

Bergische Universität Wuppertal  
Fachbereich Architektur, Design, Kunst  
Lehrgebiet Bauphysik und Technische Gebäudeausrüstung

## **Sanierung als zweite Chance**

Strategien für ein angenehmes Raumklima ohne aktive Kühlung in  
Bürogebäuden Mitteleuropas

Dipl.-Ing. (Arch.) Caroline Hoffmann

Vorsitzender: Prof. Dr. Guido Spars

PrüferInnen der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Karsten Voss (Bergische Universität Wuppertal)
2. Prof. Sabine Busching (HafenCity Universität Hamburg)

Vollständiger Abdruck der vom Fachbereich für Architektur, Design, Kunst der Bergischen Universität Wuppertal zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigten Dissertation.

Die Dissertation wurde am 17.01.2007 bei der Bergischen Universität Wuppertal eingereicht und durch den Fachbereich Architektur, Design, Kunst am 27.04.2007 angenommen.

# Dank

Mein Dank an dieser Stelle gilt all jenen, die zum Gelingen der Doktorarbeit beigetragen haben.

Mein fachlicher Dank richtet sich an meinen Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Karsten Voss, für die zielführende Betreuung der Arbeit. Frau Prof. Sabine Busching danke ich für die Ratschläge in der Endphase der Arbeit und die Erstellung des Zweitgutachtens. Meinen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl b+tgA danke ich für die angenehme Arbeitsatmosphäre während meiner Zeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl.

Mein persönlicher Dank gilt meiner Familie und ganz besonders meinem Freund Ulrich, die mir eine verlässliche und große Stütze waren.

Die Dissertation kann wie folgt zitiert werden:

urn:nbn:de:hbz:468-20070621

[<http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=urn%3Anbn%3Ade%3A468-20070621>]

## Kurzfassung

Viele der Bürogebäude, die in den 60er und 70er Jahren gebaut wurden, weisen neben den üblichen Instandhaltungszyklen einen grundlegenden Sanierungsbedarf auf, da sie nicht mehr an heutige Bedürfnisse angepasst sind. Anforderungen aus der Nutzung, wirtschaftliche Erwägungen in einem übersättigten Immobilienmarkt und hohe Baunutzungskosten machen eine Modernisierung erforderlich.

Eines der Themen beim zeitgemäßen Umbau von Bürogebäuden ist das sommerliche Raumklima. In Gebäuden ohne aktive Kühlung beeinträchtigen inakzeptabel hohe Temperaturen den Komfort, in Gebäuden mit Klimaanlage können hohe Energieverbräuche und Unterhaltskosten oder Anzeichen für das so genannte „Sick Building Syndrome“ das Technik- und Klimakonzept in Frage stellen.

Als Maßnahme gegen hohe Raumtemperaturen reichte es in der Vergangenheit oftmals aus, die externen Wärmelasten wirkungsvoll zu reduzieren. Damit konnte zumindest über weite Strecken des Sommers ein thermischer Komfort erreicht werden. Angesichts gestiegener interner Wärmelasten durch die Technisierung der Arbeitswelt und der globalen Erwärmung mit einer Zunahme sehr warmer Perioden, müssen zukünftig umfangreichere und leistungsfähigere Maßnahmen ergriffen werden.

Ohne eine aktive Kühlung kann dies über eine *wirksame Reduktion der Wärmelasten*, die *konsequente Ausnutzung der Wärmespeicherfähigkeit der Baumasse* und die *Nutzung natürlicher Wärmesenken* (Nachtluft, Erdreich) zur Aufnahme der Wärmelasten erreicht werden. Dieses integrierte Maßnahmenpaket wird als passive Kühlung bezeichnet. Die beschränkte Leistung der verfügbaren Wärmesenken macht eine geringe Kühllast des Gebäudes zur Voraussetzung.

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung, inwieweit bei Bestandsgebäuden im Rahmen einer Sanierung der thermische Komfort ohne aktive Kühlung verbessert werden kann und welches die Ausgangsvoraussetzungen sind, die ein Gebäude dafür bieten muss. Da die Außenluft als Wärmesenke speziell für Sanierungsprojekte von Bedeutung ist, konzentriert sich die Untersuchung hauptsächlich auf diese Art der Wärmeabfuhr.

Drei Arbeitshypothesen bilden die Leitgedanken der Arbeit:

- Es lassen sich typologische Gebäudeeigenschaften definieren, die für den Verzicht auf eine aktive Kühlung Voraussetzung sind.
- Die eingesetzten Instrumente zur Gebäudeanalyse als Grundlage für die Erstellung eines Sanierungskonzeptes sind sinnvoll und der Aufwand gerechtfertigt. Die verwendeten Analyseinstrumente sind: Temperaturmessungen und Nutzerbefragungen in Sommer und Winter, sowie Aufzeichnungen des Energieverbrauchs und Simulationen.
- Das sommerliche Raumklima von Bestandsgebäuden lässt sich im Rahmen einer Sanierung durch Anwendung der passiven Kühlung deutlich verbessern, im Idealfall lässt sich der Einbau einer Klimaanlage vermeiden.

Zur Untersuchung der Hypothesen gliedert sich die Arbeit in zwei Teile.

Teil A stellt den thematischen Kontext für eine Verbesserung des Raumklimas von bestehenden Bürogebäuden ohne aktive Kühlung dar und erläutert die

notwendigen theoretischen Grundlagen zur Diskussion der Hypothesen. Teil B überprüft die Hypothesen anhand von zwei typischen Bürogebäuden als Sanierungsstudien.

### *Teil A*

Den Einstieg bildet die Analyse bereits durchgeführter Sanierungen, bei denen passive Kühlkonzepte zur Senkung der sommerlichen Raumtemperaturen genutzt wurden. Diese dienen zur Veranschaulichung exemplarischer Fragestellungen.

Als grundlegender Baustein einer Sanierung von Bürogebäuden gilt zunächst die Schaffung qualitativ hochwertiger Büroarbeitsplätze. Neben psychosozialen und die Arbeit betreffenden Faktoren bestimmen die räumliche Umgebung, der thermische Komfort, die Belüftung, Belichtung und die Abwesenheit von akustischen Störungen unser Wohlbefinden am Arbeitsplatz. Ein weiterer Faktor, der im Rahmen der Arbeit jedoch nicht diskutiert wird, ist die gestalterische Qualität der räumlichen Umgebung.

Bedeutsam im Zusammenhang mit der passiven Kühlung sind die unterschiedlichen Modelle zur Bewertung des thermischen Komforts. Hierbei kann gezeigt werden, dass sich zur Bewertung eines frei schwingenden Raumklimas das um die adaptive Theorie erweiterte PMV-Modell eignet. Da es keine allgemein gültige Beurteilungsgrundlage für sommerliche Temperaturen in nicht gekühlten Gebäuden gibt, sind in der Vergangenheit Rechtsfragen in Zusammenhang mit der sommerlichen Raumtemperatur entstanden. Aus den Urteilen wird ersichtlich, dass der DIN 4108-2:2003-07 eine hohe Stellenwert als rechtsverbindlich einzuhaltende technische Regel zukommt. Allerdings garantiert ihre Einhaltung nicht, dass im Gebäude unangenehm hohe Temperaturen vermieden werden. Unabhängig davon kommen für alle Bürogebäude (Alt- und Neubau) die arbeits- und mietrechtlichen Vorschriften zur Anwendung. Das bedeutet, dass ein unzulängliches sommerliches Raumklima in jedem Fall mit geeigneten und unter Umständen über die normativen Vorgaben hinausgehenden Maßnahmen verbessert werden muss.

Bevor erörtert wird, *wie* das sommerliche Raumklima ohne aktive Kühlung verbessert werden kann, sind die Beweggründe, *warum* überhaupt auf eine aktive Kühlung verzichtet werden soll, Gegenstand der Diskussion. Diese Frage kann mit gesellschaftlichen Gründen und auf der Betrachtungsebene des Gebäudes beantwortet werden. Aus gesellschaftlicher Sicht kann die Notwendigkeit zur Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen zu einem Verzicht auf eine Klimatisierung führen. Dabei ist von Bedeutung, ob anhand der vorhandenen Daten zum Energieverbrauch und zum Bestand von Bürogebäuden in Deutschland und im europäischen Ausland Aussagen zum möglichen Sanierungspotential möglich sind. Es zeigt sich, dass aufgrund der unsicheren Datenlage in Deutschland nur überschlägige Abschätzungen möglich sind. Beweggründe auf der Ebene des Gebäudes können im Bereich der Nutzung (z. B. Anzeichen für das Sick Building Syndrome), im Bereich des Gebäudebetriebs und dem Klima (Anpassung an die Klimaveränderung) liegen.

Die Grundlagen, um geeignete Strategien zur Verbesserung des sommerlichen Raumklimas ohne aktive Kühlung zu entwickeln, umfassen neben den klimatischen Rahmenbedingungen, das Mikroklima der Fassade, Wärmequellen und Wärmesenken, sowie die Ausnutzung der Speichermasse des Gebäudes.

Einen weiteren Gegenstand der Betrachtung bildet der Vergleich von Investitions- und Unterhaltskostenermittlungen für passive (Wärmesenke Außenluft) und aktive Kühlsysteme. Der erste Teil der Arbeit (Teil A) wird mit einer Gebäudetypologie abgeschlossen, mit der in einem frühen Planungsstadium geklärt werden kann, ob eine wesentliche Verbesserung der thermischen Behaglichkeit im Gebäude über den Einsatz einer Nachtlüftung möglich ist.

#### *Teil B*

Der zweite Teil der Arbeit überprüft die Hypothesen mittels Sanierungsstudien. Dazu dienen zwei gemäß der Typologie geeignete Gebäude.

Unverzichtbare Voraussetzung eines Sanierungskonzeptes ist die Bestandsanalyse. Da im Rahmen der Arbeit die Verbesserung des sommerlichen Raumklimas Ziel ist, müssen zur Erfassung des Gebäudezustands zusätzliche Analyseinstrumente verwendet werden, die über die Diagnose des baulichen Gebäudezustands hinausgehen. Als ergänzende Analyseinstrumente werden daher Messungen und Nutzerbefragungen in Sommer und Winter, sowie Aufzeichnungen des Energieverbrauchs und dynamische Gebäudesimulationen eingesetzt. Auf die Darstellung der Analyseergebnisse folgt eine Bewertung der Werkzeuge. Der Erkenntnisgewinn durch die Analyse bestätigt den Einsatz der Werkzeuge grundsätzlich. Eine Aufwandsreduktion ist unter Umständen durch die Konzentration auf eine Jahreszeit (Sommer oder Winter) zu erreichen.

Abschließend werden geeignete Sanierungskonzepte vorgestellt. Die Strategien zur Verbesserung des thermischen Raumklimas beinhalten bei beiden Gebäuden die Nutzung der Außenluft zur nächtlichen Entwärmung. Der Schwerpunkt der Sanierungsstudien liegt auf der Lösung der baukonstruktiven und gebäudetechnischen Fragestellungen. Deren Umsetzbarkeit steht jedoch mit einer tragfähigen architektonischen Lösung in enger Verbindung. Aus diesem Grund werden den gebäudeklimatischen Konzepten entwerfliche Lösungsansätze zur Seite gestellt. Die Ergebnisse der Sanierungsstudien zeigen Möglichkeiten und Grenzen der Nachtlüftung auf: Bei einem der Gebäude lässt sich das Raumklima ohne aktive Kühlung maßgeblich verbessern, beim anderen Gebäude ist ein akzeptabler thermischer Komfort nur mit einer Zusatzkühlung erreichbar.



# Inhaltsverzeichnis

1	Einführung ..	1
1.1	Ziele der Arbeit ..	4
1.2	Arbeitshypothesen und Methodik ..	6
1.3	Literatur ..	8

## TEIL A

2	Sanierung von Gebäuden ohne aktive Kühlung - Fallbeispiele ..	9
2.1	Exemplarische Fragestellungen aus der Planung und Umsetzung ..	10
2.1.1	Kurzcharakteristik der Projekte ..	10
2.1.2	Themenspektrum bei Sanierungen ..	14
2.2	Das Gebäude nach der Sanierung – Untersuchungen im Gebäude 1 ..	17
2.2.1	Temperaturmessungen ..	17
2.2.2	Sanierungskonzept im Spiegel der Nutzer ..	19
2.3	Zusammenfassung und Aufgreifen der Fragestellungen für die folgenden Kapitel ..	23
2.4	Literatur ..	25
3	Gute Büroarbeitsplätze - Rahmenbedingungen ..	27
3.1	Arbeitsplatz ..	28
3.1.1	Gesetzliche und normative Anforderungen an den Arbeitsplatz ..	28
3.1.2	Büroraumkonzepte ..	33
3.2	Thermischer Komfort in Gebäuden ..	40
3.2.1	Das PMV-Modell ..	41
3.2.2	Adaptives Komfort-Modell ..	44
3.2.3	Auswirkungen der adaptiven Theorie auf Standards zum thermischen Komfort ..	47
3.2.4	Bedeutung der Forschungsergebnisse für die Praxis und Sanierungen ohne aktive Kühlung ..	52
3.3	Normative Anforderungen an die - sommerliche - Raumtemperatur ..	54
3.3.1	Sommerliche Temperaturen in der europäischen Normgebung ..	54
3.3.2	Normen im Bereich des thermischen Komforts ..	55
3.3.3	Normen im Bereich Raumtemperatur mit aktiver Kühlung ..	55
3.3.4	Sonstige Anforderungen an die Raumtemperatur ..	56
3.3.5	Bauphysikalische Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz ..	57
3.4	Die rechtliche Seite von sommerlichen Temperaturen ..	58
3.4.1	Ausgangslage ..	58
3.4.2	Rechtliches Umfeld und Konsequenzen ..	59
3.4.3	Relevanz für Sanierungen ..	62
3.5	Zusammenfassung ..	63
3.6	Literatur ..	64
4	Beweggründe bei einer Sanierung auf eine aktive Kühlung zu verzichten ..	69
4.1	Eigenschaften des Nichtwohn- und Bürogebäudebestands in Deutschland und Europa ..	70
4.1.1	Größe des Nichtwohn- und Bürogebäudebestands in Europa und Deutschland ..	70
4.1.2	Energieverbrauch von Bürogebäuden in Europa und Deutschland ..	75

4.2	Sanierungsgründe auf Gebäudeebene .....	79
4.2.1	Klimaveränderung .....	79
4.2.2	Sick Building Syndrome.....	81
4.3	Besonderheiten bei der Sanierung .....	83
4.4	Zusammenfassung .....	85
4.5	Literatur .....	86
5	Verbesserung des sommerlichen Raumklimas - Bausteine .....	89
5.1	Klimatische Faktoren .....	89
5.1.1	Mitteleuropäisches Klima.....	89
5.1.2	Mikroklima .....	92
5.2	Energiebilanz für (passiv gekühlte) Räume.....	101
5.2.1	Physik der Wärmeübertragung.....	102
5.3	Wärmelasten reduzieren .....	104
5.3.1	Externe Wärmequellen .....	104
5.3.2	Interne Wärmequellen .....	111
5.4	Wärmespeicherung verbessern .....	115
5.5	Wärmesenken erschließen - Wärmeabfuhr.....	119
5.5.1	Grundwasser und Erdreich.....	119
5.5.2	Außenluft .....	121
5.6	Kostenvergleich von Systemen zur Nachtlüftung und zur aktiven Kühlung .....	124
5.6.1	Methodik.....	124
5.6.2	Ermittlung und Vergleich der Investitionskosten.....	125
5.6.3	Elektrischer Energiebedarf der Anlagen.....	128
5.6.4	Kosten für eine Nutzungszeit von 20 Jahren.....	129
5.6.5	Fazit.....	130
5.7	Zusammenfassung .....	132
5.8	Literatur .....	134
6	Bei welchen Gebäuden kann das Raumklima mit Nachtlüftung verbessert werden? ...	137
6.1	Vorhandene Typologien für Nichtwohn- und Bürogebäude .....	137
6.1.1	Fazit zu den vorhandenen Typologien .....	139
6.2	Typologie zur Beurteilung des Gebäudepotentials für eine Verbesserung des Raumklimas mit Nachtlüftung.....	139
6.2.1	Gebäudeunabhängige Faktoren.....	140
6.2.2	Gebäudebezogene Faktoren.....	144
6.2.3	Typologie.....	147
6.2.4	Entscheidungsmatrix zur Einschätzung des Gebäudepotentials.....	149
6.3	Zusammenfassung .....	151
6.4	Literatur .....	152

## TEIL B

7	Vorstellung von zwei Gebäuden mit Sanierungsbedarf .....	155
7.1	Methodisches Vorgehen bei der Gebäudeauswahl.....	155
7.2	Einordnung der Gebäude in Typologie.....	157
7.3	Kurzportrait Gebäude W.....	157
7.3.1	Sanierungsbedarf Gebäude W .....	160
7.4	Kurzportrait Gebäude B.....	162
7.4.1	Sanierungsbedarf Gebäude B .....	165
7.5	Literatur .....	167

8	Bestandsanalyse als Grundlage für Sanierungskonzepte.....	169
8.1	Werkzeuge der Bestandsanalyse - Methodik.....	170
8.1.1	Messungen.....	170
8.1.2	Nutzerbefragungen.....	170
8.1.3	Simulationen.....	175
8.1.4	Wöchentliche Ablesungen des Energieverbrauchs.....	178
8.2	Gebäudeanalyse mit Messungen.....	178
8.2.1	Messungsergebnisse Gebäude W.....	178
8.2.2	Messungsergebnisse Gebäude B.....	188
8.3	Gebäudeanalyse mit Nutzerbefragungen.....	198
8.3.1	Befragungsergebnisse in Gebäude W.....	198
8.3.2	Befragungsergebnisse in Gebäude B.....	209
8.3.3	Vergleich Gebäude B und Gebäude W.....	216
8.4	Gebäudeanalyse mit Aufzeichnungen des Energieverbrauchs.....	217
8.4.1	Kennwerte Gebäude W.....	217
8.4.2	Kennwerte Gebäude B.....	218
8.5	Gebäudeanalyse mit Simulationen.....	220
8.5.1	Kalibrierung Simulationsmodell Gebäude W.....	220
8.5.2	Kalibrierung Simulationsmodell Gebäude B.....	224
8.6	Zusammenfassung: Bewertung der Analyseinstrumente.....	229
8.7	Literatur.....	232
9	Strategien zur Verbesserung des thermischen Raumklimas - Sanierungsstudien.....	235
9.1	Sanierungsstudie Gebäude W.....	236
9.1.1	Arbeitsfelder für Sanierung: Maßnahmen.....	236
9.1.2	Sanierungskonzept.....	237
9.1.3	Untersuchung des Sanierungskonzeptes mittels Simulationen.....	240
9.2	Sanierungsstudie Gebäude B.....	248
9.2.1	Arbeitsfelder für Sanierung: Maßnahmen.....	248
9.2.2	Sanierungskonzept.....	249
9.2.3	Untersuchung des Sanierungskonzeptes mittels Simulationen.....	253
9.3	Zusammenfassung und Fazit zu den Sanierungsstudien.....	260
9.4	Literatur.....	262
10	Schlussfolgerung und Zusammenfassung.....	263
10.1	Diskussion der Arbeitshypothesen.....	263
10.2	Zentrale Erkenntnisse der Arbeit.....	265
10.2.1	Ergebnisse der theoretischen Auseinandersetzung mit der Verbesserung des Raumklimas ohne aktive Kühlung (Teil A).....	265
10.2.2	Ergebnisse der Gebäudeanalyse und Fazit zu den Sanierungsstudien (Teil B).....	268
10.3	Praktische Bedeutung der Ergebnisse.....	270



# 1 Einführung

Etwa zwei Drittel (1,26 Mrd. m<sup>2</sup>) der heutigen Bausubstanz Deutschlands im Nichtwohnbereich wurde vor mehr als 30 Jahren erbaut [Rußig, 1999]. Besonders der Bereich der Bürobauten weist trotz dieser - im Vergleich zu Wohnbauten – relativ kurzen Nutzungsphase bereits einen Sanierungsbedarf auf. Dieser Bedarf entsteht aus veränderten Anforderungen an die Nutzung und dem Wandel der Arbeitswelt mit gestiegenen Erwartungen an den Arbeitsplatzkomfort. Hinzu kommen wirtschaftliche Überlegungen in einem übersättigten Immobilienmarkt und hohe Baunutzungskosten. Zukünftig wird die Anpassung an die vorhergesagte Klimaveränderung an Bedeutung gewinnen.

## *Anforderungen der Nutzung*

Einhergehend mit der Verlagerung der Büroarbeit hin zur Bildschirmarbeit sind die Nutzungsansprüche bezüglich der Ausstattung und der Arbeitsplatzqualität gestiegen. Diesen können existierende Bestandsgebäude oftmals nicht mehr genügen.

Ein zunehmend wesentliches Thema in diesem Zusammenhang ist - in unserem Klima- und Kulturkreis - das sommerliche Raumklima zusammen mit der Klimatisierung. Ein unzureichendes sommerliches Temperaturverhalten im Gebäude ohne aktive Kühlung sorgt für Unzufriedenheit und mindert die Leistungsfähigkeit am Arbeitsplatz. Hieraus können sich auch rechtliche Konsequenzen ergeben, wie Gerichtsurteile der jüngsten Vergangenheit [LG Bielefeld, 2003], [OLG Rostock, 2000], [OLG Hamm, 1994] zeigen. Danach müssen vermietete Räumlichkeiten für die Nutzung angemessene Raumtemperaturen<sup>1</sup> aufweisen. Kann dies nicht gewährleistet werden, liegt ein Mangel vor. Dieser rechtfertigt eine Mietminderung oder erfordert eine bauliche (Sonnenschutz) respektive anlagentechnische (Kühlung) Nachrüstung.

<sup>1</sup> Was in diesem Zusammenhang als angemessen erscheint, ist bis heute nicht eindeutig geregelt.

Bei vorhandenen Klimaanlageanlagen können hohe Unterhaltskosten, mangelhafte Wartung und Anzeichen für das so genannte „Sick Building Syndrome“ (SBS) [Redlich et al., 1997] oder die „Building Related Illness“ (BRI) das Technik- und Klimakonzept in Frage stellen. In welchem Maß die Gebäudetechnik (Klimaanlage) den Komfort und die Gesundheit der Gebäudenutzer beeinflusst, untersuchte das Forschungsvorhaben ProKlimA, auf dessen Ergebnisse im Verlauf der Arbeit Bezug genommen wird.

Bei den meisten Bürogebäuden im Bestand kommt hinzu, dass das vorhandene freie Lüftungskonzept nach einer Fassadensanierung mit Verbesserung der Luftdichtigkeit hohen Komfortansprüchen nicht genügt, da während der Benutzung keine ausreichende Frischluftzufuhr gewährleistet werden kann.

Für optimale Arbeitsplatzbedingungen eignen sich in Wechselwirkung mit einer attraktiven räumlichen Umgebung nach [Marmot et al., 2000], [Bauer et al., 2003], [Voss et al., 2006a] folgende Strategien:

- Erweiterte und verbesserte Tageslichtnutzung unter Berücksichtigung günstiger Arbeitsbedingungen: Blendschutz für PC-Arbeitsplätze, Sonnenschutz um Überhitzung zu vermeiden
- Hohe thermische Behaglichkeit
- Gute Luftqualität
- Individuelle Einflussnahme der Nutzer auf die Eigenschaften Licht, Luft, und Temperatur der Arbeitsumgebung<sup>2</sup>

<sup>2</sup> die Studie „ProKlimA“ zeigt als Teilergebnis, dass die Akzeptanz von Lüftungsanlagen beim Nutzer merklich steigt, wenn diesem die Möglichkeit gegeben wird, auf einzelne Raumparameter Einfluss nehmen zu können [Kruppa et al., 2002]. Dies gilt nach [Nicol et al., 2002] auch bei hohen Raumtemperaturen.

### *Wirtschaftliche Erwägungen*

Die „Nutzungsdauer“ (im Sinne einer optimalen Anpassung an die Arbeitsanforderungen) von Bürogebäuden ist kürzer als die von Wohnbauten. Gleichzeitig erhöht ein Überangebot von Büroflächen die Marktanforderungen an die einzelne Immobilie. Die Leerstandsdaten einiger deutscher Städte unterstreichen dies nachdrücklich: Stuttgart 5,7 %, München 10,7 %, Hamburg 8,4 %, Frankfurt M 17,9 %, Düsseldorf 13,3 % und Berlin 9,2 % ('04), [HBV-Expertise, 2005].

Der jährliche Primärenergieverbrauch von Bürogebäuden im Bestand für Heizung, Lüftung, Klimatisierung, Beleuchtung und Arbeitshilfen liegt je nach technischer Ausstattung zwischen 200 und 650 kWh/m<sup>2</sup><sub>NGFA</sub> [VDI 3807, 1997], [Weber, 2001], [Wambsgaß et al., 2004]. Nach [Reinert, 2006] entstehen so jährliche Energiekosten zwischen 11,6 €/m<sup>2</sup> für nichtklimatisierte und 13,1 €/m<sup>2</sup> für klimatisierte Gebäude<sup>3</sup>. Bezieht man eine zukünftige Energiepreissteigerung in die Überlegungen mit ein, so sollte der Energieverbrauch zukunftsfähiger Gebäude vertretbar gering sein. Da bei verbessertem Wärmeschutz in zeitgemäßen Bürogebäuden ein Großteil der Energie für Beleuchtung, Klimatisierung und Lüftung aufgewendet wird, setzen Konzepte zur Verringerung des Energieverbrauchs in diesen Bereichen an.

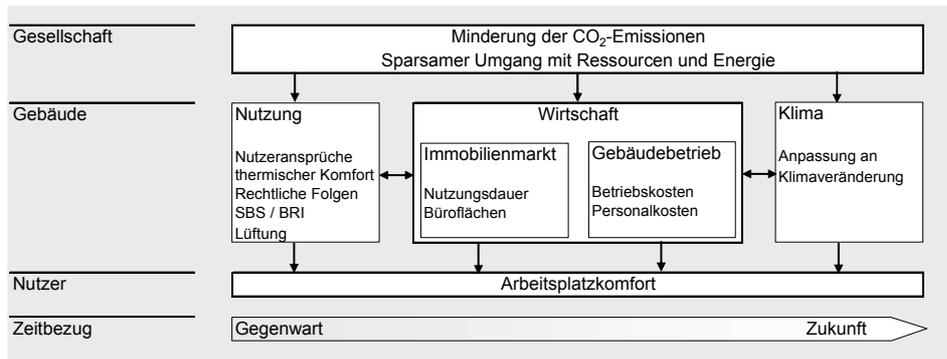
Weitaus höher als die Energiekosten sind in den meisten Branchen jedoch die Personalkosten. Dies wird bei der Betrachtung der innerhalb eines Jahres auflaufenden gesamten Kosten in einem Unternehmen deutlich<sup>4</sup>. Die Aussagen der Forschung zum Zusammenhang zwischen Leistungsfähigkeit und Temperatur sind – noch – uneinheitlich (siehe Infobox 3.2). Daher können keine verlässlichen Aussagen zum Thema der Kosten, die eine durch zu hohe Temperaturen reduzierte Leistungsfähigkeit verursacht, gemacht werden. Es konnte jedoch von [McCartney et al., 2002] nachgewiesen werden, dass ein Zusammenhang zwischen dem Bewerten einer Temperatur – also der thermischen Behaglichkeit – und der Produktivität besteht, nicht jedoch zur Temperatur selber. Den positiven Zusammenhang zwischen der Raumluftqualität und der Produktivität, sowie die ökonomischen Konsequenzen untersuchen [Wargocki et al., 2006]. Es sprechen also auch wirtschaftliche Erwägungen dafür, bei einer Gebäudesanierung optimale Bedingungen am Arbeitsplatz in den Vordergrund zu stellen.

### *Klimaveränderung*

Als zukunftsbezogener Beweggrund kann die zu erwartende Klimaentwicklung gelten. Nicht nur aufgrund der Sommer 2003 und 2006 stellt sich die Frage, wie auf bauphysikalischer und gebäudetechnischer Ebene mit erhöhten Sommertemperaturen umzugehen ist. Wie die Temperaturmessungen in einem Bestandsgebäude ohne aktive Kühlung exemplarisch zeigen (siehe Kap. 8.2.1), konnte selbst in einem Sommer ohne Rekordtemperaturen (2004), trotz Sonnenschutz und moderater Fensterflächen, im Sommer kein durchgängig akzeptabler thermischer Komfort erzielt werden. Damit gewinnt die Frage, welche Möglichkeiten zur Verbesserung des thermischen Komforts jetzt und in Zukunft bestehen, an Bedeutung.

<sup>3</sup> Datengrundlage der Studie sind über 3000 Gebäude. Die Werte beziehen sich auf das Abrechnungsjahr 2005. Unter „Energiekosten“ werden hier Strom, Heizung und Kühlung zusammengefasst.

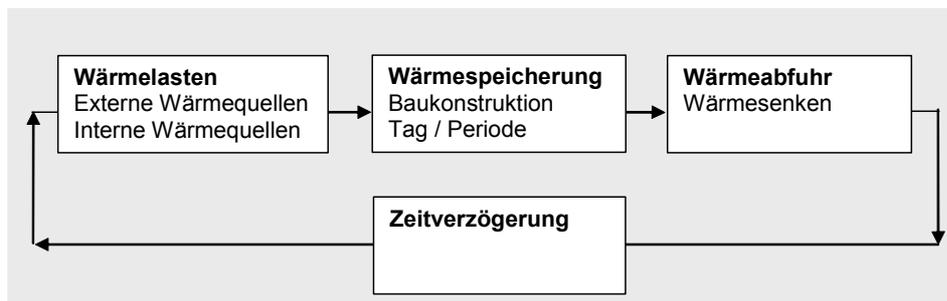
<sup>4</sup> Die Energiekosten liegen heute unter 1 % der Gesamtkosten aus Personal, Betrieb und Kapital [Weber, 2001].



**Abb. 1.1:** Beweggründe bei einer Sanierung auf eine aktive Kühlung zu verzichten. Verwendete Abkürzungen: SBS = Sick Building Syndrome, BRI = Building Related Illness

### Passive Kühlung

Eine Möglichkeit den thermischen Komfort in Bestandsgebäuden zu verbessern ist der Einsatz einer aktiven Kühlung. Soll jedoch der Einbau einer Klimaanlage vermieden werden, so kann mit der Nutzung von Speichereffekten und der Erschließung natürlicher Wärmesenken (z. B. Nachtlüftung, Erdreich) um gezielt Wärme abzuführen, ein deutliches Verbesserungspotential zugänglich gemacht werden. Die beschränkte Leistung der meisten in Frage kommenden Wärmesenken macht jedoch eine geringe Kühllast des Gebäudes zur Voraussetzung und damit zum Bestandteil der Strategie. Dieses integrative Maßnahmenpaket wird als passive Kühlung bezeichnet (Abb. 1.2).



**Abb. 1.2:** Prinzip der passiven Kühlung

Am Anfang einer Gebäudesanierung, bei der das sommerliche Raumklima ohne aktive Kühlung verbessert werden soll, steht somit die Frage, wie gut die Ausgangsvoraussetzungen sind, die das Gebäude für die passive Kühlung bietet.

Sind die Voraussetzungen günstig, so muss im ersten Schritt geklärt werden, ob und auf welche Weise eine Reduktion der vorhandenen internen und externen Kühllasten möglich ist. Bei den dominierenden externen Wärmequellen kann dies mit hinsichtlich der Sonnenschutzwirkung und dem Nutzerverhalten optimierten Fassadenkonzepten realisiert werden. Bei den internen Lasten können die elektrische Beleuchtung und die Arbeitshilfen ein hohes Verbesserungspotential bieten. Der nächste Schritt beinhaltet die konsequente Ausnutzung der Wärmespeicherfähigkeit der Gebäudemasse, um so die Wärme tagsüber speichern zu können und einen Temperaturanstieg der Raumluft zu reduzieren. Konnte bisher mit Umsetzung der beiden ersten Schritte „Reduktion“ und „Speicherung“ in Verbindung mit zeitweiser Fensterlüftung über weite Strecken des Sommers ein mittelmäßiger, aber akzeptabler thermischer Komfort erreicht werden, so muss angesichts der

Klimaveränderung zusätzlich für eine intensivere Abfuhr der Wärmelasten gesorgt werden. Daher kommt der dritte Schritt „Wärmeabfuhr“ hinzu, der klärt, welche vorhandenen oder leicht erschließbaren Wärmesenken, die Wärmelasten aufnehmen können. Erst die Einheit der drei Maßnahmenpakete erlaubt es, das sommerliche Raumklima ohne den Einbau einer Klimaanlage erheblich zu verbessern.

Eine Hauptcharakteristik von Sanierungen ist es, dass Wärmeabfuhrsysteme, die ein Bestandteil der Gebäudekonstruktion sind, wie z. B. die Betonkerntemperierung (BKT), nur in Ausnahmefällen nachträglich integriert werden können (ausführliche Erörterung, siehe Kapitel 5). Unproblematischer für den nachträglichen Einbau sind Systeme, die die Außenluft als Wärmesenke z. B. über eine ventilatorgestützte Lüftung, nutzen. Aus diesem Grund richtet sich der Hauptfokus der Arbeit auf die Nutzung der Wärmesenke Außenluft.

Nachteilig an der Nutzung der Außenluft als Wärmesenke ist allerdings, dass besonders bei langen Hitzeperioden das System an seine Grenzen stößt, da bei hohen nächtlichen Außentemperaturen, die Wärmelasten nur teilweise oder gar nicht abgeführt werden können. Dies bestätigen Messungen, die im Sommer 2003 in Gebäuden mit Nachtlüftung durchgeführt wurden [Voss et al., 2006b].

## 1.1 Ziele der Arbeit

Aus den der Arbeit zugrunde liegenden Recherchen entsteht der Eindruck, dass bislang bei Sanierungsvorhaben Gebäude selten konsequent dahingehend überprüft werden, wie weit eine Verbesserung des sommerlichen Raumklimas auch ohne eine aktive Kühlung möglich ist. Ursachen für die mangelnde Überprüfung könnten in folgenden Bereichen liegen

- „Gewerkedenken“ mit einer aus der getrennten Abrechnung gemäß Kostengruppe 300 (Baukonstruktion) und 400 (technische Anlagen) abgeleiteten inhaltlichen Arbeitsteilung zwischen Architektur und Gebäudetechnik. Die Umsetzung passiver Kühlkonzepte erfordert eine gewerkeübergreifende Vorgehensweise
- komplexes Zusammenspiel zwischen Gebäudetechnik einerseits und planerischen sowie baukonstruktiven Bereichen andererseits (höherer Planungsaufwand)
- keine Garantie einer festen Temperaturgrenze möglich (Rechtssicherheit)
- keine verbindliche Beurteilungsgrundlage des thermischen Raumklimas vorhanden
- wenige realisierte und evaluierte Sanierungen als Referenzen<sup>5</sup>
- Scheu vor erhöhtem Planungsaufwand mit „zweifelhaftem“ Ausgang

Im Gegensatz zu Neubauten, bei denen zu Beginn der Konzeptionsphase noch ein großer Handlungsspielraum besteht, sind bei Sanierungen viele Planungsweichen bereits gestellt. Damit hängt der Erfolg stark von den Ausgangsvoraussetzungen ab, die der Standort und das Gebäude bieten.

Das Ziel dieser Arbeit ist es zu untersuchen, inwieweit bei Bestandsgebäuden im Rahmen einer Sanierung der thermische Komfort ohne eine aktive Kühlung verbessert werden kann und welches die Ausgangsvoraussetzungen sind, die

<sup>5</sup> Das sich dies ändert, zeigt das seit 2005 laufende von der DBU geförderte Forschungsprojekt PROsab. Es thematisiert die energieeffiziente und komfortgerechte Sanierung von Bürogebäuden der 50er bis 70er Jahre anhand von 15 typische Bürogebäuden als Fallbeispiele [PROsab, 2005].

ein Gebäude dafür bieten muss. Daraus ergeben sich drei

Themenschwerpunkte:

- Voraussetzungen für den Verzicht auf eine aktive Kühlung
- Werkzeuge zur Bestandsanalyse als Grundlage für Sanierungskonzepte
- Machbarkeit und Grenzen der passiven Kühlung (Schwerpunkt Nachtlüftung)

Im ersten Themenschwerpunkt wird eine Gebäudetypologie erstellt, mit der in einem frühen Planungsstadium geklärt werden kann, ob eine Senkung der sommerlichen Temperaturen im Gebäude über den Einsatz einer Nachtlüftung möglich ist. Kriterien zur Beurteilung des Gebäudepotentials werden auf zwei Ebenen identifiziert:

- gebäudeunabhängige Faktoren, die entweder auf das Gebäude einwirken (Klima) oder mit der Gebäudenutzung (Kleiderordnung) im Zusammenhang stehen, aber nicht vom Gebäude oder seiner Gestalt herrühren,
- gebäudebezogene Größen (Bauweise, innere Aufteilung).

Die Betrachtung der gebäudeunabhängigen Faktoren gibt Auskunft darüber ob die Gebäudenutzung prinzipiell mit dem Verzicht auf eine aktive Kühlung vereinbar ist und ob die klimatischen Gegebenheiten (hier Deutschland und Mitteleuropa) für die Nutzung der Außenluft als Wärmesenke günstig sind. Die gebäudebezogenen Parameter legen die Eignung des Gebäudes hinsichtlich seiner Bauweise fest.

Der zweite Themenschwerpunkt liegt im Bereich der Bestandsanalyse, die eine unabdingbare Voraussetzung für ein tragfähiges Sanierungskonzept bei Bestandsgebäuden ist. Da im Rahmen der Arbeit die Verbesserung des sommerlichen Raumklimas das Ziel ist, müssen zur Erfassung des Gebäudezustands zusätzliche Analyseinstrumente verwendet werden, die über die Diagnose des baulichen Gebäudezustands hinausgehen. Ergänzende Analyseinstrumente sind Temperaturmessungen, Nutzerbefragungen, Aufzeichnungen des Energieverbrauchs und Simulationen. Die Ergebnisse der Nutzerbefragung und der Erfassung des Gebäudezustands stellen die Grundlage zur Bedarfsermittlung dar: Was ist erforderlich? Was ist möglich? Die Messungen dienen zum Verständnis des thermischen Gebäudeverhaltens und als Datengrundlage für die simulatorische Überprüfung möglicher Maßnahmen. Die Aufzeichnungen des Energieverbrauchs sollen eine Einordnung des Gebäudes in eine Energieverbrauchsklasse ermöglichen. Ziel dieses zweiten Schwerpunktes ist es, die Analyseinstrumente auf ihren Erkenntnisgewinn im Verhältnis zum erforderlichen Aufwand hin zu beurteilen.

Der dritte Arbeitsbereich liegt in der Untersuchung der Machbarkeit. Anhand von zwei Gebäuden, die typologisch günstige Voraussetzungen aufweisen, wird in Sanierungsstudien untersucht, ob und inwieweit sich bei Bestandsgebäuden das Raumklima mit Maßnahmen der passiven Kühlung (Wärmesenke Außenluft) verbessern lässt. Zielgröße ist dabei ein hoher Arbeitsplatzkomfort, der mit einem geringen Energieeinsatz und angemessenen ökonomischen Mitteln einhergeht. Weiter sollen in einer Literaturrecherche Grundlagen zur Bewertung des dynamischen Raumklimas gesucht werden, die über die bekannten Beurteilungskriterien (DIN EN ISO 7730:2006-05) hinaus zielführend sind.

## 1.2 Arbeitshypothesen und Methodik

Aus den beschriebenen Schwerpunkten lassen sich drei Hypothesen formulieren, die die Leitgedanken für diese Arbeit bilden:

- Übergeordnete Voraussetzungen  
Es lassen sich typologische Gebäudeeigenschaften definieren, die für eine erfolgreiche Verbesserung des sommerlichen Raumklimas ohne aktive Kühlung Voraussetzung sind.
- Angemessenheit der Analyseinstrumente  
Die eingesetzten Instrumente zur Gebäudeanalyse als Grundlage für die Erstellung eines Sanierungskonzeptes sind sinnvoll und der Aufwand gerechtfertigt. Die verwendeten Analyseinstrumente sind: Temperaturmessungen und Nutzerbefragungen in Sommer und Winter, sowie Aufzeichnungen des Energieverbrauchs und Simulationen.
- Machbarkeit  
Das sommerliche Raumklima von Bestandsgebäuden lässt sich durch eine Sanierung mit integrierten Maßnahmen der passiven Kühlung deutlich verbessern, im Idealfall kann der Einbau einer Klimaanlage vermieden werden. Dabei sollen eine hohe Arbeitsplatzqualität und die Einhaltung eines marktüblichen Kostenrahmens gewährleistet werden.

Im Verlauf der Arbeit werden die Hypothesen zum einen durch theoretische Grundlagen, zum anderen über Fallbeispiele und Sanierungsstudien verifiziert (Abb. 1.3).

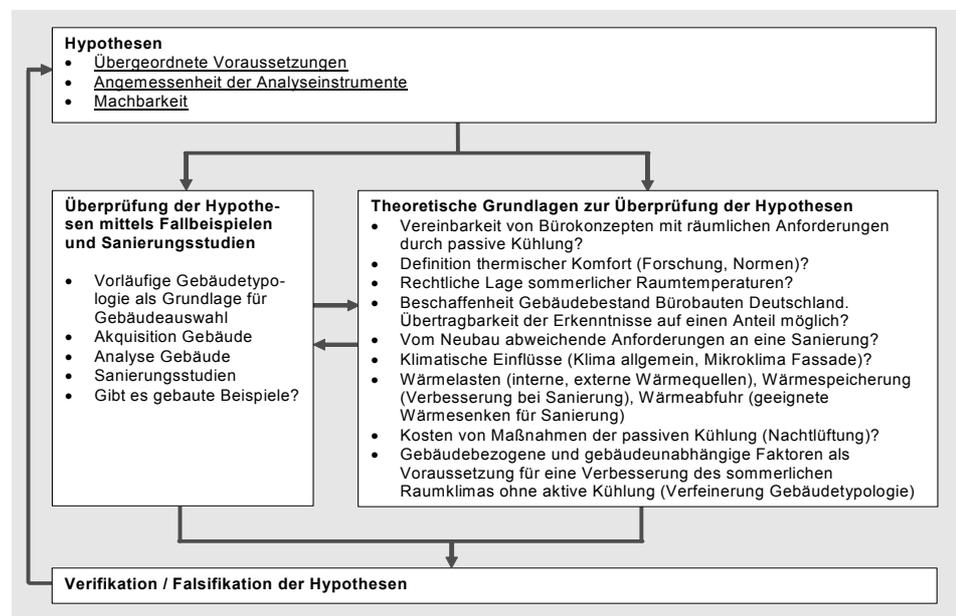


Abb. 1.3: Methodisches Vorgehen

Die Überprüfung durch Beispiele greift auf die beiden Sanierungsstudien sowie auf bereits realisierte Sanierungen aus der Literatur zurück (Fallbeispiele). Zur theoretischen Abklärung werden Themen wie Arbeitsplatzanforderungen, thermischer Komfort und Möglichkeiten seiner Beurteilung, sowie die bauphysikalischen und technischen Grundlagen erörtert. Dies geschieht aus zwei Perspektiven: zum einen aus der übergeordneten Sicht der allgemeinen



## 1.3 Literatur

- [LG Bielefeld, 2003] *Bielefelder Klimaurteil*. April 2003. Urteil: 3 O 411/01.
- [OLG Hamm, 1994] *Raumtemperaturgrenzen in gemieteten Gewerberäumen (Reisebüro)*. 18.10.1994. Urteil: 7 U 132/93, 143. Neue Juristische Wochenschrift RR 195.
- [OLG Rostock, 2000] *Sommerliche Aufheizung der Mieträume*. 29.12.2000. Urteil: 3 U 83/98, 802. Neue Juristische Wochenschrift RR 201.
- [VDI 3807, 1997] *Energieverbrauchskennwerte für Gebäude, Blatt 2: Heizenergie- und Stromverbrauchskennwerte*. Düsseldorf: VDI Verein Deutscher Ingenieure.
- [Bauer et al., 2003] Bauer, W., et al. (Hrsg.). 2003. *Office 21: Zukunftsoffensive OFFICE 21 - Mehr Leistung in innovativen Arbeitswelten*. Stuttgart: Egmont vgs.
- [HBV-Expertise, 2005] HBV Expertise GmbH. 2005. [www.hbvexpertise.de](http://www.hbvexpertise.de).
- [Kruppa et al., 2002] Kruppa, B.; W. Bischof; M. Bullinger-Naber. 2002. "Positive und negative Wirkungen raumluftechnischer Anlagen auf Befindlichkeit, Leistungsfähigkeit und Gesundheit". *gi Gesundheits-Ingenieur* 123 (2), 88-95.
- [Marmot et al., 2000] Marmot, A.; J. Eley. 2000. *Office space planning: designing for tomorrow's workplace*. New York (USA): McGraw-Hill.
- [McCartney et al., 2002] McCartney, K. J.; M. Humphreys. 2002. *Thermal comfort and productivity*. Indoor Air. Monterey (USA), 822-827.
- [Nicol et al., 2002] Nicol, J. F.; M. A. Humphreys. 2002. "Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings". *Energy and Buildings* 34 (6), 563-572.
- [PROsab, 2005] Energieeffiziente und komfortgerechte Sanierung von Bürogebäuden der 50er bis 70er Jahre. 2005. [www.prosab.de](http://www.prosab.de).
- [Redlich et al., 1997] Redlich, C. A.; J. Sparer; M. R. Cullen. 1997. "Sick-building syndrome". *The Lancet* 349, 1013-1016.
- [Reinert, 2006] Reinert, M. 2006. *OSCAR 2006 - Büronebenkostenanalyse*. Düsseldorf: Jones Lang LaSalle.
- [Rußig, 1999] Rußig, V. 1999. "Gebäudebestand in Westeuropa: Fast 17 Mrd. m<sup>2</sup> Wohn- und Nutzfläche". *IFO Schnelldienst* (12), 13-19.
- [Voss et al., 2006a] Voss, K., et al. 2006a. *Bürogebäude mit Zukunft*. 2. Auflage. Berlin: Verlag Solarpraxis.
- [Voss et al., 2006b] Voss, K.; J. Pfafferott. 2006b. *Energieeinsparung contra Behaglichkeit?* Bonn: Verlag BBR.
- [Wambsganß et al., 2004] Wambsganß, M.; S. Froelich; M. Klingele. 2004. *Energiekennwerte und Gebäudeanalysen für neun Verwaltungsgebäude der Deutschen Bahn AG - Geschäftsbereich Netz*. Karlsruhe: Universität Karlsruhe, Fachgebiet Bauphysik und Technischer Ausbau (fbta).
- [Wargocki et al., 2006] Wargocki, P.; O. Seppänen (Hrsg.). 2006. *Indoor Climate and Productivity in Offices - How to integrate productivity in life-cycle cost analysis of building services*. Brussels (B): Rehva.
- [Weber, 2001] Weber, L. 2001. *Energie in Bürogebäuden*. Zürich (CH): vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich.

## 2 Sanierung von Gebäuden ohne aktive Kühlung - Fallbeispiele

Die Umsetzung passiver Kühlkonzepte in der Sanierung gehört noch nicht zum Planungsalltag, wie Recherchen im Rahmen dieser Forschungsarbeit zeigen. Gründe dafür liegen möglicherweise in der Erwartung eines erhöhten Planungsaufwands, rechtlichen Unsicherheiten, wenigen evaluierten Beispielen sowie dem „Gewerkedenken“, das aus der abrechnungstechnischen Trennung zwischen Architektur und Gebäudetechnik eine inhaltliche Abgrenzung ableitet. In Ergänzung zu diesen übergeordneten Themenbereichen, ergeben sich bei der Aufgabe einer Sanierung ohne aktive Kühlung praktische Fragestellungen, die zugleich auch das Spannungsfeld aufzeigen, in dem sich die vorliegende Arbeit bewegt:

- Warum bestand der Wunsch auf eine aktive Kühlung zu verzichten?
- Wie wurde mit rechtlichen Fragen hoher sommerlicher Temperaturen umgegangen?
- Wurden die Gebäude im laufenden Betrieb saniert?
- Gab es im Planungsverlauf Hindernisse?
- Konnten das anfängliche Konzept umgesetzt werden, oder musste es angepasst oder verworfen werden?
- Gibt es eine Rückmeldung der Nutzer?

Zu Beginn dieser Arbeit, die die Umsetzung passiver Kühlkonzepte in der Sanierung untersucht, ist es daher lohnenswert, zunächst Fallbeispiele aus dem „Planungsalltag“ zu betrachten, bei denen diese Fragen bereits aufgetaucht sind und die mögliche Antworten aufzeigen.

Die Auswahl der vier Fallbeispiele<sup>1</sup> stellt dabei keine architektonische Wertung dar, vielmehr spiegeln die Gebäude gestalterisch einen Ausschnitt des derzeitigen Planungsgeschehens. Was allen vier Fallbeispielen gemein ist und nicht die Planungsrealität abbildet, ist die Tatsache, dass die Planung der Gebäude jeweils integral durchgeführt wurde. Das bedeutet, dass der Verzicht auf eine aktive Kühlung von Beginn an Bestandteil des gewünschten Konzeptes war und dass gewerkeübergreifend Lösungen zur Umsetzung gesucht wurden.

Das folgende Kapitel beschreibt zunächst die Beispielgebäude und geht dann auf die oben genannten Fragestellungen ein. Da sich anhand der Nutzerbefragung und der Messungen, die im Gebäude 1 nach der Sanierung durchgeführt wurden, exemplarische Beobachtungen machen lassen, werden die zentralen Analyseergebnisse am Ende des Kapitels vorgestellt.

<sup>1</sup> Gebäude 1: Haus der Presse in Dresden  
Gebäude 2: Bürogebäude in Tübingen  
Gebäude 3: Versorgungsbetriebe Remscheid  
Gebäude 4: KfW Frankfurt (Main)

## 2.1 Exemplarische Fragestellungen aus der Planung und Umsetzung

### 2.1.1 Kurzcharakteristik der Projekte

Bei allen vier Gebäuden handelt es sich um Bürogebäude, die bereits saniert wurden (Gebäude 1 und 2) oder deren Sanierung kurz vor dem Abschluss steht (Gebäude 3 und 4).

Baukonstruktiv weisen die Fallbeispiele ähnliche Eigenschaften auf. Die Bauweise ist schwer, bei zwei Gebäuden (2 und 4) ist das Obergeschoss in Leichtbauweise errichtet. Der Fensteranteil an der Fassade liegt zwischen 31 und 40 %. Alle Gebäude verfügen über einen Sonnenschutz.

Eine Verbesserung der sommerlichen Temperaturen wird in allen Gebäuden zunächst durch eine Reduktion der internen und externen Wärmelasten erreicht. Als Wärmesenke wird in unterschiedlichem Maß die Außenluft (Nachtlüftung) genutzt. Zusätzliche Wärmesenken sind das Grundwasser (Gebäude 1) und das Erdreich (Gebäude 2). Das Gebäude 4 wird zusätzlich aktiv gekühlt.



**Abb. 2.1 und 2.2:** Gebäude 1 (links nach und rechts vor der Sanierung)

Architektur: Cornelsen + Seelinger, Darmstadt

Gebäudetechnik und Energieplanung: Solares Bauen GmbH, Freiburg

Quelle Abb. 2.1: b+tga, Abb. 2.2: Cornelsen + Seelinger

*Gebäude 1: Haus der Presse in Dresden, saniert 2003*

Das „Haus der Presse“ ist Teil eines Ensembles mehrerer Bürogebäude und einer Druckerei der Sächsischen Zeitung in Dresden. Es wurde 1960 errichtet und im Jahr 2003 umfassend saniert. Neben dem Erdgeschoss und einem Technikgeschoss bietet es auf 11 Etagen Raum für mindestens 220 Büroarbeitsplätze. Das Gebäude ist mit einer hinterlüfteten, geschossweise unterteilten Doppelfassade versehen. Die Kühlung wird über Ventilatorkonvektoren und einen etwas erhöhten nächtlichen Luftwechsel realisiert.

Weitere Informationen und eine Berechnung des Gebäudes nach DIN 18599 finden sich im Anhang Info A2.1-1.

*Gebäude 2: Bürogebäude in Tübingen, saniert 2003*

Das in den 50er Jahren errichtete - ehemals vom französischen Militär genutzte - Verwaltungsgebäude wurde im Jahr 2003 in Passivhausbauweise saniert und wird nun als Bürogebäude genutzt. Der Ausbau des Dachgeschosses war aus statischen Gründen nur in Leichtbauweise möglich. Um die Speicherfähigkeit zu erhöhen, wurden Gipsbauplatten mit mikroverkapseltem Paraffin eingesetzt. Das Gebäude wird über einen erhöhten nächtlichen Luftwechsel der Zu- und Abluftanlage gekühlt, die Zuluft wird über einen Sole-Luft-Erdreichwärmetauscher etwas temperiert.

Weitere Informationen zum Gebäude finden sich im Anhang Info A2.1-2.



**Abb. 2.3 und 2.4:** Gebäude 2 (links nach und rechts vor der Sanierung)  
Architektur: B. Cramer, Tübingen und H. Maier-Linden, Tübingen  
Gebäudetechnik und Energieplanung: Ing.-Büro ebök GbR, Tübingen  
Quelle Abb. 2.3 und 2.4.: ebök, Tübingen



**Abb. 2.5 und 2.6:** Gebäude 3 (links vor und rechts nach der Sanierung)  
Architektur: Architektur Contor Müller Schlüter GbR, Wuppertal  
Gebäudetechnik und Energieplanung: IFL Ingenieurbüro F. Lucas & Partner, Remscheid, in Kooperation mit Bergische Universität Wuppertal  
Quelle Abb. 2.5 und 2.6.: Architektur Contor Müller Schlüter GbR, Wuppertal

*Gebäude 3: Versorgungsbetriebe Remscheid, saniert 2007*

Interne Umstrukturierungen innerhalb eines Entsorgungsunternehmens erforderten mehr Arbeitsplätze in räumlicher Nähe zueinander. Daher sollten Teile der bisher als Wagenhallen und Lager genutzten beiden unteren Etagen des Bestandsgebäudes in Büroarbeitsplätze umgewandelt werden. In den oberen Etagen befinden sich Büro- und Sozialräume. Die vorhandene Fassade wurde entfernt und durch eine Holzrahmenkonstruktion ersetzt. Im obersten Geschoss, das in Leichtbauweise ausgeführt ist, werden Phasenwechselmaterialien eingesetzt. Nachts sorgt ein erhöhter Luftwechsel der Abluftanlage für eine Wärmeabfuhr.

*Gebäude 4: KfW Frankfurt (Main), saniert 2006*

Der Gebäudekomplex besteht aus vier Hochhaustürmen mit unterschiedlicher Geschosshöhe. Die Fenster wurden ausgetauscht und die Fassade gedämmt. Über Deckensegel wird das Gebäude aktiv gekühlt. Eine passive Kühlung über einen erhöhten Luftwechsel durch die Abluftanlage ergänzt das Konzept.



**Abb. 2.7:** Gebäude 4 (vor der Sanierung)

Architektur: RKW Architektur + Städtebau, Düsseldorf  
Gebäudetechnik und Energieplanung: ip5 Ingenieurpartnerschaft, Karlsruhe  
Quelle Abb. 2.7: EnSan

**Tab. 2.1:** Übersicht der Fallbeispiele

Verwendete Abkürzungen: AKM = Absorptionskältemaschine, KKM = Kompressionskältemaschine, ALD = Außenluftdurchlasselemente, LW = Luftwechsel, VL = Vorlauf, RT = Raumtemperatur, k. A. = keine Angaben, n. V. = nicht vorhanden,

		Gebäude 1	Gebäude 2	Gebäude 3	Gebäude 4	
Gebäude	Baujahr	1960 / 61	1954	1968 / 1969	1968	
	Sanierung	2003	2003	2006	2004 / 2006	
	Nutzung	Verwaltung	Ingenieurbüro	Verwaltung	Verwaltung	
	Standort	Dresden	Tübingen	Remscheid	Frankfurt / M	
	Bauweise	schwer	schwer / leicht	schwer / leicht	Leicht <sup>5</sup>	
	Fensteranteil / Fassade	31 %	34 <sup>2</sup>	35	35 - 40	
	Sonnenschutz	Zw. Fenster und Doppelfassade	Innen liegend Lamellen	Lamellen außen	Außen Glas mit Streckmetall / innen Blendschutz	
Raumstruktur	Geschosse	UG, EG, ZG, 1. – 11. OG + DG + KG	EG + DG	UG, EG + 1.-2. OG	UG, EG + 11, 14, 9, oder 11 OG	
	BRI	m <sup>3</sup>	3.724			
	NGF	m <sup>2</sup>	4.759	2660 <sup>1</sup>		
	HNF	m <sup>2</sup>		838		
U-Werte (vorher / nachher)	Dach	W/(m <sup>2</sup> K)	1,03 / 0,26	1,7 / 0,14	k. A. / 0,14	0,79 / ca. 0,3
	Außenwand	W/(m <sup>2</sup> K)	1,48 + 1,65 / 0,21 + 0,19	1,5 / 0,136	k. A. / 0,21 oder 0,154	1,1 / ca. 0,25
	Fenster	W/(m <sup>2</sup> K)	2,42 / 1,4	2,7 / 0,8	k. A. / 1,41 - 1,54	2,8 / 1,5
	g-Wert	%	60 / 60	k. A. / 52	k. A. / 64 + 40	63 / 41
	Bodenplatte	W/(m <sup>2</sup> K)	2,4 / 2,0 (geg. EG)	2,5 / 0,36	0,391 / 0,258	0,81 / k. A.
Haustechnik nach Sanierung	Wärmeerzeugung		Fernwärme	Gas-Brennwert-Kessel	Gas-Brennwert-Kessel	Wärmeverbund BHKW / Holzpelletkessel / Gaskessel
	Wärmeverteilung		Ventilatorkonvektoren	Plattenheizkörper	Plattenheizkörper	Konvektorenheizkörper
	Kälteerzeugung / Wärmesenke Büro		Tiefbrunnen	Sole-Erdreich-Wärmetauscher	Nachtlüftung	AKM / KKM
	Wärmeabfuhr Büro		Ventilatorkonvektoren	Lüftung	Nachtlüftung	Deckensegel
	Kühlleistung (Büro)	W/m <sup>2</sup>	13-20 (VL 15 / RL 18 °C)	1,8 (mittlere Kälteleistung)	k. A.	40 (VL 15 °C, RT 26 °C)
	Kälteerzeugung Sonder		Splitklimaggerät für Serverräume	n. V.	Splitklimaggerät für Serverräume	AKM / KKM
	Erwärmung Trinkwarmwasser		Durchlauferhitzer	Durchlauferhitzer an Gas-Kessel	30 % Solaranlage 70 % Gas-Kessel	Durchlauferhitzer
	Lüftung		Abluftanlage	Zu- und Abluftanlage	Abluftanlage / Zu- und Abluftanlage	Abluftanlage / Zu- und Abluftanlage
	Lage ALD		ca. 70 cm über Boden	n. V.	Seitl. Fensterlaibung	Unterhalb Decke
	Wärmerückgewinnung		n. V.	Luft / Luft	KVS	Nur bei Zu- und Abluftanlage
Nachtlüftung LW	1/h	Nachtlüftung LW 1,0 1/h	Nachtlüftung LW 2,0 1/h	Nachtlüftung LW 2,0 1/h	Nachtlüftung LW 3,0 1/h	
Kosten Sanierung	KG 300	€ / (€ / m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> )	2.157.000 / (453)	k. A.	k. A.	k. A.
	KG 400	€ / (€ / m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> )	519.100 / (109)	k. A.	k. A.	k. A.
	KG 300+400	€ / (€ / m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> )	2.676.100 / (562)	810 000 <sup>3</sup> / k. A.	3 298 200 / 717 <sup>4</sup>	k. A.
	Fördermittel		keine	Bau: Klimaschutz-Plus Monitoring: EnSan	Planungsmehrkosten: DBU	Monitoring: EnSan

<sup>1</sup> = ohne Wagenhalle<sup>2</sup> = inkl. Gaupenfenster und Wände, exkl. Dachfenster<sup>3</sup> = ohne sommerliche Kühlung und Beleuchtung<sup>4</sup> = bezogen auf 4600 m<sup>2</sup><sub>NGF</sub> (inkl. Wagenhalle)<sup>5</sup> = die Bauweise des Gebäudes ist schwer, da die Masse aber von der Raumluft abgekoppelt ist, wird es hier als „leicht“ klassifiziert.

## 2.1.2 Themenspektrum bei Sanierungen

### *Motivation für Sanierung und Logistik*

Der Auslöser für die Gebäudesanierung unterschied sich bei allen vier Fallbeispielen. Bei allen Projekten bestand jedoch ein Hauptziel der Sanierung darin, den Arbeitsplatzkomfort zu verbessern. Da bei allen Gebäuden unterschiedlich starke sommerliche Überhitzungsprobleme auftraten, war eine wichtige Frage während der Planung, wie der thermische Komfort im Sommer verbessert werden kann. Bei der Motivation hierbei auf eine aktive Kühlung zu verzichten spielten wirtschaftliche Überlegungen (Energiekosten für eine aktive Kühlung) eine Rolle, teilweise in Verbindung mit übergeordneten gesellschaftlichen Aspekten (Energieeinsparung als Beitrag zur CO<sub>2</sub> Reduktion). Ein weiterer Gesichtspunkt, der eine Vollklimatisierung (Heizen, Kühlen, Be- und Enfeuchtung der Zuluft) der Gebäude von vorneherein ausschloss, waren die Bedenken, dass dies Akzeptanzprobleme oder gesundheitliche Beeinträchtigungen (Sick Building Syndrome – SBS oder Building Related Illness - BRI) der Nutzer auslösen könnten.

- Beim Gebäude 1 schuf das Elbhochwasser im Jahr 2002 Handlungsbedarf. Die Beschädigungen an dem bereits sanierungsbedürftigen Bauwerk waren so stark, dass sogar ein Abriss erwogen wurde. Aus wirtschaftlichen Erwägungen entschied man sich jedoch für eine Sanierung. Da das Bestandsgebäude über keinen außenliegenden Sonnenschutz verfügte, traten in den Sommermonaten sehr hohe Temperaturen auf. Es gab daher neben funktionalen Aspekten der Gebäudesanierung und einer attraktiven Architektur das Ziel, beides mit einem Raumklimakonzept zu verbinden, das bei hoher Arbeitsplatzqualität einen Verzicht auf eine Klimatisierung ermöglichen sollte.
- Beim Gebäude 2 stand der Wunsch nach komfortablen Arbeitsplätzen im Vordergrund mit einem ganzjährig behaglichen Raumklima. Die Realisierung dieses Ziels mit einem so geringen Energieverbrauch wie möglich (Passivhausbauweise) sollte einen beispielgebenden Referenzfall schaffen, der auch den Arbeitsschwerpunkt des Ingenieurbüros widerspiegelt.
- Die räumliche Zusammenfassung der bisher auf zwei Gebäude verteilten Verwaltung war beim Gebäude 3 Anlass für die Sanierung. Da ein Erweiterungsbau nicht möglich war, werden nun Flächen der ehemaligen Wagenhalle als Büroräume umgenutzt. Alle Räume sollen eine hohe Arbeitsplatzqualität mit einem möglichst geringen Energieverbrauch verbinden.
- Beim Gebäude 4 waren es brandschutztechnische Gründe in Verbindung mit zu hohen Raumtemperaturen im Sommer, die eine Sanierung erforderlich machten. Bei einer einmonatigen Messkampagne (07/08 2001) traten in einigen Räumen bereits bei niedrigen Außentemperaturen (16 °C bis 24 °C) Raumlufttemperaturen von mehr als 26 °C, an wärmeren Tagen im Bereich von 30 °C auf (Quelle ip5).

Ein wichtiges Thema bei Bestandssanierungen mit gleich bleibenden Nutzern ist die Logistik während der Bauarbeiten. Können die Arbeiten bei gleichzeitiger Gebäudenutzung durchgeführt werden, so ist dies meist eine wirtschaftlich günstige Lösung. Aufwändiger sind Lösungen, bei denen für die Dauer der Baumaßnahmen eigens Räumlichkeiten angemietet werden müssen.

- Ein Argument zu Gunsten der Sanierung und gegen einen Neubau war beim Gebäude 1 die Durchführung der Baumaßnahme im laufenden Betrieb. Während der zeitlich versetzt durchgeführten, dreiwöchigen Sanierungsarbeiten pro Geschoss, arbeiteten die Nutzer in Konferenzräumen.
- Bei den Gebäuden 2 und 3 war ein Einzug der Nutzer erst nach Abschluss der Sanierung geplant.
- Beim Gebäude 4 wurden für die Dauer der Bauarbeiten Räumlichkeiten angemietet.

#### *Umsetzung der Sanierungskonzepte*

Bei der Verwirklichung von Sanierungen ergeben sich typischerweise Änderungen im Laufe der Planung, häufiger noch beim Bauablauf:

- Knappe Geschosshöhen und quer spannende Unterzüge führten beim Gebäude 1 zu einer Sonderlösung für die Lüftungskanäle der Abluftanlage. Statt der Verlegung von Lüftungskanälen werden die Bereiche unter den Unterzügen als luftdicht abgeschlossener Unterströmbereich (Druckdecke) genutzt. In einem Hochhaus ist dazu eine F90 Unterdecke erforderlich.
- Beim Gebäude 2 stellte der Ensembleschutz, unter dem das Gebäude stand, eine wesentliche Einschränkung bei der Planung dar. Danach war das Erscheinungsbild der Fassade grundsätzlich zu wahren und eine komplette Aufstockung nicht möglich. Eine Nachtlüftung mittels freier Querlüftung des Gebäudes wäre für die Planer wünschenswert gewesen. Dem stand die Einbruchgefahr im EG entgegen und dass aus gestalterischer Sicht (Ensembleschutz) eine horizontale Unterteilung der Fassade mit Oberlichtern nicht möglich war. Wegen des Ensembleschutzes konnte auch kein außenliegender Sonnenschutz eingesetzt werden.
- Änderungen im Bauverlauf ergaben sich beim Gebäude 3: Die Bewehrung in der Decke wies keine genügende Überdeckung auf. Konzeptionell waren freiliegende Deckenunterseiten mit der entsprechenden nächtlichen Entladung der Speichermassen vorgesehen. Aus brandschutztechnischen Gründen ist die Decke nun mit einer 10 mm dicken Schicht Promat verkleidet. Eine – auf Grund der aufwändigen Ausführung (Statik) und hoher Kosten verworfene - Alternative wäre eine 3 cm dicke Putzschicht gewesen.
- Beim Gebäude 4 fiel im Planungsverlauf die Entscheidung gegen eine rein passive Kühlung zu Gunsten einer aktiven Kühlung über Kühlsegel. Das Konzept hat nun die weitestgehende Reduktion der Kühllasten zum Ziel. Entscheidungsgründe für die aktive Kühlung liegen in der Nutzererwartung an das Raumklima und einer gemäßigten Kleiderordnung. Hinzu kam, dass aus nachfolgenden Gründen der Wunsch bzw. die Notwendigkeit zu einer Verkleidung der Decken bestand:
  - Ästhetisch: Die Sichtbarkeit der Unterzüge war nicht erwünscht, da deren Raster nicht mit der geplanten Raumaufteilung übereinstimmt.
  - Brandschutz: Die vorhandenen Decken sind mit einer Mindeststärke von 10 cm zu dünn. Zum Zeitpunkt der Planung war es daher fraglich, wie den Anforderungen des Brandschutzes entsprochen werden kann. Zur Ausführung kommt nun eine Überdeckung mit Brandschutzputz und einer abgehängten Decke.

- Trittschall: Der Schallschutz ist ungenügend, da auf dem Bodenaufbau kein Platz für eine 3 cm starke Trittschalldämmung ist. Eine Verbesserung kann nur mittels einer abgehängten Decke erreicht werden.
- Kosten: Freiliegende Unterzüge würden eine individuelle Bearbeitung erfordern.

### *Rechtliche Lage Temperaturüberschreitungen*

Das Fehlen einer verbindlichen Beurteilungsgrundlage für sommerliche Raumtemperaturen in nicht gekühlten Gebäuden sorgt für eine Rechtsunsicherheit. Es ist daher aufschlussreich zu sehen, wie bei Sanierungen mit diesem Thema umgegangen wird.

- Zusätzlich zum Gebäude 1 (Hochhaus) wurden auch die daran angrenzenden Gebäude saniert. Diese Gebäude werden ausschließlich über Nachtlüftung mit einer mechanischen Abluftanlage temperiert, die ab einem Temperaturunterschied von minimal 3 K einen Luftwechsel von 3 1/h erzeugt. Simulationsrechnungen für die Innentemperaturen ergaben eine Überschreitung von 26 °C an etwa 130 h. Zwischen dem Bauherrn und Planer wurde vertraglich vereinbart, dass diese Überschreitung akzeptiert wird. Der Grund für die Zustimmung waren Investitionskosten, die – im Fall einer Entscheidung gegen die Duldung der Überhitzungsstunden – die kalkulierten Kosten bei weitem übertroffen hätten.
- Beim Gebäude 2 sind Nutzer, Betreiber und Planer identisch, es ergibt sich nicht die Notwendigkeit einer gesonderten Absprache.
- Beim Gebäude 3 akzeptierte der Bauherr die anhand der Simulationen (Wetterdaten Meteonorm) ermittelten geringen Überschreitzungszeiten von 26 °C. Nach Einsatz eines umfangreichen Maßnahmenpaketes konnten diese auf 22 h (kritischster Raum) reduziert werden.
- Beim Gebäude 4 unterbindet die aktive Kühlung über Kühldecken Temperaturüberschreitungen.

### *Sanierung als Chance*

Die geschickte Ausnutzung projektbezogener Gegebenheiten kann zu Synergieeffekten führen.

- Auf dem Gelände von Gebäude 1 waren vier Tiefbrunnen vorhanden, mit denen früher die Druckerei gekühlt wurde. Sie dienen nun als Wärmesenke für das Hochhaus.
- Die Dämmung der Bodenplatte erwies sich beim Gebäude 2 zunächst als problematisch, da weder eine innenseitige Fußbodendämmung (ursprünglich gewünschter Erhalt der Innentürzargen) noch eine Fußpunktentkopplung des Mauerwerks möglich waren. Letztendlich wurden die Gebäudeflanken gedämmt. In Verbindung mit einer auf 7,5 cm reduzierten Fußbodendämmung konnte eine der Passivhausbauweise vergleichbare Qualität erreicht werden. Die Baugrube diente zusätzlich zur Verlegung der Rohre für den Sole-Luft-Erdreichwärmetauscher in 1,5 m Tiefe. Dieser verhindert im Winter das Einfrieren des Wärmetauschers der Lüftungsanlage und temperiert im Sommer die Zuluft.

## 2.2 Das Gebäude nach der Sanierung – Untersuchungen im Gebäude 1

### 2.2.1 Temperaturmessungen

Von Mitte Juni bis Anfang Juli 2004 wurden im Gebäude 1 auf vier Etagen in jeweils drei Büros auf der West- und drei Büros auf der Ostseite Messungen der Raumlufttemperatur und der Raumluftfeuchte durchgeführt (Tab. 2.2). Informationen zum methodischen Vorgehen bei den Messungen finden sich im Kapitel 8.1.1. Die Außentemperaturen waren während dieser Zeit kühl, überschritten mit einem Mittelwert für den Juni von 15,8 °C (Juli: 17,9 °C) aber das Monatsmittel von Meteonorm um 3 K. Das Tagesmittel lag meist unter 18 °C, es trat nur ein Sommertag mit einem Temperaturmaximum  $\geq 25$  °C auf (grafische Darstellung Außentemperatur und Globalstrahlung, siehe Abb. A2.2.1-5 und -6).

Die Mittelwerte auf den einzelnen Etagen für Raumlufttemperatur und Raumluftfeuchte zeigt Tab. 2.3. Danach lagen die Raumlufttemperaturen entsprechend der kühlen Außentemperatur im Mittel unter 24 °C. Innerhalb des Gebäudes tritt keine Temperaturschichtung auf. Die Raumluftfeuchte beträgt in allen Büros ca. 40 %. Obwohl sie sich mit dem empfohlenen Bereich nach [DIN EN 13779:2005-05] deckt, wird sie im Rahmen der Nutzerbefragung von 62 % als „etwas“ oder „zu trocken“ empfunden.

#### Infobox 2.1: Gebäudetechnik Gebäude 1

##### Abluftanlage

Die Zuluft gelangt über Zulufteinlässe auf Höhe der Brüstungsoberkante in den Raum, die über einen Schieber verschließbar sind. Die Abluft wird über Tellerventile abgesaugt.

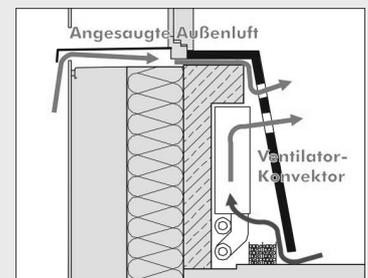
Da die Lüftungsanlage mit konstanter Leistung arbeitet, erhöht das Schließen der Lüftungsschlitze in einem Büro den Volumenstrom in den anderen Büros. Dies kann - besonders bei niedrigen Außentemperaturen - zu unangenehmen Zugserscheinungen an den geöffneten Luftauslässen führen. Die Abluftanlage erreicht tagsüber eine Luftwechselrate von 0,5 1/h (40 m<sup>3</sup>/h pro Person) und wird dazu pro Stunde ca. 20 Minuten betrieben.

##### Temperierung der Raumluft

Die Zuluft wird im Sommer über Ventilator-konvektoren temperiert (und im Winter beheizt). Ein Ventilator-konvektor hat eine Kühlleistung von 200 W bei einer Ventilatorleistung von 20 W. Jede Etage besitzt ihren eigenen Heiz- bzw. Kühlkreislauf. Die Heiz- und Kühltemperatur ist in jedem Büro individuell über den Luftwechsel anpassbar. Da die Kühlleistung der Ventilator-konvektoren begrenzt ist, kann die Raumluft nicht beliebig heruntergekühlt werden, eine zeitweise Überschreitung der 26 °C Grenze wird akzeptiert. Als weitere Maßnahme wird der Luftwechsel nachts auf 1,0 1/h erhöht.

##### Sonnenschutz

Der Sonnenschutz befindet sich in einem 40 cm breiten Luftraum, zwischen der Fensterebene und einer weiteren – über breite Fugen hinterlüfteten – Glashaut. Die Verschattung wird fassadenweise über externe Sensoren gesteuert. Der Nutzer kann die Automatik temporär übersteuern.



**Abb. 2.8:** Prinzip des Zulufteintritts über die Fassade, Gebäude 1.

Quelle: Cornelsen + Seelinger

**Tab. 2.2:** Eckdaten der Messungen. Positionsplan für die Messgeräte siehe Abb. A2.2.1-1 bis -4.

Gebäude D	
Anzahl Datenlogger	24
Etagen für Messungen	1., 4., 7. und 11. OG
Messzeitraum	15.06.2004 – 05.07.2004
Wetterdaten	Außentemperatur, Globalstrahlung, Quelle: DWD, Station Dresden-Klotzsche
Durchführung Messungen	[Reuter, 2004]

Die Temperaturdauerlinien für die Büros der einzelnen Etagen (grafische Darstellung siehe Abb. A2.2.1-7 bis -11) zeigen, dass es von Raum zu Raum Unterschiede gibt. Der wärmste Raum pro Etage ist immer auf der Westseite, die weitere Rangfolge ändert sich von Geschoss zu Geschoss. Ein systematischer Zusammenhang mit den internen Lasten ist ausgeschlossen.

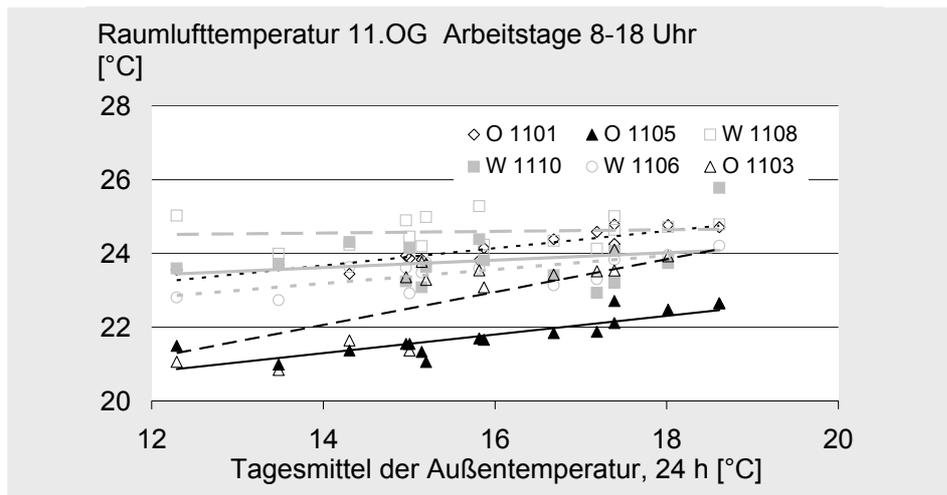
**Tab. 2.3:** Mittelwerte, Mediane und Standardabweichungen und Stunden  $\geq 26$  °C der Raumlufttemperatur und relativen Feuchte für die Büros des 1., 4., 7. und 11. OG während der Arbeitszeit. Ermittlung: Jeder Raum wird einzeln ausgewertet (siehe Tab. A2.2.1-2 bis -5). Zum Vergleich wird aus diesen Werten ein Mittelwert gebildet.

	Raumlufttemperatur				Feuchte		
	Mittelwert	Median	SD	$\geq 26$ °C	Mittelwert	Median	SD
	(°C)	(°C)	(-)	(%)	(°C)	(°C)	(-)
Büros 1. OG	±23,0	22,9	1,4	1,5	±41,5	40,8	7,1
Büros 4. OG	±23,4	23,2	1,2	3,4	±40,1	39,5	6,3
Büros 7. OG	±23,4	23,2	1,2	1,0	±40,9	40,3	6,2
Büros 11. OG	±23,4	23,6	1,3	1,4	±39,6	38,8	6,3

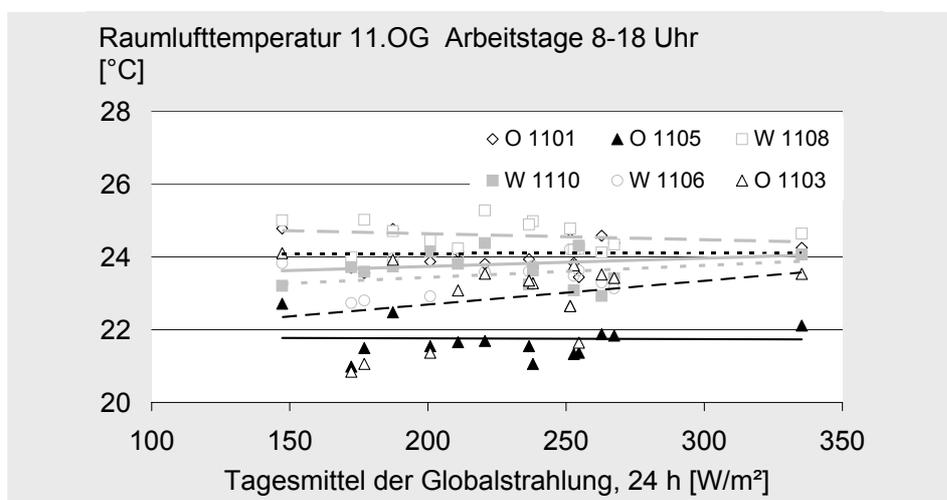
Die Raumlufttemperatur ist an die Außenlufttemperatur gekoppelt. Die stärkste Abhängigkeit weist das mittlere Ostbüro (O 1103) im 11. OG auf (Abb. 2.9, übrige Geschosse siehe A2.2.1-11 bis -14): Steigt die Außentemperatur um 1 K an, so wird es in diesem Raum 0,45 K wärmer. Der Zusammenhang variiert unabhängig von Geschosshöhe und Orientierung von Raum zu Raum. Insgesamt ist die Ankopplung der Räume derjenigen beim Gebäude B ähnlich. Es ist anzunehmen, dass – trotz der kühlen Außentemperaturen – eine Erwärmung der Raumlufttemperatur durch die Temperierung über die Ventilator-konvektoren abgemildert wird und somit keine so starke Korrelation wie z. B. beim Gebäude W auftritt (z. T. Werte zwischen 0,65 und 0,76). Würden die Kühlgeräte die Raumlufttemperatur dominieren, bestünde kein Zusammenhang.

Zwischen Raumlufttemperatur und Globalstrahlung tritt zum Teil eine schwache, teilweise eine gegenläufige Verbindung auf (Abb. 2.10, übrige Geschosse siehe A2.2.1-15 bis -18).

Die Stärke der Beziehung zwischen der Raumlufttemperatur und den externen Faktoren ist in beträchtlichem Maß vom Nutzereinfluss (Lüftung, Einstellung der Temperierung, Sonnenschutz, bzw. Steuerung) abhängig.



**Abb. 2.9:** Zusammenhang zwischen Raumlufttemperatur und Außentemperatur (Tagesmittel  $\geq 20$  °C) im 11. OG, Gebäude 1. Steigt die Außentemperatur um 1 K, so wird es im Raum 1103 auf der Ostseite um 0,45 K wärmer.



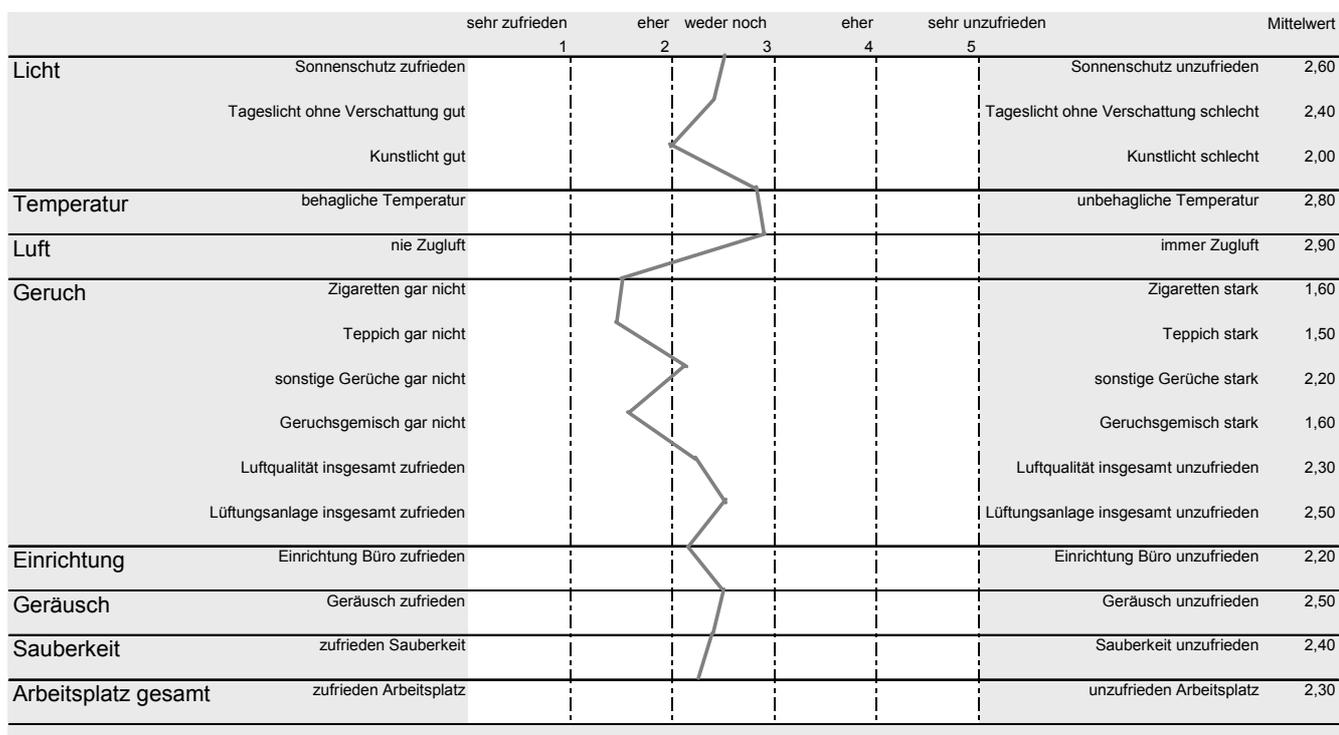
**Abb. 2.10:** Zusammenhang zwischen Raumlufttemperatur und Globalstrahlung im 11. OG, Gebäude 1. Aufgeführt sind hier die Tagesmittelwerte der Arbeitstage (8-18 Uhr) und das Tagesmittel (24 h) der Globalstrahlung.

## 2.2.2 Sanierungskonzept im Spiegel der Nutzer

Zeitgleich mit den Messungen wurde im Gebäude 1 eine Nutzerbefragung durchgeführt (Kenndaten Tab. 2.4). Informationen zum methodischen Vorgehen bei den Nutzerbefragungen finden sich im Kapitel 8.1.2. Einige Frageblöcke wurden auf Wunsch des Betriebsrates gestrichen, der Fragebogen findet sich im Anhang Info A2.2.2-1. Die gesamte Auswertung der Befragung findet sich im Anhang Info A2.2.2-2. Das Polaritätenprofil zeigt zunächst die Zufriedenheit der Nutzer mit einzelnen raumklimatischen Parametern, wie Licht, Temperatur, Luft, Geräusche, Sauberkeit und Raumgestaltung. Keiner der raumklimatischen Faktoren ruft sehr starke Unzufriedenheit hervor. Bereiche mit mittelmäßiger Bewertung sind die Temperatur, Luftzug, Lüftungsanlage und Geräusche. Sie werden nachfolgend näher betrachtet.

**Tab. 2.4:** Kenndaten zu den Nutzerbefragungen in Gebäude 1 im Sommer

Gebäude 1	
Anzahl Fragebögen	120
Größe Auswahlgruppe	120
Ausgabedatum	22.06.2004
Abgabedatum	02.07.2004
Rücklaufquote (%)	33
Besonderheiten	gekürzte Bereiche des Fragebogens <ul style="list-style-type: none"> <li>• gesundheitliche Beschwerden am Arbeitsplatz“</li> <li>• „belastende Bedingungen am Arbeitsplatz“</li> <li>• Zufriedenheit mit der Tätigkeit und beruflichen Stellung</li> <li>• Befinden zum Zeitpunkt der Befragung</li> <li>• Örtliche Angaben zum Arbeitsplatz</li> <li>• Geschlecht und Alter der Befragten</li> </ul>
Durchführung Befragung	[Reuter, 2004]

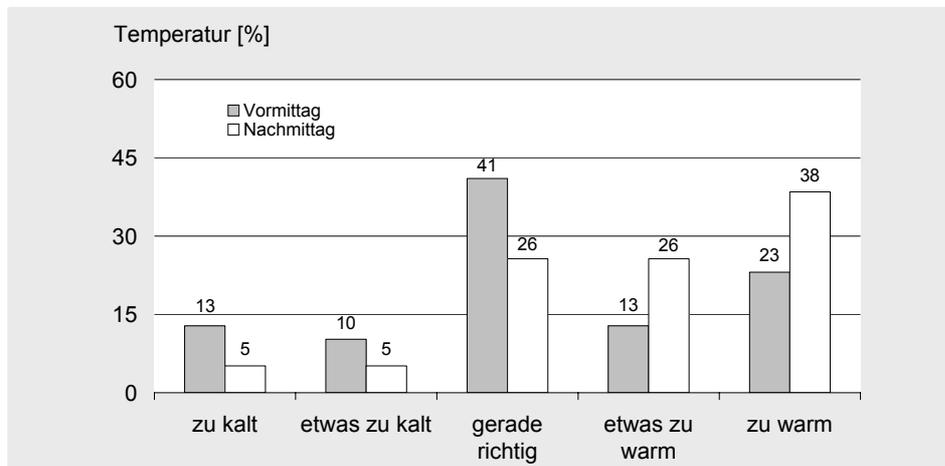


**Abb. 2.11:** Polaritätenprofil zur Beurteilung einzelner raumklimatischer Faktoren durch die Nutzer, Gebäude 1. Es bildet den Mittelwert (arithmetisches, ungewichtetes Mittel) der Antworten aller Personen auf eine Frage ab. Das Polaritätenprofil ist seitenweise zu lesen, Beurteilungen auf der linken Seite sind positiv.

### Raumtemperatur

Die Raumlufttemperatur ist – nach der Zugluft - der am kritischsten bewertete Bereich des Gebäudes. Nur ein Drittel der Befragten ist mit der Temperatur „etwas“ oder „sehr zufrieden“, ein weiteres Drittel beurteilt sie als „mittelmäßig“ und das letzte Drittel ist „ziemlich“ oder „sehr unzufrieden“. Besonders am Nachmittag ist es vielen Nutzern (62 %) „etwas zu warm“ oder „zu warm“. Knapp die Hälfte (49 %) fühlen sich in ihrer Leistung durch die Raumtemperatur „ziemlich“ oder „sehr“ eingeschränkt. Diese schlechte Bewertung überrascht aus zwei Gründen:

- Die Befragungsperiode weist keine hohen Außentemperaturen auf und die Messungen der Raumlufttemperatur zeigen, dass diese im Mittel unter 24 °C lagen. Bis auf wenige Ausnahmen wurden in den einzelnen Büros 26 °C selten überschritten. Eine Analyse des mittleren Temperaturunterschieds zwischen Vor- und Nachmittag (8:00-12:30, 13:00-18:00 Uhr) pro Geschoss zeigt, dass der Unterschied selten größer als 1,5 K war.
- Das Gebäude wies im unsanierten Zustand extrem hohe sommerliche Raumtemperaturen (bis zu 40 °C) auf. Eine Ursache dafür war der innen liegende Sonnenschutz in Kombination mit einem hohen g-Wert der Verglasung. Um den Gebäudebetrieb aufrecht zu erhalten, wurden vereinzelt Split-Klimageräte eingesetzt. Da die Nutzer vor und nach der Sanierung identisch sind, wäre zu erwarten gewesen, dass die Zufriedenheit – angesichts der hohen Raumtemperaturen in der Vergangenheit – mit den jetzigen sommerlichen Raumtemperaturen hoch ist.



**Abb. 2.12:** Beurteilung der Temperatur während der letzten vier Wochen, Gebäude 1. Vormittag und Nachmittag wurden getrennt beurteilt. Angaben in Prozent

Als Erklärung bieten sich die Erwartungshaltung an die Wirksamkeit der Einflussnahme auf die Raumlufttemperatur und diejenige an die Sanierung an.

Die Möglichkeit der Einflussnahme auf die Raumtemperatur nehmen fast alle Nutzer wahr, mit der Wirksamkeit der Temperaturänderung ist allerdings ein Viertel (26 %) der Befragten „ziemlich“ oder „sehr unzufrieden“. Knapp ein Drittel (28 %) ist „etwas“ oder „sehr zufrieden“. Der Anteil der Unzufriedenen deckt sich mit den Befragungsergebnissen aus Gebäude B und W (mit einem höheren Anteil an Enthaltungen bei diesen Gebäuden, siehe Kapitel 8.3). Im Vergleich weist das Gebäude 1 hingegen mehr Möglichkeiten zur Veränderung des Raumklimas auf (Sonnenschutz, Zulufttemperierung, Lüftung, Fensterlüftung).

Die trotzdem vorhandene Unzufriedenheit könnte darauf zurückgeführt werden, dass die Nutzer das Gebäude nach der Sanierung mit einer hohen Erwartung an die sofortige Wirksamkeit der „Kühlung“ über die Ventilator-konvektoren bezogen haben. Wird eine sofortige Raumkühlung erwartet, so könnte die erreichte Temperierung über die Ventilator-konvektoren tatsächlich hinter den Erwartungen zurückbleiben (die durch einen Raum ohne „Kühlung“ gar nicht erst geweckt worden wäre). Ob eine andere Information der Nutzer diese Haltung verändert hätte, bleibt offen.

In der Literatur findet sich der Hinweis, dass die alleinige Existenz von Kontrollmöglichkeiten nicht automatisch zu einer höheren Zufriedenheit der Nutzer führt [Nicol et al., 2002], die Nutzer müssen der Kontrolle Sinn, Zweck und Wirkung zuordnen können.

### *Lüftung*

Die Zufriedenheit mit der Luftqualität ist hoch („etwas“ oder „sehr zufrieden“: 66 %). Allerdings klagt knapp ein Drittel (30,8 %) der Befragten über Zugluft, die „häufig“ oder „immer“ auftritt. Diese wird vermutlich durch das Zusammenwirken von geschlossenen Lüftungsschlitzten und einem weiterhin konstanten Volumenstrom der Abluftanlage verursacht (siehe Infobox 2.1). Trotz der Abluftanlage werden die Fenster geöffnet, die meisten Nutzer (80 %) lüften dann, wenn die Luft verbraucht ist. Es wird also weiterhin, besonders morgens („häufig“ oder „immer“: 64 %) mit leicht abnehmender Tendenz im Tagesverlauf die Notwendigkeit empfunden, selber zu lüften. Die Zufriedenheit mit der Abluftanlage ist mit 36 %, die „etwas“ oder „sehr zufrieden“ sind (21 % sind „ziemlich“ oder „sehr unzufrieden“) mittelmäßig.

### *Tageslicht und Kunstlicht*

Allgemein ist die Zustimmung zu den Fenstergrößen ( $0,34 \text{ m}^2/\text{m}^2_{\text{NGF}}$ , bzw. 31 % pro Hauptfassade) sehr hoch. Am PC finden es über die Hälfte (56 %) der Nutzer jedoch „etwas“ oder „zu hell“, am Arbeitsplatz geben dies noch 39 % an. Blendungen treten am Computer und am Fenster auf.

Etwa die Hälfte der Befragten ist mit dem Sonnenschutz selber und mit dem Tageslicht bei heruntergefahrenem Sonnenschutz „etwas“ oder „sehr zufrieden“. Da die Steuerung des Sonnenschutzes zum Befragungszeitpunkt im laufenden Betrieb angepasst wurde, wäre das Ergebnis zu einem späteren Zeitpunkt vermutlich besser ausgefallen. Erfreulicherweise schalten 79 % der Nutzer das Kunstlicht bei heruntergefahrenem Sonnenschutz „nie“ oder „selten“ ein.

### *Geräusche*

Ein Drittel der Befragten berichten über „ziemlich starke“ oder „sehr starke“ Leistungseinschränkungen durch Geräusche. Störend werden Telefongeräusche aus dem Nachbarraum („häufig“ oder „immer“ gestört: 21 %) empfunden. Ein Grund dafür könnten die Verbindungstüren zwischen den einzelnen Büros sein, die einen geringeren Schalldämmwert als die Zwischenwände aufweisen (Grundriss siehe Abb. A2.2.1-1 bis -4). Die Bewertung des Geräuschpegels insgesamt ist aber mit 59 %, die „etwas“ oder „sehr zufrieden“ sind, noch gut.

### *Raumgestaltung und Aufteilung*

In diesem Bereich ist die Zustimmung der Nutzer sehr hoch. Mit dem Platz im Raum, der Materialwahl und der Einrichtung der Büros sind jeweils mindestens 70 % der Befragten „etwas“ oder „sehr zufrieden“. Dies spricht für eine hinsichtlich der Raumgestaltung gelungene Sanierung.

## 2.3 Zusammenfassung und Aufgreifen der Fragestellungen für die folgenden Kapitel

Wenn das sommerliche Raumklima ohne aktive Kühlung verbessert werden soll, dann hat das weitreichende Konsequenzen für die Gebäudeplanung. Dies belegen die Fallbeispiele. Soll ein passives Kühlungskonzept in der Sanierung umgesetzt werden, so lässt sich dieses nicht additiv dem fertigen Gebäudeentwurf hinzufügen. Welche Faktoren Bestandteil eines solchen Konzeptes sind und auf welche Weise sie die Planung beeinflussen beschreiben die folgenden Kapitel des ersten Teils der Arbeit (Teil A).

Die Ergebnisse der Nutzerbefragung im Gebäude 1 zeigen, dass ein entscheidender Punkt bei der Zufriedenheit der Nutzer mit der Raumtemperatur ihre Erwartungshaltung an diese ist.

Bei Gebäudesanierungen mit ausschließlich passiver Kühlung ist es wichtig, die Nutzer über das zu erwartende Raumklima und die zu erwartenden „Kühlleistungen“ realistisch zu informieren. Bei bislang nicht gekühlten Bestandsgebäuden umfasst dies die Aussage, dass sich das Raumklima einerseits verbessern wird, andererseits aber auch weiterhin dynamisch bleibt und Temperaturspitzen nicht „gekappt“, sondern nur abgedämpft werden. Eine mögliche Einflussnahme durch die Nutzer sollte auch eine Information über ihre Grenzen beinhalten („Temperierung“ statt „Kühlung“).

Doch warum nimmt die Erwartung bei der Bewertung der vorhandenen Temperatur eine so zentrale Stellung ein? Diese Frage führt zur Diskussion der unterschiedlichen Modelle zur Beurteilung des thermischen Komforts. Der thermische Komfort und weitere unser Wohlbefinden am Arbeitsplatz beeinflussende Faktoren sind Gegenstand des nachfolgenden *dritten Kapitels*. Die Betrachtung der rechtlichen Fragen im Zusammenhang mit der Raumtemperatur schließt das Kapitel ab.

Bevor erörtert wird, *wie* das sommerliche Raumklima ohne aktive Kühlung verbessert werden kann, soll kurz innegehalten und nach dem *warum* gefragt werden. Welches sind die Beweggründe auf eine aktive Kühlung zu verzichten? Die Fallbeispiele zeigten, dass im Vorfeld der Sanierung bei allen Gebäuden unterschiedlich starke sommerliche Überhitzungsprobleme auftraten. Bei der Motivation hierbei auf eine aktive Kühlung zu verzichten spielten wirtschaftliche Überlegungen (Energiekosten für eine aktive Kühlung) eine Rolle, teilweise in Verbindung mit übergeordneten gesellschaftlichen Aspekten (Energieeinsparung als Beitrag zur CO<sub>2</sub> Reduktion). Ein weiterer Grund könnten Bedenken hinsichtlich von Akzeptanzproblemen einer Klimatisierung bis hin zu gesundheitlichen Einschränkungen (SBS, BRI) der Nutzer gewesen sein. Diese Fragen sind Gegenstand des *vierten Kapitels*. Ein weiteres Thema des Kapitels sind die Besonderheiten der Sanierung im Vergleich zum Neubau. Die Fallbeispiele zeigten bereits, dass sich Sanierungen in einigen Punkten wesentlich von Neubauplanungen unterscheiden. Es wird daher beschrieben welche Punkte dies sind und wie sich diese Unterschiede auf eine Planung mit passiver Kühlung auswirken.

Wie sich unter den Anforderungen einer Sanierung ein angenehmes thermisches Raumklima auch ohne aktive Kühlung herstellen lässt, ist Gegenstand des *fünften Kapitels*. Die Fallbeispiele stützen die Vermutung, dass

die Nachtluft als leicht zu erschließende Wärmesenke am häufigsten genutzt wird. Oftmals erfolgt der Einbau einer ventilatorgestützten Lüftung ohnehin. Die Erschließung zusätzlicher Wärmesenken hingegen ist von den örtlichen Gegebenheiten abhängig. Im Sinne einer Themeneingrenzung wird eine Kostenbetrachtung am Ende des Kapitels daher für die Nutzung der Abluft als Wärmesenke im Vergleich zu aktiven Kühlsystemen durchgeführt.

Nicht alle Bestandgebäude eignen sich gleich gut für die Umsetzung passiver Kühlkonzepte. Der erste Teil der Arbeit schließt im *sechsten Kapitel* mit dem Vorschlag einer Gebäudetypologie ab, die es erlaubt zu einem frühen Planungszeitpunkt zu entscheiden, ob das Gebäude günstige Voraussetzungen für eine Senkung der sommerlichen Temperaturen über den Einsatz einer Nachtlüftung bietet.

## 2.4 Literatur

[DIN EN 13779:2005-05]

*Lüftung von Nichtwohngebäuden - Allgemeine Grundlagen und Anforderungen an Lüftungs- und Klimaanlage*. Berlin: Beuth Verlag.

[Nicol et al., 2002]

Nicol, J. F.; M. A. Humphreys. 2002. "Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings". *Energy and Buildings* 34 (6), 563-572.

[Reuter, 2004]

Reuter, T. 2004. *Raumklimaanalyse: Haus der Presse in Dresden*. Bergische Universität Wuppertal, Bauphysik + Technische Gebäudeausrüstung (b+tga) [interne Studie].

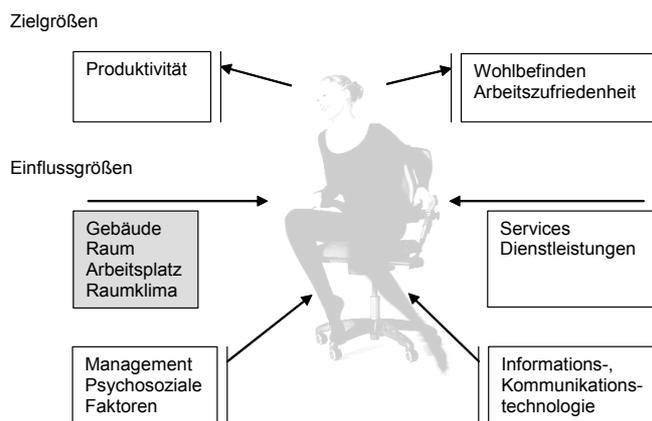


### 3 Gute Büroarbeitsplätze - Rahmenbedingungen

Die meiste Zeit des Tages verbringen wir am Arbeitsplatz, wo vielfältige Faktoren unser Wohlbefinden und damit auch unsere Produktivität beeinflussen. Dies sind beides die Zielgrößen einer guten Arbeitsumgebung. Die auf sie einwirkenden Einflussgrößen sind unter anderem:

- arbeitsbezogene (Service, Technologie und Management),
- psychosoziale Parameter,
- die räumliche Arbeitsplatzgestaltung (Bürokonzept),
- und raumklimatische Aspekte (thermischer Komfort, Belüftung, Belichtung und Akustik).

Über die genannten Faktoren hinaus beeinflussen die gestalterischen Eigenschaften des Gebäudes unser Wohlbefinden und unsere Produktivität. Diese Eigenschaften sind schwer quantifizierbar und ihre Definition Bestandteil der Diskussion über die Qualität von Architektur. Mit einer Konzentration allein auf die – quantifizierbaren - raumklimatischen Aspekte und das Bürokonzept werden gestalterische Eigenschaften des Gebäudes ausgeblendet. Im Sinne einer Themeneingrenzung wird dieser Weg dennoch beschritten.



**Abb. 3.1:** Die Zielgrößen Wohlbefinden und Produktivität sind von einer Reihe von Einflussgrößen abhängig. Grafik nach [Bauer, 2003], erweitert um „Raumklima“

Der erste Teil des Kapitels (Abschnitt 3.1) erörtert zunächst die gesetzlichen Anforderungen, die neben der Temperatur an das Raumklima (Belichtung, Belüftung und Akustik) bestehen. Daran schließen sich die Beschreibungen verschiedener Büroraumkonzepte an und wie sich diese mit dem Konzept der passiven Kühlung vereinbaren lassen.

Zentral im Zusammenhang mit der Themenstellung der Arbeit ist die Kenntnis der unterschiedlichen Modelle zur Bewertung des thermischen Komforts und welche Beurteilungskriterien für nicht gekühlte Büroräume sich daraus ableiten lassen (Abschnitt 3.2).

Da es keine allgemein gültige Beurteilungsgrundlage für sommerliche Temperaturen in nicht gekühlten Gebäuden gibt, traten in den letzten Jahren eine Reihe von Rechtsstreitigkeiten zum Thema der sommerlichen Temperaturen an Arbeitsplätzen auf. Zur Einordnung dieser Gerichtsurteile sollen in den letzten Teilen des Kapitels zunächst die existierenden

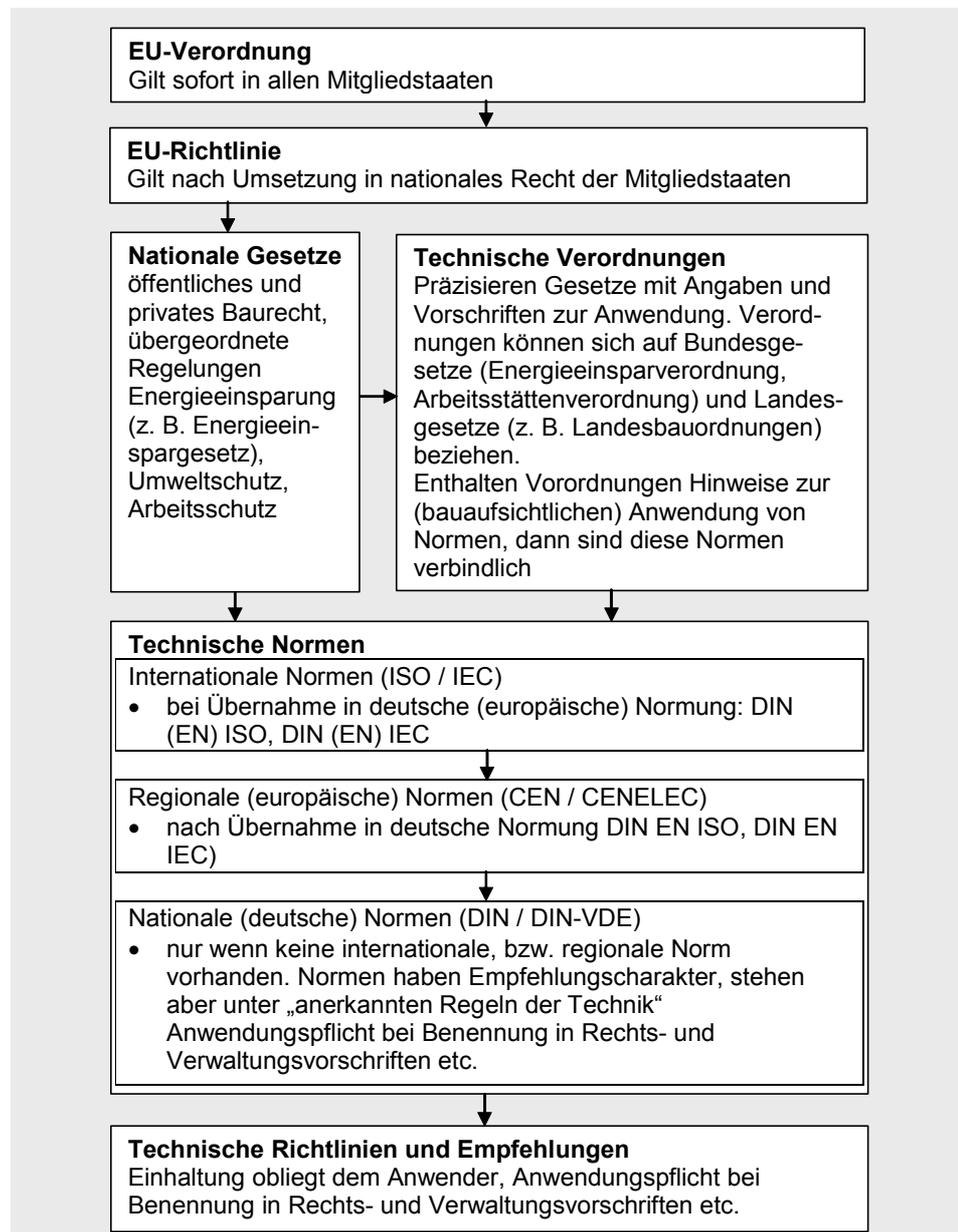
gesetzlichen und normativen Anforderungen an Temperaturen am Arbeitsplatz erläutert werden (Abschnitt 3.3) und abschließend die sich daraus ergebenden rechtlichen Konsequenzen für nicht gekühlte Büroräume (Abschnitt 3.4).

## 3.1 Arbeitsplatz

### 3.1.1 Gesetzliche und normative Anforderungen an den Arbeitsplatz

#### Verbindlichkeitshierarchie

Da in den folgenden Unterabschnitten neben allgemeinen Anforderungen Gesetze und Normen zitiert werden, zeigt Abb. 3.2 zunächst im Überblick wie sich diese hierarchisch gliedern. Dabei gibt die vertikale Gliederung auch die Rangfolge der Verbindlichkeit wieder.



**Abb. 3.2:** Darstellung der Hierarchien (von oben nach unten) von Verordnungen, Richtlinien, Gesetzen und Normen (mit Hinweisen auf den Baubereich und den Arbeitsschutz).

Anmerkung: das Arbeitsschutzrecht in Deutschland ruht auf zwei Säulen: Das staatliche Arbeitsschutzrecht (1) soll Gefährdungen eher allgemein vorbeugen und eine zu hohe Belastung am Arbeitsplatz vermeiden. Das Satzungsrecht (2) der Träger der gesetzlichen Unfallversicherung stellt konkrete Anforderungen an Arbeitgeber und Arbeitnehmer zur Verhütung von Arbeitsunfällen und Berufskrankheiten. Die Unfallverhütungs- und Sicherheitsregeln der Berufsgenossenschaften liegen in der Hierarchie zwischen technischen Verordnungen und technischen Normen.

## Luftqualität

Die gebräuchlichsten Parameter zur Beurteilung der durch den Menschen verursachten Belastung der Raumluft sind das Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) aus der Atemluft und Gerüche (Biofluenzen). Da der zeitliche Verlauf von CO<sub>2</sub>-Konzentration und Geruchsintensität ähnlich ist [Recknagel et al., 2001], gilt ein Gehalt 0,1 Vol.-% CO<sub>2</sub> als Kriterium für gute Raumluft (Pettenkofer-Zahl); Kopfschmerzen sowie Unwohlsein können vermieden werden. Daraus folgt bei 0,03 Vol.-% CO<sub>2</sub>-Konzentration der Außenluft ein Luftwechsel pro Person von ca. 30 m<sup>3</sup>/h.

Zur Bewertung der Raumluftqualität nach menschlichem Empfinden werden zwei Einheiten verwendet: olf<sup>1</sup>, um die Luftverunreinigungsquellen zu quantifizieren und dezipol<sup>2</sup>, um die von einer Person wahrgenommene Luftverunreinigung zu messen [Fanger, 1988]. Ein olf entspricht der – durch Testpersonen wahrgenommenen - Verunreinigungslast einer Standardperson (sitzend, leichte Tätigkeit). Die empfundene Luftqualität (1 Dezipol) wird über die Verunreinigungslast von einem olf, bezogen auf einen Luftwechsel von 10 l/s (= 36 m<sup>3</sup>/h) bewertet.

Zwischen Luftwechselrate (l/s\*olf) und dem Prozentsatz Unzufriedener (PD) aufgrund der Luftverunreinigung besteht eine negative Korrelation. Eine Luftwechselrate von 30 m<sup>3</sup>/h\* Pers ergibt einen PD-Wert von 20 %. Dies gilt als tolerierbarer Grenzwert für die Luftqualität in Innenräumen, bei ausschließlicher Betrachtung der Biofluenzen.

Häufig allerdings geht die Hauptbelastung der Raumluft vom Gebäude und – wenn vorhanden – von der raumlufttechnischen Anlage (RLT-Anlage) aus. Insgesamt liegt die Gesamtbelastung im Baubestand zwischen 0,2 olf/m<sup>2</sup> (wenig belastete Gebäude, keine Raucher) und 0,7 olf/m<sup>2</sup> (belastetes Gebäude und 40 % Raucher). Die Werte gelten für eine Belegungsdichte von 10 m<sup>2</sup>/Person und gehen auf eine Untersuchung von P.O Fanger (zitiert in [Awbi, 2003]) zurück. Bei einer hohen Verunreinigungslast von 0,7 olf/m<sup>2</sup>, wird ein Luftwechsel von 5 l/s\*m<sup>2</sup> benötigt, um einen PD von 20 % zu erreichen. Die Vorgaben der Standards liegen weit darunter (z. B: DIN EN 13779:2005-05 Raucher-Bereich: 2,5 l/s\*m<sup>2</sup> Einzel/Gruppenbüro, 10 m<sup>2</sup> pro Person), da eine Erhöhung der Luftwechselrate zu hohen Hilfsenergieverbräuchen führt. Die Verschmutzungslast der Räume sollte daher durch die Raumausstattung und die regelmäßige Wartung der Anlage konsequent reduziert werden.

Tab. 3.1 zeigt die Empfehlungen für den Luftwechsel von Büroräumen nach DIN EN 13779:2005-05 und ASR 5.

		EN 13779	ASR 5
Hohe Qualität Raumluft (Nichtraucher)	m <sup>3</sup> /h*P	36-54 (S = 45)	20-40
Hohe Qualität Raumluft (Raucher)	m <sup>3</sup> /h*P	72-108 (S = 90)	-
Lokale Luftgeschwindigkeit	m/s	20 °C ≤ 0,13 (S) 26 °C ≤ 0,2 (S)**	≥ 20 °C ≤ 0,2
Rel. Feuchte	%	20-26 °C 30-70 (Bereich)	20 °C ≤ 80 26 °C ≤ 55
** = Als Grenzwert für die lokale Luftgeschwindigkeit gibt die Berufsgenossenschaft (1976, 4.12.5) einen Grenzwert von ≤ 0,15 m/s an			

<sup>1</sup> lat. Olfactus = Geruchssinn  
<sup>2</sup> lat. Pollutio = Verschmutzung

Anmerkung: Für Nicht-raucher-Bereiche fallen die Unterschiede geringer aus, dennoch erhöht auch hier die Reduktion der Lasten die Nutzerakzeptanz erheblich.

**Tab. 3.1:** Standardwerte nach [DIN EN 13779:2005-05] (ersetzt DIN 1946-2:1994-01) und [ASR 5, 1984] Angaben üblicher Bereich und Standardwert (S).

Wie können nun die Luftwechselraten gewährleistet werden? Nachfolgend werden die Systeme Fensterlüftung und ventilatorgestützte Lüftung in Bezug zum Nutzerkomfort diskutiert. Eine Betrachtung der Lüftungssysteme und ihre Eignung zur Entwärmung des Gebäudes über Nachtlüftung findet sich in Kap. 5.5.

- freie Lüftung

Die Luft strömt frei und ohne mechanischen Antrieb in den Raum und wieder hinaus. Vorteilhaft an dieser Lösung ist die Tatsache, dass keine Antriebsenergie notwendig ist, die Investitionskosten gering sind (sofern keine Steuerung über Klappen realisiert wird) und die Nutzerakzeptanz im Allgemeinen hoch ist. Allerdings ist diese Lüftungsstrategie nicht zuverlässig. Besonders in tiefen Mehrpersonenbüros ist die erreichbare Luftqualität eingeschränkt. Bei Extremtemperaturen im Winter und im Sommer wird entweder nicht genügend gelüftet oder die Lüftung geht zu Lasten der thermischen Behaglichkeit. Messungen zeigen, dass allein über Fensterlüftung in den Büros keine ausreichende Abführung der Schadstoffe gewährleistet wird [Kruppa et al., 2002]. Bei Standorten mit hoher Außenlärmbelastung und / oder schlechter Außenluftqualität wird durch Fensterlüftung der Schallschutz verschlechtert und / oder die Schadstoffe gelangen ungehindert in den Raum.

- ventilatorgestützte Lüftung

Der Luftvolumenstrom wird über Ventilatoren dem Raum zu- und / oder aus diesem abgeführt. Ein Vorteil dieser Lüftungsart ist ihre gute Regelbarkeit. Bei zentralen Zu- und Abluftanlagen können eine Wärmerückgewinnung eingesetzt, die Außenluft gefiltert und der Schallschutz verbessert werden. Grundsätzlich ist der Einsatz von Filtern und Schallschutzmaßnahmen auch bei Abluftanlagen möglich, allerdings steigt hier der Wartungsaufwand erheblich (dezentrale Zuluftöffnungen). Nachteilig an diesem Konzept sind der hohe Energieverbrauch und hohe Investitionskosten. Es entsteht ein Platzbedarf für die Luftzentrale und die Rohre. Je nach Anlagentyp steigt der Wartungsaufwand. Die Nutzerakzeptanz einer mechanischen Lüftung kann problematisch sein, allerdings konnte in [Kruppa et al., 2002] auch gezeigt werden, dass eine regelmäßige Wartung der Anlage die Akzeptanz deutlich erhöht<sup>3</sup>. Bei einer Abluftanlage ist die Position der Zuluftöffnungen so zu wählen, dass das Zugluftrisiko minimiert wird (z. B. hinter dem Heizkörper, ausführliche Betrachtungen zu diesem Thema finden sich in [Richter, 2003]). Tab. 3.2 zeigt die Unterschiede zwischen einer reinen Abluftanlage und einer Zu- und Abluftanlage in Bezug auf die Wartung, den Energiebedarf und die Investitionskosten auf.

<sup>3</sup> Bezieht man hohe Personalkosten in die Überlegung mit ein, so kann der Einbau einer ventilatorgestützten Lüftung in wirtschaftlicher Hinsicht vorteilhaft sein: [Wargocki et al., 2006] weist nach, dass die Garantie einer angemessenen Luftwechselrate die Krankenstandsrate mindert und eine Steigerung der Produktivität bewirken kann.

**Tab. 3.2:** Vergleich von Zu- und Abluftanlagen für ein Bürogebäude (Neubau) mit 3 m Deckenhöhe und einfachem Luftwechsel. Datenquelle: „solares bauen mbH“ in [Voss et al., 2006a]

		Abluftanlage	Zu- und Abluftanlage
Wartung	-	gering	hoch
Elektrischer Energiebedarf	kWh/m <sup>2</sup> a	0,9	4,5
Investitionskosten (netto)	€/m <sup>2</sup>	10-20	40-80

### **Belichtung: Tageslichtnutzung**

Die Bedeutung von Tageslicht für die Gesundheit und das Wohlergehen der Nutzer sowie die Notwendigkeit für die Regulation des circadianen Rhythmus ist durch Forschungsergebnisse nachdrücklich bestätigt (ein Literaturüberblick findet sich in [Stone, 2000]).

Ein Großteil der Aufgaben am Arbeitsplatz besteht aus Sehaufgaben, für die eine gute Sehleistung Voraussetzungen ist. Diese wird durch eine hohe Wahrnehmungsgeschwindigkeit und präzises Erkennen gekennzeichnet. Wie leistungsfähig die Augen sind, bestimmen die Leuchtdichte, der Objekt-Umgebungs-Kontrast, die Objektgröße und die Betrachtungszeit. Sehkomfort stellt sich dann ein, wenn das visuelle Umfeld als angenehm empfunden wird. Dazu gehören nach Osterhaus, W. in [Voss et al., 2006a]

- eine Begrenzung von Direkt- und Reflexblendung,
- ein ausgewogenes Verhältnis von Licht- und Schatten,
- eine angemessene Lichtfarbe und Farbwiedergabe
- sowie eine ausgewogene Verteilung von Hell und Dunkel.

Die meisten Nutzer bevorzugen Tageslicht gegenüber einer elektrischen Beleuchtung [Osterhaus, 2005].

Überschlagswerte für ein ausgewogenes Verhältnis der Leuchtdichteverhältnisse nach [VBG, 2004] finden sich im Anhang (Info A3.1.1-1).

#### *Fenstergrößen in Büroräumen*

Die ASR 7 fordert, dass prinzipiell eine Sichtverbindung nach außen gewährleistet sein muss. Die Größe der Fensterfläche hängt von der Raumtiefe und -größe ab (Tab. A3.1.1-1). Die [DIN 5034-1:1999-10] bezieht sich auf Arbeitsräume mit gängigen (Höhe 3,5 m, Tiefe 6,0 m, Fläche ca. 50 m<sup>2</sup>) Abmessungen. Für größere mit Fenstern versehene Arbeitsräume gibt es bisher keine Anforderungen in Bezug auf ausreichende Helligkeit.

Die Vorgaben an die Fenstergrößen sind in einem üblichen Büroraum meist problemlos zu erfüllen, sie garantieren allerdings kaum eine ausreichende Raumbelichtung.

#### *Tageslichtquotient (TQ, Definition siehe Anhang, Info A3.1.1-2)*

Der TQ sollte nach [DIN 5034-1:1999-10] in halber Raumtiefe, 0,85 m über dem Fußboden und in 1 m Abstand von den beiden Seitenwänden im Mittel der beiden Punkte  $\geq 0,9\%$  ( $\geq 1,0\%$  bei zweiseitiger Belichtung) und an einem der Punkte mindestens  $\geq 0,75\%$  sein.

Diese Anforderung ist bei gängigen Büroräumen in der Regel erfüllt, Vorsicht ist bei Räumen geboten, die an Atrien angrenzen. Ein TQ in der geforderten Höhe führt allerdings nicht zu einem hellen Raumeindruck.

### **Belichtung: Elektrische Beleuchtung**

#### *Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz*

Die Arbeitsstättenrichtlinien verweisen auf die Anforderungen der DIN 5035-2:1990-09. Diese wurde Anfang 2003 durch die DIN EN 12464-1:2003-03 ersetzt. Danach müssen im Arbeitsbereich (Tisch: 1,60 \* 0,8 m und gleiche

Fläche davor) 500 Lux eingehalten werden, für den Umgebungsbereich sind 300 Lux ausreichend.

Im Gegensatz zu den Vorgaben der ersetzten DIN, die die Sicherstellung der Mindestbeleuchtungsstärke für den ganzen Raum vorsah, bringt dies bei Zellenbüros Vorteile. Bei Büros mit freier Möblierung muss auch nach der neuen Richtlinie die Mindestbeleuchtungsstärke flächendeckend sichergestellt werden. Der Wartungsfaktor<sup>4</sup> wurde von 0,8 auf 0,67 verschärft, dies bedeutet eine Erhöhung der installierten Leistung um ca. 20 % [Voss et al., 2006a]. Werden bestimmte Anforderungen an die Wartung erfüllt, kann auch weiterhin mit dem Wert von 0,8 gerechnet werden.

Die vorgegebene Beleuchtungsstärke von 500 Lux beurteilen Nutzer nicht einhellig als ausreichend. Im Allgemeinen werden Beleuchtungsstärken zwischen 500 und 1000 Lux bevorzugt [Hentschel, 2002]. Da die Komfortempfindung sehr individuell ist, ist eine Aufteilung der elektrischen Beleuchtung in eine Grundbeleuchtung und eine individuell bedienbare Arbeitsplatzleuchte vorteilhaft.

Die Anforderungen der Berufsgenossenschaft (BG) lauten, dass die Beleuchtungsanlage so beschaffen sein muss, dass physiologische Blendung vermieden und psychologische Blendung begrenzt wird. Es sollten daher keine störenden Lichtreflexe auf dem Sehobjekt entstehen und keine Blendung durch die Beleuchtungskörper und ihre Anbringung [VBG, 2004].

### *Blendung*

Grundsätzlich sollten bei Bildschirmarbeitsplätzen Blendungen und Reflexionen auf dem Bildschirm vermieden und die Fenster mit einem verstellbaren Blendschutz ausgestattet werden (BildschirmarbV 1996, Anhang). Für Bildschirme gelten für Flächen und Leuchten, die sich im Bildschirm spiegeln können, Grenzwerte von 1000 cd/m<sup>2</sup> [VBG, 2004]. Die verbesserte Bildschirmtechnik ließ in der Vergangenheit eine Korrektur des Ausgangswerts von 400 cd/m<sup>2</sup> zu und könnte nach neueren Studien auch zukünftig weit höhere Leuchtdichten am Bildschirm (< 4000 cd/m<sup>2</sup>) ermöglichen (Wienold, J. in [Voss et al., 2006a]).

Trotz der grundsätzlichen Forderung nach einem Blendschutz, gibt es bisher keine Norm, die eine Blendungsbegrenzung an Sonnen- und Blendschutzanlagen festlegt. Die BG empfiehlt bei möglicher Spiegelung des Blendschutzes im Bildschirm in Abhängigkeit von dessen Entspiegelung und Art der Darstellung (weiße Schrift auf schwarzem Grund oder umgekehrt) eine Begrenzung der mittleren Leuchtdichte am Behang zwischen 200 und 1000 cd/m<sup>2</sup>. Wird eine Spiegelung im Bildschirm ausgeschlossen dann sind Leuchtdichten zwischen 2000 bis 4000 cd/m<sup>2</sup> zulässig [VBG, 2002].

### **Akustische Büroplanung**

Unter Berücksichtigung der von außen einwirkenden Geräusche sollte der Beurteilungspegel in Büroräumen möglichst niedrig sein. Bei überwiegend geistigen Tätigkeiten gelten höchstens 55 dB(A) und bei Routinearbeiten maximal 70 dB(A) [VBG, 2004]<sup>5</sup>. Die Anforderungen der [DIN EN ISO 11690-1:1997-02] sehen für einen optimalen Bildschirmarbeitsplatz einen Beurteilungspegel von < 30 dB (A) und für einen guten Arbeitsplatz einen Wert zwischen 40 und 45 dB (A) vor.

<sup>4</sup> Wartungswert der Beleuchtungsstärke: Wert, unter den die mittlere Beleuchtungsstärke auf einer bestimmten Fläche nicht sinken darf

<sup>5</sup> Diese Werte gehen auf die alte – nicht mehr gültige ArbStättV zurück. Die jetzt gültige Verordnung [ArbStättV, 2004] gibt für alle Arbeitsplätze nicht zu überschreitenden Maximalwert von 85 dB (A) an, ansonsten soll der Schalldruckpegel so niedrig wie möglich gehalten werden).

Dies deckt sich mit den Empfehlungen nach [DIN EN 15251:2005-07]. Geräusche durch Arbeitshilfen (Rechner und Drucker) können durch eine Konzentration der Geräte in einem zentralen Raum begrenzt werden.

Bei Maßnahmen der passiven Kühlung kann ein Zielkonflikt zwischen dem Wunsch nach freiliegenden Decken und einer ausreichenden akustischen Bedämpfung der Flächen entstehen. Bei Einzel- bis Mehrpersonenbüros reichen die ohnehin vorhandenen schallabsorbierenden Flächen (Büromöblierung) im Raum in der Regel aus. Anders ist dies bei Besprechungsräumen, die Bedämpfungsflächen benötigen. Lösungen, die sich auch mit einem passiven Kühlkonzept vereinbaren lassen, stellt Hennings, D. in [Voss et al., 2006a]) dar.

### 3.1.2 Büroraumkonzepte

#### *Einleitung – Büroarbeit im Wandel*

Die innere Organisation von Bürogebäuden wird von den Arbeitsprozessen geprägt, die in ihnen stattfinden. Grundlage dieser Prozesse bildete bis in die 60er und 70er Jahre des letzten Jahrhunderts das auf die Büroarbeit übertragene Prinzip der Arbeitsteilung aus der Industrie. Das Augenmerk der Arbeitsplatzgestaltung richtete sich dabei auf die Ausführung definierter Aufgaben in einem hierarchisch gegliederten Arbeitsprozess mit wenig Interaktion oder Selbstständigkeit der Arbeitenden. Baulicher Ausdruck waren große Arbeitssäle, mit gleichförmig ausgestatteten Arbeitsplätzen (Abb. 3.3).

Das heutige Arbeitsverständnis im Sinne der „Wissensarbeit“ ist davon substantiell verschieden und basiert auf ständigen Lernprozessen sowie kontinuierlicher Lernbereitschaft und –fähigkeit. Dies lässt das Potential zu Innovationen, sowie zu Lern- und Wandlungsfähigkeit in Arbeitsprozessen entstehen [Schneider et al., 2004].



**Abb. 3.3:** Großraumbüro aus den 70er Jahren  
Quelle: Landesmuseum für Technik und Arbeit in Mannheim [Lachmayer et al., 1998]

**Tab. 3.3:** Eigenschaften der Arbeitsstrukturen gestern und heute. Angaben nach Duffy, F., zitiert in [Harrison et al., 2004]

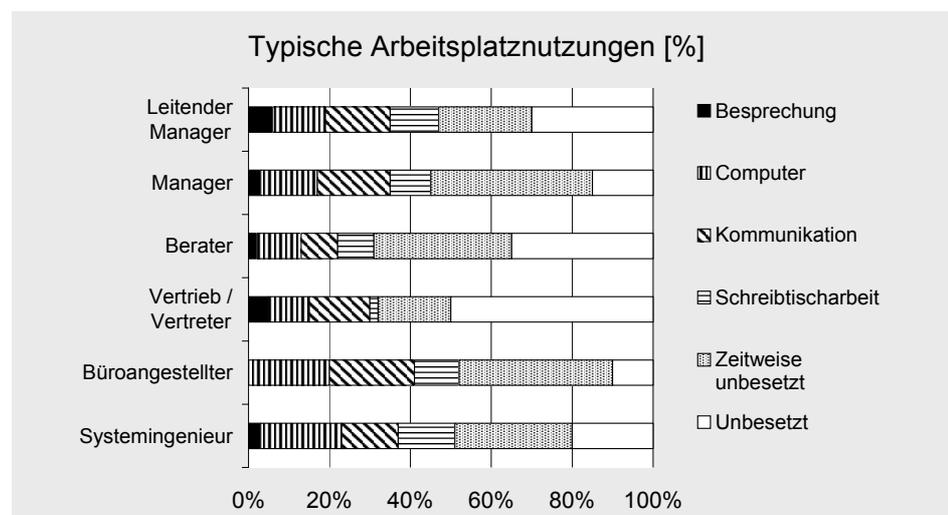
Diese – zukünftige – Arbeitsweise führt aufgrund des technologischen Fortschritts zu einem hohen räumlichen Unabhängigkeitsgrad für den Einzelnen. Persönliche Kontakte, Informationsaustausch und Besprechungen machen einen wichtigen Bereich der Arbeitsstrukturen aus [Harrison et al., 2004]. Tab. 3.3 stellt die Eigenschaften von konventionellen Büroarbeitsplätzen denen der „neuen Arbeitsweise“ gegenüber.

	Konventionelles Büro	Neue Arbeitsweise
Arbeitsstruktur	Routinetätigkeit individuelle Aufgaben isolierte Tätigkeiten	creative Wissensarbeit Gruppen-, Team- und Projektarbeit interaktive Arbeit
Nutzungsstruktur bezogen auf Raum und Zeit	Zentrale Büros mit individuellen Arbeitsplätzen (Verhältnis Arbeitsplatz zu Personen 1:1), besetzt von 9 bis 17 Uhr, räumliche Hierarchie, Nutzungsgrad mindestens 30 % unter der vollen Kapazität.	Dezentrale Arbeitsorte (Büro, Zuhause, Reise...), Verbindung durch Kommunikationsnetzwerke, selbstständige Arbeit in Projektteams, unregelmäßige Arbeitszeiten, beinahe vollständige Raumauslastung durch verschiedene Organisationskonzepte.
Grundrisstyp, Möbelsysteme, Raum- und Gebäudenutzung	Hierarchie von Räumen und Möbeln ist statusgebunden. Individuelle Belegung hat Vorrang gegenüber interaktiven Meeting-Räumen.	Multifunktionale und individuelle Ausstattung. Ausstattung, Anordnung und Möblierung werden dem Arbeitsprozess und den Aufgaben angepasst.
Nutzung von Informationstechnologie	Nutzung für routinemäßige Datenverarbeitung. Ortsfeste Terminals sind mit Großrechner verbunden.	Mobile IT- Ausstattung, Technologie dient der Unterstützung kreativer Wissensarbeit. Server haben Speicherfunktion für eine Vielzahl von IT-Werkzeugen, PC, Laptop etc.

Die Anforderungen an die räumliche Aufteilung hängen von der Art der Arbeit ab und zu welchen Anteilen diese zurückgezogene geistige Tätigkeit oder Kommunikation (in und außerhalb des Büros) erfordert.

Die Anwesenheit am Arbeitsplatz kann so je nach ausgeführter Arbeit (Abb. 3.4) stark schwanken: der Arbeitsplatz ist zwischen 45 % der Arbeitszeit (Vertrieb / Vertreter) und 10 % nicht besetzt. Dazu kommen die Zeiten, in denen der Platz temporär nicht belegt ist.

**Abb. 3.4:** Typische Arbeitsplatznutzungen für unterschiedliche Tätigkeiten. Es wird deutlich, dass kein Arbeitsplatz zu 100 % genutzt wird und dass es eine schwer zu erfassende Zeitspanne gibt, während der der Arbeitsplatz temporär unbesetzt ist. Quelle: DEGW, zitiert in [Harrison et al., 2004]



## Büroraumkonzepte

Die Büroraumkonzepte der jüngeren Vergangenheit sind Ausdruck unterschiedlicher arbeitsorganisatorischer Anforderungen, aber auch Spiegel des jeweiligen arbeitswissenschaftlichen Standes und des Zeitgeistes. So verlief die Entwicklung von Zellenbüros, über Großraum- und Gruppenbüros (auch Bürolandschaften) bis hin zu Kombibüros und neueren Desk-sharing Konzepten. Auf die Dot.com-Euphorie mit der Suche nach neuen, unkonventionellen Konzepten („Your office is where you are“ [Arch+, 1997]), folgt der Versuch praxistaugliche Lösungen für unterschiedliche räumliche (Rückzug, Kommunikation) und zeitliche (temporäre Nutzungen) Anforderungen zu finden. Derzeit ist das am häufigsten genutzte Bürokonzept das Zellenbüro [Neuhaus, 2002], [Bauer et al., 2003] für eine, zwei oder bis maximal sechs Personen (ca. 70 %). Die Zahl der Nutzer eines Einzelbüros schwankt zwischen 10 % (in [Neuhaus, 2002] zitierte Schrift des BAuA aus dem Jahr 1998) und rund 30 % [Bauer et al., 2003]. In Gruppen- oder Großraumbüros arbeiten insgesamt knapp 20 %, Kombibüros nutzen 6 % (Büros mit Einzel- und Doppelarbeitskojen). Grafik siehe Abb. A3.1.2-1.

Der folgenden Abschnitt erläutern jeweils die Hauptcharakteristika und die Vor- und Nachteile der Büroraumkonzepte.

### *Zellenbüro*

Diese Büroart eignet sich bei Belegungen bis zu zwei Personen für selbständiges konzentriertes Arbeiten und gewährleistet eine akustische und visuelle Störungsfreiheit mit hoher Privatsphäre. Durch die geringen Raumtiefen ist die Tageslichtnutzung in der Regel gut und eine freie Lüftung möglich. Die Nutzer haben eine hohe Selbstständigkeit bei der Bestimmung der klimatischen Raumparameter.

Nachteilig sind der Flächenaufwand durch die Erschließung über den Flur und eine mangelnde räumliche Flexibilität aufgrund der festen Trennwände. In seiner Reinform erschwert das Zellenbüro die zufällige Kommunikation.

Bei einer Belegung mit zwei Personen werden akustische Störeinflüsse (Telefongespräche) als störend stark empfunden [BSO, 2005]. Belegungen mit bis zu vier Arbeitsplätzen, sind nur dann sinnvoll, wenn es sich um Arbeitsgruppen handelt, bei denen der Kontakt untereinander überwiegt und gegenseitige Vertretungen erforderlich sind [Bauer et al., 2003]. Ansonsten ist das gegenseitige Störpotential hoch (siehe auch Nutzerbefragung, Gebäude W).

### *Großraumbüro*

Mitte der 60er Jahre des letzten Jahrhunderts erlebte diese Büroform einen erneuten Aufschwung, wobei die bis zu 1000 m<sup>2</sup> große Raumfläche durch die Möblierung gleichmäßig oder als „Bürolandschaft“ gegliedert wurde. Heutige Großraumbüros besitzen Einheiten von wenigen hundert Quadratmetern [Bauer et al., 2003].

Erfordern die Aufgaben dies, so ist am Großraumbüro die Unterstützung des Kommunikationsflusses positiv, wobei sich die zufällige Kommunikation auf einen Aktionsradius von 10-15 m beschränkt (Schneider / Gentz zitiert in [Neuhaus, 2002]). Die räumliche Flexibilität ist hoch.

Aufgrund der großen Raumtiefen müssen die Räume in der Regel klimatisiert und größtenteils elektrisch beleuchtet werden, was hohe Nutzungs- und Instandhaltungskosten verursacht. Für den Nutzer belastend können die nicht individuell regulierbaren Raumbedingungen, der hohe Geräuschpegel (ohne Wahrnehmung der Einzelgeräusche) und die mangelnde Privatheit sein.

Je nach Lage (Fensterplatz / neben Verkehrsfläche) ist die Arbeitsplatzqualität ungleichwertig [Schneider et al., 2004]. Diese Nachteile führen dazu, dass nur 6 % der in einem Großraumbüro arbeitenden Beschäftigten dort auch zukünftig arbeiten möchten [Neuhaus, 2002]. Die Diskussion um das SBS verstärkt die Vorbehalte [Schneider et al., 2004].

#### *Gruppenbüro*

Das Gruppenbüro soll die Vorteile von Großraum- und Zellenbüros verbinden und die Nachteile beider Formen minimieren. Es enthält etwa 6 bis 20 Arbeitsplätze, die Raumdimensionen liegen bei 150 bis 300 m<sup>2</sup>.

Positiv sind auch hier die Förderung der Kommunikations- und Abstimmungsprozesse und das hohe Maß an Flexibilität bei Umstrukturierungen. Wegen geringerer Raumtiefen (12 bis 15 m) kann zu Gunsten einer Lüftungsanlage auf eine Klimatisierung verzichtet werden.

Nachteilig wirken sich der Geräuschpegel mit Wahrnehmung der Einzelgeräusche [ergo-online, 2005] und der Abstimmungsbedarf bei Lüftung, Lufttemperatur und Belichtung aus.

#### *Kombibüro*

Grundgedanke des Kombibüros ist es eine Kombination und keinen Kompromiss zwischen Zellen- und Gemeinschaftsbüro zu schaffen. Demnach sind entlang beider Außenfassaden 8 bis 12 m<sup>2</sup> große Zellenbüros – Arbeitskojen - angeordnet, die durch raumhohe Glaswände von der mittigen, 6 bis 8 Meter tiefen Kombizone, getrennt sind. Dort befinden sich gemeinsam genutzte Einrichtungen wie Kopierer, Fax, Bibliothek, Teeküche und temporäre Arbeitsplätze.

Die Zellenbüros bieten die Möglichkeit zum konzentrierten Arbeiten, mit individueller Regelung der klimatischen Raumparameter. Kommunikationsintensive Zusammenarbeit ist in der Kombizone möglich.

Die verglasten Wände zur Kombizone sind für deren Belichtung mit Tageslicht notwendig, verringern allerdings die Stellflächen im Büro und können dort zu visuellen Irritationen und zum Eindruck von „Beobachtetwerden“ führen. Ist die Kombizone nicht adäquat eingerichtet und belichtet, so besteht die Gefahr, dass sie zum „großen Flur“ verkommt. Eine ventilatorgestützte Lüftung in der Kombizone ist zwingend.

#### *Reversibles (Revi) Büro / Flexspace-Office*

Grundlage dieser Büroart ist ein Baukörper, in dem sowohl Gruppenbüros, Ein- bis Mehrpersonenzellenbüros oder Kombi-Büros untergebracht werden können. Geeignet ist diese Form für Unternehmen mit sehr unterschiedlichen Nutzungsanforderungen. Der erhebliche Mehraufwand für den Bau und die Installation hochmobiler technischer Infrastrukturen schlägt sich in hohen Kosten nieder.

Neue Arbeitsplatzkonzepte

Die eingangs geschilderte Verringerung der im Büro verbrachten Zeit und wechselnde Anforderungen an die Arbeitsumgebung (konzentriertes Arbeiten, Besprechungen) führen zu der Überlegung, eine höhere Wirtschaftlichkeit zu erreichen, in dem nicht für jeden Mitarbeiter ein individueller Arbeitsplatz vorgehalten wird. Grundsätzlich lassen sich dabei das territoriale und non-territoriale Desksharing unterscheiden. Eine weitere Beschreibung und Diskussion befinden sich im Anhang Info A3.1.2-1.

Abschließend zeigt Tab. 3.4 die Eigenschaften der unterschiedlichen Bürotypen in der Übersicht.

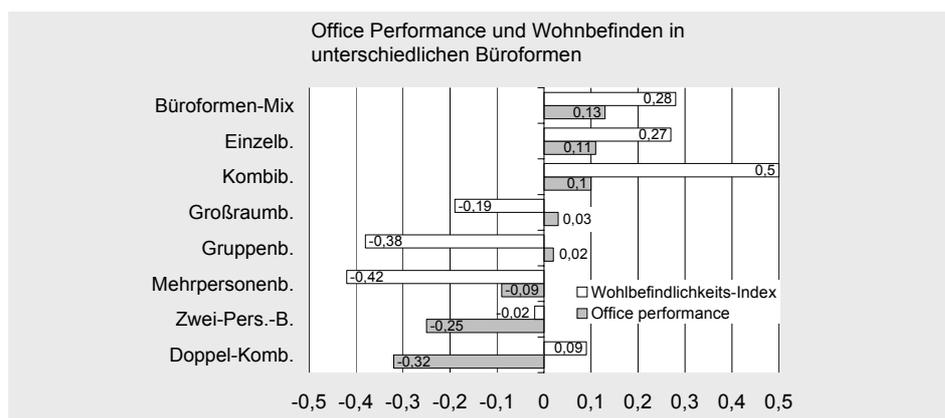
**Tab. 3.4:** Eigenschaften unterschiedlicher Bürotypen. Angaben nach: [Giesemann, 1999], [Voss et al., 2006a], [BSO, 2005], [ergo-online, 2005] Verwendete Abkürzungen: AP = Arbeitsplatz, BK = Brüstungskanal, UK = Unterflurkanalsystem, D = Doppelboden, TL = Tageslicht, EB = Elektrische Beleuchtung, K = Kombizone

Kriterien		Zellenbüro	Großraumbüro	Gruppenbüro	Kombibüro
Raumtiefe		4,5 – 5,4	20- 30	12 - 15	3,9 - 5
Gesamttiefe Gebäude	m	13 - 14	20 - 30	12 - 24	16 – 17
Geschosshöhe	m	2,8 – 3,6	3,8 – 4,5	3,7 – 4,0	3,0 – 4,0
Abstand AP – Fenster	m	< 5,0	< 15,0	< 7,0	< 4,0
Raubbreite	m	< 4,0	20 - 60	12 - 20	2,3 – 3,2 K: 6 – 8
Raumfläche	m <sup>2</sup>	15 - 25	400 - 1200	150 - 300	9 – 12
Personen / Raum	-	1-2	> 26	12 - 25	1-1
NGF pro Arbeitsplatz	m <sup>2</sup>	18,8 – 23,6	20,9	20,9	18,9
Fläche pro Bildschirmarbeitsplatz (exkl. Bewegungsflächen)	m <sup>2</sup>	12	15	15	12
Arbeitsplatz-Erschließung über		Flure	Großraum	Großraum	Kombizone
Belüftung		freie Lüftung, teilklimatisiert	Klimatisierung	freie Lüftung, teilklimatisiert	freie Lüftung teilklimatisiert
Beleuchtung		TL	überwiegend EB	T, oder EB	T, K: EB
Elektroinstallation		BK, UK	D, UK	BK, D, UK	D, UK

Beurteilung der Raumkonzepte durch die Nutzer

Wie die Nutzer die unterschiedlichen Büroformen beurteilen zeigt Abb. 3.5, in der die „Office Performance“ und das Wohlbefinden der Mitarbeiter vergleicht. Hinsichtlich der selbstberichteten eigenen Leistung („Office Performance“) schneiden die Zwei-Personen-Büros am schlechtesten ab, gefolgt von den großflächigen Raumstrukturen. Am besten bewertet werden Konzepte, die den Befragten eine Rückzugsmöglichkeit bieten. Bei der Einschätzung des Wohlbefindens verläuft die Rangfolge klar von Büroformen mit geringerer Belegungszahl oder mit Rückzugsmöglichkeiten (positiv) hin zu den großflächigen Räumlichkeiten (negativ).

**Abb. 3.5:** Office Performance und Wohlbefinden in unterschiedlichen Büroformen. Office Performance-Index: Er beinhaltet die Dimensionen Effektivität, Effizienz, Ergebnis-Qualität und Prozess-Qualität. Die Spannweite liegt zwischen 1 (sehr gering) und 7 (sehr hoch). Angegeben sind die Abweichungen vom Mittelwert (4,45). Datenbasis: Nutzerstudie mit 733 Teilnehmern aus dem deutschsprachigen Raum, Herbst 2001. Wohlbefindlichkeits-Index: Er setzt sich gleichgewichtig aus den Beurteilungen der am Arbeitsplatz und im Büro empfundenen „Wohlfühlqualität“ und der Zufriedenheit mit der Arbeit insgesamt zusammen. Skala siehe oben. Angegeben sind die Abweichungen vom Mittelwert (5,32). Datenbasis: Nutzerstudie mit 706 Teilnehmern. Befragungszeitraum: k.A, Quelle: [Bauer et al., 2003]



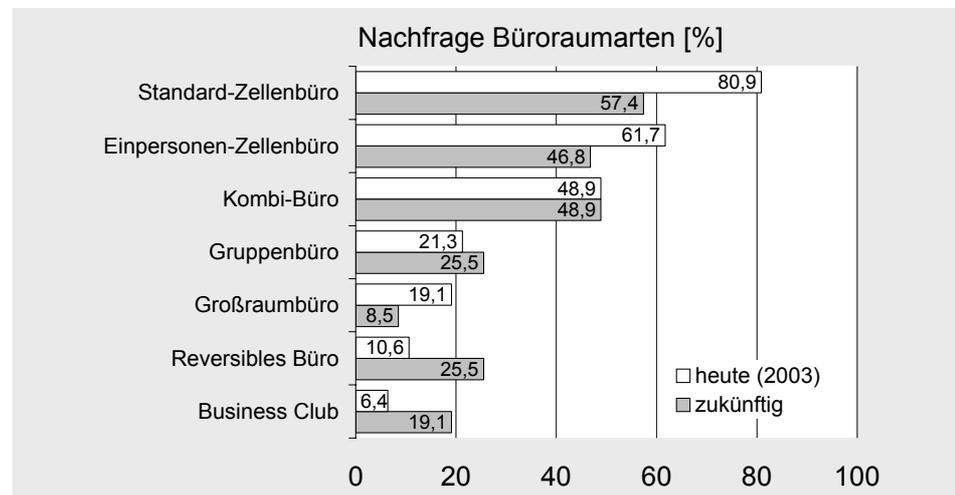
Diese Ergebnisse weichen stark von anderen Angaben in der Literatur (z. B. [Neuhaus, 2002]) ab, wonach jeweils ca. 35 % der Befragten Zwei- oder Mehrpersonenbüros (< 6 Personen) und 18 % Einzelbüros bevorzugen (Abb. A3.1.2-2). Auch die Nutzerbefragungen (Kap. 8.3) zeigten keine auffällige Unzufriedenheit mit Zweipersonenbüros. Da die Befragungsergebnisse in [Neuhaus, 2002] ohne Jahresangabe zitiert sind, könnte darin ein Grund liegen. Plausibler scheinen aber unterschiedliche Zielgruppen (eventuell auch unterschiedliche Aufgabenfelder bei der Arbeit) der Befragung zu sein. Zusammenfassend werden in [Neuhaus, 2002] Zellenbüros (Zweipersonenbüros, Mehrpersonenbüros und Einzelbüros) sehr positiv beurteilt, während Gruppen- und Großraumbüros weniger beliebt sind. Die Befragung berücksichtigt allerdings keine neueren Bürokonzepte, wie z. B.: Kombibüros.

### Zukunftsfähigkeit von Bürokonzepten

Wie eine Befragung unter Immobilienentwicklern aus dem Jahre 2003 zeigt (Abb. 3.6), führt die Verbreitung neuartiger Arbeitsmethoden und Organisationsstrukturen nicht notwendigerweise zur Auflösung klassischer Bürokonzepte [Beyerle, 2003].

Die Nachfrage nach dem Standard-Zellenbüro soll zwar in Zukunft etwas zurückgehen und das Interesse an Formen wie dem Reversiblen Büro und dem „Business Club“ (als Oberbegriff für Bürostrukturen, die auf einem non-territorialen Organisationsprinzip basieren) wachsen, insgesamt sind die Prognosen für neue Bürokonzepte aber eher verhalten.

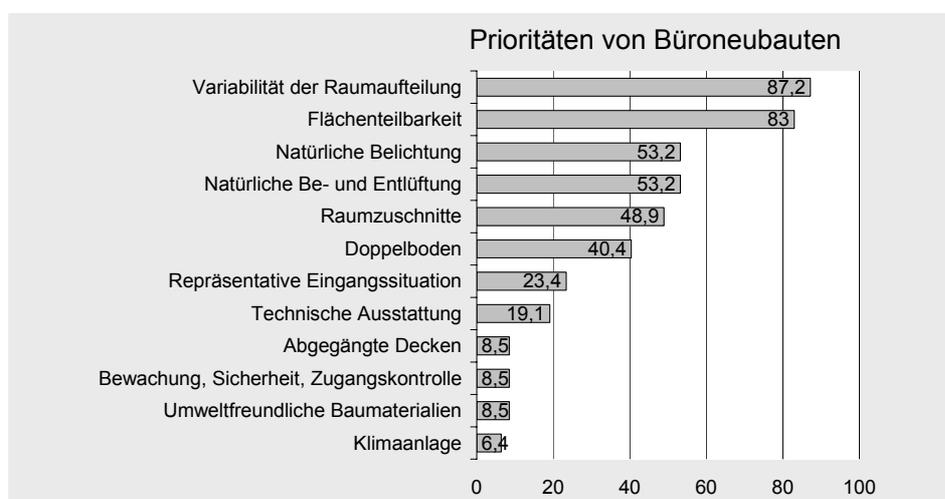
**Abb. 3.6:** Nachfrage nach Büroraumarten gemäß Einschätzung von Bauträgern, Projektentwicklern, Bauunternehmen sowie Consultants für Projektsteuerung und –management (2003), inkl. Mehrfachnennungen. Quelle: [Beyerle, 2003] Vergleicht man die Nachfrageprognosen für die Zukunft aus dem Jahr 2003 [Beyerle, 2003] mit denen von 1999 [Giesemann, 1999] (nicht dargestellt), so treten Verschiebungen auf: Im Jahr 2003 wird der Bedarf an Zellenbüros höher eingeschätzt als im Jahr 1999, etwas abgeschwächt aber von der Tendenz her ähnlich verhält sich dies bei Gruppen-, Großraum- und Kombibüros. Die Prognose für die Nachfrage nach Reversiblen Büros ist im Jahr 2003 geringer als im Jahr 1999.



Welche Büroraumart benötigt wird, hängt auch vom Charakter der Organisation und von der Branche ab [Marmot et al., 2000]. Befragungsergebnisse unter Immobilienentwicklern [Giesemann et al., 2003] zeigen, dass bei allen Branchen die Nachfrage nach Zellenbüros am größten (50 – 80 %) ist. Unterschiede treten bei den übrigen gewünschten Büroformen auf. Während die öffentliche Verwaltung fast ausschließlich Zellenbüros (Ein- und Mehrpersonenbüro) benötigt, verwenden Finanzdienstleister und Versicherungen zusätzlich dazu auch Kombi-Büros. Die Informations- und Telekommunikationsbranche nutzt neben Zellenbüros noch Gruppen- und

Kombibüros, der Sektor „Planung und Beratung“ Kombi-Büros und Business Clubs (Grafik, Abb. A3.1.2-3).

Als wichtige Merkmale neu zu errichtender Bürogebäude (Abb. 3.7) geben Immobilienentwickler der flexiblen Raumaufteilung höchste Priorität. Tageslichtnutzung und freie Lüftung nennen jeweils etwas mehr als die Hälfte der Befragten. Dass diese Themen zwar wichtig sind, nicht aber an höchster Stelle stehen, zeigen auch die Befragungsergebnisse von Office 21 („Soft Success Factors, 2002), bei denen die Relevanz der Bereiche „Lichtverhältnisse“ und „Raumklima“ im mittleren Bereich lag [Bauer et al., 2003]. Merkmale, die Konzepte der passiven Kühlung erschweren wie Doppelböden (40,4 %) und abgehängte Decken (8,5 %), haben unterschiedliche Prioritäten. Nur ein sehr geringer Teil (6,4 %) wünscht eine Klimaanlage.



**Abb. 3.7:** Prioritäten von Büroneubauten. Die Befragung wurde unter Immobilienentwicklern (Bauträger, Projektentwickler, Bauunternehmen sowie Consultants für Projektsteuerung und -management) im Jahr 2003 durchgeführt, die Stichprobe umfasste 60 Immobilienunternehmen. Mehrfachnennungen waren möglich. Angabe: Anteil der Nennungen Quelle: [Giesemann et al., 2003] Anmerkung: da „Variabilität der Raumaufteilung“ nicht näher definiert ist, bleibt offen, ob damit die Versetzbarkeit von Trennwänden (in der Praxis eher selten realisiert), oder eine Umgruppierung der Möbel gemeint ist.

### Rückschlüsse für Sanierungen

Bei einem Sanierungsvorhaben, dem ein haustechnisches Konzept additiv hinzugefügt wird (aktive Kühlung, Fall a), ist bei der Frage welches Büroraumkonzept angewendet werden soll, zunächst entscheidend, ob eine Eigennutzung oder eine Vermietung geplant ist. Im ersten Fall steht die Frage nach der Umsetzung der nutzungsspezifischen Anforderungen im Bestand im Vordergrund, im zweiten Fall liegt der Schwerpunkt auf der Realisierung eines marktkonformen Konzeptes. Dabei sind flexible Raumstrukturen oder ein Angebot unterschiedlicher Raumformen (Rückzug, Kommunikation) vorteilhaft.

Anders ist dies bei einem Sanierungsvorhaben, bei dem das sommerliche Raumklima ohne aktive Kühlung verbessert werden soll (Fall b). Hier spielt die Überlegung, welche Wärmesenken zur Verfügung stehen und wie die Wärme abgeführt werden soll, eine wichtige Rolle bei der Wahl des Raumkonzeptes.

In beiden der oben genannten Fällen (a, b) kommt bei einer Sanierung noch ein weiterer konzeptbestimmender Faktor hinzu: Der Handlungsspielraum, den die Konstruktion und Struktur des Gebäudes zulässt. Günstig können Gebäude aus den 60er Jahren sein, die mit nur wenigen tragenden und aussteifenden Elementen versehen sind. Bei Bauobjekten aus den 50er Jahren oder älteren Gebäuden übernehmen Trennwände oft eine statische Funktion und können daher nicht oder nur kostenaufwändig entfernt werden. Bei bestehenden

<sup>6</sup> Mischarbeitsplatz: 12 m<sup>2</sup>,  
Bildschirmarbeitsplatz: 10 m<sup>2</sup>  
[BSO, 2005]

Zellenbüros sind die Abmessungen für zwei Personen oft zu klein, da für eine ergonomische Bildschirmarbeit<sup>6</sup> ein erhöhter Raumbedarf entsteht.

Der Anforderung der Flexibilität kann bei Sanierungen nachgekommen werden, indem ein Angebot von Raumformen, wie z. B. bei Kombibüros, geschaffen wird, die einen unkomplizierten Wechsel im Laufe des Arbeitstages gestatten (Planungshinweise siehe Anhang, Info A3.1.2-2).

Der Verzicht auf eine aktive Kühlung mit der Nutzung der Abluft als Wärmesenke setzt Grundrißzonierungen voraus, die eine Abfuhr der Wärmelasten wirksam gewährleisten. Dies kann zu Zielkonflikten bei extrem flexiblen Grundrisslösungen führen. Werden in der Planung spätere Umstrukturierungen des Grundrisses (z. B. Rauntrennungen) berücksichtigt, so kann eine technische Um- oder Nachrüstung vermieden werden<sup>7</sup>.

<sup>7</sup> flexiblere Grundrisslösungen  
würde die Wärmeabfuhr über  
BKT ermöglichen.)

Nicht alle Büroraumkonzepte sind mit einem passiven Kühlkonzept vereinbar. Dies trifft besonders auf Großraumbüros (hohe interne Lasten vorhanden und statistisches Mittelklima mit wenig Dynamik erforderlich) zu.

Raumkonzepte, die sich ohne weiteres mit einem passiven Kühlkonzept verbinden lassen, sind Zellen-, Kombi- und Gruppenbüros (Raumtiefe  $\leq 5$  m, da ansonsten permanent elektrische Beleuchtung erforderlich [DIN V 18599-4:2005-07]). Für Neubauten bestätigen dies die Ergebnisse der Begleitforschung im Rahmen des BMWI Förderkonzepts EnOB [Voss et al., 2006a]. Die Tatsache, dass Zellenbüros weiterhin stark nachgefragt werden, eröffnet der Umsetzung passiver Kühlkonzepte in der Sanierung gute Chancen.

## 3.2 Thermischer Komfort in Gebäuden

Thermischer Komfort beim Menschen wird allgemein als physischer und mentaler Zustand definiert, bei dem „Zufriedenheit mit der thermischen Umgebung herrscht“ (ASHRAE 55-92 zitiert in [Fountain et al., 1996]), sodass keine Motivation besteht, die umgebende Situation zu verändern.

Angeregt wurde die wissenschaftliche Untersuchung des thermischen Komforts durch das Aufkommen der Gebäudeklimatisierung, die eine genaue Definition des Innenraumklimas ermöglichte [Nicol, 2003]. Um mittels der konditionierten Raumbedingungen einen Großteil der Nutzer zufrieden zu stellen, waren Kenntnisse über das Zusammenwirken von Wohlbefinden und Innenraumklima erforderlich.

Zur Bewertung der schwer fassbaren Größe „thermischer Komfort“, wurden verschiedene Modelle entwickelt, die sich vom Ansatz her in stationäre Modelle („Steady-state-models“) und adaptive Komfort-Modelle („adaptive-comfort-models“) unterteilen lassen.

Das wohl bekannteste stationäre Wärmebilanzmodell ist das von P. O. Fanger entwickelte „Predicted-Mean-Vote Model“ (PMV-Modell). Die dazugehörigen Forschungsarbeiten wurden 1970 erstmals publiziert [Fanger, 1970]. Seit den 80er Jahren bildet das Modell die Grundlage für internationale Standards (Europa: CEN ISO 7730, USA: ASHRAE 55).

### 3.2.1 Das PMV-Modell

Die Aussagen zur Wärmebilanz des Menschen basieren auf den Begriffen des „Vorausgesagten mittleren Votums“ („predicted mean vote“, PMV) und des „Vorausgesagten Prozentsatz Unzufriedener“ („percentage of dissatisfied“, PPD). Grundannahme ist dabei, dass das Wärmeempfinden des Menschen abhängig vom thermischen Gleichgewicht seines Körpers im Ganzen ist. Dieses Gleichgewicht wird von zwei körperlichen Parametern, (metabolischer Umsatz als Maß für die physische Aktivität und Wärmeschutzgrad der Bekleidung) und vier umgebungsklimatischen Parametern (Lufttemperatur, mittlere Strahlungstemperatur, Luftgeschwindigkeit und Luftfeuchte), beeinflusst. Die Wahrnehmung eines gegebenen Innenraumklimas ist also stark vom subjektivem Empfinden abhängig. Der dadurch entstehenden Streuung wird durch breiter gefasste Komfortbereiche, dem PMV, Rechnung getragen, die mit einer Aussage über den Unzufriedenheitsgrad, dem PPD, verknüpft sind. Der PPD-Index ist somit ein dem PMV-Index zugeordneter Prozentsatz, der mit dem mittleren Prozentsatz einer größeren Anzahl von Versuchspersonen innerhalb der statistischen Unsicherheit übereinstimmt [Zürcher et al., 2004]. Anhand der sechs Einflussfaktoren kann über die Berechnung des PMV-Index das Wärmeempfinden des Körpers vorausgesagt werden. Der Index bestimmt den zu erwartenden Durchschnittswert für die Klimabeurteilung durch eine große Personengruppe anhand einer 7-stufigen Klimabeurteilungsskala, die von „heiß“ über „neutral“ (als angestrebte Größe) bis „kalt“ reicht. Der PPD-Index prognostiziert den Anteil der Gruppe, der sich wahrscheinlich „zu warm“ oder „zu kalt“ fühlt.

PMV-Bewertung	Klimabeurteilungsskala	Prozentsatz Unzufriedener (PPD)
heiß	+ 3	
warm	+ 2	75
etwas warm	+ 1	25
neutral	0	5
etwas kühl	- 1	25
kühl	- 2	75
kalt	- 3	

**Tab. 3.5:** Klimabeurteilungsskala nach [DIN EN ISO 7730:2006-05].

### Integration des PMV-Modells in Richtlinien

#### *CEN-Bericht CR 1752*

Der Bericht [CR 1752, 1998] stellt Anforderungen an die Innenraumqualität und an die Darstellungsverfahren. Es werden Kategorien festgelegt, die von sehr engen Grenzen (Kategorie A: PPD 6 %) bis zu weiter gefassten Bereichen (Kategorie C: PPD 15 %) reichen (siehe Tab. 3.6). Der Bericht stellt weiter Kriterien für die Auslegung und den Betrieb von raumluftechnischen Anlagen auf.

Anmerkung: Der Bericht stellt eine Empfehlung für die Normungsarbeit dar. Er ist für die einzelnen Mitgliedsländer im Ausschuss nicht verbindlich.

### *EN ISO 7730 und ASHRAE 92-04*

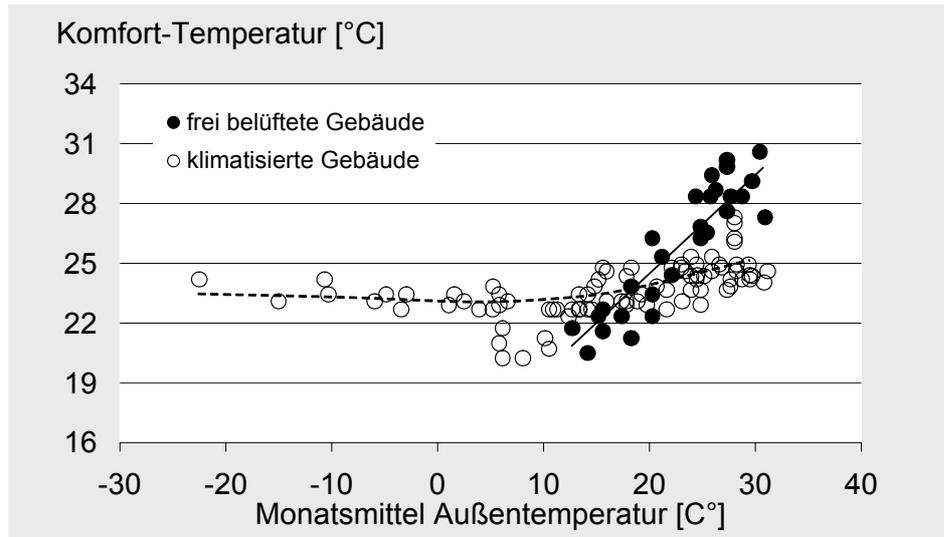
In der Vergangenheit war das PMV-Modell als alleinige Anforderung an das Raumklima in die [DIN EN ISO 7730:1995-09] und damit in zahlreiche nationale europäische Normen, sowie den ASHRAE Standard 55-92 integriert. Die Neufassung der [DIN EN ISO 7730:2006-05] übernimmt den Ansatz der Kategorien aus CEN-Bericht CR 1752 und geht darauf ein, dass es bestimmte Adaptationsprozesse geben kann, die in der Akzeptanz höherer Temperaturen münden. Die Neufassung der ASHRAE 92-04 kombiniert das PMV-Modell und Erkenntnisse des adaptiven Komfortmodells (siehe Kapitel 3.2.5).

### **Bewertung des PMV-Modells**

Aufgrund seiner weiten Verbreitung ist das PMV-Modell durch zahlreiche Studien in verschiedenen Ländern sowohl in Klimakammern als auch in klimatisierten Gebäuden bestätigt worden [Fanger et al., 2002]. Wichtig bei der Bewertung des PMV-Modells zur thermischen Behaglichkeit sind folgende Punkte:

- Gemäß seiner Konzeption kann das Modell nicht dazu dienen, die thermische Behaglichkeit eines Individuums vorherzusagen. Die Prognosen entsprechen den durchschnittlichen Empfindung einer großen Gruppe, die den gleichen klimatischen Bedingungen ausgesetzt ist [Fountain et al., 1996].
- Die Studien von Fanger und weitere Studien im Zusammenhang mit dem PMV-Modell wurden in Klimakammern mit über tausend Testpersonen in mittleren Breitengraden durchgeführt [Fanger et al., 2002].
- die auf dem PMV-Modell basierenden Standards wurden ursprünglich für zentral klimatisierte Gebäude mit stationären Klimabedingungen entwickelt.

Trotz dieser Randbedingungen wird häufig davon ausgegangen, dass das Modell – nicht zuletzt wegen der Größe der Testgruppen - universell auf alle Gebäudetypen, Klimata und Populationen zutreffend ist [Brager et al., 1998]. Diese Übertragbarkeit wird - mit Einschränkungen - bei klimatisierten Gebäuden erfüllt, bei frei belüfteten Gebäuden hingegen verlieren die Vorhersagen des PMV-Modells an Zuverlässigkeit [Humphreys et al., 2002], [Nicol et al., 2002], [Brager et al., 1998]. Diese Ergebnisse bestätigt auch die Auswertung der „ASHRAE RP-884“ Datenbank [De Dear et al., 2002] (Abb. 3.8), die die Bewertung der Komforttemperatur in Abhängigkeit von der Außentemperatur und vom Gebäudetyp in der realen Nutzung darstellt. Wäre das PMV-Modell universell anwendbar, dürfte z. B. kein Unterschied zwischen den Gebäudetypen (schwarze / weiße Punkte) und bei frei belüfteten Gebäuden keine starke Veränderung der Komforttemperatur in Abhängigkeit von der Außentemperatur auftreten.



**Abb. 3.8:** Komforttemperaturen als Funktion der Außentemperatur in frei belüfteten, nicht-gekühlten Gebäuden und in beheizten oder gekühlten Gebäuden. Datengrundlage ist die Auswertung der ASHRAE RP-884 Datenbasis [Nicol et al., 2002]. Die Datenbasis besteht – bereinigt – aus 16.762 einzelnen Komfortbeurteilungen aus drei Gebäudetypen (zentral klimatisiert, hybrid und frei belüftet) in verschiedenen Ländern. Jeder Punkt gibt den Mittelwert einer Untersuchung wieder. Die Daten der RP-884 sind abrufbar unter: [http://aws.mq.edu.au/rp-884/ashrae\\_rp884\\_home.html](http://aws.mq.edu.au/rp-884/ashrae_rp884_home.html)

### Gründe für die Ungenauigkeit des PMV-Modells bei der Vorhersage des thermischen Komforts in nicht klimatisierten Gebäuden

Der folgende Abschnitt fasst Erklärungsversuche der Literatur zur Herkunft der Abweichungen zusammen.

- Modellparameter
  - Ungenauigkeiten, bzw. Abweichungen bei den Annahmen zur Kleidung der befragten Personen [Humphreys et al., 2002]. Der Bekleidungsfaktor in der DIN EN ISO 7730:1995-09 (und DIN EN ISO 7730:2006-05) gibt Kleidung nur während des Ruhezustands des Körpers korrekt wieder, nicht während der Bewegung [Havenith et al., 2002].
  - Unterschätzung der Isolationswirkung des Bürostuhls [Brager et al., 1998].
  - Schwierigkeiten bzw. Ungenauigkeiten bei der Einschätzung der Aktivität und der daraus resultierenden metabolischen Rate (Stress, Anregung bei der Arbeit) [Havenith et al., 2002].
  - Ungenauigkeiten bei der Befragung und den Messungen (örtliche und zeitliche Trennung, auch leichte Abweichungen zählen) [Humphreys et al., 2002], unterschiedliche Einschätzung der real existierenden Temperatur auf der Skala durch differierendes Temperaturempfinden der Befragten [Humphreys et al., 2002].
- Modellannahmen

Statische Wärmebilanzmodelle basieren auf Experimenten in stationären Laborbedingungen. Reale Gebäudebedingungen sind hinsichtlich der thermischen Umgebung und der Nutzeraktivitäten dynamischer [Humphreys et al., 2002].

- **Nicht-thermische Faktoren**  
Die menschliche Reaktion auf die Zustände in einem realen Gebäude wird von weiteren Faktoren beeinflusst, die statische Modelle nicht berücksichtigten. Nach [Brager et al., 1998] können dies demographische Faktoren, der Kontext aus Gebäude, Klima und Jahreszeit, Einwirkungen wie Licht, Akustik und Luftqualität, sowie Wahrnehmung (Erwartungen, Vorlieben) sein.

### 3.2.2 Adaptives Komfort-Modell

Mit der Wahl der Testumgebung (Klimakammer, klimatisiertes Gebäude) liegt den statischen Komforttheorien ein passives Nutzerbild zugrunde. Die klimatischen Bedingungen werden zentral gesteuert und der thermische Komfort wird dem Nutzer als Produkt der Gebäudetechnik [Nicol et al., 2005] angeboten.

Im Gegensatz dazu definiert die adaptive Theorie den thermischen Komfort als Ziel. Sie geht von der Annahme aus, dass der Mensch eine maßgebliche Rolle bei der Schaffung eines ihm behaglichen Klimas einnimmt [Brager et al., 1998]. Dies wird durch Interaktion mit der Umgebung, Verhaltensänderungen oder sogar Anpassung der eigenen Erwartungen an das Klima erreicht.

Die Forschungsarbeiten zur adaptiven Theorie gehen in die 70er Jahre zurück und wurden nach [McCartney et al., 2002] unter anderem durch die Arbeiten von Nicol und Humphreys geprägt [Humphreys, 1978].

Von den Gründen für die Ungenauigkeit des PMV-Modells bei der Vorhersage des thermischen Komforts in nicht klimatisierten Gebäuden wird den nicht-thermischen Faktoren ein hohes Gewicht eingeräumt. Im Folgenden sollen diese genauer betrachtet werden.

#### **Nicht-thermische Faktoren**

Ein zentraler Punkt der adaptiven Hypothese ist die Annahme, dass die Zufriedenheit mit dem Innenraumklima über den Abgleich des thermischen Istzustands mit den eigenen thermischen Erwartungen erreicht wird. Diese Erwartungen setzen sich aus momentanen und vergangenen thermischen Erfahrungen, sowie kulturellen und technischen Praktiken zusammen [Brager et al., 1998].

Der Begriff "Adaptation" beschreibt den folgenden Vorgang: „the gradual diminution of the organism's response to repeated environmental stimulation and [it] subsumes all processes which building occupants undergo in order to improve the 'fit' of the indoor climate to their personal or collective requirements." [Brager et al., 1998], S. 85.

Innerhalb dieser Bandbreite können drei unterschiedliche Adaptationsmodi unterschieden werden

1. Verhaltensanpassungen (Rückkopplung)
2. Physiologische Adaptation (genetische Adaptation oder Akklimatisierung)
3. Psychologische Adaptation (Gewöhnung oder Erwartung)

### *Verhaltensanpassungen (Rückkopplung)*

Die Handlungsspielräume der Nutzer ihre thermische Behaglichkeit aktiv zu beeinflussen umfassen drei Ebenen. Auf der persönlichen Ebene wird eine Anpassung durch die Änderung der persönlichen Variablen (Kleidung, Aktivität) erreicht. Im Bereich des Umfeldes (Gebäudeebene) wird dieses verändert (Fensteröffnung, Heizung) und auf kultureller Ebene werden Parameter wie der Tagesablauf oder die Kleiderordnung den Gegebenheiten angepasst.

Das statische Wärmebilanzmodell berücksichtigt die Verhaltensanpassung über die Kleidungsart, die metabolische Rate und die Luftbewegung in einem einmaligen Vorgang. Im Gegensatz dazu stellt im adaptiven Modell die Verhaltensanpassung einen kontinuierlichen Wechsel zwischen der Reaktion auf thermische Unbehaglichkeit und dem inneren Bewertungsprozess dar.

Die Verhaltensrückkopplung prägt die thermische Behaglichkeit des Menschen maßgeblich. Einen hohen Stellenwert nimmt dabei die Interaktion mit dem Gebäude ein [Brager et al., 1998]. Die Größe des Handlungsspielraums, den ein Gebäude zulässt, wird in der Literatur entweder als ‚adaptive opportunity‘ (Anpassungsmöglichkeit) oder als ‚adaptive constraint‘ (Anpassungsbeschränkung) bezeichnet. Beide werden nach Meinung der Autoren von folgenden Faktoren bestimmt:

- Klima: Gebäude in einem milden Klima offerieren eine größere Bandbreite von Interventionsmöglichkeiten, als Gebäude in extremen Umgebungen (heiß, kalt), die sich gegen das Außenklima abschotten müssen.
- Wirtschaft: Anschaffungs- und Unterhaltskosten von Einrichtungen oder Hilfsmitteln zur thermischen Kontrolle sind maßgeblich für deren Einsatz.
- Gebäudeentwurf: Möglichkeiten und Hemmnisse liegen in der Gebäudehülle (zu öffnende Fenster? Sonnenschutz vorhanden?), im Grundriss (Erreichbarkeit der Fenster, Einzelbüro, Großraumbüro) und in den Klimakontrollsystemen (zentrale Klimatisierung, Zonierung, individuelle Kontrollmöglichkeit).
- Organisatorische und soziale Konventionen: Gibt es eine Kleiderordnung? Arbeiten Angestellte den ganzen Tag an einem festen Ort? Können die Arbeitszeiten dem Klima angepasst werden?

Nach [De Dear et al., 2002] kann man Gebäude bezüglich des in ihnen möglichen Handlungsspielraumes bewerten. Am unteren Ende der Skala steht dabei als Extrem die Klimakammer, in der Kleidung und Aktivität des Probanden festgelegt sind, und von außen Temperatur, Luftfeuchte und – geschwindigkeit eingestellt werden. Eine hohe Rückkopplung zwischen Anpassungshandlung und Gebäude bietet hingegen das Einzelbüro, in dem Kleidung und Aktivität frei wählbar sind und das Umfeld über zu öffnende Fenster bis zur einzelplatzbezogenen Klimaregelung veränderbar ist.

Hinsichtlich der Kontrollmöglichkeiten gilt zu bedenken, dass ihre alleinige Existenz nicht automatisch zu einer höheren Nutzerzufriedenheit führt [Nicol et al., 2002]. Eine aus der Handlung resultierende Wirkung muss erkennbar sein.

### *Physiologische Rückkopplung – Akklimatisation*

Ist der menschliche Körper veränderten thermischen Umweltbedingungen ausgesetzt, so löst diese Exposition Reize aus. Deren graduelle Verringerung wird allgemein als Akklimatisation bezeichnet.

Nach [Brager et al., 1998] lässt sich die physiologische Anpassung in zwei Untergruppen aufteilen.

- Langfristige genetische Anpassung (nicht innerhalb der Dauer eines Menschenlebens)
- Kurzzeitige Akklimatisation innerhalb einiger Tage oder Wochen durch Veränderung des Rahmens des physiologischen Thermoregulationssystems. Bei Versuchen mit körperlicher Arbeit in Hitze dauerte der Akklimatisationsprozess drei oder vier Tage [Brager et al., 1998], der in Kälte währte länger [Höppe, 2002]. Die Bewertung des Komforts vor und nach einer Akklimatisationsphase veränderte sich jedoch kaum [Parsons, 2002]. Bei sitzenden Bürotätigkeiten kann sich die Akklimatisation an Wärme über Wochen erstrecken [Brager et al., 1998].

Die lange Akklimatisationsphase lässt den Schluss zu, dass ihr Einfluss auf die Abweichungen zwischen vorhergesagter und ermittelter thermischer Zufriedenheit gering ist.

Statische Wärmebilanzmodelle berücksichtigen die Akklimatisation nicht, sondern gehen vielmehr von feststehenden „Temperatur Sollwerten“ des Körpers aus.

#### *Psychologische Rückkopplung – Gewohnheit und Erwartung*

Psychologische Adaptation umfasst die Auswirkungen von kognitiven und kulturellen Variablen und beschreibt das Ausmaß, zu dem Gewohnheit und Erwartung die eigene Wahrnehmung und Reaktion auf Sinneswahrnehmungen verändern [Brager et al., 1998].

Bezogen auf die thermische Umgebung bedeutet dies eine veränderte Wahrnehmung oder Reaktion auf das Umfeld, die von thermischen Erwartungen oder Erfahrungen herrührt. Dabei folgt der persönliche Behaglichkeits-Sollwert eines Menschen den – an das Außenklima gekoppelten - Zyklen und Variationen des Innenraumklimas. Eine längerfristige Exposition gegenüber schwankenden klimatischen Bedingungen kann die Toleranz einer größeren Temperaturschwankungsbreite zur Folge haben [Fountain et al., 1996]. Zwischen der Erwartung an ein Klima und der Bewertung der vorhandenen thermischen Umgebung besteht ein starker Zusammenhang. Je nach Erwartungshaltung, Tätigkeit und Persönlichkeit wird ein und dasselbe Klima unterschiedlich bewertet (z. B. Büro, Strand).

Im Gegensatz zum statischen Wärmebilanz Modell sieht das adaptive Modell eine Rückkopplung zwischen den vergangenen und gegenwärtigen thermischen Erfahrungen sowie dem Innen- und Außenklima vor. Diese Erfahrungen schaffen einen Bezugswert, der die Erwartungen an zukünftige thermische Zustände im Gebäude prägt [Fountain et al., 1996]. Da in frei belüfteten, ungekühlten Gebäuden die Innentemperaturen an die Außentemperaturen gekoppelt sind, passen die Nutzer ihre Erwartungen den Gegebenheiten an und sind so dem dynamischen Innenraumklima gegenüber toleranter eingestellt. In klimatisierten Gebäuden prägt ein fester Temperatursollwert die thermische Erfahrung, was in die Erwartung eines uniformen Raumklimas mündet.

Eine Stellgröße der psychologischen Adaptation ist das Maß der persönlichen Kontrolle auf das thermische Umfeld, es beeinflusst den Komfort und die Zufriedenheit signifikant [Nicol et al., 2002]. Paciuk unterscheidet nach [Brager et al., 1998] die verfügbare Kontrolle (Anpassungsmöglichkeit - adaptive

opportunity), die ausgeübte Kontrolle (Verhaltensanpassung - behavioral adjustment) und die wahrgenommene Kontrolle (Erwartung - expectation). Die wahrgenommene Kontrolle erstreckt sich von der Gebäudehülle (Fenster) über die technische Gebäudeausrüstung bis zur Belegungsdichte (mit abnehmender Kontrollwahrnehmung bei hoher Belegungsdichte [Brager et al., 1998]).

Eine Erklärung dafür, dass Nutzer in einem zentral klimatisierten Gebäude bereits Temperaturschwankungen von wenigen Grad kritisch bewerten, liegt an der Gewöhnung an konstante und gleichförmige Bedingungen und der kaum möglichen persönlichen Einflussnahme. Dies bestätigt eine in Nordamerika durchgeführte Studie [Brager et al., 1998]. Der Vergleich der thermischen Zufriedenheit von Nutzern in klimatisierten und nicht klimatisierten Büros zeigt, dass in klimatisierten Gebäuden trotz geringerer thermischer Schwankungen die Nutzer unzufriedener sind und Temperaturen über 24 °C kritischer bewerten, als in frei belüfteten Gebäuden [Brager et al., 1998].

### **Fazit**

Die Frage warum sich der thermische Komfort in nicht klimatisierten Gebäuden mittels des PMV-Modells nur eingeschränkt vorhersagen lässt, kann mit dem Einfluss der Erwartungshaltung und der Existenz adaptiver Prozesse beantwortet werden. In nichtklimatisierten Gebäuden nehmen die Nutzer einen höheren Grad an individueller Einflussnahme auf die Umgebung wahr und gehen bereits in ihrer Erwartungshaltung von möglichen Temperaturschwankungen aus. Daraus resultiert eine weniger kritische Beurteilung der Umgebung.

Der Bereich Verhaltensanpassung ist in seiner Auswirkung auf die Abweichungen nachgeordnet, da er im PMV-Modell durch Kleidung und metabolische Rate – allerdings ohne Rückkopplung - bereits berücksichtigt ist.

Diese Erkenntnisse führten dazu, dass das PMV-Modell unter Rückgriff auf die adaptive Theorie erweitert wurde. Die Umsetzung in praktisch anwendbare Modelle ist Gegenstand des folgenden Abschnitts.

### **3.2.3 Auswirkungen der adaptiven Theorie auf Standards zum thermischen Komfort**

Standards, die auf dem statischen Wärmebilanzmodell beruhen, können auch auf frei belüftete, ungekühlte Gebäude angewendet werden. Sie erwecken dann den Eindruck eines schlechten thermischen Komforts. Einige der bestehenden Standards wurden deshalb überarbeitet, um zu einer angemesseneren Bewertung der frei belüfteten, ungekühlten Gebäude zu kommen. Entweder werden dabei verschiedene Bewertungsklassen vorgegeben, oder die Anforderungen an zentral klimatisierte Gebäude einerseits und frei belüftete, ungekühlte Gebäude andererseits differenziert. Im Folgenden eine Übersicht über die geänderten Standards.

#### **DIN EN ISO 7730:2006-05**

Die internationale Norm [DIN EN ISO 7730:2006-05] hat das Ziel ein Innenraumklima zu definieren, „durch das ein Gefühl thermischer Behaglichkeit erreicht werden soll“. Neben den Klimaempfindungen des ganzen Körpers, die

auf dem PMV-Modell basieren, gibt die Norm Bewertungsmethoden für lokalen Diskomfort vor, der durch Luftzug, asymmetrische Strahlung und Temperaturschichtungen hervorgerufen wird.

Grundgedanke der Neuerung ist es, bei der Beurteilung realer Gebäude drei verschiedene Zielniveaus erlaubter thermischer Unzufriedenheit zuzulassen [Olesen et al., 2002]. Die unterschiedlichen Akzeptanzniveaus berücksichtigen das thermische Befinden (PMV) und lokale thermische Beeinträchtigungen. Für den Winter und den Sommer gibt es unterschiedliche Ausgangstemperaturen. Je nach Kategorie sind unterschiedlich breite Temperaturschwankungen erlaubt. Als Beispiel zeigt Tab. 3.6 die Werte für eine Büronutzung im Sommer.

**Tab. 3.6:** Akzeptanzniveaus am Beispiel von Büroräumen. Kleidung Sommer / Winter: 0,5 / 1,0 clo, Aktivität: 1,2 met [DIN EN ISO 7730:2006-05] Die Angaben entsprechen den Klassen des CEN-Berichts CR 1752  
Verwendete Abkürzungen: S = Sommer, W = Winter

Kategorie	PMV	PPD	Operative Temperatur S	Operative Temperatur W	Durchschnittliche Luftgeschwindigkeit S
		(%)	(°C)	(°C)	(ms <sup>-1</sup> )
A	-0,2 < PMV < +0,2	< 6	24,5 ± 1,0	22,0 ± 1,0	0,12
B	-0,5 < PMV < +0,5	< 10	24,5 ± 1,5	22,0 ± 2,0	0,19
C	-0,7 < PMV < +0,7	< 15	24,5 ± 2,5	22,0 ± 3,0	0,24

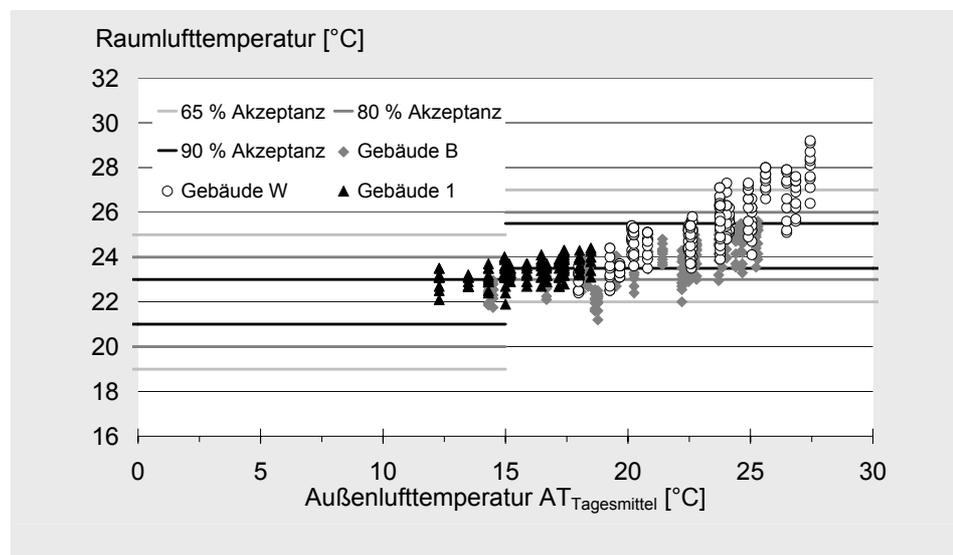
**Abb. 3.9:** Anwendung der DIN EN ISO 7730:2006-05 auf Gebäude W (28.07 – 25.08.2004), Gebäude B (10.07. – 18.08.2004) und Gebäude 1 (15.06. – 05.07.2004). Gebäudebeschreibung, siehe Kap. 7 und 2). Datenermittlung: Die Raumlufttemperatur (der Standard sieht die operative Raumtemperatur vor) wurde für jeden Raum einzeln an allen Arbeitstagen (8 bis 18 Uhr) ausgewertet und aus den Einzelauswertungen der Median für jede Stunde errechnet.  
Anmerkung: Wegen der unterschiedlichen Messperioden und Standorte ist ein Vergleich der Gebäude *untereinander* nicht möglich.

Bei Gebäude W steigt mit zunehmender Außentemperatur auch die Überschreitungshäufigkeit an. Der Akzeptanzbereich von 65 % wird häufig überschritten.

Bei Gebäude B sind aufgrund der aktiven Kühlung die Überschreitungen etwas schwächer. Da die Kühlung bei hohen Außentemperaturen mehr Wärme abführt, treten Unterschreitungen allerdings oft auf. Gebäude 1 liegt bezüglich der Außentemperatur im Übergangsbereich zwischen Sommer und Winter. Über- und Unterschreitungen sind eher selten.

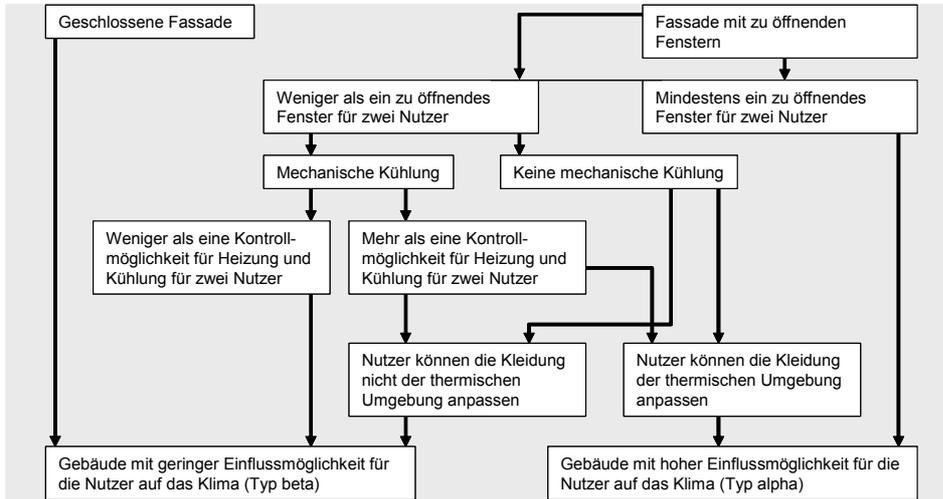
Im Vorschlag für die Norm [Olesen et al., 2002] war die Einordnung von frei belüfteten, ungekühlten Gebäuden in die Klasse C explizit erwähnt, in der Norm selber ist dies offen (mit dem Hinweis auf lokale oder nationale Prioritäten, technische Entwicklungen und Klimaregionen). Für die Betrachtung des thermischen Komforts über einen längeren Zeitraum und zum Vergleich verschiedener Varianten schlägt die Norm fünf Verfahren vor, die von der Aufsummierung der Überschreitungsstunden bis hin zur Bildung von Wichtungsfaktoren reichen.

In der Norm bleibt ungeklärt, ab welcher Außentemperatur von Sommer gesprochen werden kann. Im Auswertungsbeispiel (Abb. 3.9) wurde die Grenze bei einem Tagesmittel von 15 °C gezogen. Treten an Tagen mit einem niedrigeren Mittel im Raum hohe Temperaturen auf, so können diese abgelüftet werden.



**Niederlande – Publication 74 „Thermische Behaaglijkheid“ (im weiteren „ATG-NL“ Adaptive Temperature Limits)**

Grundsätzlich wird in der ATG-NL zwischen Gebäuden mit einem hohen (Typ „alpha“) und Gebäuden mit einem geringen Grad an Einflussmöglichkeit (Typ „beta“) der Nutzer auf das Innenraumklima unterschieden [Publication 74, 2004]. Die Kriterien für die Unterscheidung zeigt Abb. 3.10.



**Abb. 3.10:** Kriterien für die Unterscheidung von Gebäuden mit einer hohen und Gebäuden mit einer niedrigen Einflussnahme-möglichkeit für die Nutzer. Quelle: [van der Linden et al., 2006]

Für beide Gebäudetypen gibt es jeweils drei Komfortklassen, die als Grenzen für die operative Temperatur definiert sind. Die unterschiedlichen Temperaturbereiche werden über die „neutrale Temperatur“ ( $T_{a,ref}$ ) berechnet, in die das gleitende Mittel der Außentemperatur einfließt. Das gleitende Mittel berücksichtigt die Temperaturen der vergangenen drei Tage vor dem Berechnungstag und wird nach (F 3.1) berechnet. Die Gewichtungen der Außentemperatur gehen auf ausgewertete Feldstudien, z. B. [Morgan et al., 1994], zurück. Tab. 3.7 zeigt die „neutralen Temperaturen für beide Gebäudetypen und die unterschiedlichen Komfortklassen.

$$T_{a,ref} = \frac{1 * T_{a,heute} + 0,8 * T_{a,heute-1} + 0,4 * T_{a,heute-2} + 0,2 * T_{a,heute-3}}{1 + 0,8 + 0,4 + 0,2} \quad \text{F 3.1}$$

Komforttemperatur Klasse	Gebäudetyp „alpha“	Gebäudetyp „beta“
A 90 % Akzeptanz	Für $T_{a,ref} > \text{ca. } 12 \text{ }^\circ\text{C}$ : $T_{oper} < 20,3 + 0,31 * T_{a,ref}$ Für $T_{a,ref} < \text{ca. } 12 \text{ }^\circ\text{C}$ : $T_{oper} < 22,7 + 0,11 * T_{a,ref}$	$T_{oper} < 22,7 + 0,11 * T_{a,ref}$
B 80 % Akzeptanz	Für $T_{a,ref} > \text{ca. } 11 \text{ }^\circ\text{C}$ : $T_{ope} < 21,3 + 0,31 * T_{a,ref}$ Für $T_{a,ref} < \text{ca. } 11 \text{ }^\circ\text{C}$ : $T_{oper} < 23,45 + 0,11 * T_{a,ref}$	$T_{oper} < 23,45 + 0,11 * T_{a,ref}$
C 65 % Akzeptanz	Für $T_{a,ref} > \text{ca. } 10 \text{ }^\circ\text{C}$ : $T_{oper} < 22,0 + 0,31 * T_{a,ref}$ Für $T_{a,ref} < \text{ca. } 10 \text{ }^\circ\text{C}$ : $T_{oper} < 23,95 + 0,11 * T_{a,ref}$	$T_{oper} < 23,95 + 0,11 * T_{a,ref}$

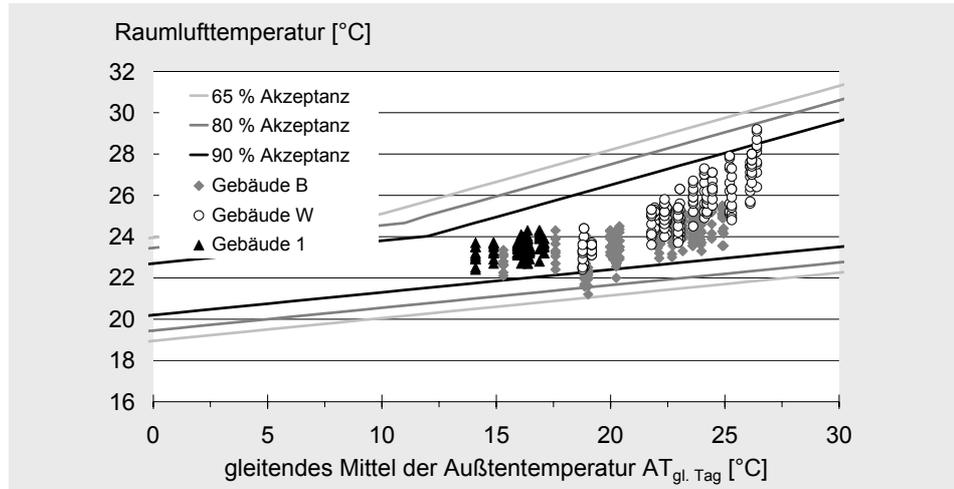
**Tab. 3.7:** Komfortklasse für Gebäudetyp alpha und Gebäudetyp beta nach [van der Linden et al., 2006]. Datengrundlage für die Bestimmung der Komfortgrenzen war die ASHRAE Datenbank RP-884 (weitere Informationen siehe Abb. 3.8). Die Angaben gelten für eine physische Aktivität im Bereich von 1,0 bis 1,4 met und einen Wärmeschutzgrad der Bekleidung zwischen 0,5 und 1,0 clo. Verwendete Abkürzungen:  $T_{oper}$  = Operative Raumtemperatur,  $T_{a,ref}$  = Referenztemperatur

Das Gebäude wird als gut eingestuft, wenn die operative Raumtemperatur innerhalb des 90-Prozent-Akzeptanzbereichs liegt, als mäßig, wenn die Temperaturen zwischen der 90 und der 80 % Akzeptanzlinie liegen und als schlecht, wenn die Spannweite bis zum 65-Prozent-Akzeptanzbereich reicht.

Anhand der Stunden der Gebäudenutzungszeit, während denen die „neutrale Temperatur“ überschritten wird, können Gebäude bewertet werden.

**Abb. 3.11:** Anwendung der ATG-NL auf Gebäude W, Gebäude B und Gebäude 1. Messperiode, Datenermittlung und Anmerkung: Siehe Abb. 3.9.

Bei Gebäude W werden bei steigender Außentemperatur die Komfortgrenzen überschritten. Gebäude B weist wegen der Kühlung keine Über-, sondern Unterschreitungen auf. Bei Gebäude 1 sind die Außentemperaturen kühl, daher treten auch hier keine Überschreitungen auf.



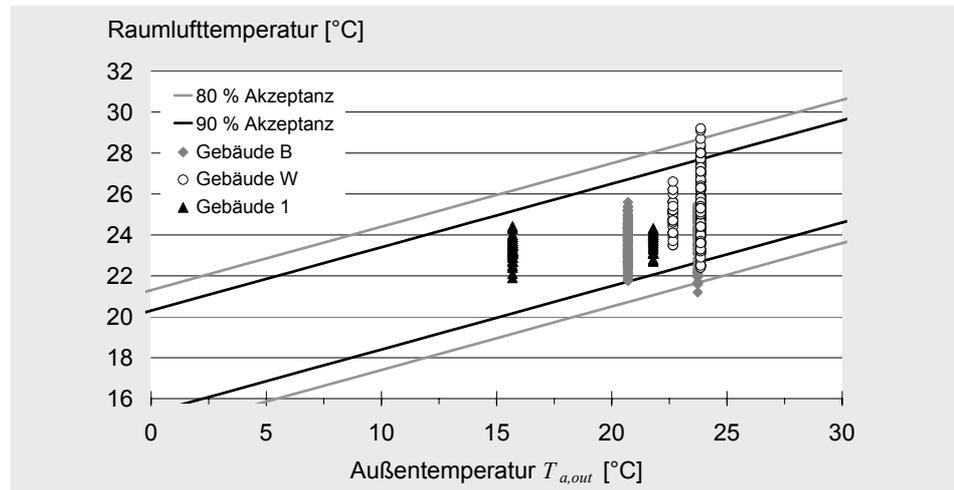
**Abb. 3.12:** Anwendung des Standards ASHRAE 55:04 auf Gebäude W, Gebäude B und Gebäude D. Messperiode, Datenermittlung und Anmerkung: Siehe Abb. 3.9.

Gebäude W über- und unterschreitet die Anforderungen des Standards. Zu beachten ist hier, dass die Werte im Juli ( $T_{a,out}$  22,7 °C) nur wenige Tage wiedergeben und somit die Werte für August ( $T_{a,out}$  23,9 °C) repräsentativer sind. Bei Gebäude B ist bei hohem Monatsmittel der Außentemperatur ( $T_{a,out}$  23,7 °C) aufgrund der Kühlung eher die Tendenz zu Unterschreitungen sichtbar.

Kühle Außentemperaturen führen bei Gebäude 1 zu einem niedrigen Mittelwert für die Außentemperatur im Monat Juni ( $T_{a,out}$  15,7 °C), daher treten auch keine Überschreitungen auf. Die Werte für Juli ( $T_{a,out}$  21,8 °C) gelten nur für drei Tage.

### ASHRAE-55:04 – Thermal environmental conditions for human occupancy

Die Neufassung [Standard 55-2004] wurde parallel zur ISO 7730:2005 erarbeitet und führt den adaptiven Komfort Standard (ACS) ein, der den thermischen Komfort in frei belüfteten Gebäuden anhand der Außentemperatur ermittelt und höhere Innenraumtemperaturen zulässt. Wegen der Datenzugänglichkeit wird den Berechnungen das Monatsmittel der Außentemperatur (arithmetisches Mittel aus den Tageshöchst- und Tagesniedrigsttemperaturen) zu Grunde gelegt [De Dear et al., 2002].



Die ideale Komforttemperatur wird folgendermaßen berechnet, die Herleitung und Begründung der Formel findet sich in [De Dear et al., 2002]:

$$T_{comf} = 0,31T_{a,out} + 17,8 \quad \text{F 3.2}$$

Dabei sind  $T_{comf}$  die Komforttemperatur und  $T_{a,out}$  das Monatsmittel der Außentemperatur. Der Komforttemperatur wurde auf Grundlage von Nutzerbefragungen (Datenbank RP-884) eine Bandbreite von Temperaturen

zugeordnet, die eine thermische Akzeptanz von 80 (7 K) bis 90 % (5 K) aufweisen.

Der ACS gilt für eine Außentemperatur von 10 bis 33 °C und kann unter folgenden Bedingungen angewendet werden:

- Frei belüftete Bereiche, in denen die thermischen Zustände hauptsächlich durch die Nutzer (Fenster öffnen) geregelt werden (adaptive opportunity).
- Es darf keine Klimaanlage geben, ist eine Heizung installiert, tritt der Standard für die Heizperiode außer Kraft.
- Bei Einsatz einer ventilatorgestützten Be- und Entlüftung muss zugleich die Möglichkeit zum Fensteröffnen bestehen.
- Die Nutzer sollten hauptsächlich sitzende Tätigkeiten ausüben (1,0 -1,3 met) und an keine Kleiderordnung gebunden sein.

Für klimatisierte Gebäude gibt es analog zur ISO 7730:2005 drei verschiedene Zielniveaus.

### DIN EN 15251:2005-07

Der Vorschlag für die [DIN EN 15251:2005-07] legt die Kriterien zur Kurz- und Langzeit-Bewertung des Innenraumklimas (z. B: thermisches Raumklima, Raumluftqualität, Beleuchtung und Lärm) fest und enthält Angaben dazu, wie diese zu verwenden sind die Anforderungen der Europäischen Richtlinie zur Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden [2002/91/EG] zu erfüllen. Bezüglich des thermischen Raumklimas bezieht die Norm die jüngsten Erkenntnisse der Komfortforschung mit ein.

Die Norm unterscheidet zwischen frei belüfteten, nicht gekühlten Gebäuden und solchen mit thermodynamischer Luftbehandlung. Die Anforderungen an das thermische Raumklima in frei belüfteten Gebäuden entsprechen für die Klasse A und B denen der ASHRAE-55:2004. Abweichend kommt hier die Begrenzung für die Klasse C hinzu.

Kategorie	PMV	PPD	Obere Grenze warme Jahreszeit	Untere Grenze warme Jahreszeit
		(%)		
A	-0,2 < PMV < +0,2	< 6	$T_{i, \max} = 17,8 + 2,5 + (0,31 T_o)$	$T_{i, \min} = 17,8 - 2,5 + (0,31 T_o)$
B	-0,5 < PMV < +0,5	< 10	$T_{i, \max} = 17,8 + 3,5 + (0,31 T_o)$	$T_{i, \min} = 17,8 - 3,5 + (0,31 T_o)$
C	-0,7 < PMV < +0,7	< 15	$T_{i, \max} = 17,8 + 4,2 + (0,31 T_o)$	$T_{i, \min} = 17,8 - 4,2 + (0,31 T_o)$

**Tab. 3.8:** Akzeptanzniveaus für Aufenthaltsräume ohne mechanische Kühlanlagen nach [DIN EN 15251:2005-07]. Kleidung frei variabel zwischen 0,5 und 1,0 clo, Aktivität: 1,2 bis 1,6 met. Verwendete Abkürzungen:  $T_i$  = annehmbare Innenraumtemperatur  $T_a$  = mittlere monatliche Außentemperatur (°C)

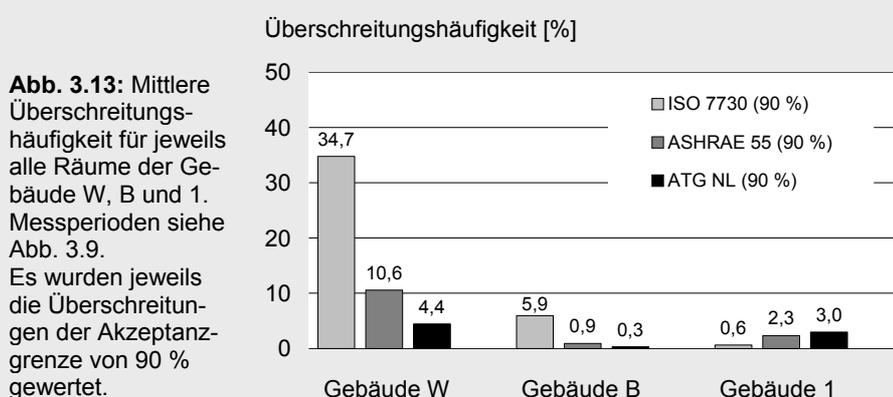
Anmerkung: Der Normenvorschlag „verlangt [...] nicht die Anwendung bestimmter Kriterien. Dies obliegt nationalen oder individuellen Projektfestlegungen“. Praktisch bedeutet dies eine Koexistenz von einerseits dem Monatsmittel (ASHRAE Standard 55 und DIN EN 15251:2005-07) und andererseits dem gleitenden Mittel (ATG-NL) als Bezugswert. Es besteht zwar keine juristische, jedoch eine wissenschaftlich, logische Notwendigkeit für eine Entscheidungsfindung. Im Rahmen dieser Arbeit wird das gleitende Mittel als geeignet betrachtet, da der Zeitraum von drei Tagen als Bezugswert für das thermische Komfortempfinden plausibler erscheint, als die Datumsgrenze von vier Wochen.

### Infobox 3.1: Vergleich der Standards untereinander

Da die Messperioden der drei Gebäude unterschiedlich lang waren und zu abweichenden Zeiten gemessen wurde, können die Gebäude nicht untereinander verglichen werden. Möglich ist aber ein Vergleich der unterschiedlichen Standards anhand der Gebäude (Abb. 3.13). Es wurden jeweils die Akzeptanzniveaus von 90 % gewählt. Der Unterschied der Standards liegt im Bezug auf die Außentemperatur.

Während die DIN EN ISO 7730:2006-05 keine speziellen Anforderungen an ungekühlte Gebäude stellt, unterscheiden die ASHRAE 55 und die ATG-NL zwischen gekühlten und ungekühlten Gebäuden. Nimmt man Gebäude W als Beispiel (Gebäude B ist gekühlt und Gebäude 1 auf Grund der niedrigen Außentemperaturen nur begrenzt repräsentativ), so zeigt sich, dass den Forderungen der DIN EN ISO 7730:2006-05 nur begrenzt entsprochen werden kann und die ASHRAE 55 und die ATG-NL dem frei schwingenden Raumklima der Gebäude besser entgegenkommen.

Im Vergleich sind die Anforderungen der ASHRAE-55 strenger als die der niederländischen Richtlinie (unterschiedliche Definitionen der Bezugsaußentemperatur), damit liegen nach ASHRAE 55 mehr Stunden außerhalb des Komfortbereiches als nach der ATG-NL.



Interpretation von Abb. 3.13: Die DIN EN ISO 7730:2006-05 wird (besonders von Gebäude W) häufig überschritten. Sie stellt Forderungen an die Raumtemperatur, die von der Außentemperatur unabhängig sind.

Die ASHRAE 55 und die ATG-NL beziehen die reale Außentemperatur in die Formulierung der Komfortbereiche mit ein und differenzieren zwischen gekühlten und nicht gekühlten Gebäuden. Das ungekühlte Gebäude W vermag den Anforderungen beider Richtlinien besser zu entsprechen.

Wertet man zusätzlich zu den Überschreitungen auch die Unterschreitungen (hier nicht dargestellt), so zeigt sich, dass den Richtwerten aller Normen um einiges schlechter nachgekommen wird. Der Grund sind die Definitionen der Standards, die eine Raumlufttemperatur von 20 °C im Sommer als kühl werten.

Anmerkung: Die Unterschreitung der Komforttemperatur kann in Gebäuden mit einem hohen Nutzereinfluss durch den Nutzer ausgeglichen werden, da im Sommer Wärmequellen zur Verfügung stehen. Es werden daher nur Überschreitungen gewertet.

### 3.2.4 Bedeutung der Forschungsergebnisse für die Praxis und Sanierungen ohne aktive Kühlung

Der folgende Abschnitt fasst die wichtigsten Punkte zusammen:

- Die Erweiterung des PMV-Modells mit den Erkenntnissen der adaptiven Theorie in Normen [DIN EN ISO 7730:2006-05], [Publication 74, 2004], [Standard 55-2004], [DIN EN 15251:2005-07] stellt für die Planung nicht klimatisierter Gebäuden eine geeignete Bewertungsgrundlage dar. Eine besonders differenzierte Betrachtung erlaubt die ATG-NL über die Ankopplung des Raumklimas an das gleitende Außentemperaturmittel der vergangenen drei Tage. Die ATG-NL wird daher innerhalb dieser Arbeit als

Bewertungsinstrument verwendet. Das Konzept der ASHRAE-55-04 eignet sich aufgrund des Temperaturmonatsmittels als Bezugswert für die Innentemperatur gut für die Betrachtung längerer Zeiträume.

- Bei der Anwendung der oben genannten Normen geht es nicht darum, ein mangelhaftes sommerliches Raumklima durch Berechnungen zu beschönigen. Ein unzulängliches Raumklima bildet sich auch bei einer Berechnung mit den genannten Normen ab. Dies bestätigen Bewertungen auf der Grundlage von Messtemperaturen, die im Rahmen der Begleitforschung des Förderkonzepts EnOB durchgeführt wurden [Voss et al., 2006b].
- Die adaptive Theorie gilt nicht als Freibrief für höhere Innentemperaturen. Eine Akzeptanz der Nutzer ist nur bei äußerst sorgfältiger Planung und unter der Voraussetzung von Verhaltensanpassungen auf allen drei Ebenen (persönliche, Umfeld- und kulturelle Anpassungen) zu erreichen.
- In gekühlten Gebäuden könnte ein an die Außentemperatur gekoppelter Sollwert für die Innentemperatur bei gleichem Wohlbefinden der Nutzer Energieeinsparungen bewirken.
- Für die Sanierung von Bestandsgebäuden mit passiven Kühlungskonzepten gilt, dass die Gebäude den Nutzern einen möglichst hohen Grad der Umfeld Anpassung (adaptive opportunity) ermöglichen sollten.
- Anpassungsmöglichkeiten im Gebäudebetrieb – Reaktion auf Hitzeperioden In einem ungekühlten Gebäude sollte – mindestens bei Hitzeperioden - die persönliche Anpassung der Nutzer erweitert werden. Dies könnte durch eine liberal angepasste Kleiderordnung geschehen und durch eine flexible Regelung der Arbeitszeiten, die den Arbeitnehmern bei besonders hohen Temperaturen mehr Gestaltungsfreiheiten bei den Arbeitszeiten (z. B. lange Mittagspause) zugesteht.

### **Infobox 3.2: Leistungsfähigkeit im Zusammenhang mit Temperatur – Exkurs**

Dieser Bereich ist - besonders im Zusammenhang mit Bürotätigkeiten bislang wenig erforscht. Forschungsergebnisse aus dem Gebiet der Industriearbeit lassen sich aufgrund der Anforderungsunterschiede nicht übertragen. Bei Untersuchungen im Bereich von nichtkörperlicher Arbeit fehlt die Differenzierung zwischen Wissens- und Routinearbeit.

Häufig zitiert wird [Wyon, 1986], der ein Nachlassen der Produktivität bei hohen Temperaturen (13 % Leistungsminderung bei 26 °C gegenüber 23 °C) nachwies. Testumgebung war eine Klimakammer. Eine Übertragung auf nicht klimatisierte Gebäude ist daher fragwürdig.

In [Seppänen et al., 2005] werden die Ergebnisse von 150 Leistungstests aus 26 Studien in wechselnden Umgebungen zusammengefasst. Danach sind bis 20 °C Leistungssteigerung zu verzeichnen, ab 23 °C Leistungsminderungen (10 % Leistungsminderung bei 30 °C gegenüber 21,6 °C). Eine Zunahme der Müdigkeit ab Temperaturen von 33 °C im Vergleich zu Temperaturen von 25 und 28 °C wurde in Call Centern beobachtet [Tanabe, 2005].

Untersuchungen des Forschungsprojektes SCATs [Nicol et al., 2000] zeigten, dass zwischen der selbstbewerteten Produktivität und der gemessenen Lufttemperatur kein Zusammenhang besteht. Allerdings ließ sich eine Verbindung zwischen der bewerteten Temperatur (also der thermischen Behaglichkeit) und der Produktivität nachweisen. Dass die selbstbewertete Produktivität signifikant mit der verfügbaren und wahrgenommenen Anpassungsmöglichkeit der klimatischen Raumparameter verknüpft ist, weisen [Leaman et al., 1999] nach. Ein Überblick und weitere Untersuchungen zu diesem Thema findet sich auch in [Hellwig, 2005].

### 3.3 Normative Anforderungen an die – sommerliche - Raumtemperatur

Einen Überblick über die in den nachfolgenden Abschnitten beschriebenen Normen und Anforderungen gibt Tab. 3.9. Die Besonderheiten und Ausnahmen in Bezug auf die Anforderungen an die Raumtemperatur sind in den jeweiligen Unterabschnitten beschrieben.

Die Bewertung der Normen hinsichtlich einer Eignung für die Beurteilung passiv gekühlter Gebäude geht aus den Ergebnissen von Abschnitt 3.2.3 und 3.2.4 hervor.

#### 3.3.1 Sommerliche Temperaturen in der europäischen Normgebung

Nur wenige Länder stellen normative Anforderungen an den thermischen Komfort im Sommer. Allerdings werden häufig bauphysikalische Kriterien genannt, die angenehme sommerliche Temperaturen gewährleisten sollen (aber nicht garantieren können). Bei der Berücksichtigung der sommerlichen Temperaturen lassen sich nach [Visier et al., 2004] prinzipiell folgende Vorgehensweisen unterscheiden, die zum Teil auch miteinander kombiniert werden:

- Empfehlungen oder verpflichtende Anforderungen an Sonnenschutz, Belüftung, Glasflächenanteil, Verglasungsart, sowie die thermische Masse sollen überhöhte Temperaturen vermeiden. Selten sind auch Temperaturgrenzen Inhalt der Norm.
- Berechnungen oder Abschätzungen von Heiz- und Kühllast, Komforttemperatur und Zeitkonstante.

In den meisten Ländern wird eine Kombination aus Empfehlung und Forderungen angewendet. Weitere Details siehe Anhang (Info A3.3.1-1).

**Tab. 3.9:** Überblick über Normenwerke und Richtlinien mit Bezug auf die – sommerliche – Raumtemperatur. Anmerkung zur DIN 1946-2:1994-01: diese Norm ist nicht mehr gültig und wurde durch die DIN EN 13779:2005-05 ersetzt. Verwendete Abkürzungen: RT = Raumtemperatur, „offen“ = nicht explizit definiert ob für gekühlte oder nicht gekühlte Räume

	Berücksichtigung adaptive Theorie?	Nationaler Geltungsbereich	Anforderung an RT mit / ohne Kühlung	Eignung für Beurteilung passiv gekühlter Gebäude?
EN ISO 7730:2005	ja	EU	offen	ja
DIN EN ISO 7730:2006	ja	D	offen	ja
ASHRAE 55:04	ja	USA	nein / ja	ja
DIN EN 15251:2005-07	ja	EU	ja / ja	ja
ATG-NL, 2004	ja	NL	ja / ja <sup>1</sup>	ja
SIA 180:1999	nein	CH		-
DIN EN 13779:2005-05	nein	D	ja / nein	-
DIN 1946-2:1994-01	nein	D, ersetzt	ja / <sup>4</sup>	-
SIA V 382/1:1992 SIA V 382/2:1992	nein	CH	ja / ja <sup>5</sup>	-
ASR 6 (2001)	nein	D	offen	-
Arbeitsstättenverordnung	nein	A	ja / offen	-
VDI 2078	nein	D <sup>2</sup>	ja / nein	-
DIN 4108-2:2003-07	nein	D	ja <sup>3</sup> / ja	-
ÖNORM B 8100-3	nein	A	offen	-

<sup>1</sup> = differenzierte Verfahren

<sup>2</sup> = Planungshilfe

<sup>3</sup> = Formulierung lässt indirekt Überschreitung zu

<sup>4</sup> = Nicht explizit verneint. Die Norm galt für Räume mit RLT-Anlagen mit den „notwendigen thermodynamischen Behandlungsfunktionen“

<sup>5</sup> = gleich

### 3.3.2 Normen im Bereich des thermischen Komforts

#### Durch die adaptive Theorie beeinflusste Normen

EN ISO 7730:2005 (EU)

ASHRAE 55:04 (USA)

DIN EN 15251:2005-07

ATG-NL, 2004 (NL)

siehe Abschnitt 3.2.3

#### Normen auf alleiniger Grundlage des PMV-Modells

SIA 180:1999 Wärmeschutz im Hochbau (CH)

Neben dem Wärmeschutz im Winter und im Sommer sowie der Lüftung behandelt diese Norm den thermischen Komfort in Gebäuden.

Die Grundlagen zur Ermittlung der thermischen Behaglichkeit entsprechen - noch - denen der alten DIN EN ISO 7730:1995-09. Zulässig ist eine maximale thermische Unzufriedenheit von 10 %. Dazu können weitere 10 % kommen, die durch lokale Beeinträchtigungen aufgrund von Zugluft, asymmetrischer Strahlung und Temperaturschichtungen hervorgerufen werden. Die Anwendung der Norm auf Gebäude B ist im Anhang unter Abb. A3.3.2-1 dargestellt.

**Tab. 3.10:** Grenzwerte für die thermische Behaglichkeit nach [SIA 180, 1999], bei leichter Tätigkeit (met: 1,2).

Jahreszeit	Raumtemperatur	Temperaturdifferenz Boden	Temperatur Boden	Luftgeschwindigkeit	Raumluftfeuchte
	(°C)	(K)	(°C)	(m/s)	(%)
Heizbetrieb	19-24	< 3	19-26	< 0,15	min. 30
Sommerbetrieb	23,5-26,6*	< 3	19-26	< 0,2	max. 65

\* = außer an Hitzetage, an denen das Stundenmittel der Außentemperatur 30 °C übersteigt.

#### Nicht normative „Behaglichkeitsdiagramme“ in der Literatur

In der Fachliteratur zur Gebäudetechnik, z. B. [Pistohl, 1998], finden sich teilweise sogenannte „Behaglichkeitsfelder“, die den Zusammenhang zwischen Raumlufttemperatur, Raumluftfeuchte und der „Behaglichkeit“ darstellen. Dass diese Kennfelder nicht – wie durch die Bezeichnung nahegelegt – im Zusammenhang mit der neueren Komfortforschung zu verstehen und anzuwenden sind, wird im Anhang (Info A3.3.2-1) durch eine Literaturstudie belegt.

### 3.3.3 Normen im Bereich Raumtemperatur mit aktiver Kühlung

DIN EN 13779:2005-05 „Lüftung von Nichtwohngebäuden“

Diese Norm ersetzt die DIN 1946-2:1994-01. DIN 1946-2:1994-01 galt für RLT-Anlagen in Nichtwohngebäuden. In Ermangelung anderer Richtwerte wurde sie jedoch auch zur Beurteilung von frei belüfteten Gebäuden herangezogen (siehe Kap. 3.4). Bei Außentemperaturen  $\leq 26$  °C sollte die örtliche

Raumlufttemperatur 25 °C - mit kurzzeitigen Ausnahmen bis 26 °C nicht überschreiten. Bei Außentemperaturen  $\geq 26$  °C durfte die Raumtemperatur ansteigen. Bezug für die Raumtemperatur war immer die momentane Außenlufttemperatur. Die Nachfolgenorm DIN EN 13779:2005-05 gilt für Nichtwohngebäude und definiert Auslegungswerte für die operative Temperatur in Bürogebäuden ausdrücklich nur für den Winterbetrieb mit Heizung und den Sommerbetrieb mit Kühlung (Tab. 3.11).

SIA V 382/1:1992 „Technische Anforderungen an Lüftungstechnische Anlagen“ und SIA V 382/2:1992 „Kühlleistungsbedarf von Gebäuden“ (CH)

Teil 2 beschreibt ein Verfahren zur Kühllastberechnung [SIA V382/2, 1992]. Abhängig von der Außentemperatur werden für Räume mit RLT-Anlagen Auslegungstemperaturen und Grenzen des Betriebsbereichs vorgegeben (Teil 1). Im späteren Betrieb des Gebäudes mit einer Lüftungsanlage mit Kühlung oder einer Klimaanlage darf der Betriebsbereich nicht überschritten werden. Zur Auslegung gelten die maximalen Stundenmittel des jeweiligen Tages. Die Anwendung der Norm auf Gebäude B ist im Anhang unter A3.3.3-1 dargestellt.

**Tab. 3.11:** Raumlufttemperaturen (RT), bei leichter körperlichen Tätigkeit (met: 1,2) im Winter und im Sommer nach [DIN EN 13779:2005-05] und [SIA V382/1, 1992].

Winterbetrieb: Nach [SIA V382/1, 1992] und [DIN EN 13779:2005-05] Zeiträume mit Heizung.

Sommerbetrieb: Nach [SIA V382/1, 1992] Zeiträume ohne Heizung und nach [DIN EN 13779:2005-05] Zeiträume mit Kühlung.

Abweichend wird in [DIN EN 13779:2005-05] der Planungswert als „Standardwert für die Auslegung“ und der Betriebsbereich als „üblicher Bereich“ bezeichnet.

Jahreszeit		Winterbetrieb		Sommerbetrieb	
		SIA V 382/2	DIN EN 13779:2005-05	SIA V 382/2	DIN EN 12779:2005-05
Isolationswert der Kleidung	(clo)	1,0	1,0	0,5	0,5
Planungswert RT	(°C)	20	21	26	26
Betriebsbereich RT	(°C)	19-24	19-24	22-28*	23-26

\* = Während Hitzetagen (Stundenmittel der Außentemperatur  $> 30$  °C) darf die Raumlufttemperatur während der Nutzungszeit auf über 28 °C ansteigen.

Anmerkung:

Die Notwendigkeit für den Einbau einer Kühlung muss gemäß [SIA V382/3, 1992] über einen Bedarfsnachweis begründet werden, wenn pro Gebäude mehr als 50 kW<sub>th</sub> Leistung benötigt wird. Dabei muss trotz Erfüllung baulicher Anforderungen (Speichermasse  $\geq 350$  kg/m<sup>2</sup><sub>NGF</sub>, g-Wert Sonnenschutz  $< 15$  %) ein Kühlungsbedarf nachgewiesen werden. Dieser besteht bei hohen internen Lasten und wenn eine Überschreitung von 30 Kh/a (Kh = Kelvinstunden, Bezug 28 °C, ohne Hitzetage) auftritt. Der Nachweis kann auch über den Einsatz einer Anlage geführt werden, deren Gesamtenergiebedarf geringer ist als der einer guten Vergleichsanlage ohne Kühlung.

### 3.3.4 Sonstige Anforderungen an die Raumtemperatur

Arbeitsstätten-Richtlinie Raumtemperaturen, ASR 6 „Raumtemperaturen“ (2001)

Die Arbeitsstättenverordnung [ArbStättV, 2004] verweist auf die Arbeitsstättenrichtlinien, die auch Anforderungen an die Temperaturen [ASR 6, 2001] formulieren. Neben allgemeinen Vorgaben für die Strahlungstemperaturen und Forderungen nach „wirksamen

Sonnenschutzvorrichtungen“, legt Absatz 3.3 fest, dass die Raumlufttemperatur 20 °C nicht unter- und 26 °C nicht überschreiten soll, in nicht näher definierten Ausnahmefällen aber höher sein darf.

#### *Arbeitsstättenverordnung (A)*

Bei Arbeiten mit geringer körperlicher Belastung sollte nach [AStV, 2003] § 28 (1) die Lufttemperatur im Arbeitsraum zwischen 19 und 25 °C betragen. Bei einer Lüftungsanlage mit oder ohne thermischer Behandlungsfunktion sind 25 °C „möglichst nicht“ zu überschreiten. Bei freier Lüftung sind alle Maßnahmen zur Temperaturabsenkung auszuschöpfen.

#### *VDI 2078*

Hier wird ein Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Kühlleistung für Räume und Gebäude vorgestellt. Es gibt ein Kurzverfahren mit definierten Randbedingungen und ein - flexibleres - EDV-Verfahren. Die Berechnung der Kühlleistung legt bei Außentemperaturen zwischen 29 °C und 33 °C (je nach Klimazone) eine Raumtemperatur von 22 °C zugrunde [VDI 2078, 1996].

### **3.3.5 Bauphysikalische Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz**

#### *DIN 4108-2:2003-07*

Vor dem Hintergrund der Ressourcenschonung wird von der Energieeinsparverordnung<sup>8</sup> der Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes nach DIN 4108 gefordert.

Die Anforderungen der DIN 4108-1 zielen darauf, durch bauliche Maßnahmen solche „unzumutbaren“ Temperaturbedingungen im Gebäudeinneren zu verhindern, die sonst eine aktive Kühlung erfordern würden. Maßnahmen des sommerlichen Wärmeschutzes müssen auch bei aktiv gekühlten Gebäuden angewendet werden.

Abhängig von der Klimazone gibt die Norm einen Grenzwert für die Innentemperatur vor, der bei Standardnutzung an nicht mehr als 10 % der jährlichen Aufenthaltszeit im Gebäude überschritten werden darf (Tab. 3.12).

Sommer-Klimaregion	Merkmal der Region	Höchstwert des monatlichen Außentemperaturmittels (°C)	Grenzwert der Innentemperatur (°C)
A	sommerkühl	< 16,5	25
B	gemäßigt	> 16,5 bis < 18	26
C	sommerheiß	> 18	27

<sup>8</sup> EnEV, 2004 und auch beim derzeitigen Referentenentwurf für die EnEV 2006, Stand 16.11.06

**Tab. 3.12:** Grenzwerte der Innentemperatur in Abhängigkeit der Sommer-Klimaregionen nach [DIN 4108-2:2003-07].

Aus dem Temperaturgrenzwert leitet sich ein Grenz-Sonneneintragswert ab, der vom Fensterflächenanteil, dem Gesamtenergiedurchlassgrad der Fenster und den Sonnenschutzmaßnahmen abhängig ist und nicht überschritten werden darf (Nachweis). Bei Gebäuden ohne raumluftechnische Anlagen gelten die Mindestanforderungen an das Raumklima als erfüllt, wenn der Nachweis zum sommerlichen Wärmeschutz erbracht ist.

Aus der Formulierung ergibt sich die rechtliche Konsequenz, dass bei Gebäuden ohne aktive Kühlung die Temperaturgrenzwerte eingehalten werden müssen, bei Gebäuden mit aktiver Kühlung der Nachweis zu führen ist, die Grenzwerte jedoch überschritten werden dürfen.

## 3.4 Die rechtliche Seite von sommerlichen Raumtemperaturen

### 3.4.1 Ausgangslage

In den letzten Jahren wurde eine Reihe von Gerichtsurteilen gefällt, in deren Rechtssprechung es um die Höhe von sommerlichen Raumtemperaturen in nicht gekühlten Räumen ging.

Gegenstand der Klage aller in Tab. 3.13 aufgeführten Urteile waren zu hohe Raumtemperaturen in zur Ausübung eines Gewerbes angemieteten Räumlichkeiten. Die Gerichte beziehen sich daher in den Urteilsbegründungen immer auf die Anforderungen der Arbeitsstättenverordnung (ASV) in Verbindung mit der Soll-Bestimmung für die Raumlufttemperatur der Arbeitsstätten-Richtlinien (ASR). Da es keine vergleichbare Norm für frei belüftete Räume gibt, wird die für Räume mit raumluftechnischen Anlagen – zum damaligen Zeitpunkt - gültige DIN 1946-2:1994-01, zur Begründung herangezogen. Die tabellarisch aufgeführten Urteile beziehen sich zusätzlich auf die zum Zeitpunkt des Verfahrens ungültige Fassung der DIN 1946-2 von 1960 [Hausladen et al., 2004] mit den entsprechenden Anforderungen an die Raumtemperatur. Dies führt dazu, dass Fachveröffentlichungen [Hausladen et al., 2004], [Busse, 2004] die Stichhaltigkeit der Urteile anzweifeln.

**Tab. 3.13:** Zusammenfassung der wichtigsten Urteile. Weitere Urteile zu diesem Thema ergingen vom [OLG Düsseldorf, 1998], vom [OLG Köln, 1991] und vom [OLG Naumburg, 2004]. Verwendete Abkürzungen: RT = Raumtemperatur, AT = Außentemperatur

Urteil	Streitgegenstand	Ursache	Urteil	Anmerkung
[OLG Hamm, 1994]	RT in gemieteten Räumen (Reisebüro) 5-6 K über AT	Anordnung Außenluftansaugung, 60 % Umluftanteil, Anlagenbetrieb	Vermieter muss Maßnahmen zur Temperaturabsenkung durchführen.	Klage in zweiter Instanz erfolgreich
[OLG Rostock, 2000]	RT in gemieteten Räumen (Arztpraxis) bei $AT \leq 32 \text{ °C} \geq 26 \text{ °C}$ (Mieter behält Teil der Miete ein)	Zu große Fensterflächen, > Sonneneinstrahlung	Teil der Miete kann einbehalten werden. Geht Versicherungsschutz verlustig, besteht keine Verpflichtung zur Nachlüftung	Bau nach anerkannten Regeln der Technik bedeutet keine Garantie auf Mangelfreiheit
[LG Bielefeld, 2003]	RT in gemieteten Räumen (Rechtsanwaltskanzlei) z. T.: $> 30 \text{ °C}$ .	Leichtbau, große Fensterflächen mit außen liegendem Sonnenschutz	Vermieter muss RT gemäß Anforderungen DIN 1946 (Fassung 1960) gewährleisten	LG Bielefeld ist dem OLG Hamm instanzlich nachgeordnet, Urteil orientiert sich daher inhaltlich am OLG Hamm

Weitere Argumente der Urteilsbegründung sind die allgemein anerkannten Regeln der Technik. Ein Gebäude entspricht diesen, wenn es den Anforderungen der DIN 4108-2:2003-07 genügt. Auch diese Norm legt regional abhängige Grenzwerte für die Innenraumtemperatur fest (siehe 3.3.5). Zu höheren Raumtemperaturen kann es dann kommen, wenn der Höchstwert der

mittleren monatlichen Außentemperatur der Klimaregion überschritten wird (z. B. Sommer 2003).

Nach [Busse, 2004] haben die ASR keinen Vorrang gegenüber der DIN 4108-2:2003-07, da die ASR keinen Normcharakter haben. Daher ist eine Klage wegen zu hoher Innenraumtemperaturen nicht gerechtfertigt, wenn die Einhaltung der DIN 4108-2:2003-07 Abschnitt 8 nachgewiesen wird. Ob die umstrittenen Räumlichkeiten (Köln: kein außen liegender Sonnenschutz, Rostock und Bielefeld: zu große Fensterflächen) mit den Anforderungen der DIN 4108-2:2003-07 überhaupt konform sind, ist jedoch anzuzweifeln [Busse, 2004].

Der nachfolgende Text geht auf das rechtliche Umfeld und die Konsequenzen der Urteile ein.

### 3.4.2 Rechtliches Umfeld und Konsequenzen

#### *Öffentliches Baurecht*

Wie in Abschnitt 3.3.5 dargestellt fordert die EnEV einen Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes nach DIN 4108:2003-07.

Wichtig dabei ist, dass ein bestimmter Sonneneintragskennwert (oder eine Kühlleistung) nur dann einzuhalten sind, wenn der Fensterflächenanteil 30 % überschreitet [DIN 4108-2:2003-07]. In der Praxis können jedoch auch Gebäude mit einem Fensterflächenanteil unter 30 % Bereiche aufweisen, die hinsichtlich des sommerlichen Raumklimas kritisch sind. Innerhalb des Rechenverfahrens nach Tab. 7 in [DIN 4108-2:2003-07] gelten erst 7 bis 15 % als nachweisfrei [Voss et al., 2006b].

Für Gebäude ohne RLT-Anlage zur Kühlung müssen die Temperaturgrenzwerte (Tab. 3.12) eingehalten werden, bei Gebäuden mit Anlagen zur Kühlung dürfen die Grenzwerte überschritten werden.

Einige Bundesländer, z. B. NRW in [Ministerialblatt, 2003], haben jedoch den Abschnitt bezüglich der Temperaturgrenzwerte von der Einführung als „Technische Baubestimmung“ im Rahmen der Landesbauordnungen ausgenommen [Voss et al., 2006b]. Das bedeutet aber nur, dass die Länder auf die Überprüfung im Rahmen des Baugenehmigungsverfahrens (öffentliches Baurecht) verzichten, die Anforderungen der DIN 4108:2003-07 bleiben bestehen. Die Überprüfung wird im Rahmen der §§ 3 bis 8 der EnEV an die staatlich anerkannten Sachverständigen für Schall- und Wärmeschutz übertragen. Bei Baumaßnahmen der öffentlichen Hand erfüllt der Bauherr auch die baurechtliche Kontrollfunktion und muss damit auch überwachen, dass die Anforderungen der EnENV erfüllt werden.

Für Gebäude des Bundes gelten zusätzlich dazu die Anforderungen nach dem Erlass „Bauliche und planerische Vorgaben für Baumaßnahmen des Bundes zur Gewährleistung der thermischen Behaglichkeit im Sommer“ vom 14.11.2005 im Kontext des „Leitfadens nachhaltiges Bauen“ [Klimaerlass, 2005]. Danach darf in Bürogebäuden – bei Gebäuden ohne aktive Kühlung – die operative Raumtemperatur 26 °C nur an maximal 200 h/a überschritten werden (nähere Angaben fehlen).

Relevanz für Sanierungen: Die Anforderungen der 4108-2:2003-07 gelten für Gebäude, die in den Geltungsbereich der EnEV fallen. Dies tritt dann ein, wenn mehr als 20 % einer Außenbauteilfläche oder der Außenwand einer Orientierung erneuert werden, oder bei Bestandserweiterungen von mehr als 10 m<sup>2</sup> NGF.

#### *Privatrecht*

Werden keine gesonderten Abmachungen getroffen, hat der Bauherr Anspruch auf eine Planung nach den anerkannten Regeln der Technik. Dies ist durch die normative Einführung der DIN 4108-2:2003-07 durch den Bund im Rahmen der EnEV gegeben.

Praktisch bedeutet dies:

- Ohne eine Kühlung erfolgt die Bauweise in den Schranken der zulässigen Sonneneintragswerte nach [DIN 4108-2:2003-07].
- Wenn die Sonneneintragswerte überschritten werden oder die Nutzung nicht den Standardnutzungsbedingungen entspricht, wird eine Einrichtung zum Kühlen geplant und eingebaut.

Der Bauherr kann abweichende Abmachungen mit dem Planer treffen. Mögliche Nutzungseinschränkungen werden bewusst in Kauf genommen. Der Planer wird so aus der Haftung befreit, der Bauherr bleibt dem Mieter gegenüber jedoch in der Haftung (siehe unten) mit den entsprechenden möglichen rechtlichen Konsequenzen.

Relevanz für Sanierungen: auch hier gilt die eingeschränkte Geltung der DIN 4108-2:2003-07 für sanierte Gebäude.

#### *Mietrecht*

Bei vermieteten Räumen besteht die rechtliche Verpflichtung des Vermieters, die Mietsache in einem zum vertragsgemäßen Gebrauch geeigneten Zustand zu überlassen und sie während der Mietzeit in diesem Zustand zu erhalten (§ 535 I 2 BGB). Werden Räume als Büros vermietet, müssen sie dazu auch geeignet sein. Als Mangel gilt, wenn vermietete Räume „nicht so beschaffen sind, dass der nach dem Vertragszweck vorgesehene Beruf [...] in den Räumen in zulässiger Weise ausgeübt werden kann“ [OLG Rostock, 2000].

Nach Auffassung des OLG Rostock kann ein solcher Mangel unabhängig von der Einhaltung der anerkannten Regeln der Technik bestehen. Es könnte also nicht ausreichend sein, die Vorgaben der DIN 4108-2:2003-07 eingehalten zu haben. Dies gilt besonders dann, wenn die Nutzung von der angenommenen Standardnutzung nach DIN 4108-2:2003-07 abweicht.

Relevanz für Sanierungen: das Mietrecht unterscheidet nicht zwischen sanierten Gebäude und Neubauten.

#### *Arbeitsrecht*

Bürogebäude fallen in den Anwendungsbereich der Arbeitsstättenverordnung, bzw. der Arbeitsstättenrichtlinien. Adressat der ASV ist der Arbeitgeber als „Beschäftigter“ (§ 1 Abs. 1, Satz 2 ASV). Er ist grundsätzlich bei der Einrichtung einer Arbeitsstätte dazu verpflichtet, den Arbeitnehmern eine „der Gesundheit zuträgliches Raumtemperatur“ (ASV § 6, Abs.1-3) zur Verfügung zu stellen.

Die ASR legen in Abschnitt 3.3 fest, dass die Lufttemperatur in Arbeitsräumen 26 °C nicht überschreiten soll und bei darüber liegenden Außentemperaturen in Ausnahmefällen höher sein darf. Die ASR stellen keine verbindliche Rechtsnorm, sondern ein „so genanntes antizipiertes Sachverständigengutachten dar“ [OLG Hamm, 1994].

Relevanz für Sanierungen: die ASR unterscheiden nicht zwischen sanierten Gebäude und Neubauten, für „Altarbeitsstätten“ gelten Sonderregeln, siehe Infobox 3.3.

#### **Infobox 3.3: Gültigkeit der ASV**

Seit 1996 gilt die ASV in allen Bundesländern für alle Arbeitsstätten [Steiner et al., 2003]. Anders ist dies bei „Altarbeitsstätten“, die vor Inkrafttreten der Verordnung (1. Mai 1976), vor der Erweiterung auf die neuen Bundesländer (1990), oder der Ausweitung auf alle Berufssparten (1996) errichtet worden waren. Für die „Altarbeitsstätten“ gelten Sonderregeln (§ 56 ASV), die besagen, dass die ASV nur bei Gesundheitsgefährdung für die Arbeitnehmer, Änderungen der Nutzung oder Arbeitsverfahren, oder baugenehmigungspflichtiger Umbauten, anzuwenden ist. Seit dem 8. August 2004 ist eine Neufassung der ArbStättV in Kraft [ArbStättV, 2004]. Der Text des Absatzes (jetzt ArbStättV 2004 Anhang Anforderungen an Arbeitsstätten nach § 3, 3.5) ist gleich geblieben.

#### *Auslegung von Lüftungsanlagen nach DIN 1946-2:1994-01 (ersetzt durch DIN EN 13779:2005-05)*

Diese Norm galt für die Auslegung von Lüftungstechnischen Anlagen. Nach gängiger Auffassung der Fachwelt ist sie nicht zur Beurteilung des sommerlichen Temperaturverhaltens von Räumen geeignet [Hochschulen, 1997].

Die Anforderungen sind in Abschnitt 3.3.3 dargestellt. Wichtig in diesem Zusammenhang ist, dass bei Außentemperaturen über 26 °C die Raumlufttemperatur ansteigen darf. In Ermangelung anderer Richtwerte wurde diese Norm in der Vergangenheit auch zur Beurteilung frei belüfteter Gebäude verwendet. Den Gutachten für die Urteile [LG Bielefeld, 2003], [OLG Hamm, 1994], [OLG Rostock, 2000] liegt eine – zum Zeitpunkt der Rechtsprechung ungültige - Fassung aus dem Jahre 1960 zugrunde [Hausladen et al., 2004]. Diese Fassung besagt, dass bei einer Außentemperatur von bis zu 32 °C zu gewährleisten ist, dass die Innentemperatur 26 °C nicht übersteigt und bei höheren Temperaturen die Innentemperatur mindestens 6 K unter der Außentemperatur liegt.

#### *Fazit*

Aus der Komplexität der Rechtslage ergibt sich ein hoher Stellenwert der DIN 4108-2:2003-07, als rechtsverbindlich anzuwendende Vorschrift bei Neubauten. Sanierungen sind nur bis zu einem Prozentsatz der erneuerten Fläche von 20 % (siehe „Öffentliches Baurecht“) ausgenommen. Als Mindeststandard garantiert diese Norm allerdings nicht, dass in allen Teilen des Gebäudes ein unkritisches sommerliches Temperaturverhalten erwartet werden kann. Die Konvergenz der Nutzungsbedingungen mit denen der Norm muss kritisch überprüft werden.

Unabhängig davon kommen bei allen Gebäuden (Neubau, Altbau, technische Systeme etc.) die arbeits- und mietrechtlichen Vorschriften zur Anwendung. Bei Vermietung einer Immobilie (unabhängig davon ob es sich um einen Neubau oder eine Sanierung handelt) zur Nutzung z. B. als Büro muss vom Vermieter ein der Nutzung adäquater Zustand gewährleistet und aufrechterhalten werden. Dies gilt auch für die Innentemperaturen. Das bedeutet, dass unabhängig von der Gültigkeit der DIN 4108-2:2003-07 das sommerliche Raumklima mit geeigneten Maßnahmen verbessert werden muss. Die sich daraus ergebenden exakten Anforderungen an die Raumtemperatur (z. B: in der Form von Überhitzungsstunden) sind nicht eindeutig, da es zur Beurteilung von frei belüfteten Gebäuden bislang noch keine rechtlich anerkannten Beurteilungskriterien in Form einer Norm gibt.

### 3.4.3 Relevanz für Sanierungen ohne aktive Kühlung

Allen angeführten Urteilen ist gemein, dass in allen Fällen Mieter gegen Vermieter mit dem Argument der eingeschränkten Gebrauchstauglichkeit der Immobilie klagten. Bei Sanierungen mit Maßnahmen der passiven Kühlung ist die Garantie eines definierten Raumklimas nicht möglich, die Raumtemperatur ist dynamisch. Rechtlich vorteilhaft für den Planer ist daher eine Struktur, bei der Nutzer und Besitzer identisch sind. Eine Sonderabmachung zwischen Planer und Gebäudebesitzer bezüglich höherer Innenraumtemperaturen vermeidet zukünftige Rechtsstreitigkeiten.

Eine Besitzstruktur, bei der Besitzer und Nutzer nicht identisch sind, bietet grundsätzlich ähnliche Möglichkeiten, nur müssten zusätzliche Abmachungen zwischen Vermieter und Mieter bezüglich der sommerlichen Temperaturen hinzukommen.

Unter der Annahme, dass in beiden Konstellationen die Gebäude als Arbeitsstätten genutzt werden und somit die ASV in Verbindung mit den ASR gelten, sollte für Sonderabmachungen juristischer Rat hinzugezogen werden.

Abmachungen zwischen Mieter und Vermieter könnten die Form einer Individualvereinbarung annehmen, die sich auf die reine Überlassung des Mietobjekts beschränkt (die Fachkompetenz des Mieters vorausgesetzt) und bei der die Haftung des Vermieters für die vom Mieter vorgesehene Nutzung ausgeschlossen wird [Hausladen et al., 2004]. Der Betrieb eines Gebäudes mit passiven Kühlungsmaßnahmen gegen den Willen der Mieter ist unmöglich, da bei einer Klage mit Bezug auf die Einhaltung der ASV und ASR gegen den Vermieter Aussichten auf Erfolg bestehen.

Für Räume ohne RLT-Anlagen gibt es keine konkrete einzuhaltende Lüftungsnorm. Die in Bearbeitung befindliche – zwischenzeitig aber gestoppte - VDI 6018 sollte diese Lücke schließen. Bislang muss also das Gebäudekonzept so überzeugend sein, dass der Mieter die Dynamik des Raumklimas akzeptiert. Andernfalls sind notwendige Sonderabmachungen zwischen Vermieter und Mieter der Vermietbarkeit des Gebäudes auf dem freien Markt nicht förderlich.

## 3.5 Zusammenfassung

Es wird deutlich, dass viele gesetzliche und normative Anforderungen an einen Büroarbeitsplatz (Luftqualität, Tageslichtnutzung und elektrische Beleuchtung, sowie Akustik) bestehen und im Rahmen einer Sanierung erfüllt werden müssen. Diese Anforderungen stehen nicht im Widerspruch zur passiven Kühlung. Auch die von den Nutzern positiv bewerteten und am Immobilienmarkt nachgefragten Büroraumkonzepte, wie zum Beispiel das Zellen-, das Gruppen- und Kombibüro sind aus dieser Hinsicht mit passiven Kühlkonzepten (auch mit solchen, die Außenluft als Wärmesenke nutzen) vereinbar.

Die Betrachtung der unterschiedlichen Modelle zur Beurteilung des thermischen Komforts in Gebäuden macht deutlich, dass sich mit dem auf Basis der adaptiven Theorie erweiterten PMV-Modell die Komfortbewertung in ungekühlten Gebäuden besser voraussagen lässt. Von den Richtlinien, die diese Erweiterung bereits berücksichtigen, ist die ATG-NL zur Beurteilung von passiv gekühlten Gebäuden besonders gut geeignet, da der Bezugswert auf die Außentemperatur der vergangenen drei Tage das thermische Komfortempfinden plausibel an die Außentemperatur koppelt.

Die Untersuchung der rechtlichen Anforderungen an die Raumlufttemperatur zeigt, dass keine verbindliche Temperaturgrenze für nichtgekühlte Gebäude existiert. Die daraus entstandenen Rechtsstreitigkeiten der Vergangenheit unterstreichen die Bedeutung der DIN 4108-2:2003-07 als anzuwendende Vorschrift bei Neubauten und Sanierungen (hier allerdings nur, wenn ein Großteil des Gebäudes saniert wird). Der so erreichte Mindeststandard garantiert allerdings nicht zwingend ein sommerlich unkritisches Temperaturverhalten in allen Teilen des Gebäudes. Die arbeits- und mietrechtlichen Vorschriften sind für Neubauten und Bestandsgebäude gleichermaßen bindend. Da die Rechtsurteile bezugnehmend auf das Mietrecht zeigen, dass ein der Nutzung adäquater Zustand auch hinsichtlich der Innentemperaturen gewährleistet und aufrechterhalten werden muss, ist ein Betrieb des Gebäudes mit passiven Kühlungsmaßnahmen gegen den Willen des Mieters nicht möglich.

Nachdem nun die Anforderungen an gute Büroarbeitsplätze geklärt sind, sollen im nächsten Kapitel die Gründe, warum auf eine aktive Kühlung verzichtet wird, näher betrachtet werden.

### 3.6 Literatur

- [2002/91/EG] *Richtlinie 2002/91/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2002 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden.*
- [ArbStättV, 2004] *Verordnung über Arbeitsstätten:* BGBl I S. 2179.
- [ASR 5, 1984] *Arbeitsstätten-Richtlinie, ASR 5: Lüftung.* Berlin: Bundesministerium für Arbeit und Soziales (BMAS).
- [ASR 6, 2001] *Arbeitsstätten-Richtlinie, ASR 6: Raumtemperaturen.* Berlin: Bundesministerium für Arbeit und Soziales (BMAS).
- [AStV, 2003] *Arbeitsstättenverordnung, Raumklima in Arbeitsräumen.* Österreich: Verordnung der Bundesministerin für Arbeit, Gesundheit und Soziales.
- [CR 1752, 1998] *Auslegungskriterien für Innenräume.* Brüssel (B): Europäisches Komitee für Normung.
- [DIN 4108-2:2003-07] *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden, Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz.* Berlin: Beuth Verlag.
- [DIN 5034-1:1999-10] *Tageslicht in Innenräumen, Teil 1: Allgemeine Anforderungen.* Berlin: Beuth Verlag.
- [DIN EN 13779:2005-05] *Lüftung von Nichtwohngebäuden - Allgemeine Grundlagen und Anforderungen an Lüftungs- und Klimaanlageanlagen.* Berlin: Beuth Verlag.
- [DIN EN 15251:2005-07] *Bewertungskriterien für den Innenraum einschließlich Temperatur, Raumluftqualität, Licht und Lärm - Deutsche Fassung prEN 15251:2005.* Berlin: Beuth Verlag.
- [DIN EN ISO 7730:1995-09] *Ermittlung des PMV und des PPD und Beschreibung der Bedingungen für thermische Behaglichkeit.* Berlin: Beuth Verlag.
- [DIN EN ISO 7730:2006-05] *Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit (ISO 7730:2005); Deutsche Fassung EN ISO 7730:2005.* Berlin: Beuth Verlag.
- [DIN EN ISO 11690-1:1997-02] *Akustik - Richtlinien für die Gestaltung lärmarmen maschinenbestückter Arbeitsstätten, Teil 1: Allgemeine Grundlagen.* Berlin: Beuth Verlag.
- [DIN V 18599-4:2005-07] *Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Beheizung, Kühlung, Belüftung, Beleuchtung und Warmwasserbereitung - Teil 4: Beleuchtung.* Berlin: Beuth Verlag.
- [Klimaerlass, 2005] *Bauliche und planerische Vorgaben für Baumaßnahmen des Bundes zur Gewährleistung der thermischen Behaglichkeit im Sommer.* Berlin: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen.
- [LG Bielefeld, 2003] *Bielefelder Klimaerlass.* April 2003. Urteil: 3 O 411/01.
- [Ministerialblatt, 2003] *Liste der technischen Baubestimmungen.* Düsseldorf: Ministerialblatt für das Land NRW Nr. 38.
- [OLG Düsseldorf, 1998] 04.06.1998. Urteil: 24 U 194/96, Neue Juristische Wochenschrift RR 1998.1307.
- [OLG Hamm, 1994] *Raumtemperaturgrenzen in gemieteten Gewerberäumen (Reisebüro).* 18.10.1994. Urteil: 7 U 132/93, 143. Neue Juristische Wochenschrift RR 195.
- [OLG Köln, 1991] 28.10.1991. Urteil: 2 U 185/90, Neue Juristische Wochenschrift RR 1993.466.
- [OLG Naumburg, 2004] Urteil: NJW -, Neue Juristische Wochenschrift RR 2004.299 (nur Leitsatz).
- [OLG Rostock, 2000] *Sommerliche Aufheizung der Mieträume.* 29.12.2000. Urteil: 3 U 83/98, 802. Neue Juristische Wochenschrift RR 201.
- [Publication 74, 2004] *Thermische Behaaglijkheid; eisen voor de binnentemperatuur in gebouwen.* Rotterdam (NL): ISSO.
- [SIA 180, 1999] *Wärmeschutz im Hochbau.* Zürich (CH): Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein.
- [SIA V382/1, 1992] *Technische Anforderungen an Lüftungstechnische Anlagen.* Zürich (CH): Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein.
- [SIA V382/2, 1992] *Kühlleistungsbedarf von Gebäuden.* Zürich (CH): Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein.
- [SIA V382/3, 1992] *Bedarfsermittlung für Lüftungstechnische Anlagen.* Zürich (CH): Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein.
- [Standard 55-2004] *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy.* Atlanta (USA): American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. (ASHRAE).
- [VDI 2078, 1996] *Berechnung der Kühllast klimatisierter Räume (VDI Kühllastregeln).* Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure e.V.

- [Arch+, 1997] Arch+. 1997. "Your Office Is Where You Are". *Arch+* 136.
- [Awbi, 2003] Awbi, H. B. 2003. *Ventilation of Buildings*. 2. Auflage. London, New York: Spon Press.
- [Bauer, 2003] Bauer, W. 2003. *Innovative Bürolösungen für erfolgreiche Unternehmen [Vortragsfolien]*. Forum Bürodesign - Attraktive, behagliche, performante Büros. Stuttgart, 24.09.2003. Fraunhofer IAO.
- [Bauer et al., 2003] Bauer, W., et al. (Hrsg.). 2003. *Office 21: Zukunftsoffensive OFFICE 21 - Mehr Leistung in innovativen Arbeitswelten*. Stuttgart: Egmont vgs.
- [Beyerle, 2003] Beyerle, T. 2003. *Zukunftsorientierte Bürokonzepte - Bewegte Büros in bewegten Zeiten [Vortragsfolien]*. Frankfurt/Main. GIM Grundwert Immobilien Management GmbH RESEARCH.
- [Brager et al., 1998] Brager, G. S.; R. de Dear. 1998. "Thermal adaptation in the built environment: a literature review". *Energy and Buildings* 27, 83-96.
- [BSO, 2005] Verband Büro-, Sitz- und Objektmöbel e.V. (BSO). 2005. [www.buero-forum.de](http://www.buero-forum.de).
- [Busse, 2004] Busse, F. 2004. "Klimaanlage par ordre du mufti - Zu den Anforderungen an den Wärmeschutz für Arbeitsräume im Sommer". *Neue Juristische Wochenschrift* 28, 1982-1985.
- [De Dear et al., 2002] De Dear, R. J.; G. S. Brager. 2002. "Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55". *Energy and Buildings* 34 (6), 549-561.
- [ergo-online, 2005] Gesellschaft Arbeit und Ergonomie - online e.V. 2005. [www.sozialnetz.de/ca/ph/het/](http://www.sozialnetz.de/ca/ph/het/).
- [Fanger, 1970] Fanger, P. O. 1970. *Thermal Comfort*. Copenhagen: Danish Technical Press.
- [Fanger, 1988] Fanger, P. O. 1988. "Introduction of the olf and decipol units to quantify air pollution perceived by humans indoors and outdoors". *Energy and Buildings* 12, 1-6.
- [Fanger et al., 2002] Fanger, P. O.; J. Toftum. 2002. "Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates". *Energy and Buildings* 34 (6), 533-536.
- [Fountain et al., 1996] Fountain, M.; G. S. Brager; R. de Dear. 1996. "Expectation of indoor climate control". *Energy and Buildings* 24, 179-182.
- [Giesemann, 1999] Giesemann, S. 1999. *Zukunftsorientierte Bürokonzepte - Eine Betrachtung aus Sicht der Immobilienentwicklung*. Frankfurt am Main: GIM Grundwert Immobilien Management GmbH RESEARCH.
- [Giesemann et al., 2003] Giesemann, S.; P. Voigt. 2003. *Zukunftsorientierte Bürokonzepte - Eine Betrachtung aus Sicht der Immobilienentwicklung*. Frankfurt am Main: DEGI Deutsche Gesellschaft für Immobilienfonds mbH.
- [Harrison et al., 2004] Harrison, A.; P. Wheeler; C. Whitehead (Hrsg.). 2004. *The Distributed Workplace*. London, New York: Spon Press.
- [Hausladen et al., 2004] Hausladen, G., et al. 2004. "26 °C - falsch verstandener Arbeitsschutz?" *Bauphysik* 26 (4), 197-204.
- [Havenith et al., 2002] Havenith, G.; I. Holmér; K. Parsons. 2002. "Personal factors in thermal comfort assessment: clothing properties and metabolic heat production". *Energy and Buildings* 34 (6), 581-591.
- [Hellwig, 2005] Hellwig, R. T. 2005. *Thermische Behaglichkeit - Unterschiede zwischen frei und mechanisch belüfteten Bürogebäuden aus Nutzersicht*. Technische Universität München.
- [Hentschel, 2002] Hentschel, H.-J. H. 2002. *Licht und Beleuchtung: Grundlagen und Anwendungen der Lichttechnik*. 5. Auflage. Heidelberg: Hüthig GmbH und Co. KG.
- [Hochschulen, 1997] Hochschulen. 1997. "Ständige Konferenz der Hochschullehrer des Fachgebietes Bauphysik an wissenschaftlichen Hochschulen: Stellungnahme zu einem Urteil des Oberlandesgerichtes Hamm". *Bauphysik* 19 (3), 97-99.
- [Höppe, 2002] Höppe, P. 2002. "Different aspects of assessing indoor and outdoor thermal comfort". *Energy and Buildings* 34 (6), 661-665.
- [Humphreys, 1978] Humphreys, M. 1978. "Outdoor temperatures and comfort indoors". *Building Research and Practice* 6 (2), 92-105.
- [Humphreys et al., 2002] Humphreys, M. A.; J. F. Nicol. 2002. "The validity of ISO-PMV for predicting comfort votes in every-day thermal environments". *Energy and Buildings* 34 (6), 667-684.
- [Kruppa et al., 2002] Kruppa, B.; W. Bischof; M. Bullinger-Naber. 2002. "Positive und negative Wirkungen raumluftechnischer Anlagen auf Befindlichkeit, Leistungsfähigkeit und Gesundheit". *gi Gesundheits-Ingenieur* 123 (2), 88-95.

- [Lachmayer et al., 1998] Lachmayer, H.; E. Louis (Hrsg.). 1998. *Work & Culture - Büro. Inszenierung von Arbeit*. Klagenfurt (A): Ritter Verlag.
- [Leaman et al., 1999] Leaman, A.; B. Bordass. 1999. "Productivity in buildings: the "killer" variable". *Building Research & Information* 27 (1), 4-19.
- [Marmot et al., 2000] Marmot, A.; J. Eley. 2000. *Office space planning: designing for tomorrow's workplace*. New York (USA): McGraw-Hill.
- [McCartney et al., 2002] McCartney, K. J.; J. F. Nicol. 2002. "Developing an adaptive control algorithm for Europe". *Energy and Buildings* 34 (6), 623-635.
- [Morgan et al., 1994] Morgan, C.; R. J. de Dear. 1994. *Weather, clothing and thermal adaptation to indoor climate*. Thermal comfort: past, present and future. Building Research Establishment, Garston, UK.
- [Neuhaus, 2002] Neuhaus, R. 2002. *Büroarbeit planen und gestalten - Teil 1: Bildschirmarbeit und Büroraumplanung*. (Hg. v. Institut für angewandte Arbeitswissenschaften e. V.). Köln: Wirtschaftsverlag Bachem.
- [Nicol et al., 2000] Nicol, F.; K. J. McCartney. 2000. *Smart controls and thermal comfort project. Final report*. Oxford: Oxford Brooks University School of Architecture.
- [Nicol et al., 2005] Nicol, F.; S. Roaf. 2005. "Post-occupancy evaluation and field studies of thermal comfort". *Building Research & Information* 33 (4), 338-346.
- [Nicol, 2003] Nicol, J. F. 2003. *The dialectics of thermal comfort [inaugural lecture]*. London (GB). School of Architecture, London Metropolitan University.
- [Nicol et al., 2002] Nicol, J. F.; M. A. Humphreys. 2002. "Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings". *Energy and Buildings* 34 (6), 563-572.
- [Olesen et al., 2002] Olesen, B. W.; K. C. Parsons. 2002. "Introduction to thermal comfort standards and to the proposed new version of EN ISO 7730". *Energy and Buildings* 34 (6), 537-548.
- [Osterhaus, 2005] Osterhaus, W. K. E. 2005. "Discomfort glare assessment and prevention for daylight applications in office environments". *Solar Energy* 79, 140-158.
- [Parsons, 2002] Parsons, K. C. 2002. "The effects of gender, acclimation state, the opportunity to adjust clothing and physical disability on requirements for thermal comfort". *Energy and Buildings* 34 (6), 593-599.
- [Pistohl, 1998] Pistohl, W. 1998. *Handbuch der Gebäudetechnik: Planungsgrundlagen und Beispiele*. 2. Auflage. Düsseldorf: Werner Verlag.
- [Recknagel et al., 2001] Recknagel, H.; E. Sprenger; E.-R. Schramek. 2001. *Taschenbuch für Heizungs- und Klimatechnik 01/02*. 70. Auflage. München: Oldenburg Industrieverlag.
- [Richter, 2003] Richter, W. 2003. *Handbuch der thermischen Behaglichkeit - Heizperiode -*. Dortmund/Berlin/Dresden: Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.
- [Schneider et al., 2004] Schneider, W.; A. Windel; B. Zwingmann (Hrsg.). 2004. *Zukunft der Arbeit - Bewerten, Vernetzen, Gestalten*. Dortmund, Berlin, Dresden: Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.
- [Seppänen et al., 2005] Seppänen, O.; W. Fisk. 2005. *A procedure to estimate the cost effectiveness of indoor environmental improvements in office work*. Clima 2005. Lausanne, 10.-12.10.2005.
- [Steiner et al., 2003] Steiner, J., et al. (Hrsg.). 2003. *Das Bielefelder Klimaurteil fordert maximal 26 °C in Büros - eine Dokumentation zur Entwicklung und Begründung der neuen Klima-Rechtssprechung im Kontext der Arbeitsstättenverordnung und Arbeitsstättenrichtlinien sowie dessen Folgen für die TGA-, Bau- und Immobilienwirtschaft*. Karlsruhe: Promotor Verlags- und Förderungsges. mbH.
- [Stone, 2000] Stone, P. T. 2000. "The effects of environmental illumination on melatonin, bodily rhythms and mood states: a review". *Lighting Research and Technology* 31 (3), 71-79.
- [Tanabe, 2005] Tanabe, S. 2005. *Productivity and future HVAC - Are you going for air-conditioning only at energy saving and just cooling?* Clima 2005. Lausanne, 10.-12.10.2005.
- [van der Linden et al., 2006] van der Linden, A. C., et al. 2006. "Adaptive temperature limits: A new guideline in The Netherlands. A new approach for the assessment of building performance with respect to thermal indoor climate". *Energy and Buildings* 38, 8-17.
- [VBG, 2002] VBG. 2002. *Sonnenschutz im Büro*. Berichts-Nr.: SP 2.5, Hamburg: Verwaltungs- und Berufsgenossenschaft.

- [VBG, 2004] VBG. 2004. *Bildschirm- und Büroarbeitsplätze - Leitfaden für die Gestaltung*. Berichts-Nr.: SP 2.1 (BGI 650), Hamburg: Verwaltungs- und Berufsgenossenschaft.
- [Visier et al., 2004] Visier, J. C.; (Hrsg.). 2004. *Energy Performance of Buildings - Calculation Procedures Used in European Countries*. Berichts-Nr.: 02-126R, Brussels (B): Belgian Building Research Institute (BBRI-CSTC-STCB).
- [Voss et al., 2006a] Voss, K., et al. 2006a. *Bürogebäude mit Zukunft*. 2. Auflage. Berlin: Verlag Solarpraxis.
- [Voss et al., 2006b] Voss, K.; J. Pfafferott. 2006b. *Energieeinsparung contra Behaglichkeit?* Bonn: Verlag BBR.
- [Wargocki et al., 2006] Wargocki, P.; O. Seppänen (Hrsg.). 2006. *Indoor Climate and Productivity in Offices - How to integrate productivity in life-cycle cost analysis of building services*. Brussels (B): Rehva.
- [Wyon, 1986] Wyon, D. P. 1986. "The effects of indoor climate on productivity and performance". *VVS & energi* (3), 59-65.
- [Zürcher et al., 2004] Zürcher, C.; T. Frank (Hrsg.). 2004. *Bau und Energie: Leitfaden für Planung und Praxis*. Zürich (CH): vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich.



## 4 Beweggründe bei einer Sanierung auf eine aktive Kühlung zu verzichten

Die Beweggründe ein Gebäude mit Maßnahmen der passiven Kühlung zu sanieren, lassen sich drei Bereichen zuordnen: dem gesellschaftlichen, dem des Gebäudebetreibers und Eigentümers, sowie dem des Nutzers (Abb. 4.1).

Aus gesellschaftlicher Sicht wird das Ziel verfolgt mit Energieeffizienz einen Beitrag zur Einhaltung der Verpflichtungen des Protokolls von Kyoto [Kyoto, 1997]<sup>1</sup> und zur Schonung der Ressourcen (Sanierung) zu leisten. Da bei modernen Bürogebäuden dank verbessertem Wärmeschutz ein Großteil der Energie für Beleuchtung, Klimatisierung und Lüftung aufgewendet wird, setzen Konzepte zur Verringerung des Energieverbrauchs sinnvollerweise in diesem Bereich an. Aus dieser übergeordneten Sichtweise ergeben sich weiterführende Fragen nach der Größe des Gebäudebestands von Bürogebäuden, nach der Höhe des Energieverbrauchs und damit nach der Größe des möglichen Einsparpotentials. Lassen sich beispielsweise anhand der Datenlage im Bereich der sommerlichen Kühlung Szenarien erstellen, welche Energieeinsparungen mit Sanierungen, die ohne eine aktive Kühlung auskommen, erreicht werden können? Diese Fragen sind Gegenstand des ersten Unterkapitels (Abschnitt 3.1).

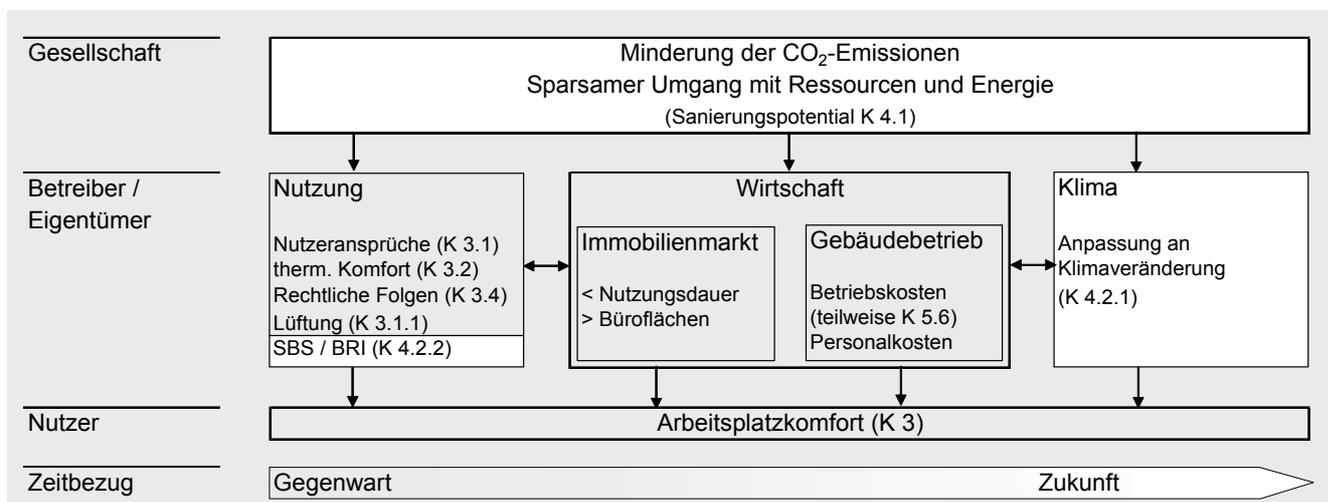
Aus der Sichtweise des Gebäudebetreibers oder Eigentümers sind im Gebäude ohne Klimaanlage hohe sommerliche Temperaturen mit der damit einhergehenden Unzufriedenheit der Nutzer und eine – antizipierte – Reaktion auf die zu erwartende Klimaveränderung ein Beweggrund. In einem Gebäude mit Klimaanlage können Anzeichen für ein Sick Building Syndrome (SBS) oder die Building Related Illness (BRI) und hohe Betriebskosten (Energie) das Klimakonzept in Frage stellen. Einen weiteren Anreiz stellt die verbesserte Vermietbarkeit eines sanierten Gebäudes auf dem Immobilienmarkt dar.

Ziel der Sanierung soll auf der Ebene des Gebäudenutzers immer eine Verbesserung des Arbeitsplatzkomforts sein.

Die Betrachtung der Besonderheiten einer Gebäudesanierung im Vergleich zu einem Neubau schließt das Kapitel ab (Abschnitt 3.3).

<sup>1</sup> Unterschreitung der CO<sub>2</sub> Emissionen von 1990 um 8 % für die EU

**Abb. 4.1:** Beweggründe bei einer Sanierung auf eine aktive Kühlung zu verzichten. Die in Abb. 4.1 grau-angelegten Themen auf der Gebäudeebene werden in weiteren Unterkapiteln besprochen, Bezüge auf die übrigen Themen finden sich im angegebenen Kapitel. Verwendete Abkürzungen: K = Kapitel, SBS = Sick Building Syndrome; BRI = Building Related Illness



## 4.1 Eigenschaften des Nichtwohn- und Bürogebäudebestands in Deutschland und Europa

Eingangs wurde auf eine Nutzung der Energieverbrauchswerte und Flächenangaben zur Ermittlung von Sanierungspotentialen und die zur Erstellung von Energieverbrauchsszenarien hingewiesen. Zusätzlich dazu sind Daten zur vergleichenden Einordnung von Energieverbrauchswerten im Bereich der Forschung und mit der Einführung von Energiepässen auch für Mietinteressenten, Gebäudebetreiber und Investoren von Interesse.

Von erheblichem praktischen Nutzen wären Zahlen, die anhand einer Einordnung nach Gebäudetyp und Altersklasse bewertete Größenordnungen für den Energieverbrauch nennen (z. B.: gering, mittel, hoch). Zahlen dieser Art stehen für Bürogebäude bezüglich der Altersklasse in Schweden (Einteilung in sechs Perioden) [Byggnadsradet, 1995] und als typologische Einordnung für ein Energieverbrauchs-Benchmarking in Großbritannien (vier Gebäudegruppen) zur Verfügung [ActionEnergy, 2003].

Für Deutschland existiert solches Datenmaterial weder für Nichtwohngebäude im Allgemeinen, noch für Bürogebäude. Der nachfolgende Blick auf die vorhandenen Daten zum Energieverbrauch und zum Bestand von Bürogebäuden in Deutschland und im europäischen Ausland schließt die Betrachtung von Nichtwohngebäuden ein, da einige Angaben nicht speziell für Bürogebäude erhältlich sind.

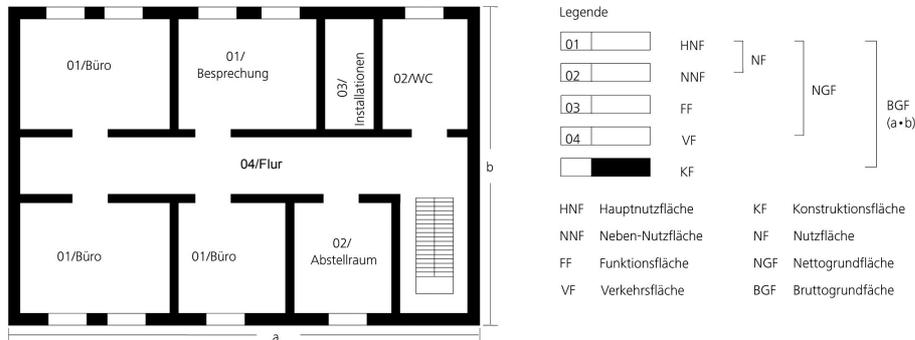
### 4.1.1 Größe des Nichtwohn- und Bürogebäudebestands in Europa und Deutschland

#### Unterschiedliche Datenlagen

Die statistische Aufarbeitung der Daten unterscheidet sich stark von Land zu Land. Einige Länder (z. B. die Schweiz oder Schweden) verfügen über genaue und auch aktuelle Zahlen zum Bestand an Bürogebäuden. In anderen Ländern (Italien und Spanien) gibt es ältere, amtliche Daten, die aber nicht fortgeschrieben wurden [Rußig, 1999]. Manche Länder hingegen haben erst vor einigen Jahren mit der Erfassung der Büroneubauten begonnen (z. B. Deutschland alte Bundesländer seit 1980, neue Bundesländer seit 1993). Der Bestand kann daher nur geschätzt werden. Eine Folge davon ist, dass die erhältlichen Zahlen für Deutschland voneinander abweichen.

Ähnlich wie mit den Flächen, verhält es sich mit Angaben über die Altersstruktur der Gebäude. In einigen Ländern (Schweiz, Schweden) sind die vorhandenen Bürogebäude - über eine Gebäudeerfassung - in Altersklassen unterteilt. Eine Übertragung der prozentualen Anteile auf Deutschland ist aber nicht möglich, da hier die Schäden des zweiten Weltkrieges zu einem anderen Bauverhalten führten. Für Deutschland existieren Schätzungen. Eine amtliche statistische Erfassung der Bürogebäude nach Gebäudetypen gibt es bisher nicht.

Die im Folgenden genannten Flächen aus der Literaturrecherche werden - wo möglich - auf einheitliche Flächenbezüge umgerechnet. Einen Überblick über die Flächenbezeichnungen gibt Abb. 4.2.



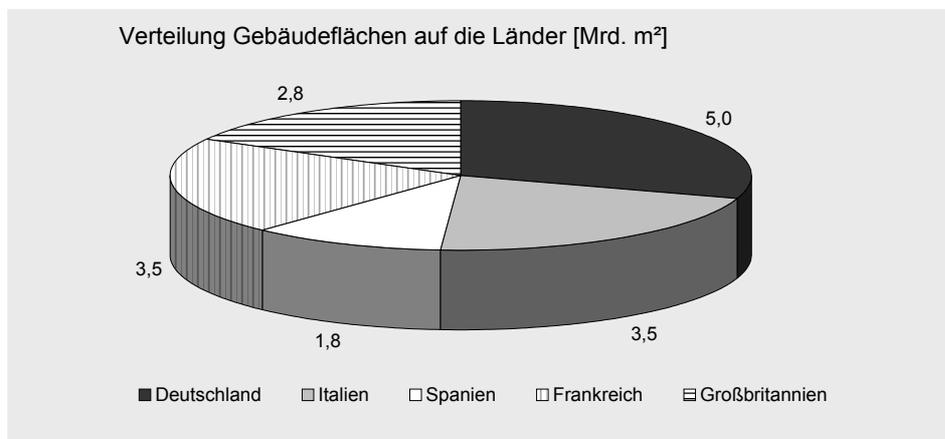
**Abb. 4.2:** Flächen-  
definitionen nach  
[VDI 3807, 1994]

### Flächenangaben Nichtwohngebäude

Nach einer Studie des IFO Institutes [Rußig, 1999] für die Länder Deutschland, Frankreich, Italien, Spanien und Großbritannien gab es im Jahr 1989 in Summe einen Gebäudebestand an „Wohn- und Nutzfläche“ zwischen 16 und 17 Mrd. m<sup>2</sup> (ohne landwirtschaftliche Gebäude). Die Aufteilung auf die einzelnen Länder zeigt Abb. 4.3. Rund ein Drittel (5,5 Mrd. m<sup>2</sup>) dieser Gesamtfläche nehmen Nichtwohngebäude ein. Auf Deutschland entfallen 5,0 Mrd. m<sup>2</sup>. Davon gehören rund 38 % (1,9 Mrd. m<sup>2</sup>) der Kategorie der Nichtwohngebäude an.

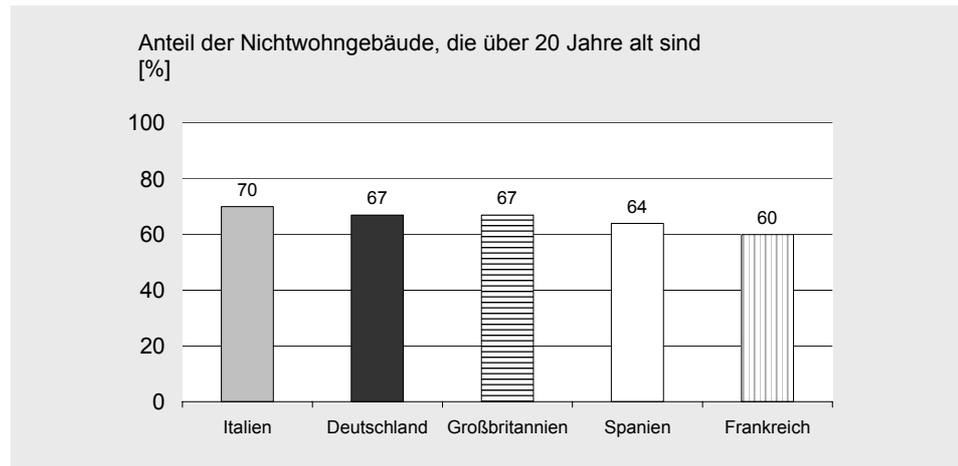
Die Studie nimmt eine grobe Einteilung der Nichtwohngebäude in Altersklassen vor. In Deutschland befinden sich rund zwei Drittel der „Nutzflächen“ befinden sich in Gebäuden, die vor 1978 errichtet wurden (Abb. 4.4).

Eine weitere Flächenangabe für Nichtwohngebäude in Deutschland findet sich in einer Studie des Fraunhofer IBP [Erhorn et al., 1992]. Hier beläuft sich die Fläche für Nichtwohngebäude (ohne landwirtschaftliche Gebäude) in den alten Bundesländern auf 1,15 Mrd. m<sup>2</sup><sub>NF</sub>.



**Abb. 4.3:** Verteilung  
Gebäudeflächen auf die  
Länder [Rußig, 1999].  
Flächenbezug: keine Angaben  
Datengewinnung: siehe Info  
A4.1.1-1

**Abb. 4.4:** Anteil an Nichtwohngebäuden mit einem Alter von über 20 Jahren am gesamten Gebäudebestand jedes Landes (Stand 1998) [Rußig, 1999].  
Flächenbezug: keine Angaben



Diese Zahl weicht von dem in [Rußig, 1999] genannten Wert von 1,9 Mrd. m<sup>2</sup> ab, wofür es folgende Gründe gibt:

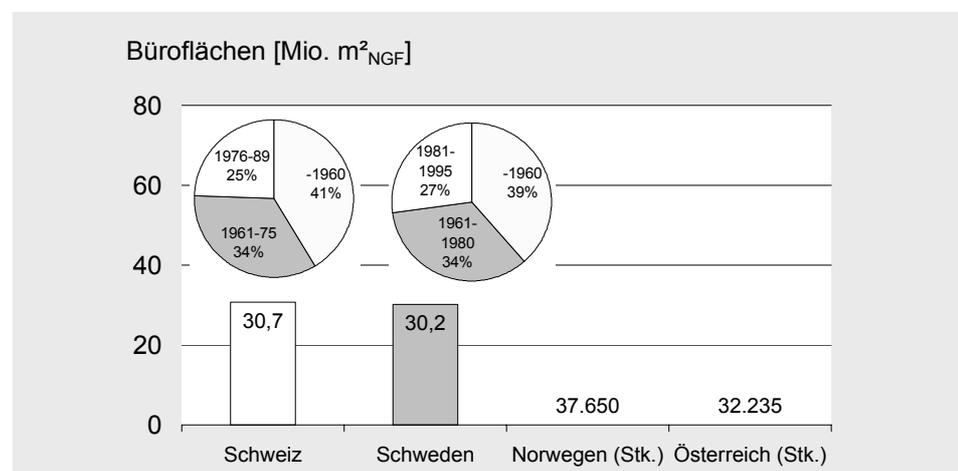
- [Erhorn et al., 1992] beziehen sich im Gegensatz zu [Rußig, 1999] nur auf die alten Bundesländer
- [Rußig, 1999] gibt keinen Flächenbezug (NF, NGF oder BGF) an

Auch im Rahmen von Energieverbrauchsstatistiken im Sektor „Gewerbe, Handel und Dienstleistungen“ (früher auch als „Kleinverbraucher“ bezeichnet) werden Angaben zur Fläche von Nichtwohngebäuden gemacht. Einige Quellen [Kolmetz et al., 1995] referenzieren die Zahlen aus [Erhorn et al., 1992], neuere Literatur [Schlomann et al., 2004] nennt gesamtdeutsche Flächenangaben für den Nichtwohnungsbau. Die Zahl von 1,93 Mrd. m<sup>2</sup><sub>BF</sub> (BF = überbaute Betriebsfläche, ohne Landwirtschaft, Gartenbau, Militär, Flughäfen, Fischerei, Klär- und Wasserwerke), liegt nahe an der in [Rußig, 1999] genannten.

**Abb. 4.5:** Übersicht über den Bestand an Büroflächen für einzelne Länder. Für die Schweiz ([Wüest et al., 1991], [Pavlu et al., 2004]) und Schweden ([Byggforskningsradet, 1995] zitiert in [Blomsterberg, 2004]) sind auch die Altersklassen angegeben. Bei der Interpretation sollte beachtet werden, dass die Flächenbezüge für die Schweiz zur besseren Vergleichbarkeit umgerechnet (siehe Info A4.1.1-2) wurden. Die Altersklassen für die Schweiz und Schweden sind unterschiedlich. Für Norwegen existiert nur eine Angabe über die Gesamtzahl der Bürogebäude. Nach Auskunft von „Statistics Norway“ (2005) gibt es keine Angaben zu m<sup>2</sup> und Alter der Gebäude. In Österreich [Mahidi, 2004] machen die Bürogebäude rund 11 % des Gesamtgebäudebestandes aus, es gibt keine Angaben zur Gebäudefläche. Datengewinnung und Umrechnung siehe Info A4.1.1-2.

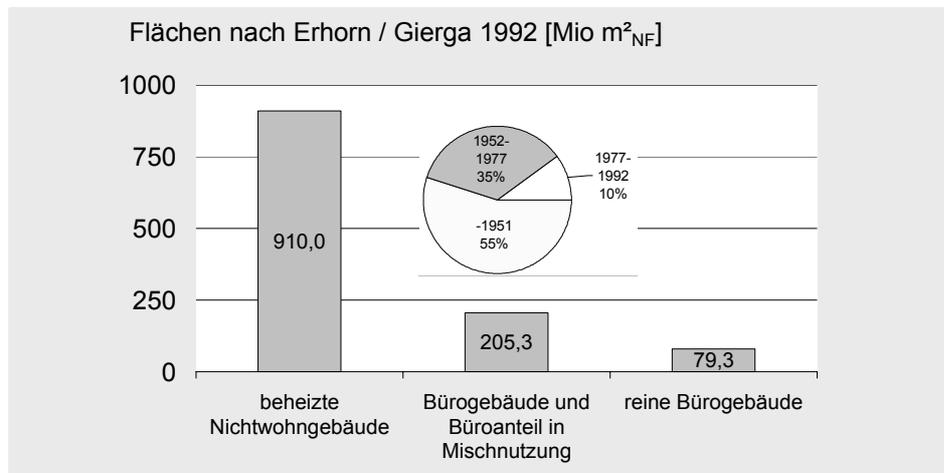
#### Flächenangaben Bürogebäude

Für die Länder Schweiz, Österreich, Schweden und Norwegen existieren Zahlen zum Bestand an Bürogebäuden (Balkendiagramm, Abb. 4.5). Angaben zur Altersstruktur der Bürogebäude gibt es in der Schweiz und in Schweden. Danach liegt der Anteil von Gebäuden, die zwischen 1960 und 1985 errichtet wurden, in der Schweiz bei einem Drittel.

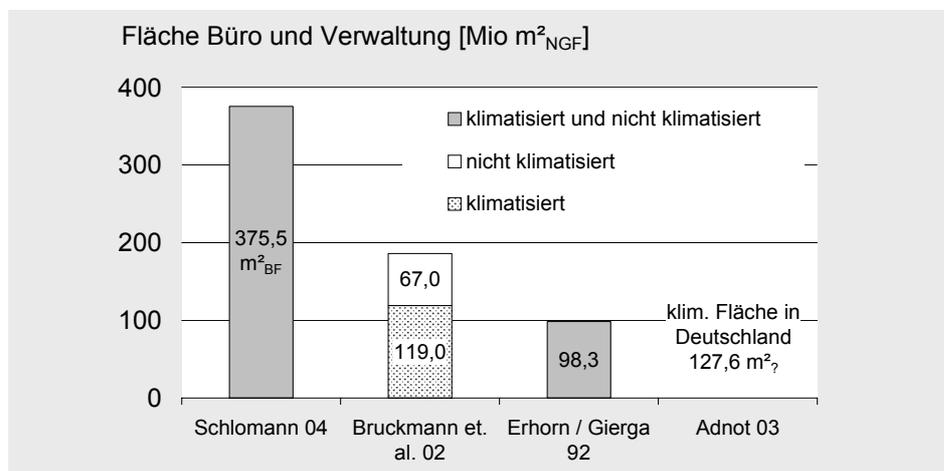


In Schweden wurde ein Drittel des Bestands an Bürogebäuden in den Jahren zwischen 1960 und 1980 errichtet (Kreisdiagramme, Abb. 4.5).

Zahlen zum Bürogebäudebestand gibt es für Deutschland in Form von Bestandsschätzungen (Abb. 4.6 und 4.7) [Erhorn et al., 1992], als Grundlage für Energieverbrauchsstatistiken (Abb. 4.6) [Schlomann et al., 2004] und im Rahmen von Forschungsarbeiten zum Thema Klimatisierung (Abb. 4.7) [Bruckmann et al., 2002]. Diese Angaben weichen voneinander ab. Auch zur Altersstruktur gibt es nur sehr wenige Aussagen. Immerhin kann als gesichert gelten, dass nach Aussage des Statistischen Bundesamtes zwischen 1980 und 2004 in den alten Bundesländern 86,3 Mio.  $m^2_{NF}$  (ca. 107,0 Mio.  $m^2_{NGF}$ , Umrechnung nach [VDI 3807, 1994]) errichtet wurden. In den neuen Bundesländern wird die Statistik erst seit 1993 geführt.



**Abb. 4.6 (oben):** Nutzfläche im beheizten Nichtwohnungsbau in Westdeutschland nach [Erhorn et al., 1992] Datengewinnung siehe Info A4.1.1-3



**Abb. 4.7 (unten):** Flächen Büro und Verwaltung in Deutschland nach diversen Quellen, Flächenbezug auf NGF umgerechnet. Für Erhorn / Gierga wird die reine Bürofläche (79,3 Mio.  $m^2_{NF}$  umgerechnet nach [VDI 3807, 1994] in 98,3 Mio.  $m^2_{NGF}$ ), ohne Anteile in mischgenutzten – z. B. Wohnungen, Büros und Läden - Gebäuden, ausgewiesen. Diese würde sonst alleine für Westdeutschland 255 Mio.  $m^2_{NGF}$  betragen und somit weit über der Abschätzung von Bruckmann et. al. liegen. Der Wert von Schlomann 04 bezieht sich auf die nicht näher definierte „überbaute Betriebsfläche“.

### Diskussion der Flächenangaben für Bürogebäude in Deutschland

[Erhorn et al., 1992] gewinnen die Daten durch Angaben des Statistischen Bundesamtes zur Anzahl von Nichtwohngebäuden in Westdeutschland, eigene Hochrechnungen und Gewichtungen anhand der Daten zur Arbeitsstätten- und zur Bautätigkeitsstatistik. Die Konzeption der Typengebäude beruht auf heizenergetischen Aspekten. Anhand von Abschätzungen wurde auch eine prozentuale Einteilung des Bestands in drei Baualtersklassen vorgenommen.

Der Größenvergleich von 1,15 Mrd.  $m^2_{NF}$  mit dem eingangs genannten Wert von 1,9 Mrd.  $m^2$  Nichtwohngebäudeflächen in [Rußig, 1999] wirkt plausibel, da hier die Differenz durch das Fehlen der neuen Bundesländer erklärt werden kann. Der Anteil an Bürogebäuden nach [Erhorn et al., 1992] ist, wenn man die Mischnutzungen anteilig mitberücksichtigt, im Vergleich mit den anderen Angaben sehr hoch (Legende zu Abb. 4.7). Dies ist dann wichtig, wenn man berücksichtigt, dass die Typologie nach Erhorn / Gierga Bürogebäude mit mehr als 6 Obergeschossen nicht beinhaltet, einen existierenden Anteil von Bürogebäuden also ausblendet.

Auch die Angaben nach [Bruckmann et al., 2002] basieren auf Daten des Statistischen Bundesamtes, die weiteren Hochrechnungen beruhen jedoch auf Angaben von Marktforschungsinstituten für einzelne Städte. Diese werden auf weniger städtische Gebiete angepasst und übertragen.

Vorteilhaft an dieser Methode ist, dass die Datenbasis für die einzelnen Städte recht differenziert und aktuell ist. Eine große Ungenauigkeit liegt jedoch in der Übertragung auf nichtstädtische Gebiete der Bundesrepublik.

Schlomann bezieht die Daten aus eigenen Befragungen in Betrieben „mit büroähnlicher Nutzung“, Betriebsbefragungen aus [Geiger et al., 1999], Beschäftigungsstatistiken und Hochrechnungen. Als Betriebe mit „büroähnlicher Nutzung“ gelten hier Kreditinstitute und Versicherungen, Verlagsgewerbe, sonstige betriebliche Dienstleistungen, Gebietskörperschaften und Sozialversicherung, Post, Telekom und die Bahn AG. Unschärfen liegen vermutlich im Flächenbezug (nicht näher definierte „überbaute Betriebsfläche“) und darin, dass in den aufgeführten Betrieben nur Teile der gesamten Betriebsfläche als Bürofläche genutzt werden. Dies erklärt auch die starke Abweichung nach oben im Vergleich zu den anderen Zahlen.

Der Blick auf die Daten zeigt, dass wegen der unterschiedlichen Arten der Abschätzungen die genannten Werte uneinheitlich sind. Daher ist ein wertender Vergleich der Daten, mit dem Ziel eines schlüssigen Ergebnisses, nicht möglich.

Eine exakte Abschätzung des möglichen Sanierungspotentials für Bürogebäude erscheint aus den folgenden Gründen schwierig

- Es kann nicht mit Sicherheit gesagt werden, welche Abschätzung der tatsächlich existierenden Anzahl von Büro- und Verwaltungsgebäuden am nächsten kommt.
- Für die Bestimmung des Sanierungspotentials wäre die Kenntnis über die vorhandenen Gebäudetypen mit dazugehörigen Bestandszahlen wichtig. Diese sind den vorhandenen Daten nicht zu entnehmen.  
Bei einer Erweiterung der vorhandenen Typologie nach [Erhorn et al., 1992] bleibt die Anzahl der ergänzten Gebäudetypen weiter unbekannt.

Werden die Zahlen dennoch für überschlägige Abschätzungen wie z. B. in Kapitel 5.6 verwendet, so sollte auf die unsichere Datenlage hingewiesen werden.

#### 4.1.2 Energieverbrauch von Bürogebäuden in Europa und Deutschland

##### Datenlage

Energieverbrauchstatistiken in Deutschland führen Bürogebäude im Sektor „Gewerbe, Handel, Dienstleistungen und übrige Verbraucher“ (kurz GHD). Die statistische Erfassung des Energieverbrauchs in diesem Bereich ist jedoch lückenhaft [Schloman et al., 2000]. Ab dem Jahr 1995 wird in den jährlichen Bilanzen der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB) [AGEB, div. Jg.] der Endenergieverbrauch des GHD-Sektors von dem der privaten Haushalte getrennt ausgewiesen. Alle Studien zum Thema Energieverbrauch im GHD Sektor nehmen die Daten der AGEB als Ausgangsmaterial oder Bezugswert für die eigenen Berechnungen. Eine Aufschlüsselung des Endenergieverbrauchs auf die verschiedenen Anwendungsbereiche (Beleuchtung, mechanische Energie, Wärme) wird von der VDEW-Projektgruppe „Nutzenergiebilanzen“ in Zusammenarbeit mit der AGEB vorgenommen [VDEW, 2005]. Danach macht beim Sektor der Haushalte die Bereitstellung von Wärme, Warmwasser und sonstiger Prozesswärme rund 90 % des gesamten Endenergieverbrauchs aus, im GHD Sektor nimmt dieser Anteil nur noch 70 % des Endenergieverbrauchs ein [VDEW, 2005], (Abb. 4.8).

Innerhalb des GHD Sektors findet jedoch keine Aufteilung statt, die Bürogebäude und deren Energieverbrauch als solche ausweist. Auch das Statistische Bundesamt macht keine regelmäßigen Angaben zum Energieverbrauch nach Subsektoren (z. B. Branchen).

Die Datenlage ist jedoch Gegenstand einiger Untersuchungen, die im Folgenden kurz beschrieben werden.

- Die Datenbank IKARUS ermöglicht auf Grundlage von volkswirtschaftlichen Rahmendaten die Analyse künftiger energiewirtschaftlicher und insbesondere technischer Entwicklungen. Bestandteil der Datenbank sind Energieverbrauchsdaten<sup>2</sup> für den GHD Sektor, die über Hochrechnungen gewonnen und mit den Angaben der AGEB abgeglichen wurden [Kolmetz et al., 1995]. Gebäudespezifische Daten (Flächen, Altersstruktur) von Nichtwohngebäuden gehen auf [Erhorn et al., 1992] zurück.
- Grundlage anderer Studien ist die Auswertung von Stichproben (Betriebsbegehungen, Messungen und Befragungen), um den Energieverbrauch einzelner Branchen des GHD Sektors einmalig zu ermitteln [Geiger et al., 1999], [Schloman et al., 2004].

<sup>2</sup> Basisjahr war ursprünglich 1995, ein Update auf das Jahr 2000 fand 2003 statt

Da allgemein nach Branchen unterschieden wird (mit Ausnahme von [Schloman et al., 2004]), sind hier Büro- und Verwaltungsgebäude anteilig verteilt<sup>3</sup>. Zusätzlich sind die energieverbrauchsbestimmenden Faktoren, wie Fläche, klimatisierte Fläche, Alter des Gebäudebestands etc., nur lückenhaft bekannt.

<sup>3</sup> Einzig der Sektor Kreditinstitute und Versicherungen kann als reine Büronutzung gelten

Interessant ist daher die Studie [Schloman et al., 2004], da sie, neben anderen Betrieben, den Energieverbrauch von 369 „büroähnlichen Betrieben“ durch eine Untersuchung über Einzelinterviews erfasst. Die Angaben zum Gesamtenergieverbrauch für den Sektor „mit büroähnlicher Nutzung“ werden anhand der Befragungen, einem Abgleich mit Beschäftigtenzahlen, weiteren statistischen Stichproben und anderen Studien (z. B. AGEB) gewonnen und Anwendungsbilanzen erstellt (Abb. 4.8).

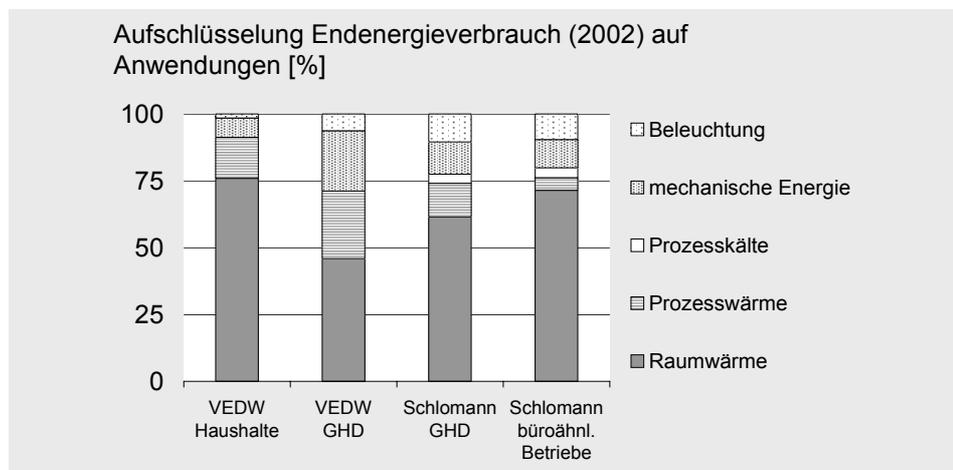
<sup>4</sup> siehe dazu auch den Kommentar zu den Flächenangaben, Abschnitt „Flächenangaben für Bürogebäude“

Bezogen auf den Endenergieverbrauch des gesamten GHD Sektors liegt der Endenergieverbrauch der „büroähnlichen Betriebe“ bei rund 22 % [Schlomann et al., 2004]. Berücksichtigt man, dass in der Definition von „büroähnlichen Betrieben“ auch Bereiche, die nicht als Büro genutzt werden, enthalten sind<sup>4</sup>, so liegt der Anteil am Endenergieverbrauch unter 22 %.

Im europäischen Ausland ist die Datenlage ähnlich wie in Deutschland. Nationale Energieverbrauchsstatistiken, sofern diese geführt werden (z. B. in Norwegen [Bergh et al., 2003]), basieren nicht auf Einzelerfassungen der Gebäude, sondern auf Hochrechnungen anhand von Stichproben. Im Bereich der Einzeluntersuchungen gibt es jedoch sehr vorbildliche Untersuchungen, wie z. B. in Schweden [Bygghörskningsradet, 1995] und [REPAB, 2003], in der Schweiz [Weber, 2001] und in Norwegen das „Bygningsnettverkets“. Dies ist ein freiwilliges Programm, im dem die Energieverbräuche von Bestandsgebäuden erfasst und Optimierungspotentiale erschlossen werden [Enova, 2003], [Enova, 2004].

Die bisher zitierten Daten für Deutschland erlauben es, den Energieverbrauch von Gebäuden mit ausschließlicher Büronutzung in einen größeren Kontext einzuordnen. Für eine genaue Bestimmung des Energieverbrauchs von Bestandsgebäuden sind die Zahlen auf nationaler Ebene aber nicht differenziert genug. Zur detaillierten Betrachtung des Energieverbrauchs von Bürogebäuden bietet sich als weitere Betrachtungsebene der Blick auf Einzeluntersuchungen zu diesem Thema an.

**Abb. 4.8:** Aufschlüsselung des Endenergieverbrauchs unterschiedlicher Sektoren auf Anwendungen (Stand 2002). Definition der Begriffe, Datengewinnung, Angaben absoluter Energieverbrauch und Kommentar siehe Info A4.1.2-1



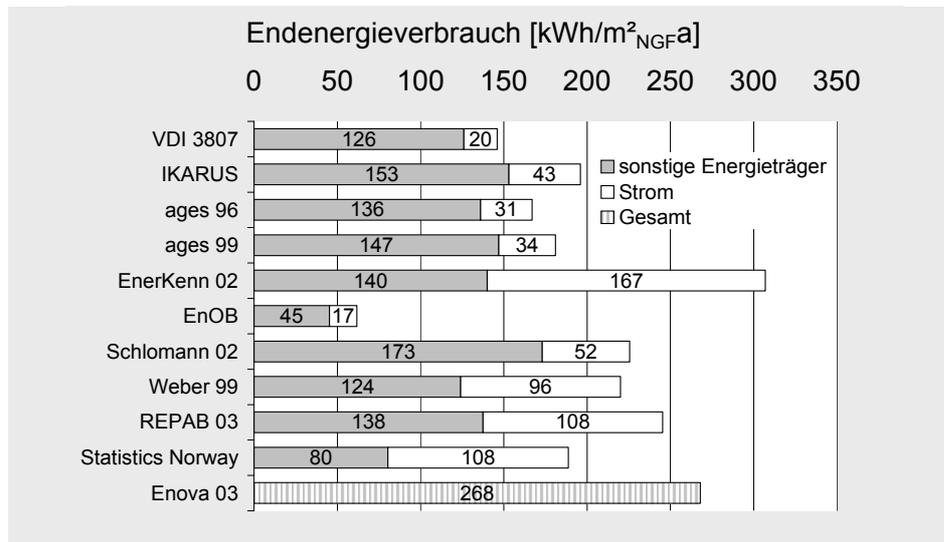
### Einzeluntersuchungen zum Energieverbrauch von Bürogebäuden

Einen Überblick über die Ergebnisse der Studien gibt Abb. 4.9. Ist der Verbrauch von Strom und fossilen Energieträgern getrennt ausgewiesen, so wurde der Primärenergieverbrauch mit den Umrechnungsfaktoren nach [DIN V 18599-1:2005-07] (nicht erneuerbarer Anteil, Faktoren siehe Tab. A4.1.2-1) berechnet.

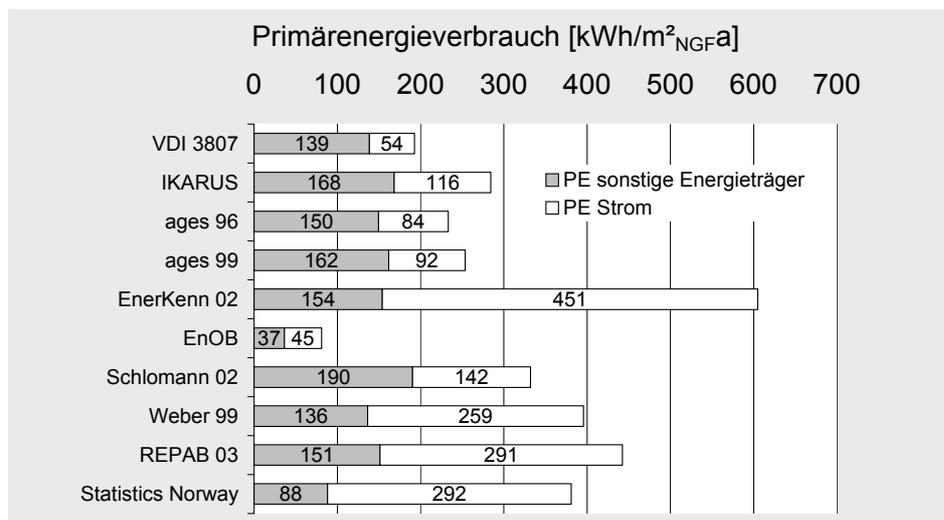
Der Vergleich der Projekte in Deutschland zeigt beim Heizwärmeverbrauch mittlere Unterschiede und große Abweichungen beim Stromverbrauch der Gebäude. Der auffallend geringe Stromverbrauch der Gebäude nach VDI 3807 und nach ages 96 und 99 deutet auf eine einfache technische Ausstattung hin

und eher kleine klimatechnische Anlagen. Im Gegensatz dazu ist der sehr hohe Stromverbrauch der Gebäude des Projektes EnerKenn auf den hohen Technisierungsgrad der Gebäude (Baujahr 1995-2002) zurückzuführen.

Nicht mit den übrigen Bestandsgebäuden vergleichbar sind die Werte der Neubauten des BMWI Förderkonzeptes EnOB. Die niedrigen Verbrauchsdaten geben einen Hinweis darauf, wie stark der Energieverbrauch bei beispielhaften, neuerrichteten (Baujahr 1998-2004) Gebäuden reduziert werden kann.



**Abb. 4.9 (oben):** Endenergieverbrauch in Bürogebäuden. Die Zahl hinter den Quellen bezieht sich auf das Jahr der Erhebung. Besonderheiten: Schlomann: Der Flächenbezug ist die „überbaute Betriebsfläche“. Zur Interpretation sind die Besonderheiten der Einzeluntersuchungen in Tab. 4.1 aufgeführt.



**Abb. 4.10 (unten):** Primärenergieverbrauch in Bürogebäuden. Die Zahl hinter den Quellen bezieht sich auf das Jahr der Erhebung. Für die Schweiz, Schweden und Norwegen wurden zum besseren Vergleich die Primärenergiefaktoren von Deutschland nach [DIN V 18599-1:2005-07] verwendet. Hier würden sich bei Verwendung der landesspezifischen Primärenergiefaktoren die größten Abweichungen für Strom ergeben. Anmerkung: Die niedrigen primärenergetischen Verbrauchsdaten der Gebäude des BMWI Förderkonzeptes EnOB (keine Berücksichtigung von Produktionsflächen) erklären sich aus einer energiebewussten Planung. Informationen siehe [www.enba-monitor.de](http://www.enba-monitor.de)

Die Gebäude mit „büroähnlicher Nutzung“ nach [Schlomann et al., 2004] weisen einen etwas höheren Heizenergie- und Stromverbrauch als die übrigen deutschen Bestandsgebäude auf.

Eine Stichprobenuntersuchung von Bürobauten in der Schweiz nach Weber zeigt einen hohen Stromverbrauch. Der Heizwärmeverbrauch sinkt jedoch nicht in gleichem Maße, da die erhöhten internen Wärmequellen nur im Winter zur Senkung des Wärmeverbrauchs anteilig wirksam werden. Der Stromverbrauch für Klimakälte mindert nicht den Heizwärmeverbrauch. Insgesamt bevorzugt der Mittelwert als arithmetisches Mittel kleine Bauten. Mit geringerer Fläche werden sie gleich gewertet, wie Bauten mit großer Fläche.

**Tab. 4.1:** Eigenschaften der Einzeluntersuchungen. Der Flächenbezug der Quelle wurde nach [VDI 3807, 1994] in NGF umgerechnet. Verwendete Abkürzungen: EK = Energiekennwert, F = Fläche, V = Verbrauch, GT = Gradtagszahl

Für die Bürogebäude in Schweden und Norwegen wäre wegen des kälteren Klimas ein höherer Energieverbrauch für die Gebäudeheizung zu erwarten. Im Vergleich zu den übrigen Projekten sind die Verbrauchswerte hingegen geringer. Dies kann ein Hinweis auf einen besseren Wärmeschutz der Gebäude sein. Die Stromverbrauchswerte sind im Vergleich zu den deutschen Projekten sehr hoch, rund 20 % der untersuchten Gebäude werden aktiv gekühlt.

Einzeluntersuchung	Bestand	Anzahl Gebäude	Zeitraum für Messdaten	Klimabereinigung	Ermittlung Mittelwerte	Quelle	Flächenbezug Quelle
VDI 3807	öffentliche Liegenschaft, D	1000	1993-1997	Mittlere GT Würzburg	$\Sigma$ von F + V, dann Berechnung eines mittleren EK	[VDI 3807, 1997]	BGF
IKARUS		Modellrechnung		-		zitiert in: [Zeine, 1996]	BGF
ages 96	öffentliche Liegenschaft, D	1000	1992-1994	Mittlere GT Würzburg	$\Sigma$ von F + V, dann Berechnung eines mittleren EK	[Zeine, 1996]	BGF
ages 99	öffentliche Liegenschaft, D	1700	1997-1998	Mittlere GT Würzburg	$\Sigma$ von F + V, dann Berechnung eines mittleren EK	[ages, 2000]	BGF
EnerKenn 02	D	9	2001	Mittlere GT Würzburg	Flächengewichtetes arithmetisches Mittel der EK der Einzelgebäude	[Wambsga nß et al., 2004]	NGF (beheizt)
EnOB	D	13	1999-2004 (1 Jahr pro Gebäude)	-	$\Sigma$ von F + V, dann Berechnung eines mittleren EK	[Voss et al., 2006], Update Interner Bericht	NGF (beheizt)
Schlomann 02	D	369	2002 (Ablesung)		k. A.	[Schloman n et al., 2004]	Betriebsfläche
Weber 99	Zufallsauswahl, freiwillig, CH	100	1986-1996	-	Arithmetisches Mittel der EK der Einzelgebäude	[Weber, 2001]	BGF
REPAB 03	SE	-	-	-	-	[REPAB, 2003]	NGF *
Statistics Norway	NO	8* + 145**	* = 2000-2001 ** = 2000	GT für Norwegen	Arithmetisches Mittel der EK der Einzelgebäude	[Bergh et al., 2003]	BGF
Enova 03	NO, freiwilliges Netzwerk			GT für Norwegen	Arithmetisches Mittel der EK der Einzelgebäude	[Enova, 2004]	BGF

\* = Es galt die NGF mit Innenwänden. Nach [Blomsterberg, 2004] kann mit einem Abzug von 10 % auf NGF umgerechnet werden.

## Fazit

Die Zusammenstellung der vorhandenen Daten über Fläche und Energieverbrauch von Bürogebäuden zeigt, dass die Kenntnis über den Bestand lückenhaft ist.

Nimmt man die Unsicherheit bei den Flächenangaben in Kauf, so sind - wie die Literatur zeigt - überschlägige Energieverbrauchsszenarien für den Nichtwohnbereich möglich. Als Konsequenz der sehr unsicheren Angaben zu den Büroflächen, ist die Datenlage für den Endenergieverbrauch des Bürogebäudebestands nicht eindeutig.

Energieverbrauchswerte von Einzelgebäuden im Bestand können anhand der vorliegenden Untersuchungen grob eingeordnet werden. Nicht möglich ist allerdings die Klassifizierung des Energieverbrauchs eines Gebäudes anhand von belastbaren Vergleichsdaten für den jeweiligen Gebäudetyp und das Baualter.

Die unterschiedlichen Angaben zum Flächebestand von Büro- und Verwaltungsgebäuden und das Fehlen verlässlicher Angaben zu Bestandszahlen einzelner Gebäudetypen erschweren eine realitätsnahe Ermittlung insbesondere des CO<sub>2</sub>-Minderungspotentials für Bürogebäude im Bestand.

## 4.2 Sanierungsgründe auf Gebäudeebene

### 4.2.1 Klimaveränderung

Die Diskussion um eine Klimaerwärmung und deren Ausmaß ist seit den 70er Jahren Gegenstand wissenschaftlicher Auseinandersetzung. Öffentliches Interesse erfuhr sie durch die hohen Temperaturen der Sommer 2003 und 2006. Besonders der Jahrhundertssommer 2003 warf die Frage auf, ob und in welcher Ausprägung sich solche Vorkommnisse wiederholen könnten und wie sich eine Klimaveränderung auf die Bewirtschaftung des Gebäudebestands auswirken würde.

Beide Themen sind Inhalt der nachfolgenden exemplarischen Literaturübersicht.

#### *Einordnung Sommer 2003*

- Gegenstand der Arbeit von [Luterbacher et al., 2004] ist die Rekonstruktion der Oberflächentemperaturen in Europa seit 1500 auf Grundlage von Eisbohrungen, Jahresringen und Messungen. In Übereinstimmung mit anderen Forschungsarbeiten wird dabei deutlich, dass das Klima des späten 20. und des frühen 21. Jahrhunderts statistisch signifikant wärmer war, als die vergangenen 500 Jahre. Das gesamte 20. Jahrhundert weist einen Erwärmungstrend von +0.08 °C ± 0,3 °C pro Jahrzehnt mit einer verstärkten Zunahme seit 1977 auf. Der Sommer 2003 überschritt die Sommerperioden (Juni, Juli, August) von 1902 bis 1995 um etwa 2 °C. Nach Schätzungen der Autoren liegt die Rückkehrperiode eines Sommers wie der des Jahres 2003 für

Klimaverhältnisse zu Beginn des 20. Jahrhunderts bei mehreren Millionen Jahren. Bei ausschließlicher Betrachtung der Daten der letzten Jahre, reduziert sich die Zeitspanne auf weniger als 100 Jahre.

- Anhand von Langzeitmessungen aus den Jahren 1864 bis 2003 in der Schweiz entwickeln und belegen die Autoren [Schär et al., 2004] die These, dass ein System mit erhöhten Temperaturschwankungen (zusätzlich zum Anstieg des Temperaturmittels) die Temperaturen des Sommers 2003 schlüssiger begründet, als die allein auf der Temperaturerhöhung basierende statistische Wiederholungswahrscheinlichkeit. Das Auftreten einer langen, heißen Periode erklären die Autoren durch die Zunahme der Verteilungsbreite der Normalverteilung, die zugleich einen Anstieg der Varianz von Jahr zu Jahr darstellt. Wird per Simulation die Varianz, also die Schwankung, erhöht, so nehmen auch die Extremereignisse im Verhältnis zu den mittleren klimatischen Bedingungen zu. Die Zunahme der Standardabweichung einer Temperaturserie (1864 bis 2003, Basel-Binningen, Genf, Bern-Liebefeld, Zürich) von  $\sigma = 0,94 \text{ °C}$  um 50 % erhöht die Wahrscheinlichkeit eines Sommers wie im Jahr 2003 (Temperaturerhöhung =  $3,85 \text{ °C}$  im Verhältnis zum Zeitraum zwischen 1990-2002) um einen Faktor von 150. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass eine Steigerung der Varianz während der letzten Jahre (belegt durch die gemessene Zunahme von heißen Perioden) eine plausible Erklärung für den Sommer 2003 bietet. Die zunehmende Erwärmung mit einem gleichzeitigen Anstieg der Variabilität könnte zukünftig in einer Mehrung ungewöhnlicher Wetterzustände des europäischen Sommerklimas münden.

#### *Auswirkungen auf Gebäude*

- Die Auswirkungen der Klimaerwärmung auf den Heiz- und Kühlenergiebedarf von Gebäuden in der Schweiz untersucht [Frank, 2005] anhand eines mehrgeschossigen Wohn- oder Bürogebäudes (Kenndaten und Gebäudebetrieb, siehe Tab. A4.2.1-1). Dabei werden anhand von vier Szenarien die Wetterdaten für Zürich-Kloten verändert:  
 A: Basis Daten von 1961-1990  
 B: Test Referenz Jahr 1981-1990: Jahresmittel +  $0,7 \text{ °C}$   
 C: Zeitraum 1981 bis 2003: Jahresmittel +  $1,0 \text{ °C}$   
 D: erwartender Trend für die Zeit von 2050 bis 2100: Jahresmittel +  $4,4 \text{ °C}$

Der Einfluss von Szenario B und C auf den Heizenergiebedarf (Setpoint:  $20 \text{ °C}$ ) ist moderat, bei Szenario D vermindert sich der Bedarf in Bürogebäuden um bis zu 58 %. Während des Sommers liegt bei Szenario B und C aufgrund sommerlicher Nachtlüftung die Raumtemperatur meistens noch unter  $28 \text{ °C}$ . Szenario D bewirkt eine Steigerung des Kühlenergiebedarfs (Setpoint  $26 \text{ °C}$ ) je nach Baustandard um das 2 und 10 Fache.

- Die Auswirkungen einer Klimaerwärmung auf Wohngebäude in England und mit welchen Sanierungsmaßnahmen die Bestandsgebäude am besten dem Klimawandel angepasst werden können, untersuchen [Gaterell et al., 2005].

- [Roaf et al., 2005] stellen anhand verschiedener Klimaszenarien die baulichen, raumklimatischen und wirtschaftlichen Konsequenzen für die Industrieländer und die Entwicklungsländer dar.

### *Schlussfolgerung*

Die klimatischen Betrachtungen zeigen, dass der Erwartungshorizont für ein Extremereignis wie den Sommer 2003 unterschiedlich bewertet wird. Die statistische Berechnung einer Wiederholungswahrscheinlichkeit auf alleiniger Basis der Temperaturerhöhung des gesamten 20. Jahrhunderts greift vermutlich zu kurz und kann durch die zusätzliche Berücksichtigung der Varianz erweitert werden.

Eine Temperaturzunahme führt zur Verringerung des Heizenergiebedarfs bei gleichzeitiger Erhöhung des Kühlenergiebedarfs. Soll letzterer so gering wie möglich gehalten werden, so gewinnen die Reduktion solarer und interner Wärmequellen sowie die Erschließung von Wärmesenken (z. B. Nachtlüftung, Erdreich) an Bedeutung. Allerdings nimmt mit höheren Außentemperaturen das Kühlpotential der Außenluft ab. Dass Gebäude, die die Nachtluft als Kältesenke nutzen, während langer Hitzeperioden an ihre Grenzen stoßen, zeigen Messungen im Sommer 2003.

### **4.2.2 Sick Building Syndrome**

In Bestandsgebäuden mit Klimaanlage können Anzeichen für das sogenannte „Sick Building Syndrome“ (SBS) das Klimakonzept in Frage stellen. Das SBS wird nach [Johnson, 1995] und [Redlich et al., 1997] folgendermaßen definiert: SBS kann dann festgestellt werden, wenn Menschen in einem Gebäude häufiger als erwartet mehrere der nachstehenden Symptome gleichzeitig aufweisen. Diese werden mit der im Gebäude verbrachten Zeit tendenziell stärker, beim Verlassen des Gebäudes können sie zurückgehen oder verschwinden:

- gereizte, trockene oder tränende Augen
- gereizte, trockene, verstopfte oder laufende Nase
- trockener oder schmerzender Hals
- trockene, juckende oder gereizte Haut
- Kopfschmerz, Müdigkeit, Gereiztheit oder Konzentrationsschwierigkeiten

Im Gegensatz zur Building Related Illness (BRI) lassen sich beim SBS die Beschwerden nicht eindeutig Eigenschaften des Innenraumes (z. B. bakterieller Verunreinigungen der Luft) zuordnen [Kruppa et al., 2002]. Dies erschwert die zweifelsfreie Belegbarkeit der Ursachen des SBS.

Anliegen eines groß angelegten Forschungsvorhabens in der jüngsten Vergangenheit, dem ProKlima-Projekt, war es daher, statistisch fundierte Erkenntnisse über die Ursachen von Befindlichkeitsstörungen zu gewinnen. Um so viele potentielle Einflussfaktoren wie möglich aufzunehmen, wurden Befragungen mit medizinischen Untersuchungen, physikalischen, biologischen und chemischen Messungen der Raumklimaparameter und Überprüfungen der Gebäudetechnik (z. B. RLT - raumluftechnische - Anlagen) kombiniert. Das Projekt umfasste 14 Bürogebäude in Deutschland (8 davon mit RLT-Anlage und unterschiedlichen thermodynamischen Behandlungsfunktionen, die übrigen frei belüftet) mit jeweils über 200 Beschäftigten.

Nach der Studie liegt der Anteil der befindlichkeitsgestörten Personen in allen 14 Gebäuden zwischen 20 und 55 %. Dabei ist in klimatisierten Gebäuden die Beschwerdenrate um ca. 15 % höher als in frei belüfteten Gebäuden [Kruppa et al., 2002].

Ein monokausaler Zusammenhang zwischen schlechten Raumklimaparametern und den Befindlichkeitsstörungen kann über Messungen (physikalische, chemische und mikrobiologische Messgrößen) ausgeschlossen werden [Bischof et al., 2003]. Insgesamt weisen alle Arbeitsplätze eine niedrige bis moderate Belastung durch diese Faktoren auf, wobei die Belastung klimatisierter Arbeitsplätze mit Schadstoffen in der Regel geringer ist als die von frei belüfteten. Diese reduzierte Belastung ist nach Ansicht der Autoren darauf zurückzuführen, dass eine RLT-Anlage im Gegensatz zur freien Lüftung konstant höhere Luftwechselraten erzeugt und Schadstoffe entweder durch Filter abhält oder im Raum zumindest verdünnt und abführt. Trotz dieser vorteilhaften Messwerte, ist die empfundene Luftqualität und Zufriedenheit mit der Lüftung bei Gebäuden mit RLT-Anlagen schlechter als in Gebäuden mit freier Lüftung. Über eine multivariate Auswertung kommt die Studie zu dem Schluss, dass eine alleinige Ursache-Wirkungsbeziehung zwischen Befindlichkeitseinschränkung und Raumklimaparametern nicht existiert und die Beziehung vielmehr durch psychosoziale, arbeitsbedingte und demographische Faktoren stark überlagert wird [Bischof et al., 2003].

Die Chance bei einer Exposition gegenüber ungünstigen Bedingungen an Befindlichkeitsstörungen zu leiden, lässt sich statistisch messen (Odds-Ratio). Im Rahmen des Projektes zeigt die Untersuchung, dass der Faktor in erster Linie dann steigt, wenn das Raumklima als gesundheitsschädlich eingestuft wird. In Gebäuden mit RLT-Anlagen ist dies doppelt so häufig der Fall als bei denen mit freier Lüftung. Auf die Punkte „Arbeitsbelastung“, „Schulabschluss“ und „Geschlecht“ folgt erst an 5. Stelle die Wartung der RLT-Anlage als „Risikofaktor“. Bei als „schlecht gewartet“ bewerteten Anlagen ist dabei das Risiko 1,25-fach erhöht, bei einer als „gut gewartet“ beurteilten Anlage liegt das Risiko bei 0,7 und ist damit geringer als bei freier Lüftung.

Die Autoren folgern, dass Ursachen von Befindlichkeitsstörungen, die in den Bereichen der personenbezogenen Merkmale, der ausgeführten Tätigkeit und der Arbeitsplatzgestaltung liegen, auf das Gebäude und seine technische Ausstattung übertragen werden.

Zwei wichtige Faktoren, die die Akzeptanz von RLT-Anlagen beim Nutzer verbessern sind nach [Kruppa et al., 2002]:

- Einfluss auf das Raumklima: 85 % der Befragten äußern Wunsch nach direktem Einfluss auf das Raumklima. Personen, die einen direkten Einfluss ausüben können, geben signifikant geringere Befindlichkeitsstörungen an.
- Konsequente Einhaltung hygienischer Standards: 30 % der Nutzer in Büros mit freier Lüftung bewerten das Raumklima als gesundheitsabträglich. Diese Anzahl verdoppelt sich auf 60 % bei Nutzern an Arbeitsplätzen mit RLT-Anlage. Die im Projekt als gut gewerteten Anlagen werden auch vom Nutzer als weniger schädlich betrachtet (32 % schädlich).

## 4.3 Besonderheiten bei der Sanierung

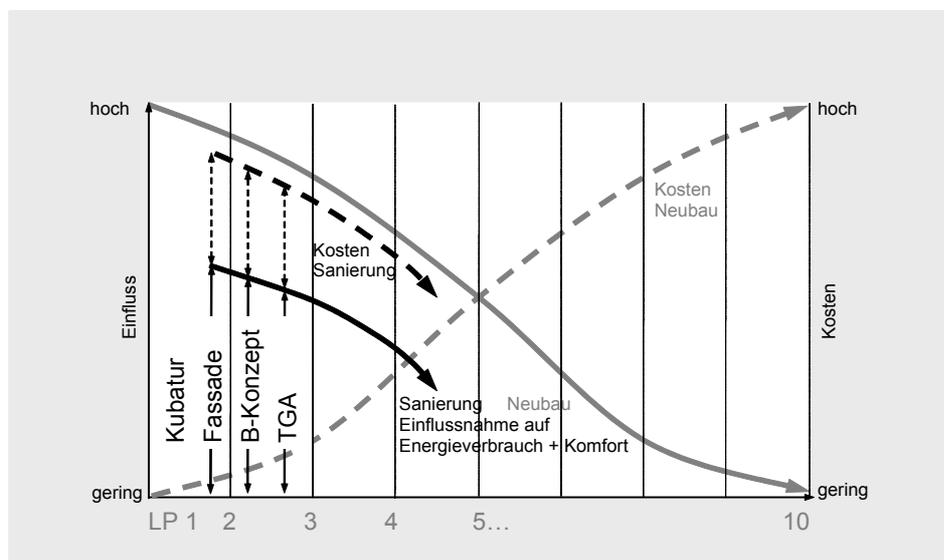
### Entscheidungsspielraum beim Neubau und bei Sanierungen

Da das Funktionieren passiver Kühlungsmaßnahmen stark von den Gebäudeeigenschaften abhängt, muss ihre Integration bei Neubauten zu einem frühen Zeitpunkt in der Gebäudeplanung erfolgen. Eine ganzheitliche, gewerkeübergreifende, „integrale Planung“ (Definition, siehe Info A4.3-1) gewährleistet hier, dass von Anbeginn die ehemals modularen Aufgaben der Gebäudeklimatisierung in die baukonstruktiven und planerischen Bereiche integriert werden.

Beim Bestandsgebäude sind die wichtigsten Planungsweichen schon gestellt und die Kubatur, das Bürokonzept, die Fassadenart und –aufteilung bereits vorhanden. Daher kommen für den Einsatz der passiven Kühlung nur Gebäude in Frage, die bestimmte gebäudetypologische Voraussetzungen erfüllen. Diese Eigenschaften werden in Kapitel 5 besprochen.

Vergleicht man den Planungsprozess eines Neubaus mit dem einer Sanierung, so werden Unterschiede deutlich (Abb. 4.11). Beim Neubau (graue Linien) sind zu Beginn (Leistungsphasen HOAI 1-5) die Freiräume groß, über Planungsentscheidungen den Energieverbrauch zu senken und den Nutzerkomfort zu verbessern. Der Einfluss der Beschlüsse auf die Kosten ist dabei noch gering. Je weiter die Planung fortschreitet, desto kleiner wird der Handlungsspielraum bei gleichzeitigem Anstieg der Kosten.

Bei der Sanierung (schwarze Linien) sind die Möglichkeiten zur Veränderung begrenzt und unterscheiden sich von Gebäude zu Gebäude. Angesichts der Kosteneffizienz kann davon ausgegangen werden, dass Änderungen der Kubatur, Deckenhöhe und der Anordnung der tragenden Bauteile zu aufwändig sind. Eine günstige Eingriffsmöglichkeit ergibt sich für bauliche Änderungen der Fassade. Unter der Voraussetzung, dass diese als nichttragende Konstruktion nur vorgehängt ist, kann ihre Aufteilung und der baukonstruktiver Aufbau verändert werden. Die Grenzen des Handlungsspielraums werden durch die Höhe der Investitionskosten bestimmt.



**Abb. 4.11:** Unterschiedliche Einflussgrößen bei Neubauten und im Gebäudebestand auf den Energieverbrauch und Komfort des Gebäudes (durchgezogene Linie) und deren Auswirkungen auf die Investitionskosten (gestrichelte Linien). Die grauen Pfeile charakterisieren den Neubau, die schwarzen Pfeile bei der Sanierung kennzeichnen die gebäudeabhängige Größe der Veränderungsmöglichkeiten und die Spannweite der Investitionskosten. Die Grafik lehnt sich für den Neubau an Löhnert, G. in [Voss et al., 2006] an. Verwendete Abkürzungen: B-Konzept = Bürokonzept; TGA = Technische Gebäude Ausstattung; LP = Leistungsphase

Eine Übertragung dieser allgemeinen Überlegungen auf eine Sanierung mit Maßnahmen der passiven Kühlung zeigt folgendes: neben einer Reduktion der solaren Wärmequellen durch eine Veränderung der Fassade, konzentriert sich die Bandbreite des Machbaren vorwiegend auf Erschließungssysteme für Kältesenken und Wärmeabfuhrsysteme, die nicht in die Gebäudestruktur oder die Gründung integriert sind (siehe Kap. 5.5). Am häufigsten anwendbar ist die Nachtlüftung in Verbindung mit der Nutzung der Gebäudestruktur als Speichermasse.

Unabdingbare Voraussetzung für die passive Kühlung ist die Begrenzung der inneren und äußeren Wärmelasten.

#### *Unwägbarkeiten im Planungsprozess*

Eine weitere Besonderheit von Sanierungen ist die Unvorhersehbarkeit bestimmter Entwicklungen im Planungsprozess. Da bei Planungsbeginn nicht alle Charakteristiken des Bestandsgebäudes bekannt sind, können sich im Verlauf der Ausführungsarbeiten (z.B. beim Öffnen von Fassaden oder abgehängten Decken) neue, dem ursprünglichen Konzept zuwiderlaufende, Planungsanforderungen ergeben.

Bezüglich des Brandschutzes ergeben sich dann Änderungen, wenn das Gebäude nicht mehr unter den Bestandsschutz fällt. Dies tritt ein, sobald eine Nutzungsänderung (auch einzelner Räume) vorgenommen wird. Daher sollte mit der entsprechenden Behörde frühzeitig abgeklärt werden, ob und in welchem Umfang ein neues Brandschutzkonzept erstellt werden muss. Ein weiterer Punkt im Zusammenhang mit dem Brandschutz im Bestand ist die Bewehrung der Gebäudedecken. Ist diese nur mangelhaft überdeckt, so müssen die Decken u. U. verkleidet werden und sind nur noch eingeschränkt als thermische Speichermasse nutzbar. Da die Bestimmungen zwischen den einzelnen Bundesländern abweichen, ist auch hier eine frühe Abstimmung mit der zuständigen Behörde vorteilhaft.

Die EU-Richtlinie 2002/91/EG [2002/91/EG] fordert eine Beurteilung der Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden und die Ausstellung von Energieausweisen. In Deutschland schafft die Novellierung des „Gesetzes zur Einsparung von Energie in Gebäuden“ (EnEG) den Rechtsrahmen für die Verwendung von Energieausweise für Neubauten und für Bestandsgebäude [EnEG, 2005]. Die Novellierung der EnEV mit konkreten Regelungen liegt als Referentenentwurf vom 16.11.06 vor. Als Berechnungsgrundlage für Nichtwohngebäude legt dieser die DIN V 18599:2005-07 (siehe Info A4.3.2) fest.

Voraussichtlich sind Bestandsgebäude vom Nachweis der Gesamtenergieeffizienz, die den Energiebedarf für Beheizung, Lüftung, Kühlung, Warmwasser und Beleuchtung einschließt, bei einer Sanierung von mehr als 25 % der Außenflächen betroffen [2002/91/EG]. Der Energiepass muss für Bestandsgebäude, die verkauft oder neu vermietet werden, ausgestellt werden. Die DIN V 18599:2005-07 sieht eine Bewertung des Primärenergiebedarfs des realen Gebäudes über ein Referenzgebäude vor. Das Referenzgebäude entspricht in seiner Geometrie dem realen Gebäude, wird aber mit standardisierten Daten zur Hülle und Haustechnik berechnet. Der Bedarf des Referenzgebäudes legt eine nicht zu überschreitende Obergrenze fest. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass bei Sanierungen auf den ermittelten Referenzwert ein „Zuschlag“ in der Größenordnung von 40 %

hinzugerechnet wird [BMVBE, 2005], die Anforderungen an die Sanierung damit also etwas gelockert werden. Weitere Informationen zur DIN V 18599:2005-07 und die Darstellung der Berechnungsergebnisse für Gebäude 1 siehe Info A4.3-2, Info A2.1-1 und Hoffmann, C. in [Kerschberger et al., 2007].

## 4.4 Zusammenfassung

Die Literaturstudie zum Bestand von Bürogebäuden in Deutschland zeigt, dass dieser zwar beträchtlich ist, die Datenlage jedoch unsicher. Daher können keine differenzierten Aussagen zur Größe des Sanierungspotentials gemacht werden. Zur Größe des Sanierungspotentials sind allenfalls überschlägige Abschätzungen möglich, wie dies in Kap. 5.6 exemplarisch zum Thema Kosten gemacht wird. Ähnlich verhält es sich mit Angaben zum Energieverbrauch von Bürogebäuden im Bestand.

Die Betrachtung des Themas Klimaerwärmung anlässlich des Sommers 2003, macht deutlich, dass es zur Bestimmung seiner Wiederholungshäufigkeit unterschiedliche Vorhersagemodelle, mit voneinander abweichenden Ergebnissen gibt. Grundsätzlich und unter der Zielvorgabe eines geringen Energieverbrauchs sind Gebäude mit einem robusten thermischen Verhalten dank passiver Kühlung besser geeignet, auch während Hitzeperioden ein annehmbares thermisches Verhalten zu bieten, als Gebäude, die schon bei moderaten Außentemperaturen Überhitzungserscheinungen aufweisen. Es gilt allerdings zu bedenken, dass die Wirkung der Außenluft als Wärmesenke bei zunehmender Außentemperatur abnimmt.

Die ProKlima-Studie, die das SBS in großem Umfang untersuchte, stellt dar, dass in Gebäuden mit RLT-Anlage – trotz besserer Messwerte der Luftqualität – die Bewertung der Nutzer schlechter ausfällt als in frei belüfteten Gebäuden. Wichtige Faktoren zur Verbesserung der Nutzerakzeptanz von RLT-Anlagen sind eine hohe Einflussmöglichkeit der Nutzer auf das Raumklima und eine sehr gute Wartung der Anlage.

Abschließend macht die Diskussion der Besonderheiten beim Einsatz passiver Kühlkonzepte in der Gebäudesanierung deutlich, dass die Unterschiede zum Neubau hauptsächlich im Bereich der Handlungsspielräume und der Unwägbarkeiten im Planungsprozess bei einer Sanierung liegen.

Sind nun die Beweggründe und Besonderheiten für den Verzicht auf eine aktive Kühlung geklärt, so werden im nächsten Kapitel die Bausteine zu einer Verbesserung des thermischen Raumklimas und ihre Umsetzbarkeit im Gebäudebestand erläutert.

## 4.5 Literatur

- [2002/91/EG] *Richtlinie 2002/91/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2002 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden.*
- [AGEB, div. Jg.] AGEB, div. Jg. *Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen: Energiebilanzen für die Bundesrepublik Deutschland.* Frankfurt / Main: VVEW Energieverlag.
- [DIN V 18599-1:2005-07] *Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz- End-, und Primärenergiebedarfs für Beheizung, Kühlung, Belüftung, Beleuchtung und Warmwasserbereitung - Teil 1: Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung und Bewertung der Energieträger.* Berlin: Beuth Verlag.
- [EnEG, 2005] EnEG, 2005. "Zweites Gesetz zur Änderung des Energieeinsparungsgesetzes". *Bundesgesetzblatt* Jg. 2005 (Teil I, Nr. 58), 2682-2683.
- [Kyoto, 1997] *Protokoll von Kyoto zum Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen.*
- [VDI 3807, 1994] *Energieverbrauchskennwerte für Gebäude, Blatt 1: Grundlagen.* Düsseldorf: VDI Verein Deutscher Ingenieure.
- [VDI 3807, 1997] *Energieverbrauchskennwerte für Gebäude, Blatt 2: Heizenergie- und Stromverbrauchskennwerte.* Düsseldorf: VDI Verein Deutscher Ingenieure.
- [ActionEnergy, 2003] ActionEnergy. 2003. *Energy consumption guide 19 - Energy use in offices.* London (GB): ActionEnergy - Carbon Trust.
- [ages, 2000] ages. 2000. *Verbrauchskennwerte 1999 - Energie und Verbrauchskennwerte in der Bundesrepublik Deutschland.* Münster: ages GmbH.
- [Bergh et al., 2003] Bergh, P. M.; A. S. Abrahamsen. 2003. *Energy consumption in the services sector. 2000.* Kongsvinger (N): Statistics Norway - Department of Industry Statistics.
- [Bischof et al., 2003] Bischof, W., et al. 2003. *Exposition und gesundheitliche Beeinträchtigungen in Bürogebäuden - Ergebnisse des ProKlima-Projektes.* Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- [Blomsterberg, 2004] Blomsterberg, A. 2004. *Energy use in swedish office buildings.* Lund (S): Division of Energy and Building Design, Lund University.
- [BMVBE, 2005] BMVBE. 2005. *Grundlagen für die Ermittlung des Vergleichswertes bei der Ausstellung von freiwilligen Energieausweisen für Nichtwohngebäude auf der Grundlage des Energiebedarfs nach DIN V 18599 im Rahmen des Feldversuches der Deutschen Energie-Agentur (Stand 24.08.2005).* Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen.
- [Bruckmann et al., 2002] Bruckmann, O., et al. 2002. *Teilbericht zum Forschungsvorhaben: Energiebedarf bei der technischen Erzeugung von Kälte.* Essen: Universität Essen, Institut für Angewandte Thermodynamik und Klimatechnik (IATK).
- [Bygghörsningsradet, 1995] Bygghörsningsradet. 1995. *Energiboken. Kunskapsläge och forskningsfront.* Stockholm (S): Bygghörsningsradet.
- [Enova, 2003] Enova. 2003. *Byggningsnettverkets energistatistikk 2002.* Trondheim (N): Enova SF.
- [Enova, 2004] Enova. 2004. *Byggningsnettverkets energistatistikk 2003.* Trondheim (N): Enova SF.
- [Erhorn et al., 1992] Erhorn, H.; M. Gierga. 1992. *Bestand und Typologie beheizter Nichtwohngebäude in Westdeutschland - Analyse und Entwicklung energierelevanter Gebäudekenndaten.* Berichts-Nr.: WB 72/1992, Stuttgart: Fraunhofer Institut für Bauphysik.
- [Frank, 2005] Frank, T. 2005. "Climate change impacts on building heating and cooling energy demand in Switzerland". *Energy and Buildings* 37, 1175-1185.
- [Gaterell et al., 2005] Gaterell, M. R.; M. E. McEvoy. 2005. "The impact of climate change uncertainties on the performance of energy efficiency measures applied to dwellings". *Energy and Buildings* 37, 982-995.
- [Geiger et al., 1999] Geiger, B.; E. Gruber; W. Megele. 1999. *Energieverbrauch und Einsparung in Gewerbe, Handel und Dienstleistung.* Heidelberg: Phisica-Verlag.
- [Johnson, 1995] Johnson, B. G. 1995. *Sick building syndrome.* Kopenhagen (DK): World Health Organization Regional Office for Europe.
- [Kerschberger et al., 2007] Kerschberger, A.; M. Brillinger; M. Binder. 2007. *Energieeffizient Sanieren - Mit innovativer Technik zum Niedrigenergiestandard.* Berlin: Verlag Solarpraxis.
- [Kolmetz et al., 1995] Kolmetz, S., et al. 1995. *Energieverbrauchsstrukturen im Sektor Kleinverbraucher.* Jülich: Forschungszentrum Jülich GmbH.

- [Kruppa et al., 2002] Kruppa, B.; W. Bischof; M. Bullinger-Naber. 2002. "Positive und negative Wirkungen raumluftechnischer Anlagen auf Befindlichkeit, Leistungsfähigkeit und Gesundheit". *gi Gesundheits-Ingenieur* 123 (2), 88-95.
- [Luterbacher et al., 2004] Luterbacher, J., et al. 2004. "European Seasonal and Annual Temperature Variability, Trends and Extremes Since 1500". *Science* 303, 1499-1503.
- [Mahidi, 2004] Mahidi, M. 2004. *Gebäude- und Wohnungszählung 2001 - Hauptergebnisse Österreich*. Wien (A): Statistik Austria.
- [Pavlu et al., 2004] Pavlu, B.; D. Matter; M. Merkli. 2004. *Zukünftige Entwicklung der Energiebezugsflächen - Perspektiven bis 2035*. Bern (CH): Wüest & Partner, Zürich.
- [Redlich et al., 1997] Redlich, C. A.; J. Sparer; M. R. Cullen. 1997. "Sick-building syndrome". *The Lancet* 349, 1013-1016.
- [REPAB, 2003] REPAB. 2003. *Arskostnader Kontor 2003*. Möndal (S): REPAB AB.
- [Roaf et al., 2005] Roaf, S.; F. Nicol. 2005. *Adapting Buildings and Cities for Climate Change - A 21st century survival guide*. Oxford (GB): Architectural Press.
- [Rußig, 1999] Rußig, V. 1999. "Gebäudebestand in Westeuropa: Fast 17 Mrd. m<sup>2</sup> Wohn- und Nutzfläche". *IFO Schnelldienst* (12), 13-19.
- [Schär et al., 2004] Schär, C., et al. 2004. "The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves". *Nature* 427, 332-336.
- [Schlomann et al., 2000] Schlomann, B.; H.-J. Ziesing; B. Geiger. 2000. *Erarbeitung kostengünstiger Erhebungsformen zur Erfassung des effektiven Energieverbrauchs im Bereich Haushalte und Kleinverbraucher*. Berichts-Nr.: NF-III-03, Berlin, Karlsruhe, München: Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW), Fraunhofer Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung (ISI), Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik an der TU München.
- [Schlomann et al., 2004] Schlomann, B., et al. 2004. *Energieverbrauch der privaten Haushalte und des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD)*. Berichts-Nr.: 17/02, Karlsruhe, Berlin, Nürnberg, Leipzig, München: Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW), Fraunhofer Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung (ISI), GfK Marketing Services GmbH & Co.KG, GfK Panel Services Consumer Research GmbH, Institut für Energetik und Umwelt GmbH, Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik an der TU München.
- [VDEW, 2005] VDEW. 2005. *Endenergieverbrauch in Deutschland 2003*. Berichts-Nr.: VDEW Materialien M-16/2004, Berlin: Verband der Elektrizitätswirtschaft - VDEW - e.V.
- [Voss et al., 2006] Voss, K., et al. 2006. *Bürogebäude mit Zukunft*. 2. Auflage. Berlin: Verlag Solarpraxis.
- [Wambsganß et al., 2004] Wambsganß, M.; S. Froelich; M. Klingele. 2004. *Energiekennwerte und Gebäudeanalysen für neun Verwaltungsgebäude der Deutschen Bahn AG - Geschäftsbereich Netz*. Karlsruhe: Universität Karlsruhe, Fachgebiet Bauphysik und Technischer Ausbau (fbta).
- [Weber, 2001] Weber, L. 2001. *Energie in Bürogebäuden*. Zürich (CH): vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich.
- [Wüest et al., 1991] Wüest, H.; U. Rey; T. Steinbach. 1991. *Dokumentation Gebäudebestand Schweiz*. Bern (CH): Bundesamt für Konjunkturfragen, CH.
- [Zeine, 1996] Zeine, C. 1996. *Energie und Verbrauchskennwerte von Gebäuden in der Bundesrepublik Deutschland*. Münster: ages GmbH.



## 5 Verbesserung des sommerlichen Raumklimas - Bausteine

Bei der passiven Kühlung werden durch ein Zusammenspiel von entwerflichen und bauphysikalischen Qualitäten Alternativen der technischen Gebäudeausrüstung entwickelt, die es ermöglichen, natürliche Kältequellen wie die Nachtluft oder das Erdreich zu nutzen.

In diesem Kapitel sollen einerseits die bauphysikalischen und technischen Zusammenhänge sowie andererseits die Möglichkeiten zur Umsetzung der passiven Kühlung in der Sanierung erläutert werden.

Der erste Abschnitt (5.1) behandelt die klimatischen und mikroklimatischen Rahmenbedingungen. Während das Klima eine unveränderliche Gegebenheit darstellt, sind besonders das Mikroklima der Fassade und damit die Temperatur der Fassadengrenzschichten durch die Planung beeinflussbar. Diese Temperatur kann für das Raumklima dann entscheidend sein, wenn die fassadennahe Luft über ventilatorgestützte Lüftungskonzepte mit dezentralen Zuluft einlässen in der Fassade auch unter ungünstigen Bedingungen (hohe Temperaturen) in den Raum gelangt.

Weitere Unterkapitel widmen sich der Energiebilanz für passiv gekühlte Räume (Abschnitt 5.2), der Reduktion der Wärmequellen (Abschnitt 5.3), der Verbesserung der Wärmespeicherung (Abschnitt 5.4) und den bei einer Sanierung erschließbaren Wärmesenken (Abschnitt 5.5).

Den Abschluss des Kapitels bildet der Vergleich von Investitions- und Unterhaltskosten für passive Kühlsysteme, die Nachtluft als Wärmesenke nutzen und aktive Kühlsystemen (Abschnitt 5.6).

### 5.1 Klimatische Faktoren

#### 5.1.1 Mitteleuropäisches Klima

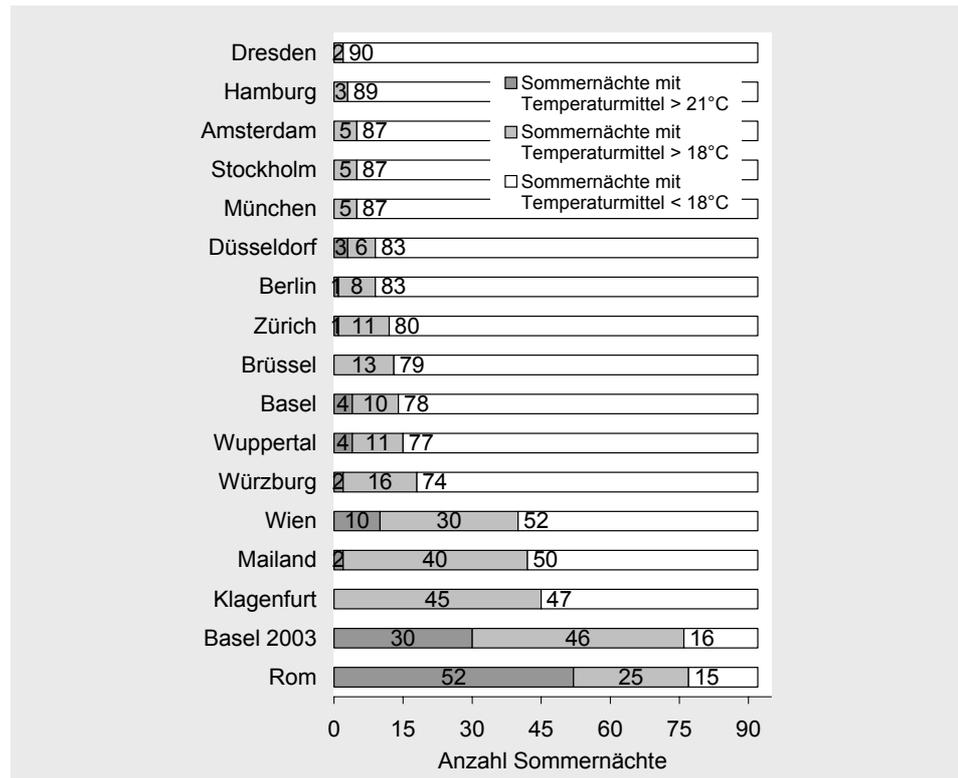
Die klimatischen Umgebungsbedingungen in Nordeuropa bieten insgesamt günstige Rahmenbedingungen für die passive Kühlung. Bei einer mittleren Anzahl von Sommertagen ( $T_{\max} \geq 25 \text{ °C}$ , z. B. Basel: 01.06 bis 31.08 = 31 Sommertage) tritt zwischen Tag- und Nachttemperaturen immer eine Temperaturamplitude auf und „Tropische Nächte“ mit Außentemperaturen  $\geq 20 \text{ °C}$  sind selten.

Für den erfolgreichen Einsatz von passiven Kühlungsmaßnahmen ist zunächst die Kenntnis über die zu erwartenden externen Wärmelasten und das Auftreten von Hitzeperioden erforderlich. Wird die Nachtluft als Wärmesenke genutzt, so sind die Temperaturen in der Nacht und das Verhältnis zwischen diesen und der Raumtemperatur entscheidend.

Vor diesem Hintergrund wurden exemplarisch einzelne Städte Nordeuropas untersucht<sup>1</sup>. Um den Temperaturschwankungen, die von Jahr zu Jahr an einem Standort auftreten können (Beispiel Sommer 2003 und Juli 2006), Rechnung zu tragen, sind die Werte für den Standort Basel, CH, im Jahr 2003 in die Betrachtung einbezogen.

<sup>1</sup> Informationen zur Datenbasis Meteonorm und eine Übersicht über die monatlichen Temperaturmittelwerte, siehe Info A5.1.1-1 und Tab. A5.1.1-1)

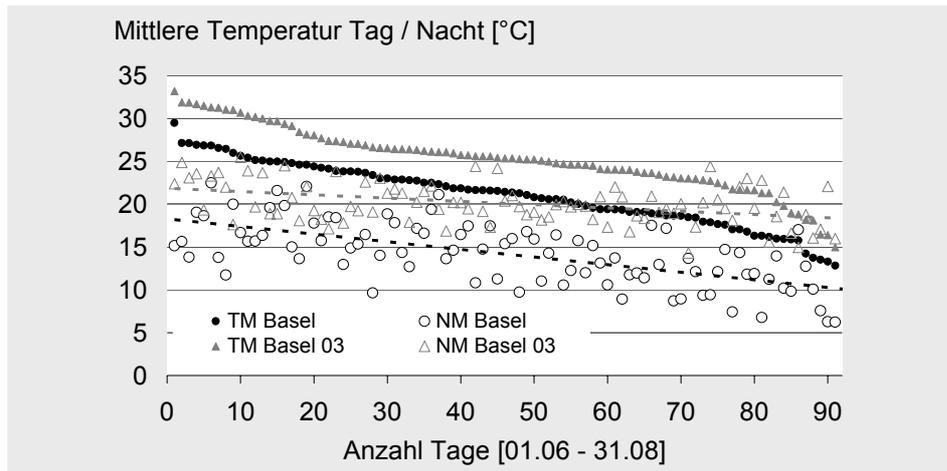
Für eine wirksame Wärmeabfuhr über Nachtlüftung, sollten die Temperaturen in der Nacht an mindestens fünf Stunden unter 21 °C liegen [Zimmermann, 2003]. Abb. 5.1 führt die Anzahl der Sommernächte auf, während derer im Mittel eine Außentemperatur von 21 °C und 18 °C überschritten wird. Betrachtet man die 18 °C Grenze, so wird allerdings deutlich, dass in Wien, Mailand und Klagenfurt während etwa der Hälfte der Nächte die mittlere Temperatur nicht unter 18 °C fällt. Das Beispiel vom Sommer 2003 in Basel zeigt, dass 30 Nächte einen Mittelwert von über 21 °C aufwiesen, mehr als eine Verachtfachung gegenüber dem Referenzklima.



**Abb. 5.1:** Anzahl der Sommernächte mit einem Außentemperaturmittel von  $\geq 18^\circ\text{C}$ . In der Periode gibt es insgesamt 92 Sommernächte. Betrachtet wird der Zeitraum vom 01. Juni bis zum 31. August, als „Nacht“ wird die Zeit von 24:00 bis 06:00 Uhr früh definiert. Datenquelle: Meteororm Vers. 5.0, Daten Basel 2003: Universität Basel, CH

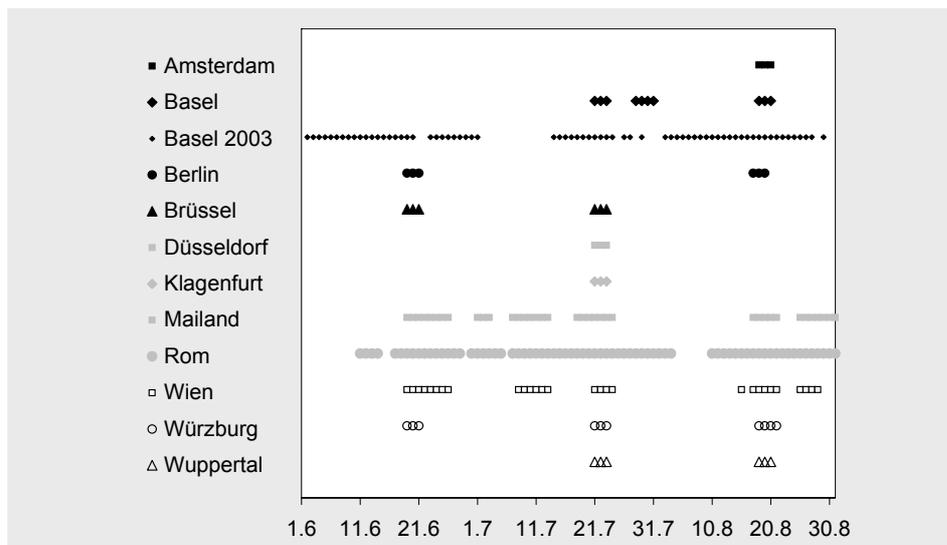
Die Bedeutung einer hohen Temperaturdifferenz zwischen Raumluft und Außenluft verdeutlicht eine Beispielrechnung. Unter der Annahme niedriger interner und externer Wärmelasten ( $150 \text{ Wh/m}^2\text{d}$ ), müsste bei einem  $\Delta \vartheta$  von 5 K und einem Luftwechsel von 1,0 1/h während 9,5 h gelüftet werden, um die Wärmelasten abzuführen. Bei einer Erhöhung von  $\Delta \vartheta$  auf 8 K, reduziert sich die Lüftungszeit auf 6 h (weitere Angaben zur Berechnung, siehe Info A5.1.1-2).

Die Auswirkungen eines höheren Temperaturniveaus auf das Nachtauskühlungspotential stellt der Vergleich zwischen den Referenzwerten und den Werten von 2003 für Basel (Abb. 5.2) dar. Die Abbildung zeigt mit der Gegenüberstellung von Tages- und Nachtmittelwerten die Verschlechterung des ansonsten ausreichenden Potentials. Bei einer weiterhin bestehenden Temperaturdifferenz zwischen Tag und Nacht ist im Sommer 2003 das Temperaturniveau insgesamt höher, was die Wirksamkeit von Nachtlüftung als Wärmesenke stark mindert.



**Abb. 5.2:** Sortierte Tagesmittelwerte (8 – 18 Uhr) und die dazugehörigen Nachtmittelwerte (24 – 6 Uhr) der Lufttemperatur für einen typischen Sommer und den Sommer 2003 in Basel.

Für einen Gebäudebetrieb mit passiver Kühlung sind längere Perioden mit hohen Temperaturen kritisch, da nachts nicht genügend Wärme abgeführt werden kann und die Gebäudetemperaturen sich daher aufschaukeln. Abb. 5.3 zeigt die zu erwartenden Hitzeperioden in den untersuchten Städten. Auffallend ist auch hier wieder der Sommer 2003 in Basel mit einer von den Standardwerten nach oben extrem abweichenden Anzahl von Hitzeperioden.



**Abb. 5.3:** Hitzeperioden für einzelne Städte. Da der Begriff „Hitzeperiode“ nicht einheitlich definiert ist, wird hier eine Periode von mindestens drei Tagen Länge mit einem Temperaturmittel für die Sommernächte von  $\geq 18$  °C angenommen. Städte, die nach dieser Definition keine Hitzeperioden aufweisen sind: Dresden, Hamburg, München, Stockholm und Zürich. Datenquelle: Siehe Abb. 5.1

Eine gute – qualitative - Übersicht über das Zusammenwirken von Gebäude und Außentemperatur stellt die Betrachtung der „Kühlgradtage“ für die einzelnen Standorte dar (Abb. 5.4).

Klimatologisch gesehen war der Sommer 2003 mit einer Überschreitung des Referenzwertes von 3,5 K (Juni, Juli und August) in Deutschland [DWD, 2003] und zwischen 6,5 und 7,5 K in der Nordschweiz (Juni) [Bader et al., 2003] eine Ausnahmerecheinung. Die Schätzungen für eine Wiederkehr liegen je nach Bezug und Ermittlungsmethode mit Werten zwischen 100 [Luterbacher et al., 2004], 150 [Schär et al., 2004] und 1000 [DWD, 2003] Jahren sehr weit auseinander (siehe 4.2.1). Die Extremwerte des Juli 2006 legen die Vermutung nahe, das mit einer verkürzten Wiederkehrwahrscheinlichkeit zu rechnen ist.

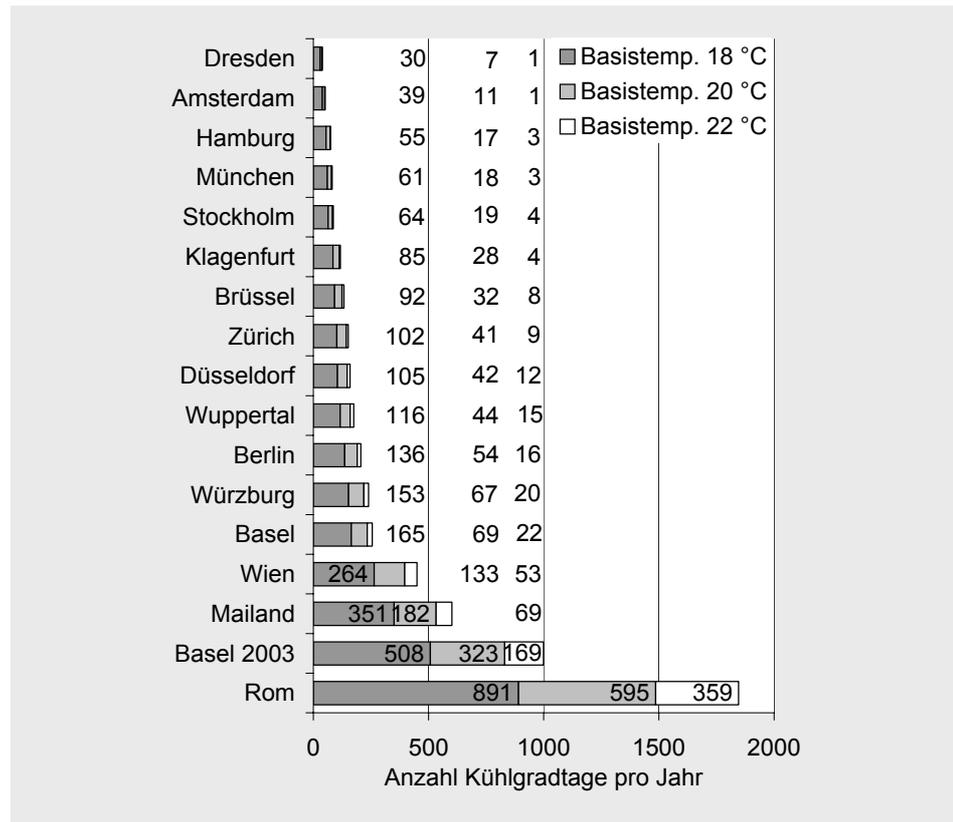
**Abb. 5.4:** Anzahl der Kühlgradtage über das ganze Jahr. Die Kühlgradtage berechnen sich folgendermaßen:

$$\text{KGT} = T_{a(24\text{ h})} - T_{\text{Basis}}$$

Dabei sind  $T_{a(24\text{ h})}$  das Tagesmittel der Außentemperatur und  $T_{\text{Basis}}$  die „Basistemperatur“. Die „Basistemperatur“ wird für den Sommer bei 18, 20 oder 22 °C festgelegt. Sie stellt das Tagesmittel der Außentemperatur dar, ab dem die Raumlufftemperatur eines Gebäudes über 26 °C ansteigt. Bei Gebäuden mit einem sehr schlechten sommerlichen Wärmeschutz ist dies ab einem Tagesmittel von 18 °C der Fall, bei Gebäuden mit einem besseren sommerlichen Wärmeschutz trifft dies ab einem Tagesmittel von 20 °C, im Idealfall sogar erst ab 22 °C zu. Anmerkung: Die Raumlufftemperatur im Sommer hängt nicht allein von der Beschaffenheit der Gebäudehülle, sondern auch vom Speicherverhalten des Gebäudes, internen Wärmelasten und dem Nutzerverhalten ab. Die oben genannten „Basistemperaturen“ dienen daher nur als Hilfsmittel zur Klassifizierung unterschiedlicher Klimata, direkte Rückschlüsse von den Kühlgradtagen auf die zu erwartende Kühllast des Gebäudes sind nicht möglich. Datenquelle: Siehe Abb. 5.1

Eine Folge des nachweislichen Erwärmungstrends seit Beginn des 20. Jahrhunderts [Luterbacher et al., 2004] ist die, dass Untersuchungsergebnisse des sommerlichen Gebäudeverhaltens durch Wetterdatensätze, die oftmals eine Periode von 10 bis 30 Jahren in der Vergangenheit wiedergeben, verfälscht werden können. [Frank, 2005] legt angesichts des Klimawandels eine kritische Überprüfung der Wetterdaten nahe.

Für die Simulationen der Fallstudien (Kap. 9) wurden aus diesem Grund Wetterdaten des Jahres 2004 verwendet.



### 5.1.2 Mikroklima

Im Gegensatz zum Klima, das die durchschnittlichen Wetterzustände über einen längeren Zeitabschnitt und eine größere Region bezeichnet, beschreibt das Mikroklima die klimatischen Verhältnisse im kleineren räumlichen Maßstab (Bsp. Straßenzug, Park, Tal). Bestimmende Faktoren für das Mikroklima sind die Topographie, die Bodenstruktur, die Bodenbedeckung und die Bebauungsform. Durch Veränderung der Oberflächenbeschaffenheit (Bepflanzungsgrad, Albedo [Def. siehe Infobox 5.1]) kann das Mikroklima beeinflusst werden. Auf Gebäudeebene treten in fassadennahen Grenzschichten weitere Temperaturveränderungen gegenüber dem Mikroklima der unmittelbaren Umgebung auf. Exemplarische Messungen von Fassadentemperaturen bilden den Abschluss dieses Abschnittes.

### Das Phänomen der Hitzeinsel („heat-island“)

Trotz räumlicher Nähe unterscheidet sich das Klima einer dicht bebauten Gegend vom Klima ländlicher Gegenden. Die Temperaturdifferenz zwischen Stadt und Land wird auch als Hitzeinsel-Effekt bezeichnet. Verantwortlich für die Unterschiede ist hauptsächlich die Art, wie die Sonnenstrahlung aufgenommen wird. Im ländlichen Bereich absorbieren Pflanzen rund 80 % der Solarstrahlung und senken die Umgebungstemperatur zusätzlich dazu zusammen mit dem Boden durch Evapotranspiration (Definition siehe Infobox 5.1). Die Oberflächen einer Stadt (Gebäude, Straßen) weisen eine geringe Albedo auf und absorbieren die solare Strahlung größtenteils. Die durch das Material absorbierte Wärme erhöht dessen Temperatur und wird zum Teil durch Konvektion an die Luft, zum Teil durch Strahlung an die Umgebung übertragen.

Das Phänomen der Hitzeinsel ist gründlich erforscht, zu dem dargestellten Grundprinzip kommen weitere Ursachen hinzu [Santamouris, 2001].

- Die Geometrie von „Straßenschluchten“  
Die Bilanz zwischen solaren Wärmegewinnen und -verlusten über die emittierte langwellige Strahlung bestimmt das thermische Gleichgewicht städtischer Gebiete. Wie viel Strahlung eine Oberfläche emittiert, hängt von der Größe des für sie „sichtbaren“ Himmelsausschnittes ab. Ist ein Großteil der theoretisch „sichtbaren“ Himmelskuppel durch andere Gebäude verdeckt, reduziert dies die Emission von langwelliger Strahlung zum Himmel und Empfangsflächen sind stattdessen die gegenüberliegenden Wände, die ihrerseits langwellige Strahlung in den Straßenraum emittieren. Damit verändert sich die Bilanz und die Temperaturen erhöhen sich.
- Geringerer Abtransport der Wärme aus den „Straßenschluchten“  
Die hohe Bebauung blockiert den Wind und verhindert auf diese Weise den Abtransport der Wärme. Die durchschnittliche Windgeschwindigkeit ist in Städten um bis zu 25 % reduziert.
- Großmaßstäbliche Oberflächenstruktur  
Die Albedo einer unebenen Oberfläche (Gebäude und Straßen) ist niedriger als die einer ebenen, aus denselben Materialien bestehenden Fläche.
- Thermische Eigenschaften der Materialien  
Im Gegensatz zu Erdboden und Vegetation begünstigen Beton und Asphalt ein Einspeichern sensibler Wärme.
- Menschliche Wärmeproduktion (Verbrennung fossiler Brennstoffe)
- Städtischer Treibhauseffekt
- Verringerung von Verdunstungsflächen

Die Temperaturerhöhung von Städten gegenüber der ländlichen Umgebung kann in Ausnahmefällen und temporär bis zu 6 K betragen [Santamouris, 2001]. Wenn dies auch Extremwerte sein mögen, so unterstreichen die Daten, dass bei Simulationen für städtische Gebäude die Herkunft der Wetterdaten kritisch geprüft werden sollte. Stammen diese von Wetterstationen außerhalb der Stadt (z. B. Flughafen), so liegen die realen Temperaturen in der Stadt höher und die Berechnungsergebnisse (besonders für den Sommer) geben zu niedrige Temperaturen wieder. Ein Vorschlag Wetterdaten in Form von Temperaturzuschlägen je nach Lage „anzupassen“, findet sich beispielhaft für London in [Kolokotroni et al., 2005].

**Infobox 5.1: Begriffe**

Albedo: Bezeichnung für den Anteil der Sonnenstrahlung, der an einer Oberfläche oder an einem Körper reflektiert wird (solare Reflexion). Der Begriff wird meistens für große, inhomogene Flächen (Städte, Wald), in einigen Fällen aber auch auf einzelne Dachflächen bezogen, verwendet.

Evapotranspiration: Verdunstung von Wasser auf unbewachsenem Land oder Wasser (Evaporation), oder durch Pflanzen (Transpiration)

Ein Beispiel die Verdunstungsleistung – und die schattenspendenden Eigenschaften - von Pflanzen zu nutzen ist das Projekt Berlin Adlershof.



**Abb. 5.5:** Begrünte Fassade am Neubau des Instituts für Physik der Humboldt-Universität Berlin. Die Bepflanzung bewirkt eine Temperierung der Luft durch die Verdunstung der Pflanzen. Die Zuluft gelangt über Klappen in der Fassade in den Raum. Die Pflanzen wachsen in Kübeln auf jeder Geschoßebene der Fassade, ihre Bewässerung erfolgt durch das zuvor gesammelte Regenwasser. Technische Räume wie Labore, Seminarräume und der Hörsaal werden zusätzlich über eine adiabatische Kühlung gekühlt.

Architektur: Architekturbüro Augustin und Frank

Weitere Informationen: [www.gabaeudekuelung.de](http://www.gabaeudekuelung.de)

Quelle Abb. 5.5: b-tga, Bergische Universität Wuppertal

### **Oberflächeneigenschaften und ihre Auswirkung auf die Oberflächentemperatur**

Oberflächen absorbieren kurzwellige Solarstrahlung in Abhängigkeit von ihrem Absorptionsvermögen und der Position der Flächennormalen im Bezug zum Sonnenstand. Die Absorption langwelliger Strahlung richtet sich nach der Temperatur der Oberflächen, ihren Strahlungseigenschaften (Emissions-, Absorptions- und Reflexionsvermögen) und der Größe des sichtbaren Himmelsausschnittes. Zusätzlich dazu findet ein Wärmeaustausch durch Konvektion zwischen der Luft (als „strömendem Fluid“) und der Oberfläche statt, der von einem Energietransport durch Wärmeleitung begleitet wird.

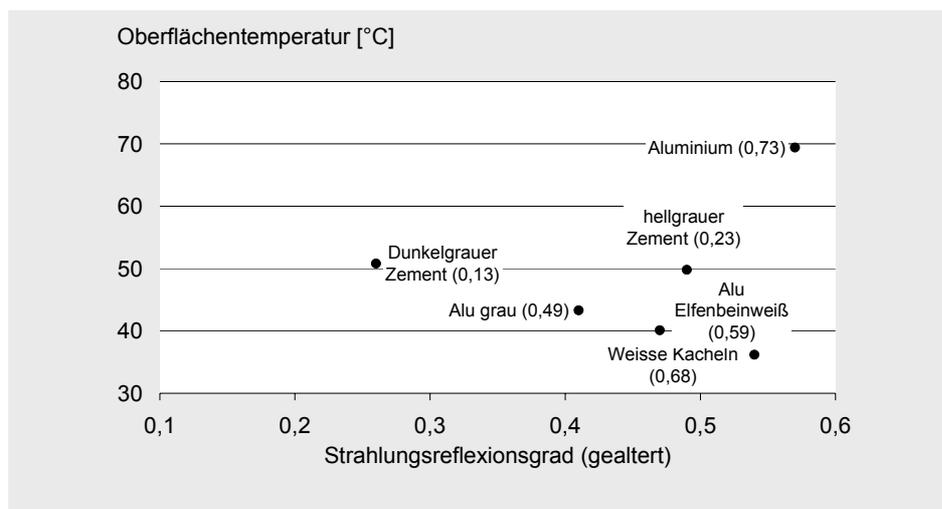
Die optischen und thermischen Eigenschaften von Materialien, besonders aber die Albedo für Solarstrahlung und das Emissionsvermögen für die langwellige Strahlung haben einen großen Einfluss auf die städtische Energiebilanz und somit das Mikroklima.

Messwerte des Strahlungsreflexionsgrades für unterschiedliche Dachoberflächen geben z. B. [Prado et al., 2005] an. Bei Materialien im Außenbereich vermindert sich der Strahlungsreflexionsgrad in Folge von Alterung und Verschmutzung der Materialien. Wie sich der Strahlungsreflexionsgrad unter Berücksichtigung von Alterungsprozessen auf die Oberflächentemperatur (jedoch ohne Berücksichtigung des Speichervermögens) auswirkt, zeigt Abb. 5.6.

Auf dem Markt sind reflektierende Anstriche erhältlich, die sich im Vergleich zu herkömmlichen Materialien durch ein erhöhtes Reflexionsvermögen auszeichnen [Synnefa et al., 2005]. Bei dieser Art von Anstrichen ist jedoch die Wirkungsminderung durch Verwitterung und Verschmutzung nicht unerheblich. Angaben zur Wirksamkeit dieser Anstriche, die sich auf Messungen beziehen,

ohne das Langzeitverhalten zu berücksichtigen, sind daher zur Beurteilung des Materials über die gesamte Gebrauchsdauer nur eingeschränkt aussagefähig.

In welchem Maß sich die Strahlungsreflexion gedämmter und ungedämmter Flachdächer auf die Innenraumtemperaturen und den Kühlenergiebedarf auswirkt, untersuchen [Simpson et al., 1997]. Dabei hat beispielsweise ein weißes Dach ( $\rho_{sol} = 75\%$ ) die geringsten Oberflächentemperaturen und ist bis zu 20 K kühler als ein graues ( $\rho_{sol} = 30\%$ ). Die Oberflächentemperaturen eines braunen Daches ( $\rho_{sol} = 10\%$ ) werden bis zu 30 K unterschritten. Mit gedämmtem Dach und weißer Oberfläche konnte die Spitzenlast für die Kühlung im Vergleich zu den anderen Materialien um 5 % gesenkt werden. Ohne Dämmung wurden diese Unterschiede größer.



**Abb. 5.6:** Gemessene Strahlungsreflexionsgrade (Wert in Klammern) und Oberflächentemperaturen für verschiedene Materialien. Die Messwerte beziehen sich auf das Strahlungsspektrum mit Wellenlängen zwischen 290 und 2500 nm. Dieses besteht zu 6 % aus UV-Strahlung, zu 46 % aus sichtbarem Licht und zu 43 % aus Infrarotstrahlung. Die Veränderung der Reflexion durch Alterung und Verschmutzung wird mit folgender Formel ermittelt:

$$\rho_{alt} = \rho_0 * c * (\rho_{neu} - \rho_0)$$

Wobei für  $\rho_0 = 0,2$  und für  $c = 0,9$  eingesetzt wird ( $c$  wird dabei nicht näher definiert). Die Oberflächentemperatur berücksichtigt die Speichereigenschaft des Materials nicht. Die Temperatur wird unter folgenden Bedingungen berechnet: Globalstrahlung  $1000 \text{ W/m}^2$ , Konvektionskoeffizient  $12 \text{ W/m}^2\text{K}$ , Himmels-temperatur  $300 \text{ K}$ , Lufttemperatur:  $310 \text{ K}$ . Datenquelle: [Prado et al., 2005]

## Oberflächeneigenschaften der Gebäudefassaden und ihre Auswirkungen auf die Temperatur der Grenzschichten

### Infobox 5.2: Wann ist die Fassadentemperatur für Sanierungskonzepte mit Maßnahmen der passiven Kühlung wichtig?

In der Regel wird bei einer Sanierung die Luftdichtigkeit der Gebäudehülle verbessert. Zur Herstellung des hygienisch erforderlichen Luftwechsels ( $\text{CO}_2$ -Gehalt, Gerüche) sollte daher eine ventilatorgestützte Lüftung Bestandteil der Planung sein. Wird dazu die Zuluft über dezentrale Lufteinlässe in der Fassade bezogen, (z. B. Abluftanlage) ist die Fassadentemperatur sehr wichtig, da sie für die Zulufttemperatur bestimmend ist. Hinzu kommt, dass aufgrund des konstanten Luftwechsels die Zuluft auch unter ungünstigen Bedingungen, d. h. auch bei starker Erwärmung über die Fassade, in den Raum gelangt. Hohe Zulufttemperaturen beeinträchtigen bei passiven Kühlkonzepten den Nutzerkomfort und resultieren bei aktiver Kühlung in einem erhöhten Energieeinsatz für die Kühlung.

Bei einer zentralen Zuluftansaugung ist die Fassadentemperatur eher von geringer Bedeutung. Selbst wenn eine zusätzliche Fensterlüftung möglich ist, ist die Lüftung in der Regel nur temporär (gerade auch bei hohen Außentemperaturen), sodaß nur kurze Zeit warme Luft in den Raum gelangt.

Der Wärmeeintrag über eine stark erwärmte Fassade via Wärmeleitung ist unter der Annahme, dass bei der Gebäudesanierung ein heute üblicher Dämmstandard erreicht wird, von untergeordneter Bedeutung.

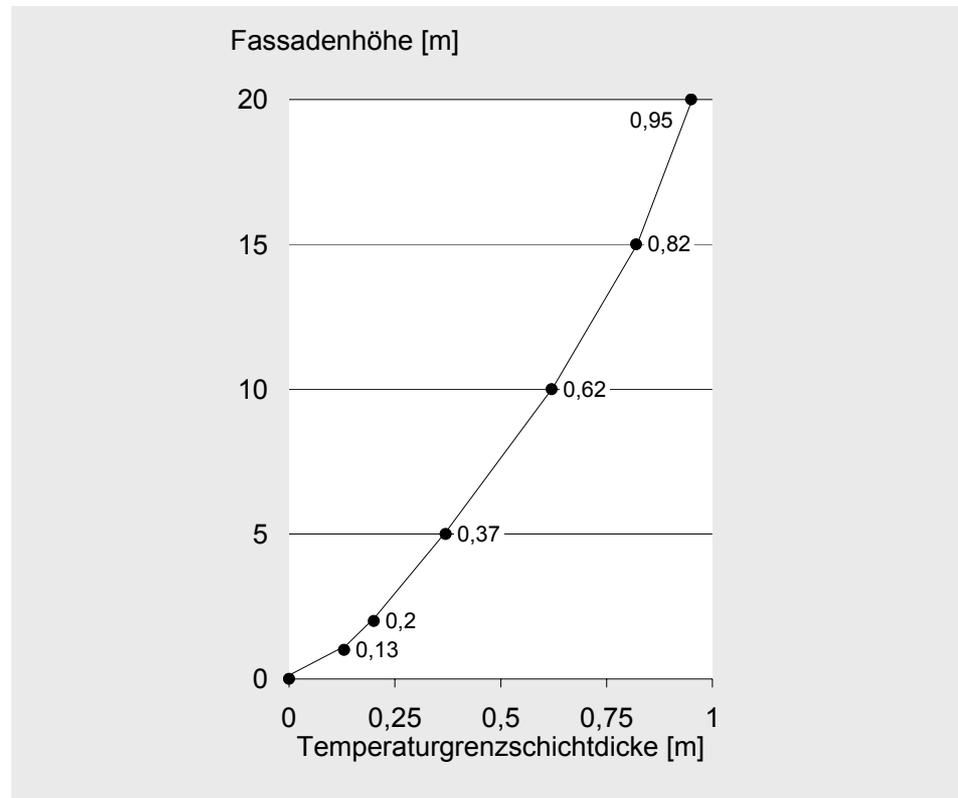
Vor großen Fassadenflächen ergeben sich Temperaturgrenzschichten, die von der solaren Einstrahlung, dem Fassadenmaterial und der Gebäudehöhe abhängig sind. Beeinflusst werden die Grenzschichten durch

Auftriebsströmungen, die sich auf Grund der wärmeren Fassadenoberfläche bilden, und durch Wind. Abb. 5.7 zeigt die Temperaturgrenzschicht beispielhaft für eine Fassade ohne Windeinwirkung. In der Regel ist die Lufttemperatur in den Grenzschichten immer höher als die Außenlufttemperatur.

**Abb. 5.7:** Dicke der Temperaturgrenzschicht an einer warmen Fassade bei einer Temperaturdifferenz zwischen Wand und Außenluft von 20 K, ohne Windeinwirkung. Als thermische Grenzschicht wird der Bereich eines Fluids (hier Luft) verstanden, der durch einen Wärmestrom aus oder in eine Wand beeinflusst wird. Für die unterschiedlichen Höhen (die Breite der Fassade ist nicht angegeben) ergeben sich die folgenden Auftriebsvolumenströme ( $\text{m}^3/\text{h}$ ):

1 m:	85
2 m:	190
5 m:	480
10 m:	1020
15 m:	1560
20 m:	2040

Quelle: Kriegel, B: Fallströmungen vor Abkühlflächen in Gebäuden und mögliche Schutzmaßnahmen, Dissertation TU Berlin, 1973, zitiert in [Finke, 2002]



Dezentral nachströmende Zuluftöffnungen in der Fassade vermögen die Grenzschichten nicht zu überbrücken. Selbst mit einer ventilatorbetriebenen Ansaugung (dezentrales Lüftungsgerät) gelingt dies nicht, wie das Beispiel für ein Einzelbüro (Tab. 5.1) zeigt. Bei einer kreisrunden Ansaugung ist die Luftgeschwindigkeit etwa 10 cm vor der Fassade abgebaut, bei einer schlitzförmigen Ansaugung ist dies schon bei etwa 2 cm Abstand der Fall.

**Tab. 5.1:** Beispiel für Außenluftansaugungen in einem Einzelbüro. Dezentrales Lüftungsgerät, Außenluftvolumenstrom  $60 \text{ m}^3/\text{h}$ . Datenquelle: [Finke, 2002]

Form der Absaugung	Kreisförmig	Schlitzförmig
Abmessungen	$\varnothing 0,1 \text{ m}$	$2,0 \text{ m} * 0,02 \text{ m}$
Fläche ( $\text{m}^2$ )	0,01	0,04
Ansauggeschwindigkeit ( $\text{m/s}$ )	2,12	0,42
Abbau der Ansauggeschwindigkeit auf $\leq 10 \%$ (m)	0,1	0,02

### Messungen von Gebäudefassaden

Welche Temperaturen sich in fassadennahen Grenzschichten tatsächlich einstellen, zeigen exemplarisch nachfolgend vorgestellte Fassadenmessungen [Reuter, 2005]. Dabei wurden an vier Gebäuden in Wuppertal die Oberflächentemperatur und die Grenztemperaturen im Abstand von 3 und 30 cm einer unverschatteten Süd-, Südost- oder Südwestfassade, sowie die Strahlung auf die Fassade gemessen. Außentemperatur, Globalstrahlung und

Wind wurden für alle Gebäude an der Bergischen Universität Wuppertal (BUW) erfasst, weitere Angaben zur Durchführung finden sich im Anhang (Info A5.1.2-1). Die (gemessene) Schichttemperatur wird durch folgende Faktoren beeinflusst:

- Materialeigenschaften der Oberfläche (Absorptionsgrad, Wärmeeindringvermögen)
- Strahlungsintensität auf Oberfläche (Tages- und jahreszeitliche Schwankungen)
- Außentemperatur (Tages- und jahreszeitliche Schwankungen)
- Wind
- Höhe des Messpunktes (Wind, Schichtdicke)

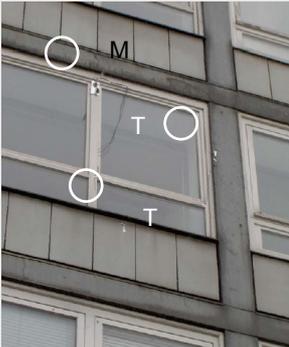
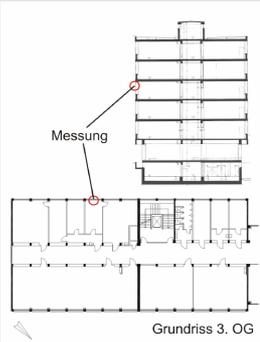
Die Untersuchungsergebnisse sind untereinander nur qualitativ vergleichbar, da die Messungen zu unterschiedlichen Zeiten im Jahr (mit jeweils eigenen Wetterbedingungen) durchgeführt wurden und sich die Fassadenmessstation an den Gebäuden jeweils auf unterschiedlicher Höhe befand. Weitere Abweichungen ergeben sich durch die zentrale Erfassung der Winddaten, die sich von den lokalen Windverhältnissen unterscheiden können.

Zur Auswertung wird jeweils ein Referenztag mit geringen Windgeschwindigkeiten und ungestörter Einstrahlung gewählt. Die gesamte Messperiode wird jeweils über Korrelationen zwischen Strahlung und Messpunkttemperatur (sortiert nach hoher und geringer Einstrahlung) und über die Tages- und Nachtmittel der Temperaturen untersucht. Nachfolgend sind exemplarisch zwei Gebäudemessungen dargestellt, die gesamten Messungen finden sich im Anhang (Info A5.1.2-1).

**Tab. 5.2:** Daten zu den Messungen.  
 Verwendete Abkürzungen:  
 F = Fassade,  
 M= Messungen,  
 A = Ausrichtung,  
 WS = Entfernung zur Wetterstation, S = Süd,  
 O = Ost, W = West,  
 $\rho_{sol}$  = Reflexionsgrad,  
 $\alpha$  = Temperaturleitfähigkeit,  
 b = Wärmeeindringkoeffizient (Definition, siehe Kap. 5.4), FZ = Faserzement

Gebäude	Daten M	Höhe M	A F	WS	Fassadenoberfläche				
					Material	Farbe	$\rho_{sol}$	$\alpha$	b
		(m)		(km)			(%)	(m <sup>2</sup> /s)	(kJ/m <sup>2</sup> h <sup>1/2</sup> K)
BUW, Haspel	29.01. - 20.02. 2005	14	S-W	0,0	FZ-Platten	Mittelgrau, RAL 7038	45	0,0016	14,84 (55)
					Beton mit Mineralputz	Mittelgrau, RAL 7045	29		(108)
„Neue Burse“	29.06. - 12.07. 2005	10	S-O	2,0; S-W	FZ-Platten	Lichtgrau RAL 7035	58	0,0016	14,84 (55)
					Aluminiumverkleidung	matt	75	0,33	346,41 (1319)

Messung Bergische Universität Wuppertal, 29.01.2005 bis 20.02.2005

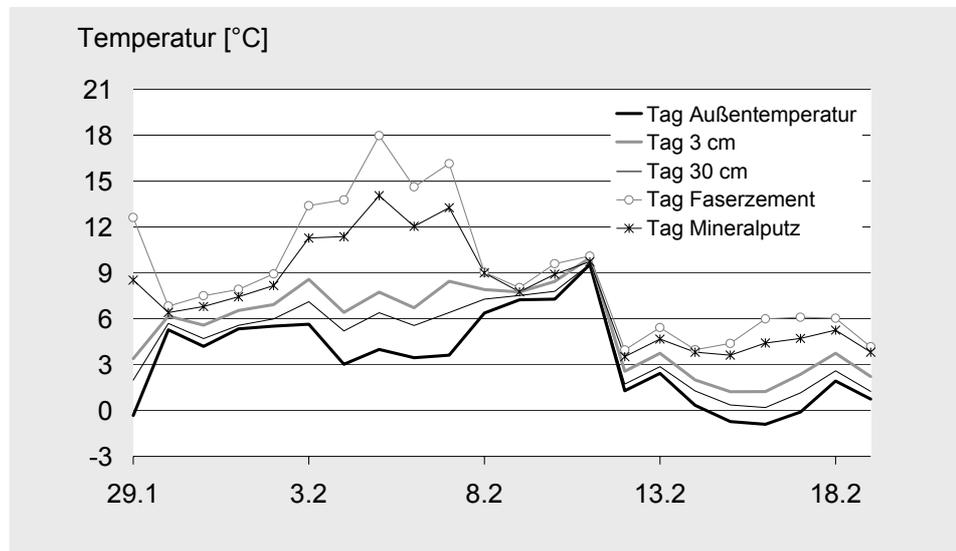
Gebäudebeschreibung: Das Gebäude ist ein Beton-Skelettbau mit in der Fassadenebene liegenden, verputzten Stützen und Deckenstirnseiten. Die Fassadenfelder sind mit Holzfenstern und Betonbrüstungen, die vor einer Dämmschicht mit grauen Faserzementplatten verkleidet sind, ausgefüllt. Es gibt teilweise innen liegende Sonnenschutzvorrichtungen. Die Oberflächentemperatur wurde auf den Faserzementplatten und den Stützen erfasst.

**Abb. 5.9:** (links) Grundriss und Schnitt mit eingezeichneter Messstation auf 14 m Höhe  
**Abb. 5.8:** (rechts) Messstation auf der Fassade, T= Temperatursensor, M = Messstation

Das Gebäude zeigt ein abweichendes Temperaturverhalten der Oberflächen, das aus den verschiedenen Reflexionseigenschaften in Kombination mit einer unterschiedlichen Speicherfähigkeit resultiert.

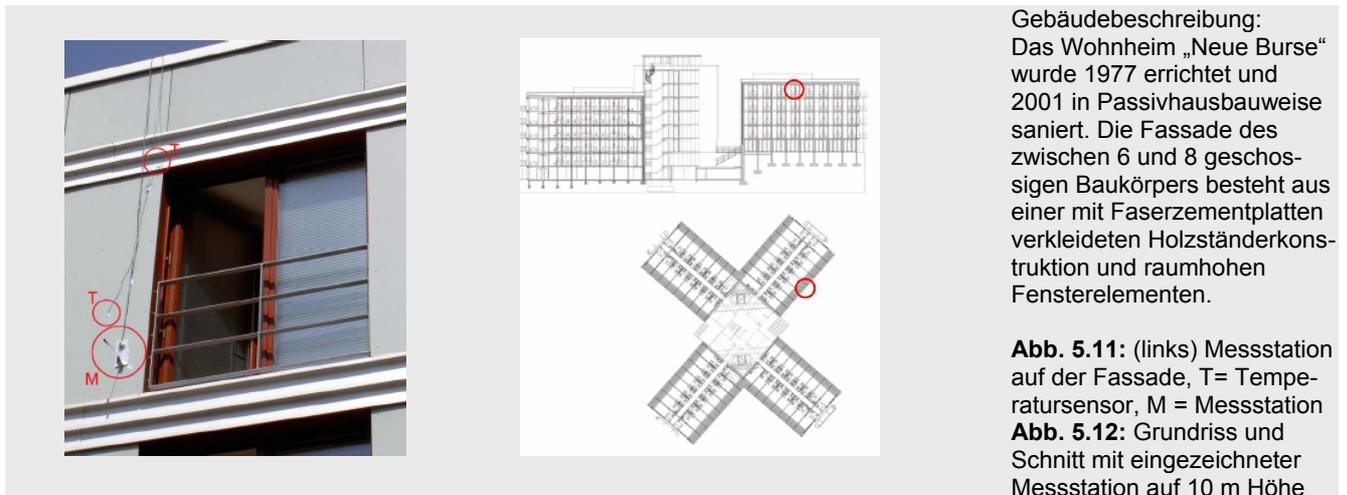
Der hellere Faserzement hat eine geringere Speichermasse als der dunklere Mineralputz. Die Temperaturmittel der einzelnen Fassadenmesspunkte weisen bei hoher Strahlungsintensität große, bei geringerer Einstrahlung kleine Differenzen auf. Die Rangfolge der Messpunkte bleibt gleich, am wärmsten sind die Oberflächen (Faserzement, Mineralputz), gefolgt von den Messpunkten bei 3 cm und 30 cm. Nachts liegen die Temperaturen insgesamt näher beieinander. In Nächten, die einem Tag mit hoher Einstrahlung folgen, ist die Spreizung jedoch etwas größer (maximal 4,0 K) und die Schicht mit dem höheren Speichervermögen (Mineralputz) ist am wärmsten. Nach strahlungsarmen Tagen ist diese Schicht kühler als der Faserzement.

**Abb. 5.10:** Mittlere Tagestemperatur (8 bis 20 Uhr) der einzelnen Messpunkte am Gebäude der BUW. Die Temperaturdifferenzen der Messpunkte an einzelnen Tagen sind unterschiedlich und von der Einstrahlung auf die Fassade abhängig. Der hellere Faserzement ( $\rho_{sol} = 45\%$ ) heizt sich bei solarer Einstrahlung schneller auf als die dunkleren Bauteile mit Mineralputz ( $\rho_{sol} = 29\%$ ). Die geringere Speichermasse der FZ-Platten (vor Dämmschicht) sorgt für eine schnelle Wärmeaufnahme. Der Mineralputz (auf Beton) reagiert träger.



Die Betrachtung eines Tages mit unbedecktem Himmel unterstreicht die Beobachtung, dass sich das Material mit der höheren Reflexion ( $\rho_{sol} = 45\%$ ) aber der geringeren Speicherfähigkeit stärker erwärmt als das Material mit der kleineren Reflexion ( $\rho_{sol} = 29\%$ ) und der höheren Speicherfähigkeit. Im Maximum beträgt die Temperaturdifferenz zwischen beiden Materialien rund 9 K.

Messung Studentenwohnheim „Neue Burse“, 29.06.2005 bis 12.07.2005



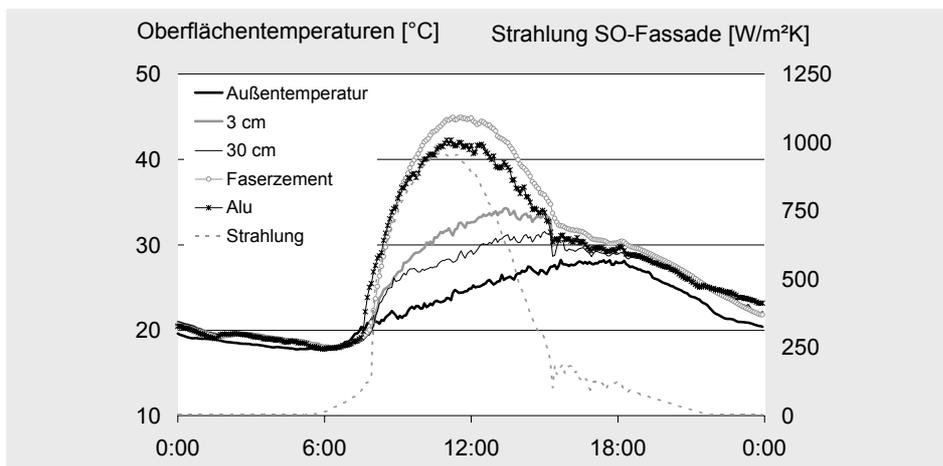
Gebäudebeschreibung:  
Das Wohnheim „Neue Burse“ wurde 1977 errichtet und 2001 in Passivhausbauweise saniert. Die Fassade des zwischen 6 und 8 geschos-  
sigen Baukörpers besteht aus einer mit Faserzementplatten verkleideten Holzständerkonstruktion und raumhohen Fensterelementen.

**Abb. 5.11:** (links) Messstation auf der Fassade, T= Temperatursensor, M = Messstation  
**Abb. 5.12:** Grundriss und Schnitt mit eingezeichneter Messstation auf 10 m Höhe

Da der Fassadenaufbau im Zuge einer Sanierung, die den Austausch der Fassade vorsieht, gut eingesetzt werden kann, ist eine Betrachtung der Konstruktion hinsichtlich ihres Verhaltens in den Temperaturschichten lohnenswert.

An einem klaren, windstillen Sommertag (Abb. 5.13) tritt zwischen Faserzementplatte und Außentemperatur eine maximale Temperaturdifferenz von 21 K auf, gefolgt von einem Wert für das Aluminiumprofil von 19 K. Aufgrund der geringen Speicherkapazität kühlen die Oberflächen nach Abfall der solaren Strahlung relativ rasch ab. Die Temperaturschichten sind bedeutend kühler als die Oberflächen. Die nächtliche Temperaturdifferenz zwischen den Fassadenschichten, insbesondere die stark verlangsamte Abkühlung des Aluminiumprofils ab 21:30 Uhr, könnte primär auf die Öffnung des Zimmerfensters und sekundär auf das geringere Emissionsvermögen für langwellige Strahlung von Aluminium zurückzuführen sein.

Über die gesamte Messperiode weist der Faserzement mit dem niedrigeren Reflexionsvermögen als das Aluminium die höchsten Tagesmittel (Oberfläche zur Außentemperatur  $\Delta \vartheta_{\max/\min}$  10,0/1,2 K) auf, gefolgt vom Aluminium, der 3-cm- und der 30-cm-Schicht. Nachts ist die Temperaturdifferenz sehr schwach ausgeprägt, am wärmsten ist stets die Oberfläche des Aluminiumprofils (mit der gleichen Begründung wie am Referenztag).



**Abb. 5.13:** Tag mit unbedecktem Himmel, 12.07.2005, SO = Südost, Messung „Burse“. Die Fassadenmaterialien erwärmen sich aufgrund der geringen Speichermasse rasch. Das Aluminiumprofil reagiert zunächst am schnellsten (> Wärmeeindringvermögen), erst gegen 9 Uhr überholt die etwas dunklere FZ-Platte ( $\rho_{sol} = 58 \%$ , Alu:  $\rho_{sol} = 75 \%$ ). Bei Abnahme der solaren Einstrahlung kühlt das Aluminium schnell, der Faserzement etwas langsamer ab. Ab 21:30 Uhr ist die verlangsamte Abkühlung des Aluminiumprofils auf die Fensterlüftung und das geringere Emissionsvermögen für langwellige Strahlung zurückzuführen.

### Qualitative Beobachtungen aus den Projekten

Die Auswertung aller vier Messungen zeigt, dass das Material und seine physikalischen Eigenschaften Auswirkungen auf die Oberflächentemperatur haben. Strahlung und Außentemperatur beeinflussen ihrerseits das Verhalten der Oberfläche und der Grenzschichten unterschiedlich stark.

- **Speicherfähigkeit:** Eine hohe Speicherfähigkeit bewirkt eine langsamere Erwärmung am Tag mit geringen Maximaltemperaturen, nachts treten eher warme Temperaturen auf. Eine geringe Speicherfähigkeit verhält sich umgekehrt mit höheren Temperaturen am Tag und tieferen Temperaturen nachts.
- **Reflexionsvermögen:** Tagsüber ist der Einfluss des Reflexionsvermögens hoch, nachts wirkt es bei speicherfähigen Materialien indirekt nach.
- **Korrelationen:** Bei kleinen Strahlungsleistungen ( $< 100 \text{ W/m}^2$ ) ist der Zusammenhang mit der Außentemperatur stärker als der mit der Strahlung, diese Tendenz verstärkt sich mit zunehmendem Abstand von der Fassade. Bei großen Strahlungsleistungen ist mit einer Ausnahme<sup>2</sup> die Korrelation der Oberflächentemperaturen mit der Strahlung höher als mit der Außentemperatur, nimmt aber mit zunehmendem Abstand von der Fassade ab.

### Rückschlüsse für die Sanierung

Die Messungen bestätigen, dass bei allen Projekten die Lufttemperatur in der Grenzschicht deutlich wärmer als die Außenluft war. Die Temperaturen aus der 30-cm-Grenzschicht liegen im Maximum je nach Oberfläche zwischen 3,5 und 5,4 K über der Außenlufttemperatur, die der 3-cm-Grenzschicht sogar zwischen 9,6 und 7,5 K.

<sup>2</sup> Mineralputz Haspel, „r“ 4 % höher wegen des Zusammenwirkens von  $<$  Reflexionsgrad und  $>$  Speicherfähigkeit)

**Tab. 5.3:** Bewertung unterschiedlicher Lüftungskonzepte hinsichtlich ihrer Bedeutung für die Fassadentemperatur und Empfehlungen.

Verwendete Abkürzungen:

+ = wichtig, o = mittel,

- = unwichtig,

$\vartheta$  = Außentemperatur

Lesebeispiel für Konzept

Nr. 1: Die Bedeutung der Fassadentemperatur ist hoch (+ = wichtig), da die Luft konstant auch bei hohen Außentemperaturen in den Raum strömt. Als Empfehlung leitet sich daraus ab, dass der Reflexionsgrad eine hohe Bedeutung hat (also helle Farben verwendet werden sollten) und die Speichermasse der Fassade außen von mittlerer Bedeutung ist.

#	Konzept	Bedeutung Fassadentemperatur	Empfehlung
1	Dezentrale ventilatorgestützte Ansaugung über Zuluft einlaß in Fassade	+ Luft strömt konstant – auch bei $> \vartheta$ - nach- Bei runder Zuluftansaugung Entnahme Luft aus Grenzschicht bis max. 10 cm [Finke, 2002]	Reflexionsgrad: + (möglichst hoch) Speichermasse: o
2	zentrale ventilatorgestützte Abluftanlage, Nachströmung Zuluft über dezentrale Zuluft einlässe in Fassade	+ Luft strömt konstant – auch bei $> \vartheta$ - nach Entnahme Luft fassadenahe Grenzschicht	Reflexionsgrad: + (möglichst hoch) Speichermasse: o
3	Reine Fensterlüftung	o Möglichkeit Fenster bei $> \vartheta$ geschlossen zu halten Anmerkung: Als singuläre Lüftung i.d.R. nicht ausreichend	Reflexionsgrad: + (möglichst hoch) Speichermasse: o
4	Optionale Fensterlüftung als Ergänzung zu ventilatorgestützter Lüftung	o Möglichkeit Fenster bei $> \vartheta$ geschlossen zu halten Anmerkung: Potentielle Wärmeeinträge über „unvernünftiges“ Nutzerverhalten	Reflexionsgrad: + (möglichst hoch) Speichermasse: o
5	Zentrale Zu- und Abluftanlage	-	
6	Nachtlüftung über dezentrale Zuluft einlässe in Fassade	+ $\vartheta$ soll so $<$ wie möglich sein	Reflexionsgrad: o wenn Speichermasse $<$ Reflexionsgrad: + wenn Speichermasse $>$
7	Nachtlüftung über Lüftungsklappen	+ $\vartheta$ soll so $<$ wie möglich sein	Reflexionsgrad: o wenn Speichermasse $<$ Reflexionsgrad: + wenn Speichermasse $>$

Bei Lüftungskonzepten, die als Bestandteil eine konstante Luftzufuhr über die Fassade beinhalten, hat dies starke Auswirkungen auf die Raumlufttemperatur. Die Wärmeeinträge vermindern bei passiven Kühlkonzepten den Nutzerkomfort erheblich, bei aktiv gekühlten Gebäuden steigt die Kühllast.

Bei einer Taglüftung über die Fassade sollten daher Materialien mit einem hohen Reflexionsgrad erste Wahl sein. Ist eine Nachtlüftung (über Fenster, Lüftungsklappen oder Überströmelementen in der Fassade) geplant, so sollten die Materialien eine geringe Speichermasse und keine metallisch glänzenden (Emission von langwelliger Strahlung) Oberflächen aufweisen.

Neben der Fassadenbeschaffenheit ist die Position des Lufteinlasses eine weitere Einflussgröße. Ist ein Nachströmen der Zuluft über die Fassade im Winter gewünscht, so stellt ein Einlass hinter oder über dem Heizkörper (um kalte Zugluft zu vermeiden, siehe Gebäude 1, Kap. 2) eine gute Lösung für beide Jahreszeiten dar. Eine Alternative dazu kann ein Zulufttritt neben dem Fenster (mit leichtem Zugluftisiko im Winter) sein. Weitere Informationen finden sich in [Richter, 2003].

Vorsicht ist bei Zuluftentritten oberhalb des Fensters unterhalb des Sturzes geboten, da sich hier außen erwärmte Luft stauen kann. Dies gilt auch für Zuluftentritte hinter dem – außen liegenden - Sonnenschutz. Bei teilweise oder ganz heruntergefahrenem Sonnenschutz bilden sich hier Wärmepolster.

Wie das Zusammenwirken zwischen den unterschiedlichen Lüftungskonzepten und der Fassadentemperatur zu bewerten ist und welche Empfehlungen sich daraus ableiten zeigt Tab. 5.3 in der Übersicht.

## 5.2 Energiebilanz für (passiv gekühlte) Räume

Jeder Raum hat eine Energiebilanz, die sich aus Wärmeeinträgen und Wärmeverlusten zusammensetzt. Ist die Bilanz ausgeglichen, dann gelangt nur so viel Wärme in den Raum, wie auch wieder – mit Zeitverzögerung - abgegeben wird. Ein Ungleichgewicht sorgt für eine Abkühlung oder Erwärmung.

Die von den externen (1, 2, 3) und internen (4) Wärmequellen abgegebene Wärme wird über Wärmetransportmechanismen an die Raumumschließungsflächen (5) übertragen. Deren Speichermasse (Wärmekapazität) stabilisiert die Raumtemperatur. Große Speichermassen sorgen für eine Glättung der Temperaturschwankungen über mehrere Tage. Dies ist für diejenigen Prinzipien der passiven Kühlung, bei denen Wärme tagsüber in die Bauteile eingespeichert wird und zu einem anderen Zeitpunkt, z. B. nachts, wenn eine Wärmesenke verfügbar ist (Lüftung (6) oder Wasser), wieder abgeführt wird, entscheidend.

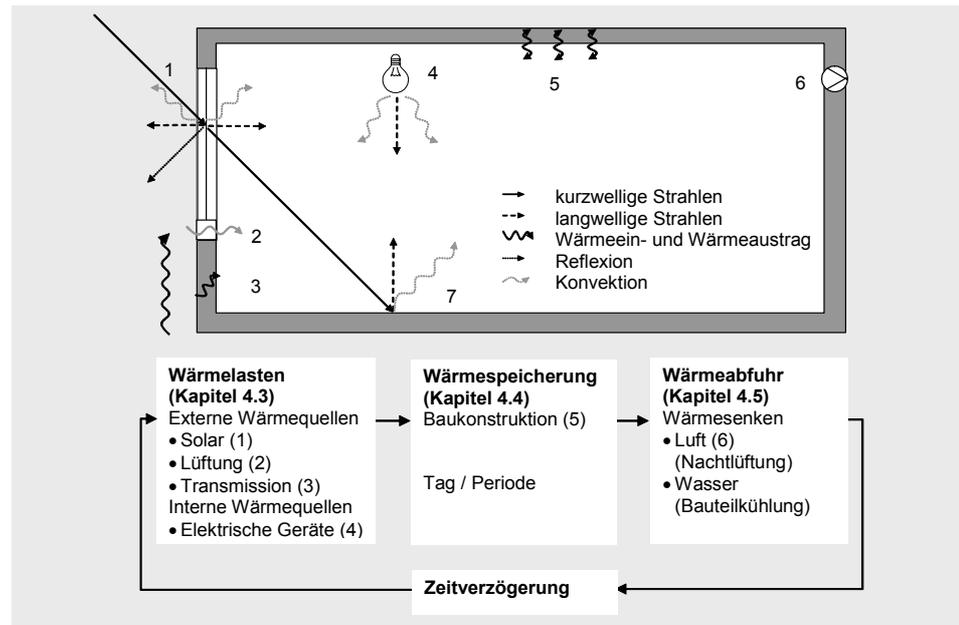


Abb. 5.14: Energiebilanz für einen Raum.

### 5.2.1 Physik der Wärmeübertragung

Es gibt drei Mechanismen der Wärmeübertragung

- Unter *Wärmeübertragung durch Wärmeleitung* versteht man einen Energietransport unter dem Einfluss einer örtlichen Temperaturdifferenz (Temperaturgradient). Diese Art von Wärmetransport tritt vorwiegend in Festkörpern auf und ist im wesentlichen von den Stoffeigenschaften abhängig<sup>3</sup>. Die Raumlufttemperatur wird hier nicht direkt beeinflusst.

<sup>3</sup> Beispiel: Wärmetransport durch Schuhwerk einer auf dem Boden stehenden Person

- Wenn eine direkte Energieübertragung von einem Körper zu einem anderen durch elektromagnetische Wellen stattfindet, spricht man von *Wärmeübertragung durch Wärmestrahlung*. Die Raumlufttemperatur wird auch hier nicht direkt beeinflusst.

Im Außenbereich wird einer Hauswand einerseits durch Sonneneinstrahlung (direkt und diffus) und andererseits durch Infrarotstrahlung der Atmosphäre Wärme zugeführt. Die Hauswand ihrerseits strahlt gemäß dem Stefan Boltzmann-Gesetz proportional zur vierten Potenz ihrer Oberflächentemperatur Energie ab. Für stark abstrahlende Oberflächen mit einem hohen Emissionsgrad kann die Strahlungsbilanz in einer klaren Winternacht defizitär werden und es treten Wärmeverluste auf (z. B. Flachdach).

Die Wärmeübertragung durch Strahlung im Innenraum kann anhand von Abb. 5.14 erläutert werden. Treffen die kurzwelligen Strahlen der Sonne auf eine Fensterscheibe, so wird je nach Einfallswinkel und Glasart (g-Wert) ein Teil ungehindert durchgelassen (Transmission), ein Teil wird reflektiert und ein Teil wird absorbiert. Vom absorbierten Teil wird dann die Wärmeenergie durch Konvektion und als langwellige Strahlen (Wärmestrahlung) nach außen und nach innen abgegeben (1). Beim Auftreffen auf die Raumboflächen (z. B. Boden) werden die kurzwelligen Strahlen größtenteils absorbiert und wiederum in Konvektion und langwellige Strahlung umgewandelt (7). Diese trifft nun auf die nächste Raumbofläche (z. B. Decke) und wird dort größtenteils absorbiert und wiederum als Konvektion und langwellige Strahlung abgegeben (5).

- *Wärmeübertragung durch Konvektion* beschreibt den Wärmetransport von einem strömenden Fluid (z. B. Luft) an eine Oberfläche. Dieser Vorgang ist stets von einem Energietransport durch Wärmeleitung begleitet. Da der konvektive Anteil bei Wärmequellen direkt an die Raumluft weitergegeben wird und sich somit die Raumluft sofort erwärmt, ist diesem Anteil der internen und externen Wärmequellen besondere Beachtung zu schenken.

Der Wärmetransport durch Konvektion an Oberflächen wird u. a. durch folgende Punkte beeinflusst [Zürcher et al., 2004]:

- Temperaturdifferenz Bauteiloberfläche / Luft ( $\Delta \vartheta$ )
- Anströmgeschwindigkeit der Luft
- Art der Strömung (laminar / turbulent)
- Wärmestromrichtung (horizontal, vertikal, auf- oder abwärts)
- Oberflächenbeschaffenheit
- Mittlere Lufttemperatur
- Geometrie- und Abmessungen des Bauteils

Daraus folgt für den konvektiven Wärmestrom:

$$\dot{q}_K = \alpha_K * \Delta \vartheta = \alpha_K * (\vartheta_i - \vartheta_{O_i}) \quad \mathbf{F\ 5.1}$$

- Zur Bestimmung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten gibt es unterschiedliche Untersuchungen (genannt in [Koschütz et al., 2000] und [Khalifa et al., 1990]), deren Ergebnisse voneinander abweichen. Die „Rangfolge“ der Koeffizienten abhängig von der Wärmestromrichtung ist jedoch unumstritten:
- Bei  $\Delta \vartheta = 5,0$  K sind in [Koschütz et al., 2000] folgende Angaben zu finden
- Wärmestrom aufwärts  $\alpha_K = 3,2$  (W/m<sup>2</sup>K)
- Wärmestrom horizontal  $\alpha_K = 2,4$  (W/m<sup>2</sup>K)
- Wärmestrom abwärts  $\alpha_K = 1,75$  (W/m<sup>2</sup>K)

Da der Wärmetransport durch Konvektion von einer Temperaturdifferenz abhängig ist, muss sich die Raumluft erst erwärmen, bevor der Wärmetransport an die Bauteile überhaupt beginnen kann. Aus Komfortgründen ist im Laufe eines Arbeitstages nur eine bestimmte Temperaturerhöhung wünschenswert, die maximal mögliche Speicherkapazität des Bauteils kann also nicht ausgenutzt werden. Boden und Deckenbeläge stellen einen zusätzlichen thermischen Widerstand dar, der nur durch eine (weitere) Erhöhung der Raumtemperatur überwunden werden kann – zu Lasten des thermischen Komforts.

Wie aus der Aufstellung der Wärmeübergangskoeffizienten in Abhängigkeit von der Wärmestromrichtung hervorgeht, hat besonders die Decke einen hohen konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten und kann daher bei vergleichsweise niedrigeren Temperaturdifferenzen mehr Wärme einspeichern. Die Decke sollte also möglichst freiliegen.

## 5.3 Wärmelasten reduzieren

### 5.3.1 Externe Wärmequellen

Betrachtet man die externen Wärmequellen hinsichtlich ihrer Einflussgröße auf die sommerlichen Raumtemperaturen, so sind die solaren Wärmelasten die dominantesten, gefolgt von den Wärmegewinnen über die Lüftung. Die Wärmeeinträge über opake Hüllflächen sind angesichts des heutigen Dämmstandards (der auch bei einer Sanierung hergestellt würde) gering und zu vernachlässigen.

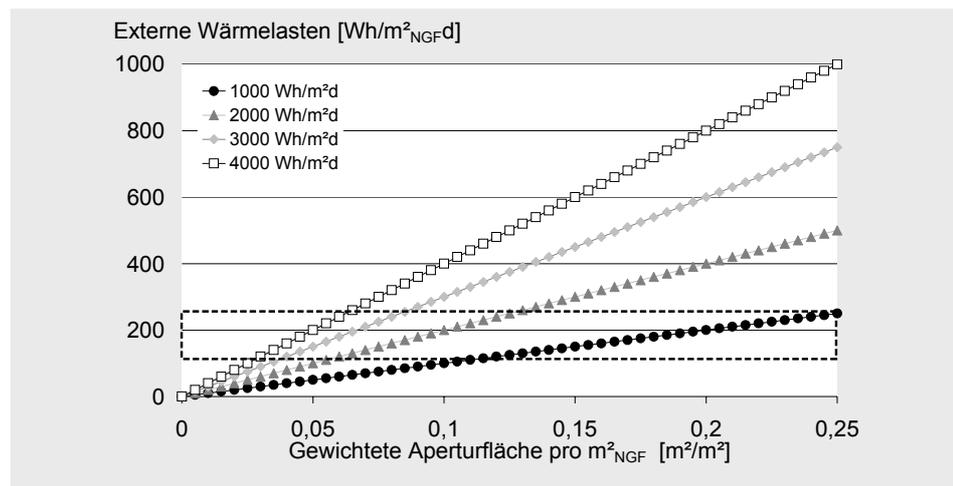
**Abb. 5.15:** Tägliche solare Wärmelasten, die aus dem Verhältnis der gewichteten Aperturfläche pro  $m^2_{NGF}$  und der täglichen Gesamtsumme auf die Gebäudefassade hervorgehen. Die Aperturfläche als Strahlungseintrittsfläche ist mit dem effektiven g-Wert der Fassade (Glas und Verschattungseinrichtung) gewichtet. Der gestrichelte Rahmen gibt die übliche Spannweite interner Lasten an.

Ablesebeispiel: Für einen Büroraum mit einer NGF von  $10 m^2$ , einer Verglasungsfläche von  $4,5 m^2$  mit einem g-Wert von 50 % ergibt sich eine gewichtete Aperturfläche von  $0,23 m^2 / m^2_{NGF}$ . Abhängig von der Tagessumme der solaren Einstrahlung können Wärmelasten zwischen 230 und  $920 Wh / m^2_{NGF d}$  entstehen.

Quelle: [Voss, 2006]

### Solare Wärmeeinträge

Wie Abb. 5.15 zeigt, können die solaren Einträge in Abhängigkeit vom g-Wert und der Strahlungsleistung ein Vielfaches der internen Wärmelasten betragen. Da bei passiven Kühlkonzepten die abführbare Wärmemenge durch die verfügbaren Wärmesenken begrenzt wird, ist der Reduktion der solaren Wärmeeinträge eine hohe Bedeutung zuzumessen.



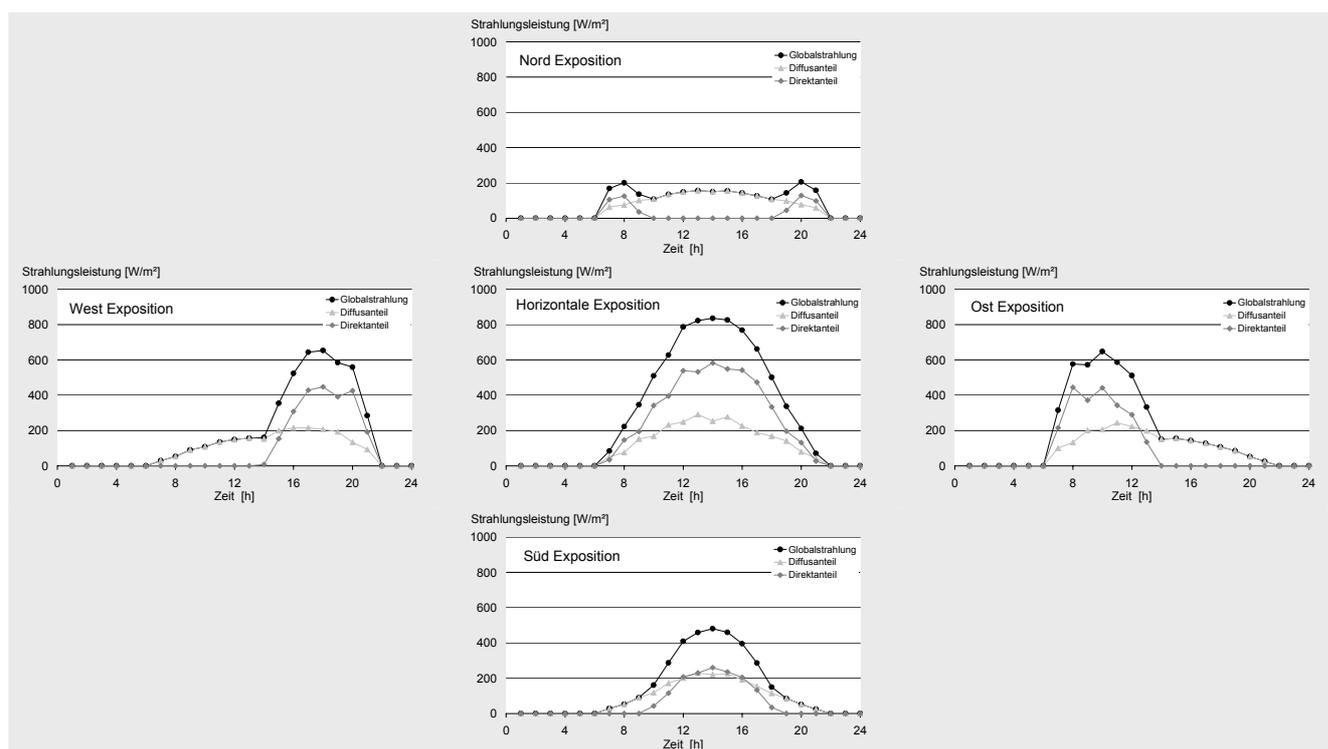
Bestimmt werden die solaren Wärmeeinträge von folgenden Faktoren

- Solare Einstrahlung (Standort, Jahreszeit)
- Größe und Orientierung der transparenten Fläche
- Verschattung durch umgebende Bebauung und Pflanzenbewuchs
- Effektiver g-Wert Glas und Sonnenschutz
- Betrieb Sonnenschutz

Die Globalstrahlung setzt sich aus direkter und diffuser Strahlung zusammen. Das Verhältnis ändert sich in Abhängigkeit vom Bewölkungsgrad. An klaren Tagen liegt der Anteil der Diffusstrahlung bei 10 %, an völlig bedeckten Tagen kann er bis auf 100 % ansteigen [Zürcher et al., 2004]. Diese Aufteilung ändert sich nochmals je nach Orientierung der Fassadenfläche und ihrer Neigung (Abb. 5.16). Als Beispiel dient hier das für mitteleuropäische Verhältnisse typische Klima von Zürich an einem unbewölkten Tag (21.06).

Auf die Nordfassade trifft nur in den frühen Morgen- und späten Abendstunden Direktstrahlung auf, die Ostfassade erhält ihr Strahlungsmaximum vormittags. Bei beiden Orientierungen beginnen die Strahlungseinträge jedoch vor der Arbeitszeit. Bei Einsatz eines beweglichen Sonnenschutzes garantiert meist nur die Schließung über die Gebäudeleittechnik ungewollte Wärmeeinträge. Da bei der Westfassade nachmittags die Maxima der Strahlung und der Außentemperatur zusammenfallen, sind im Sommer gerade westorientierte Büros besonders anfällig für Überhitzungen. Die Südfassade weist (bedingt durch den hohen Sonnenstand im Sommer) zwar ein niedrigeres Niveau für die Einstrahlung auf, aber auch hier gilt die Gleichzeitigkeit von Strahlungs- und Temperaturmaximum. Besonders kritisch sind zweiseitig verglaste Eckräume, hier ist die solare Aperturfläche bezogen auf die Grundfläche des Raumes höher und der Zeitraum für die solare Einstrahlung insgesamt länger. Die Ausführungen machen deutlich, dass sich hinsichtlich der Strahlungseinträge (im Gegensatz zur Temperatur, die für das gesamte Gebäude gleich ist) grundsätzlich für jede Fassadenseite unterschiedliche Handlungsspielräume ergeben. Dem steht oftmals der gestalterische Wunsch nach Einheitlichkeit und Symmetrie entgegen. Eine Möglichkeit gestalterisch neutral auf die spezifische Anforderungen der Orientierung zu reagieren, ist der Einsatz von Sonnenschutzglas.

**Abb. 5.16:** Aufteilung der Strahlung in Direkt- und Diffusstrahlung an einem unbedeckten Tag (21. Juni) in Zürich, CH. Datenquelle: Meteonorm, Vers. 5.0. Anmerkung: Das Klima Zürichs gibt mitteleuropäische Verhältnisse gut wieder (IEA SHC 28)

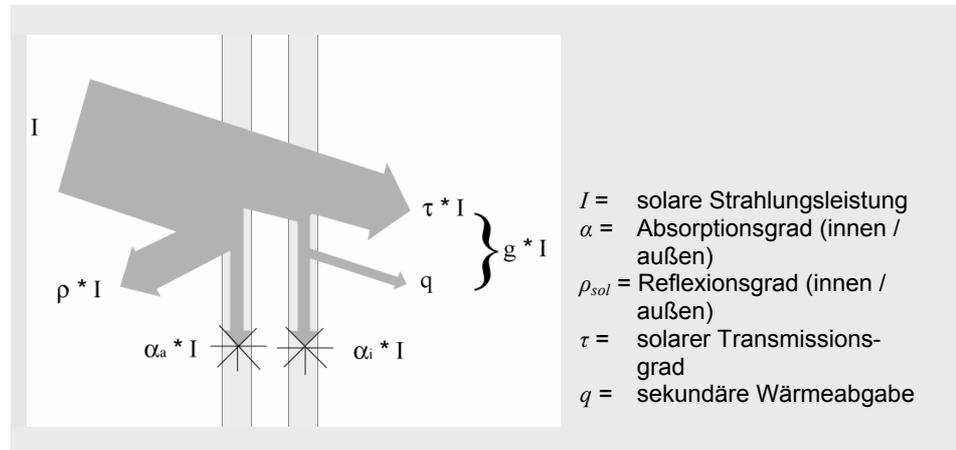


Wie viel von der auf die Fassade auftreffenden Strahlung tatsächlich in den Raum gelangt, wird über den Gesamtenergiedurchlassgrad, den g-Wert (Abb. 5.17) des Sonnenschutzsystems, bestimmt. Dieser wird nach [Voss et al., 2006a] von den

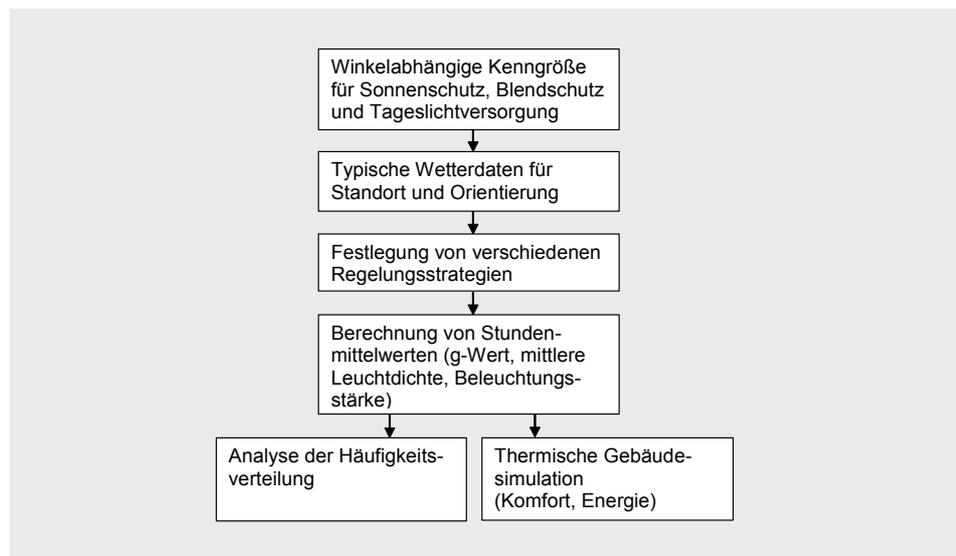
- Verglasungseigenschaften,
- Art, Einbaulage und Stellung des Sonnenschutzsystems,
- Einfallsrichtung der Strahlung, sowie der
- Windgeschwindigkeit und -richtung bestimmt.

Der g-Wert wird berechnet oder kalorimetrisch gemessen, allerdings gilt das Ergebnis dann nur für bestimmte Randbedingungen. Um ein Fassadensystem über einen definierten Zeitraum zu charakterisieren und Systeme untereinander vergleichbar zu machen, kann auf den effektiven g-Wert zurückgegriffen werden (Abb. 5.18).

**Abb. 5.17:** Definition des Gesamtenergiedurchlassgrades  $g$ . Um die Wirksamkeit des Sonnenschutzes eines Fassadensystems zu beurteilen, ist der g-Wert aus Kombination von Verglasung und Sonnenschutzsystem die entscheidende Größe. Quelle: [Voss et al., 2006a]



**Abb. 5.18:** Ablauf der Bestimmung des effektiven g-Werts [Kuhn, 2006]. Nach der Berechnung von Stundenmittelwerten für den effektiven g-Wert kann die Effizienz des Fassadensystems entweder über die Analyse der Häufigkeitsverteilung oder eine thermische Gebäudesimulation ermittelt werden. Die Simulation liefert Aussagen zum thermischen Komfort oder zum Kühlenergieverbrauch. Die Vorgehenssystematik wird auch zur Bestimmung der Tageslichtautonomie (siehe 9.1.2) verwendet.



Die Entscheidung für ein Fassadensystem wird immer im Spannungsfeld zwischen Sonnenschutzwirkung, Blendschutz, der Tageslichtnutzung und der Interaktion Nutzerkomfort (thermisch, visuell) getroffen. Die Eignung einer Lösung ist stark projektbezogen. Typologisch lassen sich die diversen Sonnenschutzarten in folgende Gruppen einteilen

- *Bauliche feststehende Verschattungsvorrichtungen (Vordächer, Vorsprünge, Lichtschwerter etc.)*  
 Aufgrund des Sonnenstands sind diese Verschattungen hauptsächlich an Südfassaden wirksam. Nachteilig ist, dass abhängig von der Kragweite ein Teil des Zenitlichts ausgeblendet und damit der Tageslichteinfall gemindert wird. Blendungen werden nicht wirksam verhindert.

- *Bewegliche Sonnenschutzvorrichtungen (Lamellenbehänge, Rollos)*
  - *außen liegende Systeme*

Der Vergleich der Sonnenschutzwirkung abhängig von der Position und vom Reflexionsgrad des Systems (Abb. 5.19, 5.20 und 5.21) macht deutlich, dass die Wirksamkeit von außen liegenden Systemen am höchsten ist. Im Rahmen einer Sanierung kann es jedoch unter Umständen aus baukonstruktiven oder gestalterischen Gründen nicht möglich sein, nachträglich ein außen liegendes System anzubringen. Nachteilig sind eine hohe Windanfälligkeit, höhere Kosten (Robustheit) und bei einer Nutzung im Winter als Blendschutz eine Reduktion der solaren Wärmeeinträge.
  - *Systeme zwischen der Doppelverglasung*

Der mit diesem Sonnenschutz maximal erreichbare g-Wert liegt etwas höher. Der Einsatz bei einer Sanierung ist nur mit gleichzeitigem Austausch der Fenster möglich. Die Anfälligkeit gegenüber Wind entfällt, dafür ist die vorauszusetzende Langlebigkeit des Systems ein wirtschaftlicher Risikofaktor.
  - *Innen liegende Systeme*

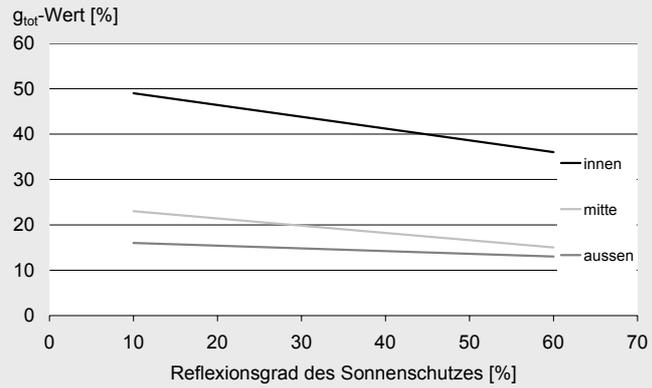
Eine nachträgliche Anbringung ist einfach und die Systeme sind in der Regel kostengünstig. Die Sonnenschutzwirkung der Einrichtung in Kombination mit einem g-Wert der Verglasung  $\geq 55\%$  ist oft nicht ausreichend, kann aber mit einer Sonnenschutzverglasung (siehe dort) verbessert werden. Je nach Konstruktion wird die Öffnung des Fensters bei geschlossenem Sonnenschutz erschwert.
- *Sonnenschutzverglasungen*

Die ideale Sonnenschutzverglasung lässt durch eine geeignete Beschichtung auf der Innenseite der Außenscheibe nur den Lichtanteil der Solarstrahlung in den Raum und verhindert ein Eindringen der Infrarotstrahlung. Physikalisch machbar ohne Farbverfälschung ist ein etwa doppelt so hoher Lichttransmissionsgrad wie der g-Wert. Einen Überblick über einige verfügbare Produkte gibt Abb. 5.22. Trotz der erzielten Sonnenschutzwirkung muss ein Blendschutz zur Verfügung gestellt werden. Oftmals wird zugunsten der Tageslichtnutzung ein g-Wert  $\geq 30\%$  gewählt und ergänzend ein innen liegender Sonnenschutz eingesetzt. Ein großer Vorteil des Sonnenschutzglases ist der bereitgestellte nutzungsunabhängige Basissonnenschutz. Die Kosten für Sonnenschutzglas liegen – je nach Hersteller und Produkt – bei ca. 40 € / m<sup>2</sup> [Voss et al., 2006b]. Eine weitere, sich derzeit in der Entwicklung befindende Alternative, sind schaltbare Verglasungen, bei denen sich g-Wert und Lichttransmissionsgrad in einem bestimmten Bereich einstellen lassen [Voss, 2006].

**Abb. 5.19:** Wirkung eines Sonnenschutzes ( $g_{tot}$ -Wert) in Abhängigkeit von der Position und seinem Reflexionsgrad. Der  $g_{tot}$ -Wert entspricht  $g \cdot F_c$ , wobei  $g$  der Gesamtenergiedurchlass der Verglasung ist und  $F_c$  der Abminderungsfaktor für Sonnenschutzvorrichtungen [DIN 4108-2:2003-07].

Annahmen: Sonnenschutz: 20 %;  $U_g$ -Wert: 1,2  $W/(m^2K)$ ;  $g$ -Wert Glas: 55 %  
Quelle: [Brunner et al., 2001]

Anmerkung zum Reflexionsgrad: Bei Lamellenhängen gilt dieser für den geschlossenen Zustand. In „Cut-off-Stellung“ wird bei Lamellen mit einem hohen Reflexionsgrad einerseits eine gute Tageslichtversorgung erreicht, andererseits muss besonders bei außen liegenden Lamellen mit einem schlechteren  $F_c$ -Wert gerechnet werden, da der Behang transparenter erscheint. In dieser Position wird nicht mit allen Systemen ein  $F_c$ -Wert von 15 % erreicht.



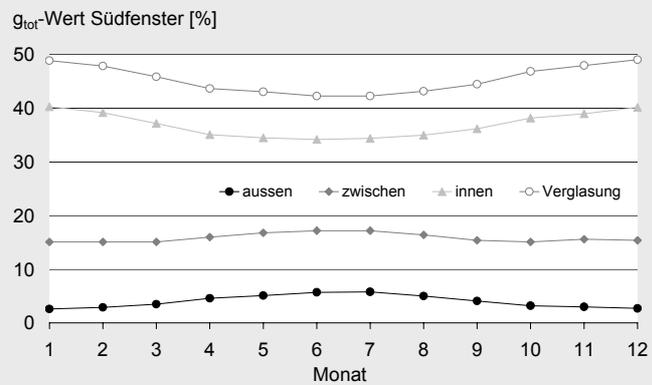
**Abb. 5.20:** vergleichende Berechnung für folgende Fenstersysteme mit Parasol v3.0 [Rosencrantz, 2003], www.parasol.se:

a) „Verglasung“:  $U_g$ -Wert= 0,98  $W/(m^2K)$ ,  $g$ -Wert: 54 %

b) Verglasung und Lamellen „außen“ (Breite: 5 cm, Emission kurz- und langwellige Strahlung = 80 %, Stellung: 45 °)

c) Lamellen „zwischen“ Verglasung (Breite: 2,2 cm, Reflexion kurzwellige Strahlung: 67 %, Emission langwellige Strahlung: 10 %, Stellung: 45 °)

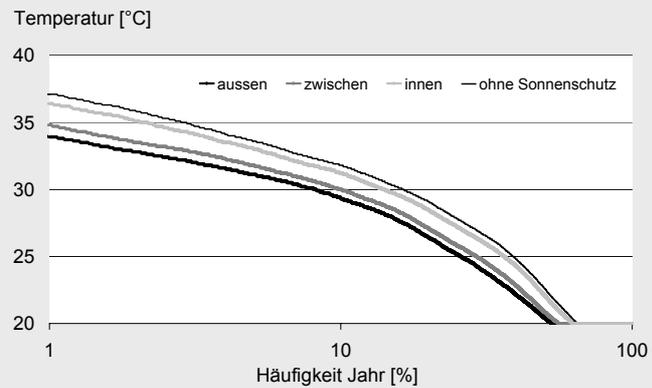
d) Verglasung und Lamellen „innen“: (siehe c)  
Anmerkung: Die unterschiedliche Entwicklung des  $g_{tot}$ -Werts der Sonnenschutzsysteme liegt an der sich verändernden Zusammensetzung zwischen Direkt- und Diffusstrahlung im Jahresverlauf. Auf der Südseite nimmt der Anteil der Direktstrahlung in den zentralen Sommermonaten ab.



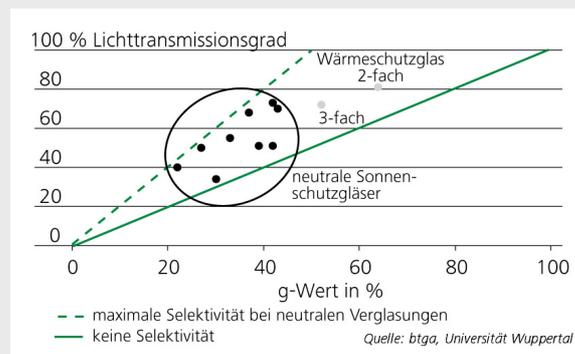
**Abb. 5.21:** Berechnungen der Raumlufttemperatur mit den in Abb. 5.20 untersuchten Systemen a) bis d) mit „Parasol“. Temperaturhäufigkeit auf 8760 h bezogen, x-Achse logarithmisch skaliert.

Klima: Zürich Kloten  
Raum: Breite: 3,5 m, Tiefe: 4,5 m, Höhe: 3,0 m  
Aperturfläche (Lichteintrittsfläche) Fassade: 30 %  
Betriebszeit: 8 bis 17 Uhr, Wochenenden berücksichtigt.

Interne Lasten: 260  $Wh/m^2d$  (hoch)  
Luftwechsel Betriebszeit: 1,3 1/h (Außenluft)  
Keine Kühlung, Setpoint Heizung: 20 °C  
Steuerung Sonnenschutz: Heruntergefahren bei Strahlungsleistung auf Fenster  $\geq 150 W/m^2$ .



**Abb. 5.22:** Selektivität typischer Sonnenschutzverglasungen. Dargestellt ist der Lichttransmissionsgrad in Abhängigkeit des  $g$ -Wertes nach DIN EN 410:1998-12 bei senkrechtem Lichteinfall  
Quelle: [Voss et al., 2006a]



### *Steuerung / Regelung oder manuelle Betätigung?*

Anzustreben ist ein robustes System, das eine grobe Fehlbedienung ausschließt und dem Nutzer einen größtmöglichen Handlungsspielraum gibt. Neben einer Vielzahl von Möglichkeiten gibt es folgende Grundprinzipien. Die einfachste Art einer Steuerung gewährleistet über eine Zeitschaltung, dass am Wochenende und vor Arbeitsbeginn der Sonnenschutz heruntergefahren ist und erst durch die Nutzer geöffnet wird. Eine strahlungsbezogene Steuerung kann fassadenweise über externe Sensoren (kostengünstiger) oder als Regelung über Beleuchtungsstärkemesser im Raum eingesetzt werden. Die Entscheidung für eine Strategie ist von der Wahl des Fassadensystems abhängig.

Beispielsweise kann bei der Kombination aus Sonnenschutzverglasung und einem Sonnen- und Blendschutz eine einfache Zeitschaltung ausreichend sein.

Grundsätzlich sollte ein Nutzereingriff jedoch immer möglich sein.

Untersuchungen zeigen, dass ein Öffnen des Sonnenschutzes von Nutzern eher akzeptiert wird, als ein Schließen desselben [Reinhart et al., 2003], [Rubin et al., 1978]. Erst ab einer Strahlungsleistung von  $450 \text{ W/m}^2$  auf die Fassade oder wenn direktes Sonnenlicht  $> 50 \text{ W/m}^2$  auf die Arbeitsfläche trifft [Reinhart, 2005], steigt die Akzeptanz.

### *Lamellenstellung*

Aus Befragungen geht hervor, dass die Mehrzahl der Nutzer den Blickkontakt nach draußen als sehr wichtig bewertet (siehe Kap. 8.3, sowie Wienold, J. in [Voss et al., 2006a]) und dafür sogar Blendung in Kauf nimmt [Chauvel et al., 1982]. Als Konsequenz ist die Duldung eines völlig heruntergefahrenen und geschlossenen Lamellenbehangs eher gering. Besser akzeptiert wird die „cut-off-Stellung“, bei der die Lamellen im Abhängigkeit vom Sonnenstand so weit gedreht werden, dass eine akute Blendung verhindert wird und ein Sichtkontakt nach draußen weiter besteht. Dadurch, dass auch weiter Diffusstrahlung in den Raum dringen kann, wird die Sonnenschutzwirkung gemindert.

### *Rückschlüsse für die Sanierung*

Bei Bestandsgebäuden ist es von den vorhandenen Gegebenheiten abhängig, welches System eingesetzt werden kann. Entscheidender Faktor ist, ob und wenn ja welche Teile der Fassade erhalten bleiben (Tab. 5.4).

Bleibt die Fassade oder / und die Fenster bestehen, dann sind als grober Anhaltswert Verglasungsanteile bezogen auf die Fassade zwischen 30 und 40 % günstig. Abhängig vom  $g_{\text{tot}}$ -Wert des Fassadensystems bewegen sich die Wärmeeinträge der Gebäude auch bei ungünstigem Nutzerverhalten in Größenordnungen, die von Wärmesenken im Rahmen der passiven Kühlung aufgenommen werden können. Bei geringer Tiefe des dahinter liegenden Raumes und einem hohen  $g_{\text{tot}}$ -Wert des Fassadensystems können jedoch bereits ab einem Verglasungsanteil von 30 % der Fassadenfläche Merkmale erhöhter externer Wärmebelastung auftreten [Brunner et al., 2001]. Den Zusammenhang zwischen Glasfläche, Fassadenfläche, Nettogeschossfläche und Raumtiefe zeigt Abb. A5.3.1-1.

Bei höheren Verglasungsanteilen, bzw. Fassadensystemen mit einem hohen  $g_{\text{tot}}$ -Wert, sollten die übrigen Eigenschaften des Gebäudes daraufhin betrachtet werden, ob eine „Kompensation“ möglich ist. [Birtles et al., 1996] zeigen, wie Speichermasse, reduzierte interne Lasten und eine tiefe

Nachtlüftungstemperatur einen erhöhten Glasflächenanteil ausgleichen können. Nachteilig dabei ist, dass die Gebäude, z. B. bei ungünstigem Nutzerverhalten, für Überhitzungen anfälliger sind.

**Tab. 5.4:** Handlungsspielräume abhängig vom Erhalt oder Austausch der Fassade

Ist ein Austausch der Fenster und / oder der Fassade möglich, so erhöhen sich die Handlungsspielräume beträchtlich.

	Erhalt Fassade + Fenster	Erhalt Fassade, Austausch Fenster	Austausch Fassade
Handlungsspielraum	Gering	mittel	hoch
Abhängigkeiten	Vorhandene Aperturfläche (= Lichteintrittsfläche) bestimmt Systemwahl	Bindung an Öffnungsgröße, Möglichkeit opake Flächen (z. B. als Lüftungsflügel) zu integrieren	solare Wärmelasten gestalterisch
Möglichkeiten	externer / interner Sonnenschutz	Selektive Sonnenschutzverglasung, externer / interner Sonnenschutz	Fensterflächenanteil, Verglasungseigenschaften, Sonnenschutzvorrichtungen
Robustheit System	abhängig von Steuerung / Regelung	Mit Sonnenschutzverglasung hoch, sonst abhängig von Steuerung / Regelung	Mit Sonnenschutzverglasung hoch, sonst abhängig von Steuerung / Regelung

### *Fassadensysteme in der Praxis - Fallbeispiele*

Neben den oben ausgeführten theoretischen Überlegungen über den Erhalt oder den Austausch der Fassade, spielen bei der Wahl des Fassadensystems auch gestalterische Aspekte eine Rolle oder – wie das Gebäude 2 zeigt - Anforderungen des Denkmalschutzes.

- Beim Gebäude 1 wurde die bestehende Fassade komplett ausgetauscht. Aufgrund der Gebäudehöhe (Windlasten) und aus gestalterischen Gründen ist das Gebäude nun mit einer geschossweise unterteilten und durchlüfteten Glasfassade versehen. Es gibt außenseitig vor der Wärmeschutzverglasung der Fenster einen automatisch und manuell bedienbaren Sonnenschutz, der nach außen nochmals durch eine weitere – über breite Fugen hinterlüftete - Glasscheibe geschützt ist (Abb. siehe Info A2.1-1).
- Beim Gebäude 2 wurden bei Erhalt und zusätzlicher Dämmung der Außenwand die Fenster ausgetauscht. Wegen der Anforderungen des Ensembleschutzes musste ein innen liegender Sonnenschutz eingebaut werden. Dieser wird manuell bedient.
- Die bestehende Fassade von Gebäude 3 wurde entfernt und durch eine Leichtbaukonstruktion ersetzt. Die Fenster auf der Nordseite haben eine Sonnenschutzverglasung (g-Wert 40 %) ohne Sonnenschutz. Der Grund dafür ist die Annahme, dass der Sonnenschutz auf dieser Seite selten heruntergefahren wird (keine Direktstrahlung) und die Diffusstrahlung somit ungehindert in den Raum gelangt. Hinzu kommt, dass die Zusatzkosten für eine Sonnenschutzverglasung geringer sind, als die für ein Sonnenschutzsystem. Auf der Südseite wird ein außen liegender Sonnenschutz verwendet (g-Wert Verglasung 64 %,  $F_c$ -Wert Sonnenschutz 25 %), der über die Gebäudeleittechnik – mit Nutzereingriff – gesteuert wird.
- Auch beim Gebäude 4 entschieden sich die Planer für den Austausch der Fassade. Als Fenstersystem wird eine Kombination aus Sonnenschutzglas (g-Wert 41 %), einem außen liegenden Sonnenschutz aus in Glas einlaminiertem Streckmetall und einem innen liegenden Blendschutz eingesetzt.

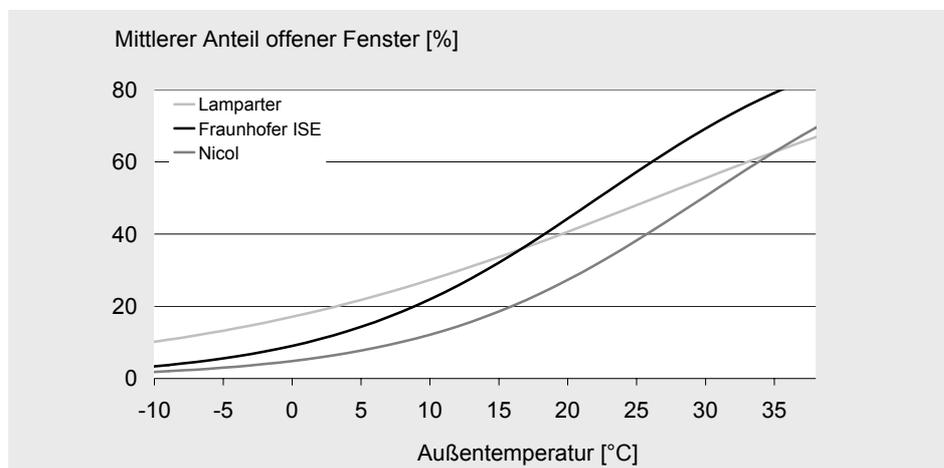
## Lüftung

Wärmeeinträge durch die Lüftung können über die Fensterlüftung, dezentrale Zuluft einlässe in der Fassade (siehe dazu auch Kap. 5.1.2) sowie die Lüftungsanlage in das Gebäude gelangen. Wie in Kap. 3.2 dargelegt, sollte eine Fensterlüftung durch die Nutzer immer möglich sein. Allerdings ist dann bei zunehmenden Außentemperaturen auch mit einer vermehrten Fensterlüftung zu rechnen (Abb. 5.23). Bei zeitgleichem Einsatz einer ventilatorgestützten Lüftung wird zwar weniger, aber grundsätzlich weiterhin über die Fenster gelüftet.

Zentrale Zuluft einlässe für die Lüftungsanlage sollten so platziert sein, dass die Luft sich nicht unnötig (z. B. Zuluftansaugung über Flachdach mit geringem Reflexionsgrad) erwärmt.

### Rückschlüsse für die Sanierung

Siehe Kap. 5.1.2 und 5.5.2



**Abb. 5.23:** Fensteröffnung in Abhängigkeit von der Außentemperatur (AT). Die Kurven zeigen die Ergebnisse einer Auswertung von stündlichen Daten [Voss et al., 2006a]. Die Untersuchungen im Gebäude Lamparter wurden vom 08.2001 bis zum 07.2003, die Untersuchungen am Fraunhofer ISE vom 08.2002 bis zum 07.2003 durchgeführt. Die Logid-Funktion dient in der Statistik zur Beschreibung von binären Ereignissen (offen/zu) und geht auf eine Untersuchung Nicols in mehreren europäischen Ländern zurück [Nicol, 2001].  
 Fensteröffnungsgrad =  $\frac{\exp(a+b \cdot AT)}{1 + \exp(a+b \cdot AT)}$   
 Lamparter:  $a = -1,58$ ,  $b = 0,06$   
 Fraunhofer ISE:  $a = -2,98$ ,  $b = 0,1$   
 Nicol:  $a = -2,31$ ,  $b = 0,104$

## Transmission

Die Wärmeeinträge über Transmission sind aufgrund des heute üblichen Dämmstandards nach einer Sanierung gering und können unter dieser Voraussetzung vernachlässigt werden.

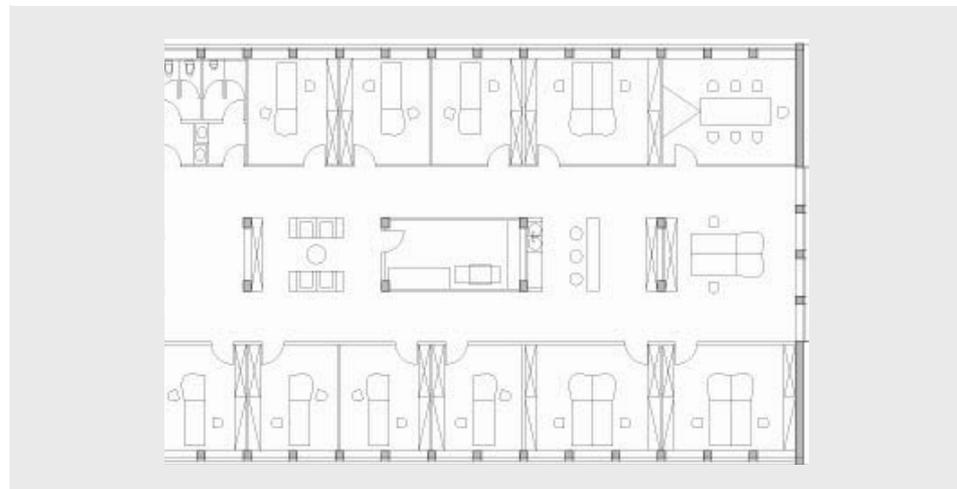
### 5.3.2 Interne Wärmequellen

Die internen Wärmequellen eines Büroraumes setzen sich aus der Wärmeabgabe von Personen, Arbeitshilfen und der elektrischen Beleuchtung zusammen. Der Tagesgang besteht je nach Datensicherungssystem aus einer Grundlast und einer erhöhten Last während der tatsächlichen Anwesenheitszeit. Die Quellen geben ihre Wärme anteilig als konvektive und radiative Lasten ab. Neben dem Technisierungsgrad des Büros gibt es einige wichtige Einflussgrößen, auf die im Folgenden kurz eingegangen werden soll:

- Büroraumkonzept und Tageslichtnutzung  
Die Belastung pro Raum ist von der Bürogröße und der Belegungsdichte abhängig. In Großraumbüros nimmt die Fläche pro Arbeitsplatz ab. Ist die

Hardware zentralisiert, so verringert sich auch die Wärmeabgabe pro Flächeneinheit. Unterschiedliche Anteile von Verkehrsflächen verstärken oder schwächen diesen Effekt. Nachteilig bei Großraumbüros ist die fehlende Anbindung der Arbeitsplätze an die Außenfassade. Da ab einer Raumtiefe von 5 m eine ständige elektrische Beleuchtung erforderlich ist [DIN V 18599-4:2005-07], können nur wenige Plätze mit Tageslicht versorgt werden. Bei einer guten Tageslichtnutzung ist mit einer weitaus höheren Lichtausbeute und damit geringeren Wärmelasten als mit Kunstlicht zu rechnen<sup>4</sup>. Hinsichtlich der Sanierung mit Maßnahmen der passiven Kühlung sind als ideale Zielgröße Bürokonzepte mit Einzel- und Gruppenbüros für wenige Personen sowie Kombibüros mit tageslichtorientierten Arbeitsplätzen anzustreben (siehe auch Kap. 3.1.2). Eine wirksame Reduktion der Geräteabwärme verspricht die Konzentration von Kopierern, EDV u.ä. in einem separaten Raum, in dem die Lasten gezielt abgeführt werden (Abluftanlage, Zu- und Abluftanlage).

<sup>4</sup> Abhängig vom Himmelszustand sind Werte von 90 bis 130 Lumen/Watt, in Verbindung mit Sonnenschutzglas sind auch 200 Lumen/Watt zu erreichen.

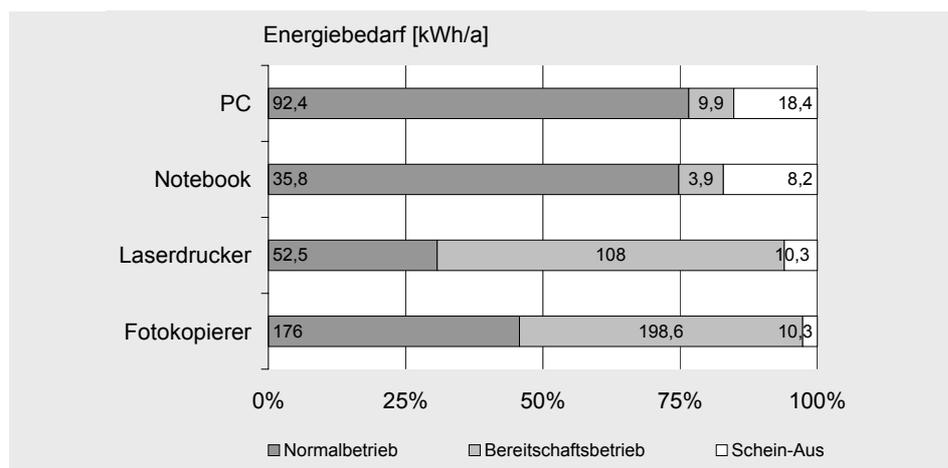


**Abb. 5.24:** Beispiel für einen Grundriss mit einem separaten Raum für gemeinschaftlich nutzbare Geräte, Sanierungsstudie Gebäude W

<sup>5</sup> Tisch: 0,80 x 1,6 m zuzüglich ebensolche Fläche davor

- **Elektrische Beleuchtung**  
Nach der [DIN EN 12464-1:2003-03] muss für den Arbeitsbereich<sup>5</sup> eine Beleuchtungsstärke von 500 Lux gewährleistet sein, für den Umgebungsbereich sind 300 Lux ausreichend. Sind flexible Möblierungsoptionen Bestandteil des Konzepts (z. B. bei Großraumbüros), dann müssen im ganzen Raum 500 Lux bereitgestellt werden. Die dazu erforderlichen elektrischen Leistungen hängen vom Tageslichtkonzept und der Energieeffizienz der Anlage ab. Die [DIN EN 13779:2005-05] gibt als Standardwert 12 W/m<sup>2</sup> (üblicher Bereich: 11 bis 15 W/m<sup>2</sup>) an. Dies deckt sich mit der mittleren installierten Leistung für 14 Gebäude mit Büronutzung des BMWI Förderkonzepts EnOB, die bei 11,9 W/m<sup>2</sup> lag [Hoffmann et al., 2005b]. Mit Sicherstellung einer Grundbeleuchtung und einer separaten Arbeitsplatzbeleuchtung sind Werte bis 10 W/m<sup>2</sup> zu erreichen [Hoffmann et al., 2005b].
- **Verkehrsflächen**  
Auch hier ist bei der Beleuchtung auf eine geringe installierte Leistung zu achten. Je nach Lüftungskonzept können nicht abgeführte Wärmelasten indirekt auf die Büros einwirken.

- **Personen**  
Die sensible Wärme pro Person liegt bei einer Raumtemperatur von 24 °C und bei Bürotätigkeiten zwischen stündlich 70 und 75 W/Person. In ruhendem Zustand besteht die Wärmeabgabe zu gleichen Teilen aus Wärmestrahlung und Konvektion [Koschütz et al., 2000].
- **Bürogeräte**  
Untersuchungen haben gezeigt, dass die durch die Leistungsangaben auf dem Typenschild erwartete Wärmeabgabe die tatsächliche Wärmeabgabe häufig überstieg. Dabei wich für Bürogeräte unter 1000 W die tatsächliche Wärmeabgabe zum angegebenen Verbrauch zwischen 25 und 50 % ab [Hosni et al., 1999]. Meist werden daher Leistungen nach Art der Erzeuger und nicht nach Typenschild ausgewiesen. Viele der Geräte geben ihre Wärme über Ventilatoren unmittelbar an die Raumluft ab. Dieser direkt spürbare Anteil beträgt je nach Gerät zwischen 65 und 90 % (der andere Anteil ist Wärmestrahlung) [Wilkins et al., 2000]. Die Daten von Abb. 5.25 zeigen, dass es bei den meisten Geräten, neben dem Bereitschaftsbetrieb, einen „Schein-Aus“ Modus gibt, bei dem selbst in ausgeschaltetem Zustand dennoch weiter Strom bezogen wird. Hier und beim Bereitschaftsbetrieb erschließen sich – neben der Anschlussleistung - Einsparungspotentiale.



**Abb. 5.25:** Aufteilung des jährlichen Energiebedarfs in Normalbetrieb, Bereitschaftsbetrieb und „Schein-Aus“. Begriffsdefinitionen siehe, Tab. A5.3.2-1. Bezug sind insgesamt 8760 h. Datenquelle [Schlommann et al., 2005]

#### *Lastannahmen für Büroräume in Normen*

Der Vergleich unterschiedlicher Normen in Tab. 5.5 zeigt, dass die Vorgaben der DIN V 18599-10:2005-07 mit der SKWI-Richtlinie aus der Schweiz in einem ähnlichem Bereich liegen, wenn man berücksichtigt, dass die DIN V 18599:2005-07 die Wärmelasten durch Beleuchtung an anderer Stelle behandelt. Die DIN EN 13779:2005-05 legt als Bezugsgröße die Anzahl der Personen im Raum fest, die Werte sind also nur bedingt vergleichbar. DIN 4108-2:2003-07 gibt zur Berechnung des sommerlichen Wärmeschutzes einen Pauschalwert für Nichtwohngebäude an. Zukünftig ist bei den nationalen und EU-Normen ein Abgleich zu erwarten.

Exemplarische Ermittlungen von internen Wärmelasten in fünf Bürogebäuden des BMWI Förderkonzepts EnOB zeigen für Gruppen- oder Großraumbüros eine Spannweite zwischen 92 und 188 Wh/m<sup>2</sup><sub>NGF</sub>d auf (Herkel, S. in [Voss et al., 2006a]).

### Nutzungsdauer

Bei einer Ermittlung der internen Lasten über Einzelwerte (Tab. A5.3.2-1), ist der Anwesenheitsfaktor zu berücksichtigen, da bei einer Nutzungsdauer von 11 Stunden, das Büro während dieser Zeit nicht immer belegt ist. Werte aus der Literatur geben für Einzel- oder Mehrpersonnbüros eine als „üblich“ bezeichnete Bandbreite von 70 bis 90 % [RAVEL, 1994], oder 80 % in [Knissel, 1999] an<sup>6</sup>. Ein weit niedrigerer Wert von 55 % ist in [Knissel, 2004] genannt. Untersuchte Anwesenheitszeiten in zwei Bürogebäuden ergaben eine Spannweite zwischen 4,5 h/d und 7,5 h/d (Herkel, S. in [Voss et al., 2006a]), in [SWKI 95-3, 2001] werden 5,5 h angeführt. Die Wahl des Anwesenheitsfaktors sollte bei einer Berechnung von der Arbeitsstruktur im untersuchten Gebäude (siehe z. B. Abb. 3.4) abhängig gemacht werden.

<sup>6</sup> In [RAVEL, 1994] und [Knissel, 1999] wird von einem „Betriebsfaktor Personen“ oder „Vollbetriebszeitfaktor Personen“ gesprochen.

		[DIN V 18599-10:2005-07]			[SWKI 95-3, 2001]			[DIN 4108-2:2003-07]			[DIN EN 13779:2005-05]
		B m <sup>2</sup> /P	T Wh/m <sup>2</sup> d	mL W/m <sup>2</sup> (11h)	B m <sup>2</sup> /P	T Wh/m <sup>2</sup> d	mL W/m <sup>2</sup> (11h)	B m <sup>2</sup> /P	T Wh/m <sup>2</sup> d	mL W/m <sup>2</sup> (11h)	
Einzel- / Gruppen- büro	h	10	132	12	10	216	20		-		Spannweite Wärmelast Bürogebäude: 25-200 W/P Standardwert: 100 W/P (jeweils 8 h/d)
	m	14	72	7	14	153	14				
	t	18	42	4	18	117	11				
Groß- raum- büro	h	8	168	15	8	234	21		-		
	m	10	102	9	10	162	15				
	t	12	60	5	12	117	11				
Nicht- wohnbau		-			-			k.A	144	13	
Beleuch- tung	exkl. Beleuchtung			inkl. Beleuchtung			inkl. Beleuchtung			exkl. Beleuchtung	
Flächen- bezug	NGF			BGF: Umrechnung auf NGF: 0,87 nach [VDI 3807, 1994]			-			NGF	
Beson- derheit	-			Einzel-/Gruppenbüros: bis 6 Arbeitsplätze Großraumbüros > 6 Arbeitsplätze			-			-	

**Tab. 5.5:** Obergrenze von Wärmelasten an Werktagen in Bürogebäuden nach unterschiedlichen Normen. Verwendete Abkürzungen: B = Belegung, T = Tagessumme (24h), mL = mittlere Leistung, h = hoch, m = mittel, t = tief  
Anmerkung zur DIN EN 13779:2005-05: In Abschnitt 6.4.1 wird als Flächenangabe für Einzel- / Gruppenbüros ein üblicher Bereich von 8-12 m<sup>2</sup>/P (Standardwert: 10 m<sup>2</sup>/P) und für Großraumbüros ein üblicher Bereich von 7-20 m<sup>2</sup>/P (Standardwert: 12 m<sup>2</sup>/P) angegeben. Die Angaben für die Wärmelasten beziehen sich explizit nur auf Personen.

### Rückschlüsse für die Sanierung - Senken der Wärmelasten

Weisen die bestehenden Bürogeräte (z. B. veraltete EDV) und Anlagen (z. B. Beleuchtungsanlagen) eine – altersbedingt – hohe Wärmeabgabe auf und gibt es Alternativen mit geringeren Wärmeabgaben, so lässt sich hier ein großes Potential erschließen. Auch eine Konzentration der gemeinschaftlich genutzten Geräte auf einzelne Räume in der Abluftzone stellt eine wirkungsvolle Reduktion dar. Die Einflussgrößen zur Verbesserung der Tageslichtnutzung sind abhängig vom Umfang der Sanierungsmaßnahmen (Austausch Fassade?). Einen Überblick über die Möglichkeiten zur Reduktion gibt Tab. 5.6.

Es gilt zu bedenken, dass eine wirksame Reduktion der internen Lasten oftmals günstiger ist, als Investitionen in eine erhöhte Wärmeabfuhr.

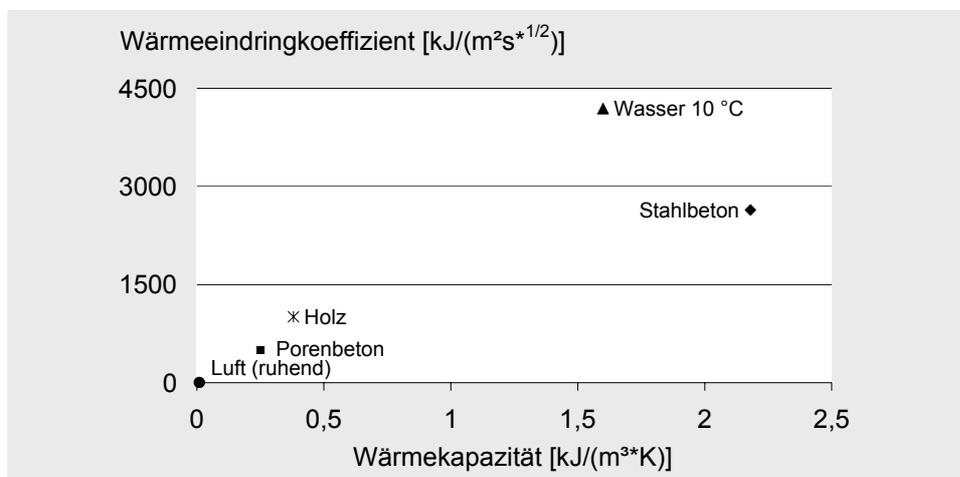
Bereich	Verbesserungspotential Sanierung	Optionen
Bürokonzept	- in der Regel festgelegt	Änderung möglich?
Tageslicht-nutzung	+ bei Austausch Fassade	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tageslichtorientierte Arbeitsplätze</li> <li>• Erhöhung <math>\tau_{vis}</math> möglich ?</li> </ul>
Kunstlicht	+	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aufteilung Grundbeleuchtung / Arbeitsplatzleuchte</li> <li>• Vermeidung indirekter Beleuchtung von Flächen mit geringem Reflexionsgrad (z. B.: Sichtbeton)</li> <li>• Präsenzsensoren Verkehrsflächen</li> <li>• Verzicht dekorative Beleuchtung</li> </ul>
Bürogeräte	+ abhängig von Nutzer	<ul style="list-style-type: none"> <li>• gradueller Austausch Geräte</li> <li>• Konzentration auf einzelne Räume (EDV, Kopierer)</li> </ul>

**Tab. 5.6:** Möglichkeiten zur Verringerung der internen Lasten bei Sanierungen  
Verwendete Abkürzungen: + = groß, o = mittel, - = klein

### 5.4 Wärmespeicherung verbessern

Die Speichermasse (Wärmekapazität) eines Gebäudes stabilisiert die Raumtemperatur. Große Speichermassen sorgen für eine Glättung der Temperaturschwankungen über mehrere Tage.

Wie viel Wärme bei einer Temperaturänderung an der Oberfläche in das Bauteil eindringt, beschreibt der Wärmeeindringkoeffizient  $b$  (Abb. 5.26).



**Abb. 5.26:** Materialkoeffizienten nach [Keller, 1997]. Vereinfacht gesagt steht die Wärmekapazität für die potentiell vorhandene Speichermasse, die Wärmeeindringzahl für die Geschwindigkeit der Wärmeaufnahme, bzw. Abgabe [Zimmermann, 2003]

Ist der Wärmeeindringkoeffizient hoch, nimmt die Materialoberfläche schnell Wärme auf und gibt sie ebenso rasch wieder ab. Dies ist für das Prinzip der Nachtauskühlung, bei der Wärme tagsüber in die Bauteile eingespeichert und nachts durch kühle Luft wieder abgeführt wird, entscheidend.

#### Beurteilung der speicherwirksamen Masse eines Raumes

Die folgenden Betrachtungen beziehen sich auf die inneren Bauteiloberflächen. Das Wärmespeichervermögen eines homogenen Baustoffes kann zunächst mit der potentiell vorhandenen Speichermasse  $c \cdot \rho$  und dem Wärmeeindringkoeffizienten  $b$  für die Geschwindigkeit der Wärmeaufnahme, bzw. -abgabe beschrieben werden.

$$b = \sqrt{\lambda * \rho * c} [kJ / m^2 * s^{1/2}] \quad \text{F 5.2}$$

Die speicherwirksame Schichtdicke wird durch die Eindringtiefe definiert, die wiederum von der Periodenlänge der Temperaturschwankung abhängig ist.

$$\delta = \sqrt{\frac{\lambda * T}{\rho * c * \pi}} [m] \quad \text{F 5.3}$$

Das Maß für die Geschwindigkeit, mit der sich eine Temperaturänderung im Material ausbreitet, ist die Temperaturleitfähigkeit.

$$a = \frac{\lambda}{\rho * c} [\frac{m^2}{s}] \quad \text{F 5.4}$$

Wie anhand dieser grundlegenden Prinzipien das Wärmespeichervermögen eines Raumes mit mehrschichtigen Bauteilen durch diverse Normen beurteilt wird, zeigen der nachfolgende Text und Tabelle 5.7.

Das Wärmespeichervermögen eines Bauteils (instationäre Randbedingungen) charakterisiert die europäische Norm [DIN EN ISO 13786:1999-12] mit der thermischen Speicherkapazität CT (kJ/m²K). Diese gibt an, welche Wärmemenge bei einer Lufttemperaturschwankung von 1 K von der Oberfläche aufgenommen und im Bauteil gespeichert werden kann. In einem vereinfachten Ansatz kann die maximale Eindringtiefe für einzelne Schichten überschlagen werden, ansonsten wird diese errechnet.

Die [DIN EN 832:2003-06] führt die Berechnung der wirksamen Wärmespeicherfähigkeit rein informativ an und folgt nach dem vereinfachten Ansatz der [DIN EN ISO 13786:1999-12]. Die maximale zu berücksichtigende Schichtdicke beträgt 10 cm.

**Tab. 5.7:** Bestimmung der speicherwirksamen Masse eines Raumes nach unterschiedlichen Normen. Bezug ist immer die Bodenfläche des Raumes.  
Verwendete Abkürzungen:  
SL = sehr leichte Bauweise,  
L = leichte Bauweise,  
M = mittlere Bauweise,  
S = schwere Bauweise

	[SIA V382/2, 1992]		[DIN 4108-2:2003-07] [DIN 4108-6:2003-06] [DIN EN 832:2003-06]		[VDI 2078, 1996]	
	kg/(K*m²)	Wh/(K*m²)	kg/(K*m²)	Wh/(K*m²)	kg/(K*m²)	Wh/(K*m²)
SL	-	-	-	-	< 150	< 50
L	< 300	-	-	< 50	150 - 300	50 - 100
M	300 – 400	-	-	< 130	300 - 800	100 - 200
S	> 400	-	-	> 130	> 800	> 200

Berechnung		
$m = \frac{\sum(A_i * M_i)}{A_B} [kg / m^2]$ <p>Für <math>M_i</math> werden speicherwirksame Massen verschiedener Wand- und Deckenkonstruktionen vorgegeben. Eigene Berechnungen können unter definierten Randbedingungen nach der „Heindl-Methode“ mit einem PC Programm durchgeführt werden.</p>	$C_{wirk} = \sum_i (c_i \rho_i d_i A_i) [Wh / K]$ <p>Für <math>d_i</math> werden bei Schichten mit <math>\lambda \geq 0,1</math> die Schichten nur bis zu einer Gesamtdicke von 10 cm aufsummiert. Bei Trennwänden ist nur die Hälfte, max. 10 cm der Schichtdicke anrechenbar. Schichten vor einer Wärmedämmschicht (<math>\lambda &lt; 0,1, R_i &gt; 0,25</math>) werden nur bis zu dieser Grenzschicht bis max. 10 cm berücksichtigt.</p>	<p>Speicherwirksame Masse (a) / Wärmekapazität (b) eines Bauteils</p> <p>a) <math>\sum \frac{m}{A_{FB}} [kg / m^2_{FB}]</math> b</p> <p>b) <math>\sum \frac{m * c}{A_{FB}} [Wh / (K * m^2_{FB})]</math></p> <p>Bei <math>m</math> und <math>c</math> wird die thermische Abdeckung der wärmespeichernden Schichten zum Raum berücksichtigt. a) Abdeckung mit <math>R_i &gt; 0,15</math> bis 0,3: Wertung der nachfolgenden Speicherschicht zur Hälfte, b) Abdeckung mit <math>R_i &gt; 0,3 (m^2 * K / W)</math>, keine Wertung der nachfolgenden Schicht.</p>

[DIN 4108-2:2003-07] und Teil 6 [DIN 4108-6:2003-06] legen die Bestimmung der wirksamen Wärmespeicherfähigkeit für Komponenten gemäß [DIN EN ISO 13786:1999-12] fest, die für einen Raum erfolgt nach DIN EN 832:2003-06.

Keinen rechnerischen Nachweis fordert die [VDI 2078, 1996], sie gibt Beispielkonstruktionen vor. Es wird keine maximale Schichtdicke genannt, die thermische Abdeckung der wärmespeichernden Schichten wird berücksichtigt.

In [SIA V382/2, 1992] werden zur Bestimmung der wirksamen Wärmespeicherfähigkeit zwei Größen verwendet und bestimmte Randbedingungen vorgegeben. Zur Beurteilung des Wärmeaufnahmevermögens einer Wand bei einer raumseitigen Temperaturamplitude an der Bauteiloberfläche wird die Größe (YT) eingeführt, mit der die speicherwirksame Masse (MT [kg/m<sup>2</sup>]) bestimmt wird. Die Norm gibt – alternativ zur Berechnung - speicherwirksame Massen verschiedener Wand- und Deckenkonstruktionen vor. Die Kennwerte nach [DIN EN ISO 13786:1999-12] und [SIA V382/2, 1992] unterscheiden sich somit in der Wahl der Randbedingungen (z. B. Temperaturamplitude), die Berechnung erfolgt prinzipiell nach dem selben mathematischen Verfahren.

Vergleicht man die Gruppierungen der Bauweise nach den unterschiedlichen Normen, so lassen sich die größten Abweichungen zwischen SIA V382/2:1992 und VDI 2078:1996 bei der Untergrenze für die „schwere Bauweise“ feststellen. Dies lässt sich zum Teil durch die voneinander abweichenden Berechnungsverfahren erklären. Für eine grobe Bestimmung sind die Werte gemäß SIA V382/2:1992 ausreichend.

### **Rückschlüsse für die Sanierung - Optimierung der Wärmespeicherung**

Bodenbeläge und zusätzliche Deckenverkleidungen verringern die Fähigkeit der Bauteile Wärme einzuspeichern, bzw. stellen einen zusätzlichen thermischen Widerstand dar, der nur durch eine Erhöhung der Raumtemperatur überwunden werden kann (siehe Kap. 5.2.1). Hält man an einer maximalen täglichen Temperaturerhöhung fest, so müssen die dem Raum zugeführten Wärmelasten reduziert werden, bei gleich bleibenden Lasten ist ein höherer täglicher Temperaturanstieg in Kauf zu nehmen.

Auch für die Trennwände ist eine massive Ausführung vorteilhaft. Der horizontale Wärmestrom ist zwar etwas kleiner als der horizontale (siehe 5.2.1), demgegenüber steht die im Vergleich zur Decke größere Fläche, die als Austauschfläche verfügbar ist (zwei oder drei Wandflächen pro Raum). Sind Teile dieser Fläche durch Möbel von der Raumluft abgekoppelt, so verringert sich die Wärmeaustauschfläche.

Dem Freilegen von Speichermassen können bei Sanierungen ästhetische (sichtbare Unterzüge oder Leitungen) oder baukonstruktive Erwägungen (ungenügende Überdeckung der Bewehrung) entgegenstehen (siehe Kap. 2). In diesem Fall ist eine Verbesserung der – unzureichenden - Speichermassen eines Raumes durch eine Nachrüstung mit PCM (Phase Change Material) möglich (Schossig, P. in [Voss et al., 2006a]).

PCM speichern Wärme isotherm allein durch Wärmeaufnahme über den Phasenwechsel tagsüber und geben sie nachts, wenn sich der Raum abkühlt, wieder ab. In den vergangenen Jahren scheiterte der Einsatz am Bau immer an der kostengünstigen und langlebigen Einbringung des Materials in den

Baukörper. Vielversprechende Systeme am Markt sind derzeit mikro- und makroverkapselte Phasenwechselmaterialien (Tab. 5.8). Erstere sind winzige Kapseln des Speichermaterials Paraffin, die in Putz oder Bauplatten integriert sind. Dabei gewährt die Mikroverkapselung eine große Oberfläche zwischen Material und Speicher und damit eine gute Wärmeübertragung. Ein weiterer Vorteil ist der, dass das Material wie üblich eingesetzt und verarbeitet werden kann (Gipskartonplatte, maschinell aufbringbarer Putz). Der „PCM-Putz“ erreicht die Baustoffklasse B1 (schwer entflammbar). Trockenbauplatten mit mikroverkapseltem PCM werden in die Baustoffklasse B2 (normal entflammbar) eingestuft. Sie sind damit für den Innenausbau eines Büros verwendbar. Ist die Baustoffklasse B1 vorgeschrieben, so kann diese durch eine Beschichtung oder durch eine raumseitig aufgebraute zweite 12,5 mm starke Gipskartonplatte erreicht werden. Letzteres ist dann vorteilhaft, wenn ohnehin eine doppelte Beplankung erforderlich ist.

Makroverkapselte Salze können als Beutel oder Kassetten in abgehängte Decken eingelegt werden. Die latente Wärmespeicherkapazität ist größer als bei den mikroverkapselten Paraffinen, dafür kann der Aufwand für die Integration am Bau steigen. Die makroverkapselten Salze sind in der Regel nicht brennbar. Weiter existieren Systeme am Markt, die eine erhöhte Wärmeeinspeicherung durch PCM-Materialien mit einer gezielten Wärmeabführung über eine aktive Kühlung z. B. in Kühlsegeln kombinieren.

**Tab. 5.8:** Exemplarische Produktformen von PCM und ihre Eigenschaften. Datenquelle: Herstellerangaben

Produktform / Standarddicke	Material	Lat. Wärmespeicherkapazität bei Schalttemperatur	Spez. Wärmekapazität	Rohdichte	Schalttemperatur	Hersteller
		(kJ/kg)	(kJ/kgK)	(kg/m <sup>3</sup> )	(°C)	
Bauplatte 15 mm	Mikroverkapseltes Paraffin	31	ca. 1,2	700	23-26	BASF
Innenputz 15 mm	Mikroverkapseltes Paraffin	20,2	k.A.	877	23-26	BASF / Maxit
Stahlkassette 10 mm	Salzhydrat	165	2,5	1380	22 / 25	Rubitherm
Aluminiumverbundbeutel	Salzhydrat	158	2,7 (fest) 2,2 (flüssig)	1500-1600	22-28	Dörken AG

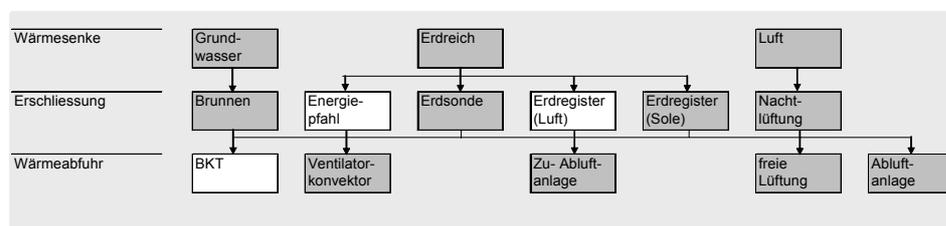
**Infobox: 5.3: Messung der Wärmespeicherfähigkeit einer Hohlkörperdecke und einer Deckenverkleidung aus Gipsbauplatten mit mikroverkapseltem Paraffin im Gebäude 2**

Es gibt im Gebäude zwei unterschiedliche Deckentypen: im Erdgeschoss eine Hohlkörperdecke aus Bimsziegeln (Bestand) und im Obergeschoss eine Deckenverkleidung aus Gipsbauplatten mit einer Beimischung aus mikroverkapseltem Paraffin. Messungen an beiden Deckentypen unter sommerlichen Bedingungen zeigen, dass die tatsächlich eingespeicherte Wärmemenge hinter der theoretisch Möglichen zurückbleibt. Der Grund dafür ist der, dass sich die Decke vom fensternahen Bereich zum Flur hin abnehmend unterschiedlich stark erwärmt. Würde sich die Decke gleichmäßig erwärmen (ca. 1,5 K), so könnte die Hohlkörperdecke in der Erwärmungsphase 1400 Wh, die PCM-Platte 418 Wh speichern. Tatsächlich nimmt die Hohlkörperdecke im Mittel 68 %, die PCM-Platte 87 % der theoretisch erreichbaren Wärmemenge auf. Da bei thermischen Simulationen in der Regel von einer isothermen Temperaturverteilung im Raum ausgegangen wird, ist anzunehmen, dass die Speicherfähigkeit in Simulationen leicht überbewertet wird.

Wie zu erwarten, kann das Wärmespeichervermögen einer Massivdecke durch PCM-haltige Bauteiloberflächen nicht erreicht werden, das einer GK-Platte wird jedoch übertroffen (PCM-/ GK- Platte: 23,4 / 17 Wh/m<sup>2</sup>). Der Einsatz von PCM ist also dann zu prüfen, wenn eine Leichtbaukonstruktion oder eine Verkleidung notwendig sind. Information zu den Messungen: das methodische Vorgehen bei den Messungen ist in [Doose, 2005] beschrieben, es wird der Zeitraum vom 16.06. – 30.06.2005 mit ab dem 20.06. maximalen Außentemperaturen über 30 °C betrachtet. Informationen zum Gebäude und den eingesetzten Sensoren finden sich im Anhang unter A2.1-2.

## 5.5 Wärmesenken erschließen - Wärmeabfuhr

Als mögliche Wärmesenken für die Wärmeabfuhr stehen das Grundwasser, das Erdreich und die Luft zur Verfügung. Diese müssen erschlossen werden. Im Rahmen einer Gebäudesanierung kann das System dann genutzt werden, wenn es sich auch nachträglich installieren lässt. Damit scheidet Erschließungen im Zusammenhang mit der Gebäudegründung (Pfähle) in der Regel aus. Auch bei der Wärmeabfuhr gibt es Techniken, die nicht nachträglich installiert werden können (Betonkern-Temperierung - BKT) oder sich als alleinige Wärmeabfuhr nicht eignen. Abb. 5.27 gibt einen Überblick über die verfügbaren Systeme und hebt – sich am Regelfall orientierend - die für eine Sanierung geeigneten grau hervor.



**Abb. 5.27:** Wärmesenken, Erschließungssysteme und Wärmeabfuhr bewertet für den Einsatz in der Sanierung. Die Wertung versteht sich als Betrachtung des Regelfalls. Verwendete Abkürzungen: BKT = Betonkern-Temperierung

Anmerkung: Die freie Lüftung als alleinige Wärmeabfuhr ist nicht ausreichend, da sie nicht zuverlässig ist. Auch eine Zu- und Abluftanlage genügt als alleiniges System nicht, da hier unter Berücksichtigung eines geringen Hilfsenergieverbrauchs, nur ein Luftwechsel von 2,0 1/h erreicht werden kann. Mit einer zusätzlichen Temperierung über ein Sole-Erdregister sind die Bedingungen besser.

### 5.5.1 Grundwasser und Erdreich

Steht Grundwasser als Kältesenke zur Verfügung, so ist zwischen stehendem und fließendem Grundwasser zu differenzieren. Stehendes Grundwasser muss wie ein Speicher be- und entladen werden, bei Fließgeschwindigkeiten  $> 0,5$  m pro Tag ist die „eigenständige“ Regeneration des Erdreichs gewährleistet [Zimmermann, 2003]. Der Erschließung stehen oftmals behördliche Einschränkungen gegenüber.

Bei der Nutzung von Erdreich als Wärmequelle sind die Erdreichtemperatur (abhängig von Standort und Tiefe) und die Wärmeleitfähigkeit des Bodens bestimmend. Wird das Erdreich als Wärmesenke genutzt, so gilt auch hier wieder das Speicherprinzip: Die im Sommer zugeführte Wärme muss im Winter auch wieder entnommen werden, da sich sonst das Erdreich graduell erwärmt.

#### *Erdsonden, Energiepfähle und Brunnen*

Erdsonden sind zwischen 70 und 150 m tiefe Bohrungen mit geschlossenen Kunststoffrohrsystemen, in denen ein Wasser-Sole-Gemisch (bei Frostgefahr Wasser-Glykol) zirkuliert. Dieses entzieht dem umgebenden Gestein Wärme, bzw. führt ihm welche zu. Bei der Bohrung werden zwei oder drei Kunststoffrohre (25-40 mm) in das Bohrloch eingebracht und dieses anschließend mit einem Wasser-Bentonit-Zementgemisch ausgefüllt. Steht die Kühlanwendung einer Erdsondenanlage im Vordergrund, so sind wegen der Temperaturzunahme in großer Tiefe (zwischen 2,5 und 4 K pro 100 m Tiefe) Längen zwischen 50 und 100 m günstig [Zimmermann, 2003]. Zur Sicherung des thermischen Gleichgewichts kann die Wärmeentnahme beispielsweise über eine Wärmepumpe realisiert werden. Dabei sollte dem System im Winter 10 bis 20 % (einige Quellen geben sogar 50 % an [Hollmüller et al., 2005]) mehr

Wärme entzogen werden, als im Sommer zugeführt wird [Zimmermann, 2003]. Ob – abhängig von der Bodenart – eine Erdsondenbohrung sinnvoll ist, ist über ein geologisches Gutachten zu prüfen. Für einzelne Gegenden z. B. Nordrhein-Westfalen, gibt es landesweite Gutachten ([www.gd.nrw.de](http://www.gd.nrw.de)). Mit Sonden ist eine durchschnittliche Kühlleistung zwischen 20 und 30 W/m Sonde erreichbar, an Wärme oder Kälte können jeweils zwischen 60 und 80 kWh/(m<sup>2</sup>a) eingespeichert werden [Zimmermann, 2003], konservativere Schätzungen gehen von 10-30 W/m, bzw. 20-40 kWh/m<sup>2</sup>a aus [Hollmüller et al., 2005]).

Energiepfähle, als in 20-30 m tiefen Gründungspfähle integrierte „Sonden“, bieten sich hauptsächlich bei Neubauten an, da bei Sanierungen in der Regel keine zusätzlichen Gründungsarbeiten mehr notwendig sind.

Der Vorteil von Brunnen, die oberflächennahes fließendes Grundwasser als Wärmesenke erschließen, ist, dass nicht auf ein Gleichgewicht zwischen Wärmeübergabe (Sommer) und Wärmeentzug (Winter) geachtet werden muss. Allerdings muss die Erschließung von Grundwasser immer genehmigt werden.

Bei allen Systemen kann die Wärmeabfuhr aus dem Raum über Ventilatorkonvektoren realisiert werden. Der Einsatz von Betonkerntemperierung ist an den Neubau von Raumdecken gebunden. Denkbar sind hingegen Kapillarrohrmatten auf der Deckenunterseite und Kühldecken. Dabei ist der Zielkonflikt zwischen der Notwendigkeit von freiliegenden Speichermassen und einer erhöhten Wärmeabfuhr zu berücksichtigen.

Bei der Energiebilanzierung wird bei den geschilderten Systemen der Hilfsenergieverbrauch für die Pumpen und die Kälteverteilung (Konvektoren) berücksichtigt. Beim Fallbeispiel Gebäude 1 mit Grundwasser als Wärmesenke (Erschließung über Brunnen) und einer Wärmeabfuhr über Ventilatorkonvektoren lag der berechnete Hilfsenergieverbrauch für die sommerliche Kühlung bei 1,65 kWh/m<sup>2</sup>a.

### *Erdregister*

Die Wirksamkeit eines Erdregisters zur sommerlichen Zuluftkühlung wird über die erreichbare Temperaturabsenkung und die möglichen Betriebszeiten des Erdregisters beschrieben. Bei einer durchgängigen Temperierung über das Erdregister sind eine große Rohroberfläche und damit ein hoher Flächenbedarf notwendig.

Da größere Erdarbeiten bei Sanierungen in der Regel nicht anfallen, kann ein Erdregister nur in Ausnahmefällen günstig erschlossen werden. Mögliche Kühlleistungen eines Erdregisters können bei 30 bis 50 Wh/(m<sup>2</sup>d) liegen, bei einem Luftwechsel von 2,0 1/h [Zimmermann, 2003]. Nachts sollte, um eine Regeneration des Erdreichs zu ermöglichen, mit Außenluft gelüftet werden.

Weniger Fläche benötigt ein mit Sole durchströmtes Rohrregister. Dabei wird die Zuluft über einen Sole-Luft-Wärmeübertrager leicht temperiert. Dennoch steigt auch hier mit zunehmender Fläche und Tiefe der Rohrverlegung (siehe Gebäude T, Kap. 9.3.1) die mögliche Betriebszeit des Registers, die durch die Erschöpfung der Wärmesenke begrenzt wird. Als alleiniges Kühlsystem sind weder Erdregister noch das mit Sole durchströmte Rohrregister geeignet. Beide Registerarten erfordern eine Zu- und Abluftanlage.

**Infobox: 5.4: Messung der Leistung des Sole-Luft-Wärmeübertragers (SEWT) im Gebäude 2**

Während der Messperiode im Juni erreichte der SEWT eine mittlere Kühlleistung von 1,5 kW. Unter Einbeziehung der Hilfsenergien (Druckabfall über SEWT: 12 Pa, Kompensation Ventilator: 30 W, Pumpe: 60 W) ergibt sich für das Gesamtsystem im Mittel ein COP von 18,4 [Eicker et al., 2005b].

Bei einer falschen Regelung der Anlage kann es während längerer Hitzeperioden (so auch in der Messperiode) zu einem Ausbleiben des Kühleffekts, in Ausnahmefällen zu einer Vorwärmung der Zuluft kommen [Eicker et al., 2005a]. Die Einregulierungsschwierigkeiten sind mittlerweile behoben. Informationen zu den Messungen siehe Infobox 5.3

## 5.5.2 Außenluft

### *Nachtlüftung*

Wie viel Wärme abgeführt werden kann, ist von der Temperaturdifferenz zwischen innen und außen (siehe Kap. 5.1), dem Luftwechsel und der Dauer der Lüftung abhängig (Abb. 5.28).

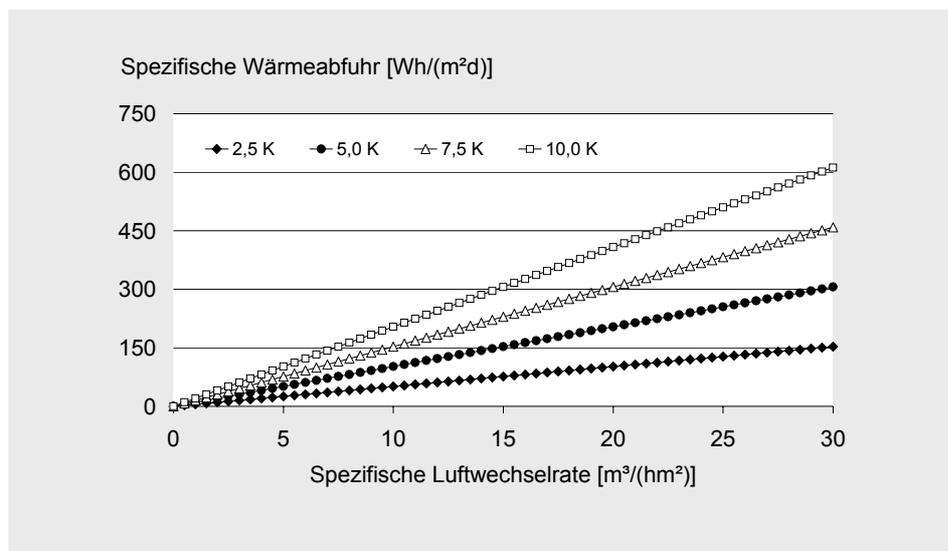
- Freie Lüftung  
Der Luftstrom in ein Gebäude wird u. a. durch die Druckverteilung um das Gebäude, besonders aber durch diejenige an den Lüftungsöffnungen geprägt. Die Druckverteilung ist die antreibende Kraft für die Lüftung, während der Strömungswiderstand u. a. durch die Beschaffenheit der Öffnung bestimmt wird. Der Druck auf die Gebäudehülle setzt sich aus Staudruck und dem aus der Temperaturdifferenz resultierenden Luftdruckunterschied zusammen. Der Winddruck hängt von der Gebäudeorientierung im Verhältnis zur vorherrschenden Windrichtung, der Gebäudegeometrie und der umgebenden und angrenzenden Bebauung ab. Thermik als Antrieb für die freie Lüftung kann nur bei sehr speziellen Projekteigenschaften (z. B. vorhandenes Atrium) eingesetzt werden. Eine wichtige Voraussetzung für die freie Lüftung sind große Luftöffnungen, da der Volumenstrom bei einem kleineren Widerstand größer ist. Dem gegenüber stehen Einbruchschutz, Sicherheitsauflagen und Schlagregenschutz (siehe auch „Abluftanlage“). Freie Lüftung kann sehr effizient sein, sie ist aber nie zuverlässig. Daher ist sie als alleiniges Instrument zur Wärmeabfuhr (und als Hygienelüftung) kritisch zu hinterfragen. Als Ergänzung ist daher ein hybrides System sinnvoll, bei dem ein Abluftventilator als „Back-Up-System“ zur Verfügung steht.
- Ventilatorgestützte Abluftanlage  
Bei allen Systemkonfigurationen (zentraler Abluftventilator, Unterteilung in Geschosse) wird der Luftwechsel über einen Ventilator sichergestellt. Ein Nachströmen der Zuluft kann über einbruchssichere Klappen (siehe dazu Kap. 5.2.1) oder Lüftungselemente in der Fassade, die beide über die Gebäudeleittechnik geöffnet werden, realisiert werden. Gekippte Fenster sind aus Gründen der Sicherheit (Einbruchgefahr) und des Witterungsschutzes (Schlagregen) meist nicht möglich. Bei sorgfältiger Planung kann ein Luftwechsel von 3,0 1/h erreicht werden. Die für den Antrieb spezifische elektrische Leistung sollte unter  $0,15 \text{ W}/(\text{m}^3\text{h}^{-1})$  liegen. Für die Rohrführung sind - ohne Kreuzungspunkte - 0,3 m unter der Decke zu veranschlagen. Nachteilig an dem System ist, dass keine Wärmerückgewinnung eingesetzt werden kann.

- Zu- und Abluftanlage  
Bei Hochhäusern (> Winddruck und -sog auf die Fassade), bei Einsatz einer Wärmerückgewinnung (WRG) oder einer Zuluftkühlung ist eine Belüftung des Gebäudes mit einer Zu- und Abluftanlage notwendig. Aufgrund der höheren Strömungswiderstände sind mit vertretbarem Energieaufwand maximale Luftwechsel von 2,0 1/h zu erreichen. Ein weiterer Nachteil ist, dass sich die – zentral angesaugte – Außenluft über die Verteilung im Gebäude bereits etwas erwärmt, die maximal erreichbare Temperaturdifferenz also gemindert wird. Eine alleinige Abfuhr der Wärmelasten über die Lüftung ist daher nur bei extrem geringen Wärmelasten möglich. Als Planungsgröße sollte der Antrieb mit WRG eine spezifische elektrische Leistung von  $\leq 0,4 \text{ W}/(\text{m}^3\text{h}^{-1})$  unterschreiten. Unter der vorhandene Decke sind für die Rohrführung mindestens 0,5 m vorzusehen.

#### Nachtlüftung in der Praxis - Fallbeispiele

In allen vier Fallbeispielen wird die Nachtlüftung zur Wärmeabfuhr eingesetzt. Wegen der geringeren Strömungswiderstände wird bei Gebäude 1, 3 und 4 dazu eine Abluftanlage verwendet. Nur bei Gebäude 2 ist eine Zu- und Abluftanlage (Messergebnisse, siehe Infobox 5.4) eingebaut. Willkommener Synergieeffekt ist bei allen Gebäuden die Verwendung der Lüftungssysteme tagsüber als Hygienelüftung.

- Im Gebäude 1 (Hochhaus) wird die Abluftanlage tagsüber zur hygienischen Grundlüftung verwendet, nachts wird ein Luftwechsel von 1,0 1/h erzeugt. Der Realisierung einer Nachtlüftung (zusätzlich zur Kühlung über die Ventilator-konvektoren) mit einem Luftwechsel von 3,0 1/h standen nach Aussagen der Planer hohe Umsetzungskosten gegenüber. Die Kostenersparnis des einfachen Luftwechsels gegenüber einem Luftwechsel von 3,0 1/h beträgt rund 30 %.
- Gebäude 2: Über die Zu- und Abluftanlage lässt sich – unter Berücksichtigung eines geringen Hilfsenergieverbrauchs - ein Luftwechsel von 2,0 1/h erreichen (spez. Leistungsaufnahme Zu- und Abluftventilator 0,5 Wh/m<sup>3</sup>). Weitere Erfahrungen, siehe Infobox 5.3.
- Beim Gebäude 3 ist durch die Abluftanlage ein nächtlicher Luftwechsel von 2,0 1/h, beim Gebäude 4 ist (in den Bereichen mit reiner Abluftanlage) ein Luftwechsel von 3,0 1/h geplant.



**Abb. 5.28:** Maximal mögliche Wärmeabfuhr über die Außenluft als Funktion der spezifischen Luftwechselrate pro  $m^2$  NGF und der Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenluft. Die Rechnung basiert auf einem sechsständigen konstanten Luftwechsel. Beispiel: Bei einem Raumvolumen von  $45 m^3$  ( $15 m^2_{NGF}$ , 3 m Höhe) und einem Luftwechsel von  $4,0 1/h$  ergibt sich ein spezifischer Luftwechsel von  $12 m^3/(m^2h)$ . Wird 6 Stunden bei einer Temperaturdifferenz von 5 K gelüftet, so können  $120 Wh/m^2$  abgeführt werden. Quelle: [Voss, 2006]

#### Infobox: 5.5: Messung der Raumlufttemperaturen mit Nachtlüftung im Gebäude 2

Ist die Lüftungsanlage am Wochenende und somit auch nachts außer Betrieb, erwärmen sich die Räume stark und es sind etwa zwei Tage zur Regeneration des Gebäudes notwendig. In dieser Zeit können Raumlufttemperaturen von über  $27^\circ C$  auftreten (bei maximalen Außentemperaturen zwischen  $30$  und  $35^\circ C$ ) [Doose, 2005]. Ab 2007 wird die Lüftungsanlage mit einem neuen Regelungskonzept auch am Wochenende betrieben werden.

Während der Messperiode lag die Senkung der Nachttemperatur bei 3 K und die Kühllasten des Tages konnten nicht gänzlich abgelüftet werden. Pro Nacht können im Mittel  $85 Wh/m^2$  (Maximalwert:  $147 Wh/m^2$ ) abgeführt werden, die mittlere Kühllast liegt bei  $7,4 kW$  (Maximalwert:  $14 kW$ ). Der COP für die mechanische Nachtkühlung lag während der Messperiode zwischen 4 und max. 6 [Eicker et al., 2005b].

Insgesamt bestätigen die Messergebnisse die Annahme, dass während einer heißen Periode ein nächtlicher Luftwechsel von  $2 1/h$  für die völlige Entladung der inneren Oberflächen zu gering ist. Diese kann nur mit Luftwechselraten zwischen 3 und  $4 1/h$  und einem hohen Wärmeübergangskoeffizienten erreicht werden. Die Anlage ist dafür (um einen hohen Hilfsenergieverbrauch zu vermeiden) nicht ausgelegt.

Anmerkung: Wegen des Ensembleschutzes konnte kein außen liegender Sonnenschutz eingesetzt werden. In Verbindung mit einem verbesserten Regelungskonzept für die Anlage könnten auch mit einem Luftwechsel von  $2 1/h$  bessere Ergebnisse erzielt werden.

#### Adiabatische Kühlung

Die direkte Befeuchtungskühlung ist im mitteleuropäischen Klima wegen des Anstiegs der relativen Luftfeuchte nicht zu empfehlen. Eine adiabatische Kühlung der Abluft ist über verschiedenen Verfahren möglich. Die dabei durch die Befeuchtung gewonnene Kälteenergie überträgt ein Kälteübertrager auf den Zuluftstrom. Die Größe des Kühlpotentials hängt dabei von der absoluten Feuchte der Abluft ab. Das System setzt eine Zu- und Abluftanlage voraus mit der damit einhergehenden Verringerung des nächtlichen Kühlpotentials. Wegen des hohen Hilfsenergieaufwands (besonders bei Einsatz eines Luftwäschers) kann der Einsatz eines anderen aktiven Kühlsystems u.U. günstiger sein [Zimmermann, 2003]. Als überschlägiger Planungswert ist bei internen Lasten  $\leq 150 Wh/(m^2d)$  der thermische Komfort mittels adiabatischer Kühlung sichergestellt [Zimmermann, 2003].

## 5.6 Kostenvergleich von Systemen zur Nachtlüftung und zur aktiven Kühlung

### 5.6.1 Methodik

Eine Betrachtung der Fallbeispiele zeigt, dass bei allen Projekten die Außenluft als Wärmesenke genutzt wird. Gründe dafür sind die leichte Zugänglichkeit und die Tatsache, dass in allen Gebäuden ohnehin eine ventilatorgestützte Lüftung eingesetzt wird. Im Sinne des Themenschwerpunktes der Arbeit konzentriert sich die Kostenbetrachtung daher auf Systeme, welche die Außenluft über freie oder ventilatorgestützte Nachtlüftung erschließen. Als Referenzvarianten werden zwei aktiv kühlende Systeme mit jeweils einer Zu- und Abluftanlage und Kälteerzeugung über eine Kompressionskältemaschine untersucht. Die Kälteverteilung erfolgt in einem Fall über Ventilatorkonvektoren, im anderen Fall über Deckenkühlelemente. Alle betrachteten Systeme werden in Tab. 5.10 beschrieben.

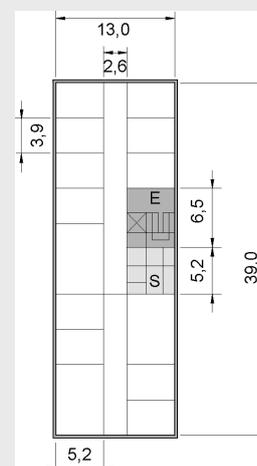
Im ersten Schritt wird zunächst die Höhe der Investitionskosten für die Lüftungs- und Kühlsysteme (Tab. 5.11) anhand eines Typengebäudes (siehe Infobox 5.6) definiert, das sich – abgeleitet aus den Erkenntnissen der Gebäudetypologie (Kap. 6) - für eine Sanierung mit Maßnahmen der passiven Kühlung eignet. Die Kostenabschätzung berücksichtigt nur die Maßnahmen, wie sie bei einem Neubau erfolgen würden. Ein Versuch, die Kosten für Sanierungsmaßnahmen anzugeben, wäre unrealistisch, da in der Schätzung von einem Typengebäude ausgegangen wurde, also die Beschaffenheit und der Zustand der Bausubstanz nicht bekannt sind. Weitere Kosten, die nicht berücksichtigt sind, sind die Kosten für den Abbruch vorhandener Bauteile (z. B. abgehängte Decken) und die Planungskosten. Letztere ergeben sich anteilig aus den Investitionen.

#### Infobox 5.6: Typengebäude für Kostenermittlung

Das Typengebäude gehört in die Baualtersklasse zwischen den 60er und den 80er Jahren und wird als Bürogebäude genutzt. Die Hauptbauteile des Gebäudes sind bis auf einige Innenwände oder Teile der Außenfassade massiv und der Verglasungsanteil liegt bei 40 % der Außenwandfläche. Die Aufteilung des Grundrisses zeigt Abb. 5.29. Danach gibt es einen Erschließungs- und einen Sanitärkern. Die kleinste mögliche Bürobreite (Achismaß 1,3 m) liegt bei 2,6 m. Die lichte Raumhöhe von 3,0 m orientiert sich an der Minimalhöhe für die Rohrführung einer Zu- und Abluftanlage im Flur. Da die Fläche der einzelnen Geschosse mehr als 400 m<sup>2</sup> beträgt, muss in der Mitte des Flures eine Brandschutztür (T90) vorhanden sein. Ein zweiter Fluchtweg ist als eine außen liegende Treppe vorgesehen.

**Abb. 5.29, Tab. 5.9:** Grundriss (rechts) und Eigenschaften des Typengebäudes. Verwendete Abkürzungen: S = Sanitär, E = Erschließung

		Kennwerte
Abmessungen	(m)	13,0 x 39 (Achismaß)
Geschoßfläche	(m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> )	507
Bauweise	(kg/m <sup>2</sup> )	Mittelschwer (300 – 400) bis schwer (> 400)
Fassadenfläche	(m <sup>2</sup> )	1872
Fensterflächenanteil	(%)	40 (Bezug: Außenwandfläche)
Fensterfläche (30 % Rahmenanteil)	(m <sup>2</sup> )	749
Glasfläche	(m <sup>2</sup> )	524
Bauraster	(m)	1,3
lichte Raumhöhe	(m)	> 3,0
Stockwerke		6



In einem zweiten Schritt wurde der elektrische Energiebedarf der Systeme berechnet, der dann Grundlage für die abschließende Betrachtung der Gesamtkosten über eine Nutzungszeit von 20 Jahren war.

Bei allen Daten wird hier auf die Ergebnisse eines an der Universität Wuppertal erstellten Berichts zurückgegriffen [Hoffmann et al., 2005a], dieser findet sich im Anhang (Info A5.6-1).

### 5.6.2 Ermittlung und Vergleich der Investitionskosten

#### Technische Beschreibung der Strategien und Systeme

Alle vier untersuchten Systeme zeigt Tab. 5.10 in der Übersicht. Eine ausführliche Darstellung mit weiteren Schemazeichnungen findet sich im Anhang. Die Grundannahmen für die Dimensionierung der Systeme führt Tab. 5.11 auf.

**Tab. 5.10:** Untersuchte Systeme  
 Legende für alle Grafiken:  
 Zuluft = weiß, Abluft = grau,  
 Kühlfunktion = Verlauf grau zu weiß

#	Bezeichnung	Kurzbeschreibung
passive Kühlung	1 „freie Lüftung“	<i>Lüftung Büros:</i> Querlüftung über elektrisch ansteuerbare Zuluftelemente (jede 2. Achse) in der Fassade. Überströmung Flur über Türen oder Oberlichter. <i>Lüftung Sanitärräume:</i> Separate Abluftanlage
	2 „Abluftanlage“	<i>Lüftung Büros:</i> Abluftanlage und manuell bedienbare Zuluftelemente (jede 2. Achse) in der Fassade. Absaugung Abluft über Schacht mit Dachventilator. Kanalführung im Flur und WC (Abhängung Decke 30 / 70 cm). Die Anlage wird auch zur Nachtlüftung verwendet. <i>Ausführung und Ausstattung:</i> Jeder Abluftabgang ist mit einer Irisblende, Telephonieschalldämpfer und einer einfachen Abluftöffnung mit Abdeckung versehen. In der Mitte des Geschosses befindet sich eine F90-Trennung. Jedes Geschoss kann über einen Volumenstromregler für die Abluft separat geregelt oder abgeschaltet werden. Der Ventilator wird über eine Konstantdruckregelung betrieben. Ausführung: vertikaler Schacht F90, pro Geschoß gibt es eine Brandschutzklappe für die Abluft. <i>Lüftung Sanitärräume:</i> Separate Abluftanlage
aktive Kühlung	3 Zu-/Abluftanlage mit Luftkühlung „Konvektoren“	<i>Be- und Entlüftung Büros:</i> Zu-/Abluftanlage (eine grundsätzlich sinnvolle Wärmerückgewinnung ist in den Kostenberechnungen nicht enthalten). Zu- und Abluftauslässe abwechselnd in jeder Achse positioniert. Kanalführung erfolgt im Flur und WC (Abhängung Decke 50 / 70 cm). <i>Ausführung und Ausstattung:</i> wie # 2 nur jeweils für Zu- und Abluft. <i>Kühlung Büros:</i> über Ventilator-konvektoren (jede 2. Achse) im Umluftbetrieb. Dazu Verlegung von Steig-, Verteil- und Kondensatleitungen im Brüstungskanal und 3-4 vertikalen Schächte im Fassadenbereich. Jeder Ventilator-konvektor ist über ein Raumbedienungsgerät ansteuerbar, Umstellung zwischen Heizen und Kühlen erfolgt saisonal. <i>Kälteerzeugung:</i> Kompressionskältemaschine mit Rückkühlwerk. <i>Lüftung Sanitärräume:</i> Separater Abluftstrang
	4 Zu-/Abluftanlage mit Deckenkühlung „Kühldecke“	<i>Be- und Entlüftung Büros:</i> Zu-/Abluftanlage, siehe # 3 <i>Ausführung und Ausstattung:</i> Siehe # 3. <i>Kühlung Büros:</i> Über Deckenkühlelemente in jeder Achse. Einbau von Feuchteühlern (Vorlauf-temperaturregelung und Vermeidung Kondensation). Je zwei Achsen sind über ein Raumbedienungsgerät ansteuerbar, Umstellung zwischen Heizen und Kühlen erfolgt saisonal. <i>Kälteerzeugung:</i> Siehe # 3 <i>Lüftung Sanitärräume:</i> Separater Abluftstrang

Bei den Systemen zur Nachlüftung werden nur solche betrachtet, die ohne freie Lüftung über die Geschossgrenzen auskommen. Dies begründet sich folgendermaßen:

- brandschutztechnische Bestimmungen, die freie Lüftung innerhalb von Nutzungseinheiten > 400 m<sup>2</sup> verkomplizieren (siehe Kap. 6.2.1).
- die hier vorgestellten Lösungen sollen eine hohe Übertragbarkeit auf andere Projekte haben und nicht von individuellen Grundrisslösungen abhängig sein. Dies wäre bei einem Lüftungskonzept über mehrer Geschosse der Fall.

		Kennwerte		System #
Lüftung Büros	Personen pro Geschoss		34	2,3,4
	Spez. Volumenstrom pro Person (ASR 5)	(m <sup>3</sup> /h)	40	2,3,4
	Luftwechsel Taglüftung / Nachlüftung	(1/h)	1,3 / 2,0	2,3,4
	Volumenstrom pro Geschoss Taglüftung / Nachlüftung	(m <sup>3</sup> /h)	1350 / 2050	2,3,4
	Anzahl Zuluftöffnungen (1,2) / Zu- und Abluftöffnungen (3,4) pro Geschoss	Stk.	24	1,2,3,4
Kühlung Büros	Spez. Kühlleistung	(W/m <sup>2</sup> )	35	3,4
	Kühlleistung Gesamtgebäude	(kW)	70	3,4
Lüftung Sanitärräume	Luftwechsel ASR 37/5	(1/h)	5	2,3,4
	Volumenstrom pro Geschoss Sanitärräume	(m <sup>3</sup> /h)	300	2,3,4

**Tab. 5.11:** Grundannahmen für die Auslegung der untersuchten Systeme. Die Nummer der letzten Spalte gibt das zugehörige System an: 1 = Freie Lüftung, 2 = Abluftanlage, 3 = Zu-/Abluftanlage mit Luftkühlung, 4 = Zu-/Abluftanlage mit Deckenkühlung

### Grundlagen der Kostenermittlung

Die Kosten wurden zum Großteil anhand von Ausschreibungsergebnissen ermittelt, die der „Solares Bauen GmbH, Freiburg“ vorlagen [Hoffmann et al., 2005a]. Zu einem kleineren Teil wurden Bruttolistenpreise von Herstellern verwendet. Die Genauigkeit der Kosten wird auf +/- 15 % geschätzt. Die größten Ungenauigkeiten bestehen beim Gewerk Mess- Steuerung und Regelungstechnik (MSR). Bei der Ermittlung wird davon ausgegangen, dass das Dach des Gebäudes neu hinzukommende Lasten aufnehmen kann. Die Aufwendungen für die Planung, Kabelzugarbeiten, große Deckendurchbrüche, Brüstungskanäle (bei „Ventilatorkonvektor“), sowie den Einbau der Zuluftelemente in der Fassade sind nicht berücksichtigt (genaue Aufstellung, siehe Info A5.6.1).

Alle nachfolgend genannten Kosten sind Nettokosten.

### Vergleich der Systeme

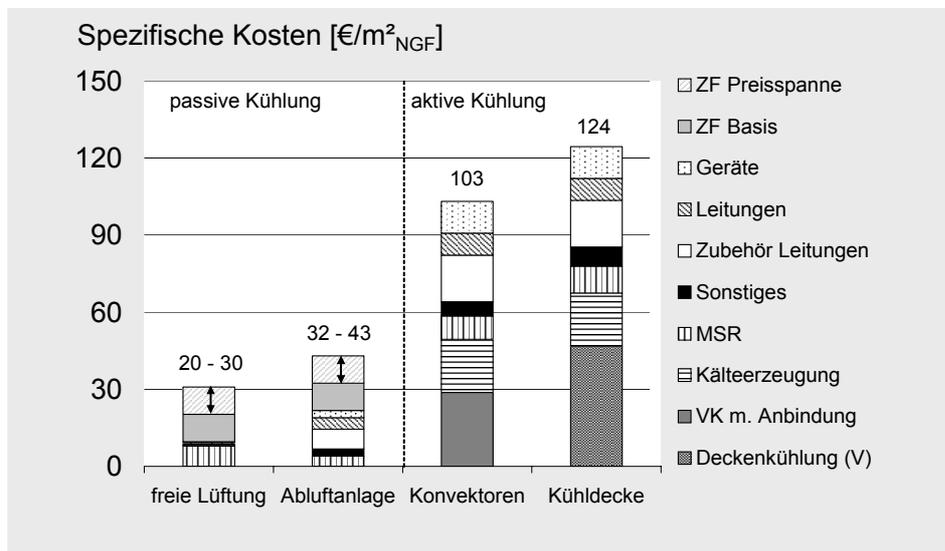
Die ermittelten Investitionskosten zeigen Abb. 5.30 und Tab. 5.12. Bei den passiven Systemen liegt bei der freien Lüftung und bei der Abluftanlage eine Unsicherheit in den Aufwendungen für die Zuluftelemente in der Fassade (siehe auch Infobox 5.6). Abhängig davon können beide passiven Systeme im ähnlichen Bereich liegen.

Am unteren Ende der Kostenspanne liegen einfache Zuluftelemente (z. B.: Eigenbau, evt. mit Verzicht auf Schallschutz). Lösungen, die wegen des Wärmeschutzes mit einer automatischen Verschlussklappe ausgestattet sind, liegen am oberen Ende der Spannweite.

Weitaus höher sind die Kosten für die aktiven Systeme, die sich hauptsächlich durch die höheren Beträge für die Ventilator-konvektoren und die Kühldecken unterscheiden.

**Tab. 5.12:** Vergleich Kosten. Die spezifischen Kosten beziehen sich auf eine NGF von 3.050 m<sup>2</sup>. Anmerkung: Bei der Variante mit Zu- und Abluftanlage mit Ventilator-konvektoren könnten sich die Investitionskosten bei einem Bestandsgebäude mit vorhandenen und geeigneten Heizkörpern auf 223.300 € (73 €/m<sup>2</sup>) verringern.

Baugruppe		freie Lüftung	Abluftanlage	Konvektoren	Deckenkühlung
Lüftungsgeräte	€	1.500	8.500	37.800	37.800
Lüftungsleitungen inkl. Dämmung	€	1.500	13.600	26.000	26.000
Zubehör Lüftungsleitungen	€	1.500	23.500	55.300	55.300
Zuluftelemente Fassade	€	32.400 - 64.800	32.400 - 64.800		
Ventilator-konvektoren mit Anbindeleitungen	€			87.900	
Deckenkühlung mit Anbindeleitungen	€				142.600
Kälteerzeugung	€			63.000	63.000
MSR	€	24.500	12.200	27.500	32.000
Kernbohrungen, Durchbrüche, Montage-stahl	€	400	8.500	16.900	22.700
Gesamtkosten	€	61.800 - 94.200	98.700 - 131.100	314.400	379.400
spez. Gesamtkosten	€/m <sup>2</sup>	20 - 31	32 - 43	103	124



**Abb. 5.30:** Spezifische Kosten für die unterschiedlichen Systeme. Besonderheiten: Freie Lüftung und Abluftanlage: die Kosten pro Zuluft-element können zwischen 200 und 400 € pro Stück variieren, die Kosten  $\geq 10,7 \text{ € / m}^2_{\text{NGF}}$  sind daher als „Preisspanne“ gesondert ausgewiesen. Abluftanlage: die Kosten für Überströmelemente im Flur sind nicht berücksichtigt, da von nachts geöffneten Bürotüren ausgegangen wird. Verwendete Abkürzungen: ZF = Zuluftelemente Fassade, VK = Ventilator-konvektor, V = Verteilung.

**Infobox 5.6: Zuluftelemente in der Praxis**

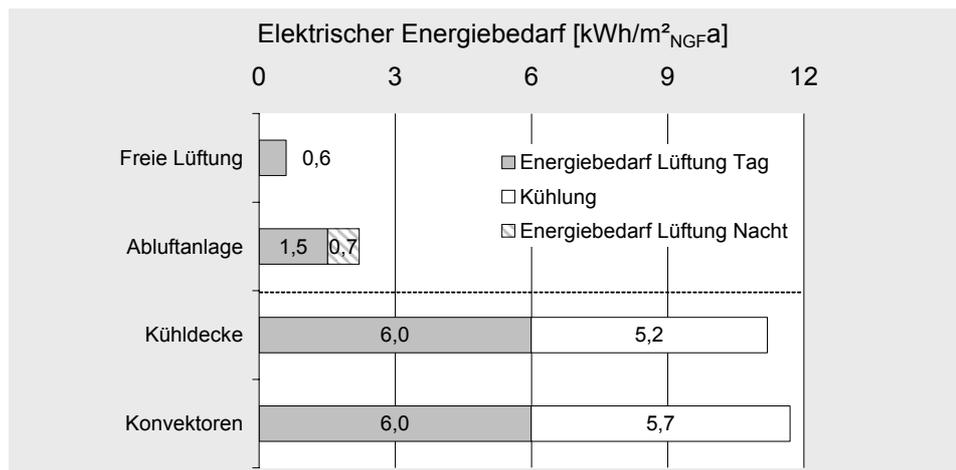
Während der Planungen für das Gebäude 3 wurde der Einfluss von geöffneten Zuluftelementen bei ausgeschalteter Lüftungsanlage und Winddruck auf die Fassade untersucht. Selbst bei geschlossenen Bürotüren ergaben Simulationsrechnungen eine Steigerung des Heizenergiebedarfs um ca. 7 % (Basis 33.2 kWh/m<sup>2</sup>a, Programm TRNSYS 15.0). Auf dieser Basis entschied man sich für zwei Lüftungselemente pro Raum, von denen eine motorisch betrieben wird und das andere manuell. Beim Gebäude 1 kommt eine einfache Ausführung zum Einsatz, deren Klappen manuell bedient werden (siehe Kap. 2.2).

### 5.6.3 Elektrischer Energiebedarf der Anlagen

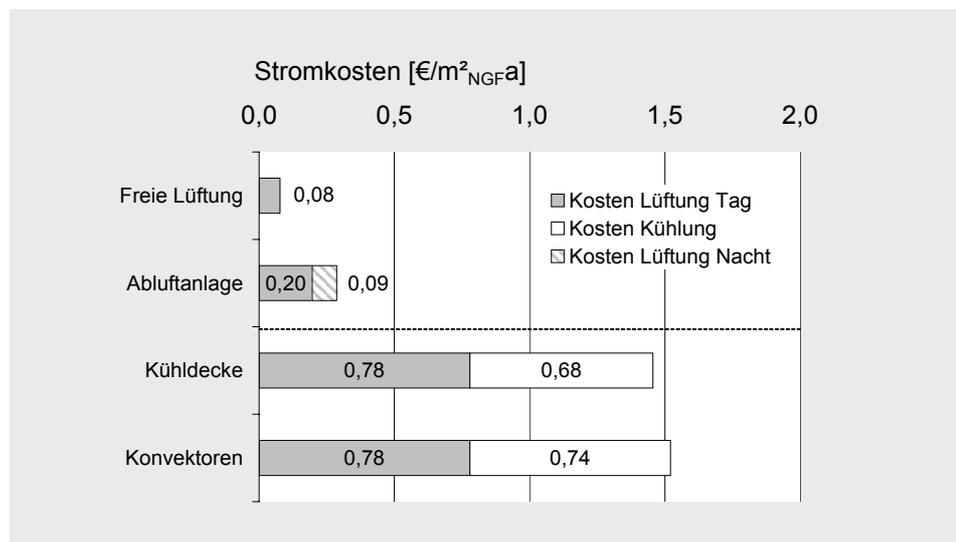
Für jedes Lüftungssystem wurde anhand der Motoraufnahmeleistung der Anlagenkomponenten und der angenommenen Betriebszeiten der Energiebedarf ermittelt. Der Energiebedarf für die Kühlung wurde mittels der Berechnungssystematik „Klimakälte“ bilanziert. Das Verfahren ist Bestandteil der „Methodik zur Erfassung, Beurteilung und Optimierung des Elektrizitätsbedarfs von Gebäuden (MEG)“ [Knissel, 2004] und ermöglicht eine vereinfachte Abschätzung des Strombedarfs für die Klimatisierung des gesamten Gebäudes. Die Annahmen und Berechnungsgrundlagen für jedes System finden sich im Anhang (Info A5.6-1).

Abb. 5.31 zeigt den Energiebedarf für die Systeme und die jeweiligen Stromkosten pro Jahr. Bezüglich des Energiebedarfs sind die passiven Systeme den aktiven Systemen deutlich überlegen. Die aktiven Systeme unterscheiden sich nur unwesentlich, bei den passiven Systemen hat die ventilatorgestützte Lüftung – zugunsten einer zuverlässigen Entlüftungsfunktion – einen höheren Bedarf als die freie Lüftung. Die jährlichen Stromkosten (Abb. 5.32) spiegeln die genannten Tendenzen wider.

**Abb. 5.31:** Elektrischer Energiebedarf für die Systeme. Der Endenergiebedarf für Lüftung und Kühlung ist separat aufgeführt.



**Abb. 5.32:** Jährliche Stromkosten für die Systeme. Als Stromkosten wurden 0,13 € pro kWh angenommen. Dies stellte die obere Grenze der in [Recknagel et al., 2001] angegebenen Spanne von 0,08 bis 0,13 € dar. Bei einer Betrachtung des Zeitraums von 20 Jahren ist mit einer Preissteigerung zu rechnen.



### 5.6.4 Kosten für eine Nutzungszeit von 20 Jahren

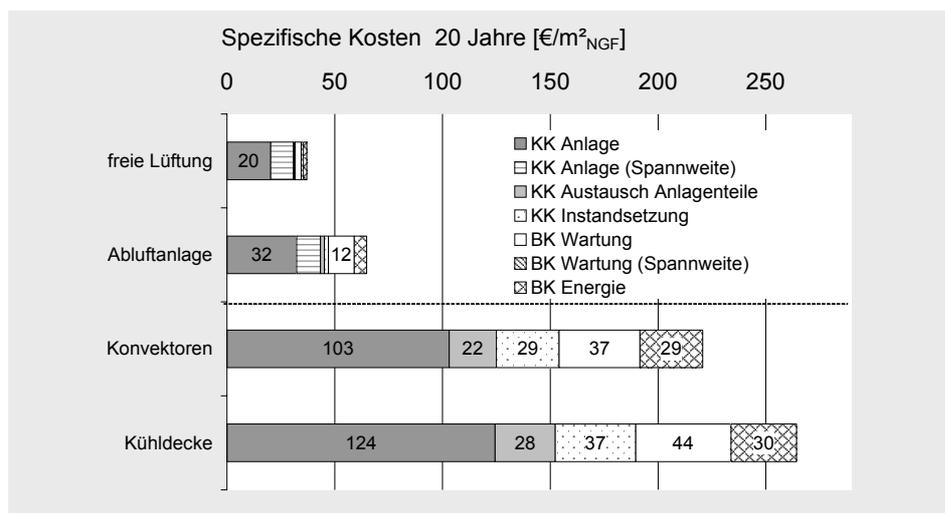
Bei der Ermittlung der Kosten werden nach [VDI 2067, 2000] prinzipiell vier Gruppen in die Betrachtung mit einbezogen.

- Kapitalgebundene Kosten (einschl. Instandsetzung und Erneuerung)
- Bedarfs- (verbrauchs-) gebundene Kosten (Energiekosten)
- Betriebsgebundene Kosten (Wartung)
- Sonstige Kosten (z. B. Versicherung, Steuern), hier vernachlässigt.

Da im Rahmen der nachfolgenden Kostenbetrachtung über einen Nutzungszeitraum von 20 Jahren die zukünftige Preisentwicklung und die Teuerungsrate nicht berücksichtigt werden, sind die nachfolgenden Angaben vorwiegend für einen qualitativen Vergleich der Anlagen geeignet. Im Vergleich mit realen Kosten können die Werte unter Umständen von diesen abweichen. Die Kosten für die Instandsetzung und Wartung der Anlagen wurden auf Basis bestimmter Faktoren aus [VDI 2067, 2000] ermittelt, die sich jeweils als prozentualer Wert aus den Kosten der Anlagenkomponente errechnen. Die [VDI 2067, 2000] nennt auch rechnerische Nutzungsdauern für die einzelnen Anlagenkomponenten. Sind diese kürzer (z. B. 12 Jahre) als der Betrachtungszeitraum, so wird davon ausgegangen, dass die Komponente kostengleich ersetzt wird und es werden die anteiligen Kosten für die verbleibende Nutzungsdauer (hier 8 Jahre) zu den Ausgangskosten hinzuaddiert.

Die spezifischen Kosten über einen Nutzungszeitraum von 20 Jahren der Anlage zeigt Abb. 5.33. Danach dominieren beim Konzept „freie Lüftung“ die kapitalgebundenen Kosten. Beim Konzept „Abluftanlage“ entstehen Kosten im Bereich „Wartung“ hauptsächlich für den Ventilator. Bei beiden Systemen sind die Energiekosten sehr gering.

**Abb. 5.33:** Spezifische Kosten über 20 Jahre. Die Preisspannweite für die Zuluftelemente in der Fassade ist gesondert ausgewiesen. Die Kosten- gruppe „Austausch Anlagenteile“ berücksichtigt die Bauteile, die eine kürzere rechnerische Lebensdauer als 20 Jahre haben und somit ersetzt werden müssen. Für das Kompaktgerät der Zu- und Abluftanlage der Systeme „Ventilator-konvektor“ und „Deckenkühlung“ gab es nur einen Gesamtpreis. Um die Anlagen- Wartungs- und Instandsetzungskosten für das Kompaktgerät zu berechnen, wurden für die Ventilatoren und die Filter anteilige Preise bei Lüftungsfirmen erfragt. Die Filter machen rund 1,2 %, die Ventilatoren rund 20 % der Kosten für das Kompaktgerät aus.  
Verwendete Abkürzungen:  
KK = kapitalgebundene Kosten  
BK = betriebsgebundene Kosten



Diese steigen erst bei den Konzepten „Konvektoren“ und „Deckenkühlung“, wenngleich sie auch hier nur 13 oder 11 % der Gesamtkosten ausmachen. Da der Nutzungszeitraum auf 20 Jahre festgelegt ist, müssen hier Anlagenteile, die eine kürzere Lebensdauer haben, ausgetauscht werden. Diese Kosten gehören zu den kapitalgebundenen Kosten „Anlage“ sind aber in der Grafik zur Unterscheidung als „Austausch Anlagenteile“ ausgewiesen.

**Tab. 5.13:** Kapitalgebundene und bedarfs- und betriebsgebundene Kosten für die unterschiedlichen Anlagen  
Anmerkungen: Bei der freien Lüftung und bei der Abluftanlage sind die Kosten für die Überströmelemente mit der dazugehörigen Spannweite ausgewiesen.

Kurzlebigere Anlagenteile sind die Ventilatoren (12 Jahre), Ventile für die Kühlung (Ventilatorkonvektoren und Kühldecke), die Kompressionskältemaschine (15 Jahre) und die Filter in der Lüftungsanlage. Der vierteljährliche Austausch der Filter macht 7 % der Anlagengesamtkosten aus. Die Kosten für Wartung und Instandsetzung liegen für die Konzepte „Konvektoren“ und „Deckenkühlung bei rund 30 % der Gesamtkosten.

Tab. 5.13 zeigt die Werte nochmals in der Übersicht, die Aufwendungen der Bestandteile der jeweiligen Anlage finden sich im Anhang (Info A5.6-1).

System	Betrachtung Investitionsjahr				Betrachtung Nutzungsdauer 20 Jahre			
	Kosten Anlage	Instandsetzung	Wartung	Energie	Kosten Anlage	Instandsetzung	Wartung	Energie
	(€/m <sup>2</sup> <sub>NGFa</sub> )	(€/m <sup>2</sup> <sub>NGFa20</sub> )						
Freie Lüftung	20,26 bis 30,89	0,02	0,14 bis 0,20	0,08	20,59 bis 31,21	0,33	2,88 bis 3,94	1,57
Abluftanlage	32,36 bis 43,0	0,09	0,60	0,29	34,19	1,86	12,01	5,70
Konvektoren	103,11 *	1,38	1,48	1,52	124,99	27,61	29,60	30,43
Kühldecke	124,43	1,79	1,82	1,46	152,36	35,72	36,38	29,11

\* = Summe für Gebäude mit geeigneten Heizkörpern: 72,89 €/m<sup>2</sup><sub>NGFa</sub>, Mehrkosten Kühlung: 30,20 €/m<sup>2</sup><sub>NGFa</sub>

### 5.6.5 Fazit

Der Vergleich der Investitionskosten zeigt, dass sich die passiven Systeme (hier Lüftungssysteme) von den aktiven Systemen erheblich unterscheiden. Da eine freie Lüftung (siehe auch Kap. 3.1.1 und 5.5.2) weder den hygienisch erforderlichen Luftwechsel tagsüber, noch eine effiziente sommerliche Nachtlüftung zuverlässig garantieren kann, muss die Abluftanlage als Mindestausstattung für eine wirkungsvolle nächtliche Entlüftung angesehen werden. Sie verursacht je nach Art der Zuluftelemente Investitionskosten zwischen 32 und 43 €/m<sup>2</sup>. Dagegen entstehen bei den aktiven Systemen mit Zu- und Abluftanlage und Ventilatorkonvektoren oder Deckenkühlung Kosten von 103 €/m<sup>2</sup> bzw. 124 €/m<sup>2</sup>. Unter der Annahme von üblichen Bauwerkskosten von 1100 €/m<sup>2</sup> (netto, mittlerer Standard [BKI, 1999]), bedeutet dies eine Kostensteigerung von knapp 3 % (Abluftanlage mit günstigen Zuluftelementen) bis hin zu 11 % (Zu- und Abluftanlage mit Kühlfunktion).

Allerdings ist bei diesem Vergleich die Tatsache außer Acht gelassen, dass die ventilatorgestützte Lüftung neben der Verbesserung des sommerlichen Raumklimas einen zusätzlichen Beitrag zur Lufthygiene leistet. Dies ist besonders dann von Bedeutung, wenn nach einer Fassadensanierung mit Verbesserung der Luftdichtigkeit freie Lüftungskonzepte hohen Komfortansprüchen nicht mehr genügen, da sie während der Benutzung keine ausreichende Frischluftzufuhr gewährleisten können. Weitere Argumente für eine ventilatorgestützte Lüftung sind eine dichte Personenbelegung in Bürogebäuden und die Leistungsminderung bei hohen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen. Dieser Argumentation folgend, werden in der nachfolgenden Überlegung als Schätzung 50 % der Investitionskosten für die ventilatorgestützte Lüftung der Verbesserung des sommerlichen Raumklimas angerechnet. Als Vergleichsmaßnahme, die ausschließlich der Senkung der sommerlichen Raumtemperaturen dient, wird die Ausstattung des Gebäudes mit einer

Sonnenschutzverglasung betrachtet. Für die Sonnenschutzverglasung ergeben sich Investitionskosten von knapp 7 €/m<sup>2</sup><sub>NGF</sub><sup>7</sup>. Ist also allein die Verbesserung des sommerlichen Raumklimas das Ziel, so liegen – selbst bei anteiliger Berücksichtigung – die Kosten für die Lüftungsanlagen weit über denen der Sonnenschutzverglasung. Dies bestätigt, dass Maßnahmen zur Reduktion der Wärmelasten oftmals günstiger sind, als solche zur Erhöhung der Abfuhr. Die Wirtschaftlichkeit verbessert sich erst dann deutlich, wenn von einer ventilatorgestützten Gebäudelüftung als Grundausstattung ausgegangen wird.

Vergleicht man die Kosten der vier untersuchten Systeme, so dominieren bei der „freien Lüftung“ und „Abluftanlage“ die kapitalgebundenen Kosten (Anlage und Instandsetzung). Bei der Abluftanlage kommen Aufwendungen für die Wartung hinzu, die bei rund 22 % der Gesamtkosten liegen. Der Energiebedarf und damit auch die Aufwendungen sind im Rahmen des Gesamtenergiebedarfs typischer Bürogebäude gering.

Bei den aktiven Kühlsystemen „Ventilator-konvektor“ und „Deckenkühlung“ machen die kapitalgebundenen Kosten jeweils rund 70 % aus. Die Kosten für Wartung und Energie liegen zusammen bei etwa 30 %. Der Primärenergiebedarf beläuft sich auf etwa 30 kWh/m<sup>2</sup>a. Abhängig vom Baustandard entstehen demnach zwischen 10 % und 30 % an Mehrbedarf<sup>8</sup>.

Die Konzepte „Konvektoren“ und „Kühldecke“, die hier im Zusammenhang mit einer Kompressionskälteanlage untersucht wurden, können im Sinne eines sparsamen Umgangs mit Energie dann von Interesse sein, wenn Kältequellen, wie z. B. Erdreich und Grundwasser, zur Verfügung stehen. In diesem Fall würden die Energiekosten sinken, dafür aber die Investitionskosten steigen. Daher sind die durchgeführten Berechnungen auf diesen Fall nicht übertragbar.

#### *Auswirkungen auf den Gebäudebestand*

Die verfügbaren Angaben zum Bürogebäudebestand weisen eine beträchtliche Bandbreite auf (siehe Kap. 4.1.1). Abschätzungen können daher nur Größenordnungen aufzeigen, nicht aber verlässliche Daten liefern. Die folgende Betrachtung basiert auf den Angaben nach [Bruckmann et al., 2002]. Danach umfasst der Bestand an Büro- und Verwaltungsbauten 186 Mio. m<sup>2</sup>, mit einem nicht klimatisierten Anteil von 67 Mio. m<sup>2</sup>. Würde letzterer zur Verbesserung des sommerlichen Raumklimas mit Sonnenschutzglas ausgestattet<sup>9</sup>, so entstünden Investitionskosten von 469 Mio. €. Der Einbau von Zu- und Abluftanlagen inkl. aktiver Kühlung ließe Aufwendungen von 6,9 bis 8,3 Mrd. € (unter einer Anrechnung der Kosten von 50 %) entstehen.

<sup>7</sup> Nach [Voss et al., 2006b] 40 €/m<sup>2</sup> Glasfläche, Glasfläche Gebäude 524 m<sup>2</sup>, siehe Abb. 5.29

<sup>8</sup> Basiswert 300 bzw. 100 kWh/m<sup>2</sup>a

<sup>9</sup> unter den Rahmenbedingungen des Referenzgebäudes

## 5.7 Zusammenfassung

Die Untersuchung der klimatischen Faktoren bestätigt zunächst, dass die Umgebungsbedingungen in Nordeuropa für passive Kühlungskonzepte, die Außenluft als Wärmesenke nutzen, günstig sind. Dass sich dies unter den veränderten Rahmenbedingungen des Klimawandels ändern kann, zeigen die Erfahrungen der Sommer 2003 und 2006. Die hohen Temperaturen während dieser Hitzeperioden minderten die Wirksamkeit der Nachtluft als Wärmesenke beträchtlich. Unabhängig davon kommen auf der Ebene des Mikroklimas Temperaturabweichungen hinzu, die beispielsweise zwischen einem Stadtzentrum und einer Wetterstation außerhalb der Stadt auftreten können. Bei der Verwendung von Klimadatensätzen zur Untersuchung der Wirksamkeit passiver Kühlungskonzepte gilt es daher, die verwendeten Daten auf ihre Realitätsnähe zu prüfen.

Exemplarische Messungen des Mikroklimas an Gebäudefassaden bestätigen, dass die Temperatur der Fassadengrenzschicht tagsüber immer über der Außentemperatur liegt und dass die Materialien der Fassade bestimmen, wie hoch die Temperaturdifferenz ist. Dies hat dann Bedeutung, wenn die Luft der Fassadengrenzschicht auch unter ungünstigen Bedingungen in den Raum gelangt.

Bei der Betrachtung der Energiebilanz eines Raumes wird auf der Lastenseite deutlich, dass die externen Wärmelasten dominierend sind. Bei Sanierungen stehen unter bestimmten Ausgangsvoraussetzungen des Gebäudes Handlungsoptionen zu ihrer Reduktion und der der internen Wärmelasten zur Verfügung.

Die Verbesserung des Wärmespeichervermögens eines Gebäudes mit einer mittleren speicherwirksamen Masse ist beispielsweise mit PCM möglich. Gerade hier sollte jedoch berücksichtigt werden, dass die Erwärmung und damit die Wärmespeicherfähigkeit der Decke auf den Raum verteilt unterschiedlich ist. So ist es angesichts der hohen Kosten von PCM möglicherweise wirtschaftlicher, dieses nur in Teilbereichen einzusetzen. Da bei thermischen Simulationen in der Regel von einer isothermen Temperaturverteilung ausgegangen wird, kann dies zu einer Überbewertung der Speicherfähigkeit in der Simulation führen. Ist die Speicherfähigkeit ein zentraler Punkt des Konzeptes, sind Strömungssimulationen eine mögliche Alternative.

Zur Wärmeabfuhr können auch bei Bestandsgebäuden natürliche Wärmesenken wie Außenluft, Grundwasser oder Erdreich mit bestimmten Systemen nutzbar gemacht werden. In vielen Fällen ist die Außenluft besonders leicht zu erschließen.

Aus Messungen an bereits sanierten Gebäuden wird deutlich, dass ohne außen liegenden Sonnenschutz ein Luftwechsel von 2,0 1/h alleine zur Entwärmung nicht ausreicht. In diesem Fall ist mit hohen sommerlichen Temperaturen zu rechnen. Bei Nutzern mit hohen Erwartungen an das Raumklima (z. B. Bestandsgebäude mit aktiver Kühlung) sind ergänzende Maßnahmen (z. B. aktive Kühlung) notwendig. Ist ein hoher ventilatorgestützter Luftwechsel möglich, so ist daran vorteilhaft, dass die Büros am Morgen „keinen stickigen“ Eindruck machen. Erfahrungen bei einem passiv gekühlten Neubau (im Rahmen der Begleitforschung des BMWI Förderkonzeptes EnOB) zeigen, dass sich die Temperaturen in den Büros zwar im Tagesverlauf nicht stark erhöhen,

der warme Raumeindruck am Morgen aber bei den Nutzern hingegen einen sehr negativen Eindruck hinterlässt.

Die Ermittlung der Investitions- und Nutzungskosten passiver (begrenzt auf die Nutzung der Außenluft) und aktiver Systeme zur Verbesserung des sommerlichen Raumklimas zeigt, dass schon bei den Investitionskosten erhebliche Unterschiede zwischen den Systemen auftreten.

Allerdings dienen nicht alle Systeme ausschließlich dazu, die sommerlichen Raumtemperaturen zu senken. Da eine ventilatorgestützte Lüftung auch die Lufthygiene verbessert, werden die aufzuwendenden Kosten exemplarisch nur zu 50 % in Ansatz gebracht. Als Vergleichssystem, das ausschließlich zur Verbesserung des sommerlichen Raumklimas dient, wird Sonnenschutzglas angeführt.

- Die Ausstattung des Referenzgebäudes mit Sonnenschutzglas führt zu Mehrkosten von 7 €/m<sup>2</sup>
- Eine Abluftanlage zur nächtlichen Entwärmung führt zu Mehrkosten von 16 €/m<sup>2</sup>
- Eine Zu- und Abluftanlage mit aktiver Kühlung und Wärmeabfuhr über Ventilator-konvektoren oder eine Deckenkühlung verursacht Mehrkosten zwischen 50 und 60 €/m<sup>2</sup>.

Beispielhaft zeigt sich hier, dass Maßnahmen zur Verringerung der Kühllasten oftmals günstiger sind, als solche zur Erhöhung der Wärmeabfuhr.

Betriebsenergieaufwand und Betriebskosten sind für die Abluftanlage eher gering, bei den Zu- und Abluftsystemen mit aktiver Kühlung steigen der Primärenergiebedarf und die Betriebskosten.

Nachdem nun die Bausteine für eine Verbesserung des Raumklimas ohne aktive Kühlung aber auch die Grenzen in der Sanierung dargestellt sind, soll im nachfolgenden Kapitel anhand einer Gebäudetypologie untersucht werden, welche Gebäude günstige Voraussetzungen für den erfolgreichen Einsatz dieser Strategien bieten.

## 5.8 Literatur

- [DIN 4108-2:2003-07] *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden, Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz*. Berlin: Beuth Verlag.
- [DIN 4108-6:2003-06] *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden, Teil 6: Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs*. Berlin: Beuth Verlag.
- [DIN EN 832:2003-06] *Berechnung des Heizenergiebedarfs Wohngebäude*. Berlin: Beuth Verlag.
- [DIN EN 12464-1:2003-03] *Licht und Beleuchtung - Beleuchtung von Arbeitsstätten, Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen*. Berlin: Beuth Verlag.
- [DIN EN 13779:2005-05] *Lüftung von Nichtwohngebäuden - Allgemeine Grundlagen und Anforderungen an Lüftungs- und Klimaanlage*. Berlin: Beuth Verlag.
- [DIN EN ISO 13786:1999-12] *Wärmetechnisches Verhalten von Bauteilen - Dynamisch-thermische Kenngrößen - Berechnungsverfahren*. Berlin: Beuth Verlag.
- [DIN V 18599-4:2005-07] *Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz- End,- und Primärenergiebedarfs für Beheizung, Kühlung, Belüftung, Beleuchtung und Warmwasserbereitung - Teil 4: Beleuchtung*. Berlin: Beuth Verlag.
- [DIN V 18599-10:2005-07] *Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz- End,- und Primärenergiebedarfs für Beheizung, Kühlung, Belüftung, Beleuchtung und Warmwasserbereitung - Teil 10: Nutzungsbedingungen, Klimadaten*. Berlin: Beuth Verlag.
- [SIA V382/2, 1992] *Kühlleistungsbedarf von Gebäuden*. Zürich (CH): Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein.
- [Standard 55P-2003] *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. Atlanta (USA): American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. (ASHRAE).
- [SWKI 95-3, 2001] *Jährlicher Energiebedarf von Lüftungstechnischen Anlagen*. Schönbühl (CH): Schweizerischer Verein von Wärme- und Klima-Ingenieuren.
- [VDI 2067, 2000] *Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen, Blatt 1: Grundlagen und Kostenberechnung*. Düsseldorf: VDI Verein Deutscher Ingenieure.
- [VDI 2078, 1996] *Berechnung der Kühllast klimatisierter Räume (VDI Kühllastregeln)*. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure e.V.
- [VDI 3807, 1994] *Energieverbrauchskennwerte für Gebäude, Blatt 1: Grundlagen*. Düsseldorf: VDI Verein Deutscher Ingenieure.
- [Bader et al., 2003] *MeteoSchweiz. Aussergewöhnlicher Hitzerekord*. 2003. <http://www.meteoschweiz.ch/de/Wissen/Rekorde/IndexRekorde.shtml>.
- [Birtles et al., 1996] Birtles, A. B.; M. Kolokotroni; M. D. Perera. 1996. "Night Cooling and Ventilation Design for Office-Type Buildings". *Renewable Energy* 8 (1-5), 259-263.
- [BKI, 1999] BKI. 1999. *BKI Baukosten 1999*. Stuttgart: Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern GmbH.
- [Bruckmann et al., 2002] Bruckmann, O., et al. 2002. *Teilbericht zum Forschungsvorhaben: Energiebedarf bei der technischen Erzeugung von Kälte*. Essen: Universität Essen, Institut für Angewandte Thermodynamik und Klimatechnik (IATK).
- [Brunner et al., 2001] Brunner, C., et al. 2001. *Dokumentation SIA D 0176: Gebäude mit hohem Glasanteil - Behaglichkeit und Energieeffizienz*. Zürich (CH): Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein.
- [Chauvel et al., 1982] Chauvel, P., et al. 1982. "Glare from windows: current views of the problem". *Lighting Research and Technology* 14 (1), 31-46.
- [Doose, 2005] Doose, D. 2005. *Decken als temporäre Wärmespeicher*. FH-Trier Umwelt-Campus Birkenfeld [Diplomarbeit].
- [DWD, 2003] Deutscher Wetterdienst. *Der Rekordsommer 2003*. 2003. <http://www.dwd.de/de/FundE/Klima/KLIS/prod/spezial/temp/>.
- [Eicker et al., 2005a] Eicker, U., et al. 2005a. *Limits and potentials of office building climatisation with ambient air*. 1st International Conference on Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment (Palenc 2005). Santourini (GR), 19.-21.05.2005. Heliotopos Conferences, 561-566.
- [Eicker et al., 2005b] Eicker, U., et al. 2005b. "Passive and low energy cooling of office buildings". *International Journal of Ventilation* 4 (3), 203-214.
- [Finke, 2002] Finke, U. 2002. "Dezentrale Außenluftansaugung bei raumluftechnischen Geräten". *HLH* 53 (10), 32-37.
- [Frank, 2005] Frank, T. 2005. "Climate change impacts on building heating and cooling energy demand in Switzerland". *Energy and Buildings* 37, 1175-1185.

- [Hoffmann et al., 2005a] Hoffmann, C.; C. Neumann; K. Voss. 2005a. *Zwischenbericht: Kosten unterschiedlicher Lüftungssysteme bei Sanierungsvorhaben*. Bergische Universität Wuppertal (b+tga), Solares Bauen mbH.
- [Hoffmann et al., 2005b] Hoffmann, C.; K. Voss. 2005b. "Zur Ermittlung des Energiebedarfs für Kunstlicht in Bürogebäuden – Diskussion von Meßresultaten". *Bauphysik* 27 (4).
- [Hollmuller et al., 2005] Hollmuller, P.; B. Lachal; D. Pahud. 2005. *Refraichissement par geocooling - Bases pour un manuel de dimensionnement*. Genf (CH): Université de Geneve et SUPSI, CH.
- [Hosni et al., 1999] Hosni, M. H.; B. W. Jones; H. Yu. 1999. *Measurement of heat gain and radiant/convective split from equipment in buildings - Final Report for ASHRAE Research Project 1055-RP*. Kansas (USA): Institute for Environmental Research, Kansas State University.
- [Keller, 1997] Keller, B. 1997. *Klimagerechtes Bauen - Grundlagen - Dimensionierung - Beispiele*. Stuttgart: B.G.Teubner.
- [Khalifa et al., 1990] Khalifa, A. J. N.; R. H. Marshall. 1990. "Validation of heat transfer coefficients on interior building surfaces using a real-sized indoor test cell". *International Journal of Heat and Mass Transfer* 33 (10), 2219-2236.
- [Knissel, 1999] Knissel, J. 1999. *Energieeffiziente Büro- und Verwaltungsgebäude - Hinweise zur primärenergetischen und wirtschaftlichen Optimierung*. 1. Auflage. Darmstadt: Institut für Wohnen und Umwelt.
- [Knissel, 2004] Knissel, J. 2004. *Methodik zur Erfassung, Beurteilung und Optimierung des Elektrizitätsbedarfs von Gebäuden - Modul 2.3 Klimakälte*. Frankfurt/Main, Darmstadt: ARGE DS-Plan GmbH (DSP), Institut für Wohnen und Umwelt (IWU).
- [Kolokotroni et al., 2005] Kolokotroni, M.; Y. Zhang; R. Watkins. 2005. *The London heat island and building design*. 1st International Conference on Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment (Palenc 2005). Santourini (GR), 19.-21.05.2005. Heliotopos Conferences, 743-748.
- [Koschenz et al., 2000] Koschenz, M.; B. Lehmann. 2000. *Thermoaktive Bauteilsysteme tabs*. Dübendorf (CH): Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt EMPA.
- [Kuhn, 2006] Kuhn, T. 2006. "Solar control: A general evaluation method for facades with venetian blinds or other solar control systems". *Energy and Buildings* 38 (6), 648-660.
- [Luterbacher et al., 2004] Luterbacher, J., et al. 2004. "European Seasonal and Annual Temperature Variability, Trends and Extremes Since 1500". *Science* 303, 1499-1503.
- [Nicol, 2001] Nicol, F. 2001. *Characterising occupant behaviour in buildings: towards a stochastic model of occupant use of windows, lights, blinds, heaters and fans*. Seventh international IBPSA conference. Rio (BR), 1073-1078.
- [Prado et al., 2005] Prado, R. T. A.; F. L. Ferreira. 2005. "Measurement of albedo and analysis of its influence the surface temperature of building roof materials". *Energy and Buildings* 37, 295-300.
- [RAVEL, 1994] RAVEL. 1994. *Interne Lasten von Büroräumen*. Bern (CH): Bundesamt für Konjunkturfragen, CH.
- [Recknagel et al., 2001] Recknagel, H.; E. Sprenger; E.-R. Schramek. 2001. *Taschenbuch für Heizungs- und Klimatechnik 01/02*. 70. Auflage. München: Oldenburg Industrieverlag.
- [Reinhart, 2005] Reinhart, C. F. 2005. *Tutorial on the Use of Daysim Simulations for Sustainable Design*. Ottawa (CDN): National Research Council Canada.
- [Reinhart et al., 2003] Reinhart, C. F.; K. Voss. 2003. "Monitoring manual control of electric lighting and blinds". *Lighting Research and Technology* 35 (3), 243-260.
- [Reuter, 2005] Reuter, T. 2005. *Mikroklima Bürofassade - Analyse und Optimierung relevanter Fassadenparameter*. Bergische Universität Wuppertal, Bauphysik + Technische Gebäudeausrüstung (b+tga) [Master Thesis].
- [Richter, 2003] Richter, W. 2003. *Handbuch der thermischen Behaglichkeit - Heizperiode*. Dortmund/Berlin/Dresden: Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.
- [Rosencrantz, 2003] Rosencrantz, T. 2003. *Calculation of cooling loads for different solar shading devices in Swedish offices using the software Parasol v2.0 and comparison of calculated and measured g-values*. ISES Solar World Congress. Gothenburg (S), 14.-19.06.2003.

- [Rubin et al., 1978] Rubin, A. I.; B. L. Collins; R. L. Tibott. 1978. *Window blinds as a potential energy saver - a case study*. Washington (USA): National Bureau of Standards (NSB) Building Science Series 112.
- [Santamouris, 2001] Santamouris, M. (Hrsg.). 2001. *Energy and climate in the urban built environment*. London (GB): James & James (Science Publishers) Ltd.
- [Schär et al., 2004] Schär, C., et al. 2004. "The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves". *Nature* 427, 332-336.
- [Schlomann et al., 2005] Schlomann, B., et al. 2005. *Technische und rechtliche Anwendungsmöglichkeiten einer verpflichtenden Kennzeichnung des Leerlaufverbrauchs strombetriebener Haushalts- und Bürogeräte*. Berichts-Nr.: 53/03, Karlsruhe, München, Dresden: Fraunhofer ISI, Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE), TU Dresden (Juristische Fakultät).
- [Simpson et al., 1997] Simpson, J. R.; E. G. McPherson. 1997. "The effects of roof albedo modification on cooling loads of scale model residences in Tucson, Arizona". *Energy and Buildings* 25, 127-137.
- [Synnefa et al., 2005] Synnefa, M.; M. Santamouris; I. Livada. 2005. *A comparative study of the thermal performance of reflective coatings for the urban environment*. 1st International Conference on Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment (Palenc 2005). Santourini (GR), 19.-21.05.2005. Heliotopos Conferences, 101-107.
- [Voss, 2006] Voss, K. 2006. Solar Control. In: *Advances in Passive Cooling* (Hg. v. M. Santamouris). London (GB): Earthscan / James & James.
- [Voss et al., 2006a] Voss, K., et al. 2006a. *Bürogebäude mit Zukunft*. 2. Auflage. Berlin: Verlag Solarpraxis.
- [Voss et al., 2006b] Voss, K.; J. Pfafferott. 2006b. *Energieeinsparung contra Behaglichkeit?* Bonn: Verlag BBR.
- [Wilkins et al., 2000] Wilkins, C.; M. H. Hosni. 2000. "Heat Gain from Office Equipment". *ASHRAE journal* (6), 33-39.
- [Zimmermann, 2003] Zimmermann, M. 2003. *Handbuch der passiven Kühlung*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- [Zürcher et al., 2004] Zürcher, C.; T. Frank (Hrsg.). 2004. *Bau und Energie: Leitfaden für Planung und Praxis*. Zürich (CH): vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich.

## 6 Bei welchen Gebäuden kann das Raumklima mit Nachtlüftung verbessert werden?

Die in der passiven Kühlung verwendeten und für die Sanierung tauglichen natürlichen Wärmesenken weisen oftmals eine beschränkte Leistung auf und haben daher eine geringe Kühllast des Gebäudes zur Voraussetzung. Besonders ist dies der Fall bei der Nutzung der Außenluft als Wärmesenke, die jedoch in den meisten Fällen besonders leicht erschlossen werden kann. Aus diesem Grund beginnt die Sanierung eines Bürogebäudes, das die Nachtlüftung als Wärmesenke nutzen soll, mit der Frage wie gut die Ausgangsvoraussetzungen sind, die das Gebäude dafür bietet. Zur Beantwortung der Frage werden zunächst die relevanten gebäudeunabhängigen und gebäudebezogenen Faktoren erläutert und aus diesen eine Typologie erarbeitet, die die Unterscheidung und Klassifizierung von Gebäuden hinsichtlich ihrer Eignung für die passive Kühlung mit Nachtlüftung ermöglicht. Eine „Entscheidungsmatrix“ führt abschließend die gebäudeunabhängigen und gebäudebezogenen Parameter zusammen und zeigt so zu einem frühen Planungszeitpunkt, ob ein Gebäude Potential für die Verbesserung des Raumklimas ohne aktive Kühlung aufweist.

Anmerkung zur Behandlung der freien Lüftung in der Typologie: Besonders nach einer Fassadensanierung mit Verbesserung der Luftdichtigkeit genügen freie Lüftungskonzepte hohen Komfortansprüchen nicht, da sie während der Benutzung keine ausreichende Frischluftzufuhr gewährleisten können. Dass eine ausschließlich freie Lüftung eine hohe Raumluftqualität nicht immer gewährleistet, bestätigen auch Messungen im Rahmen des ProKlimA-Projektes [Bischof et al., 2003]. Die negativen Auswirkungen einer mangelhaften Luftqualität auf die Produktivität weisen [Wargocki et al., 2006] nach: Luftqualität wird so auch zum wirtschaftlich relevanten Faktor.

Da die Anwendung der freien Lüftung aber dennoch zur Baupraxis (gerade bei kleineren Projekten) zählt, wird sie in den entsprechenden Abschnitten als vollwertige Lösung diskutiert.

### 6.1 Vorhandene Typologien für Nichtwohn- und Bürogebäude

Die Erstellung einer Gebäudetypologie kann verschiedenen Zwecken dienen und dementsprechend unterscheiden sich auch die Unterteilungskriterien. Als solche sind die baugeschichtliche Einordnung der Gebäude, ihre äußere Gestalt, die innere Aufteilung, die Bauweise und die Nutzungsart denkbar.

**Tab. 6.1:** Die Eignung der untersuchten Typologien hinsichtlich einer Klassifizierung für die passive Kühlung. Verwendete Abkürzungen: WK = zu wenig Kriterien

Eine Übersicht über die Ergebnisse einer Literaturrecherche zum Thema der zweckgebundenen Gebäudetypologien für Nichtwohn- und Bürogebäude zeigt Tab 6.1. Eine ausführliche Beschreibung findet sich im Anhang (Info A6.1-1).

Zweck	Sortierkriterium	Bewertung und Kommentar	Literatur
Büronutzung und Organisation	Büroraumkonzept (Zellen-, Großraum- und Organisationstyp)	WK	[Gottschalk, 1963]
	4 Raumaufteilungen und bestimmte Arbeitsweise	WK	[Laing, 1998]
	Arbeitsweise	WK	[Hascher et al., 2002]
Statistische Erhebungen Nichtwohngebäude	Nutzung	WK	
Normen Nichtwohngebäude	33 Nutzungen, 3 Büroraumkonzepte, Zonen nach baulichen und haustechnischen Kriterien	WK	[DIN V 18599-10:2005-07]
	12 Nutzungen, 2 Büroraumkonzepte	WK	[SIA 380/1, 2001]
Büronebenkosten Büro und Verwaltung	3 haustechnische (Klimatisierung) Kriterien, 4 Altersklassen, Standort	WK	[Reinert, 2002]
Energieverbrauchsprofile Bürogebäude	4 Kombinationen aus Kriterien: Belüftung, Klimatisierung, Büroraumkonzept, Nutzungsstandard	WK	[DETR, 2000]
Energieverbrauchs-szenarien Nicht-wohnungsbau	21 Typengebäude mit Nutzung, 3 Altersklassen	WK, Gebäude > 6-Geschosser fehlen	[Erhorn et al., 1992]
Sanierungsszenarien	Exponiertheit, Speichermasse, Funktion Gebäudehülle, Bürotyp	Zur Weiterentwicklung geeignet	[Tombazis et al., 1997], [Santamouris, 2003], [Burton et al., 2001]

**Tab. 6.2:** Gebäudekategorisierung gemäß gestaltneutraler Kriterien. Aus der praktischen Zuordnung ergeben sich weitere Eigenschaften, die mit den übrigen Merkmalen zusammen besonders häufig auftreten. Verwendete Abkürzungen: KO = Kernorientiert, FO = Fassadenorientiert

Der Fragestellung der Arbeit am nächsten liegt die im Rahmen des EU-Forschungsprojektes OFFICE entwickelte Typologie. Sie dient zur Untersuchung und Bewertung von Energiesparpotentialen unterschiedlicher Sanierungsszenarien für Bürogebäude in Süd- und Nordeuropa aus der Periode zwischen 1950 und 1990. Als Unterscheidungskriterien dienen energierelevante Eigenschaften wie Exponiertheit, Bauweise, Gebäudehülle und die interne Struktur (Tab. 6.2). In Verbindung mit den vorherrschenden Bürogebäudetypen in Europa [Tombazis et al., 1997] werden aus Kombinationen der oben genannten Merkmale fünf Kategorien [Santamouris, 2003] gebildet (Tab. 6.2), für die sich basierend auf der Analyse von 10 Fallbeispielen [Burton et al., 2001], geeignete Sanierungsansätze ableiten lassen.

Typ	Exponiertheit (Lage)	Bauweise	Funktion der Gebäudehülle	Grundrissorganisation	Weitere Eigenschaften aus der praktischen Zuordnung
A	freistehend	schwer	KO	offener Grundriss	großflächige Verglasungen, Tageslichtversorgung wegen großer Gebäudetiefe schlecht
B	angrenzende Bebauung	schwer	FO	Einzelbüros	dicht bebautes Umfeld, innere Struktur: kleine, durch Gang verbundene Raumeinheiten
C	freistehend	schwer	FO	Einzelbüros	Gebäude freistehend, sonst ähnlich Typ B
D	freistehend	leicht	FO	offener Grundriss	großflächige Verglasungen, leichte Bauweise mit abgehängte Decken innere Struktur: große, offene Flächen
E	angrenzende Bebauung	leicht	FO	Einzelbüros	Gebäudehülle: isolierte opake Elemente und Verglasung, häufig Atrien, innere Raumaufteilungen: Leichtbauweise

### 6.1.1 Fazit zu den vorhandenen Typologien

Die Literaturrecherche zeigt, dass es unterschiedliche zweckgebundene Typologien gibt, aber keine übergeordnete Systematik, die sich für alle Fragestellungen gleichermaßen gut eignet.

Der nächste Abschnitt stellt eine Typologie vor, die dazu dient diejenigen Bürobauten zu identifizieren, bei denen Sanierungskonzepte mit Maßnahmen der passiven Kühlung erfolgreich eingesetzt werden können.

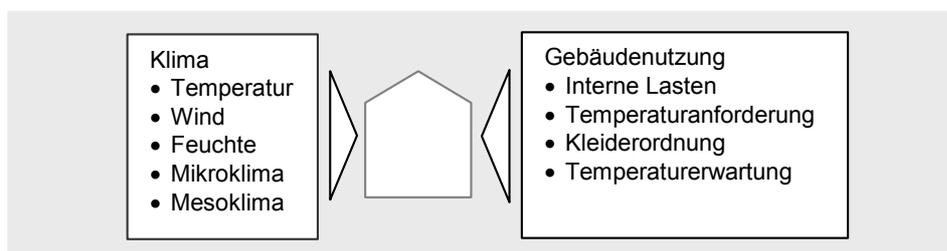
Bei Bewertung der Gebäudetypen gemäß der OFFICE-Typologie hinsichtlich ihres Potentials für eine Sanierung mit Maßnahmen der passiven Kühlung, wird deutlich, dass eine nähere Untersuchung von Typ B, C und E lohnenswert ist. Aus diesem Grund beinhaltet die nachfolgend vorgestellte Typologie auch Elemente der OFFICE-Typologie und entwickelt diese weiter.

## 6.2 Typologie zur Beurteilung des Gebäudepotentials für eine Verbesserung des Raumklimas mit Nachtlüftung

Die Typologie gilt als Lehre von der Gruppenzuordnung aufgrund einer umfassenden Ganzheit von Merkmalen, die den Typ kennzeichnen [DUDEN, 2005].

Zur Erstellung einer Typologie in Bezug auf passive Kühlung im Gebäudebestand müssen zunächst die Kriterien zur Beurteilung des Gebäudepotentials für die passive Kühlung zusammengestellt werden. Diese lassen sich auf zwei Ebenen identifizieren:

- Gebäudeunabhängige Faktoren, die entweder auf das Gebäude einwirken (Klima), oder mit der Gebäudenutzung (Kleiderordnung) im Zusammenhang stehen, aber nicht vom Gebäude oder seiner Gestalt herrühren (Abb. 6.1)
- Gebäudebezogene Größen (Bauweise, innere Aufteilung)



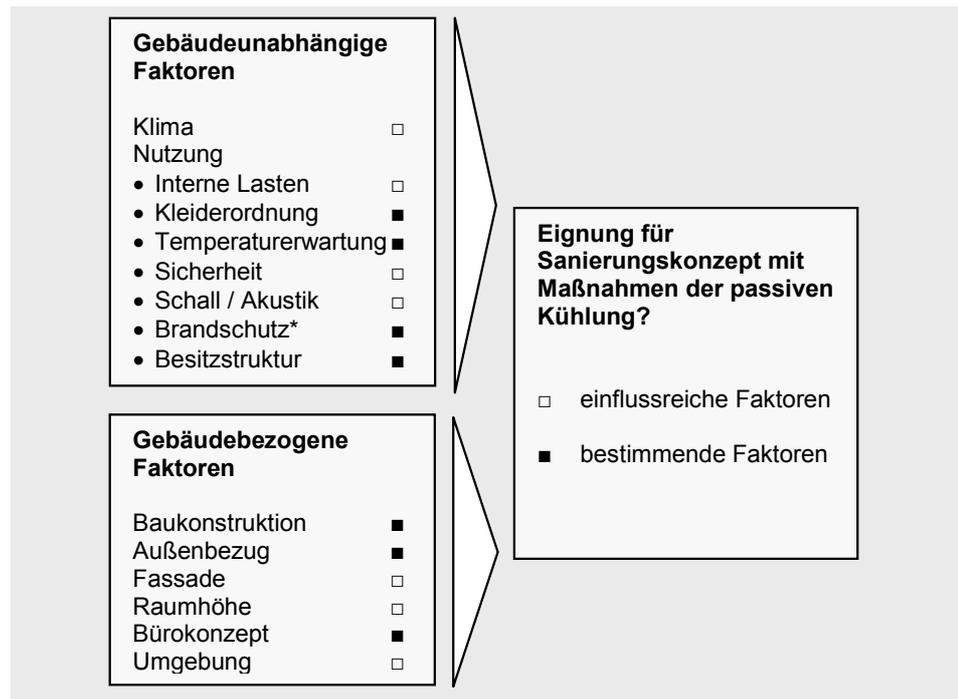
**Abb. 6.1:** Gebäudeunabhängige Faktoren

Die Betrachtung der gebäudeunabhängigen Faktoren gibt Auskunft darüber, ob die Gebäudenutzung prinzipiell mit dem Konzept der passiven Kühlung vereinbar ist und ob die klimatischen Gegebenheiten (hier Deutschland und Mitteleuropa) günstig sind. Die gebäudebezogenen Parameter legen fest, ob das Gebäude bezüglich seiner Bauweise für die passive Kühlung geeignet ist.

Abb. 6.2 zeigt das Zusammenwirken der beiden Betrachtungsebenen „gebäudeunabhängig“ und „gebäudebezogen“. Auf beiden Ebenen gibt es

Größen (gekennzeichnet durch ein schwarzes Quadrat), deren Erfüllung hier als Voraussetzung für die Umsetzung des Konzeptes betrachtet wird und Faktoren, die sich in ihrer Ausprägung vorteilhaft oder nachteilig auswirken können. Das zugrunde liegende Verständnis dabei ist folgendes: die ungünstige Ausprägung einer dieser Faktoren (z. B. mittlere interne Lasten) lässt sich durch andere vorteilhafte Eigenschaften entweder kompensieren, oder im Zuge der Sanierung verändern (g-Wert des Fassadensystems). Ist das Gebäude aber beispielsweise in leichter Bauweise errichtet, oder besteht die innere Aufteilung zwingend aus Großraumbüros, so sollte ein anderes Kühlkonzept gewählt werden.

**Abb. 6.2:** Bestimmungsgrößen für die Entscheidung ob ein Gebäude für eine Sanierung mit Maßnahmen der passiven Kühlung geeignet ist. Die Aufzählung ist in der Grafik wertneutral (vorteilhaft, nachteilig), eine Wertung wird im nachfolgenden Text vorgenommen.  
\* = Wird – trotz hoher Kosten – eine Sprinkleranlage eingebaut, entfallen bestimmte Anforderungen des Brandschutzes (siehe Kap. 6.2.1).



Der nachfolgende Abschnitt beschreibt die einzelnen Faktoren zunächst. Für die gebäudebezogenen Größen wird dann eine Typologie vorgestellt, die die Unterscheidung und Klassifizierung von Gebäuden ermöglicht. Eine „Entscheidungsmatrix“ führt abschließend die gebäudeunabhängigen und gebäudebezogenen Parameter zusammen und beantwortet so zu einem frühen Planungszeitpunkt die Frage, ob ein Gebäude Potential für eine Sanierung mit Maßnahmen der passiven Kühlung aufweist.

### 6.2.1 Gebäudeunabhängige Faktoren

#### Klima

Die Senkung der sommerlichen Raumtemperaturen durch Nachtlüftung ist in Deutschland möglich, da sich die Außentemperatur in den Sommernächten in der Regel auf  $\leq 18$  °C abkühlt. Es treten regionale Unterschiede auf, die sich in der Anzahl der Sommernächte mit Außentemperaturen  $\geq 18$  °C, in der Zahl der Kühlgradtage und im Auftreten und der Länge von Hitzeperioden niederschlagen (siehe Kap. 5.1.1).

## Interne Lasten

Kapitel 5.3.2 stellte unterschiedliche Lastannahmen für Büroräume durch Normen vor. Für die überschlägige Klassifizierung sind die Annahmen nach [SWKI 95-3, 2001] geeignet, da diese die Beleuchtung mit einschließen. Je geringer die internen Lasten sind, desto weniger thermischer Speicher wird beansprucht, bzw. desto weniger Wärme muss abgeführt werden.

	Interne Lasten Einzel- und Gruppenbüro ( $\leq 6$ Personen) (Wh/[m <sup>2</sup> <sub>NGFd</sub> ])	Interne Lasten Großraumbüro ( $\geq 6$ Personen) (Wh/[m <sup>2</sup> <sub>NGFd</sub> ])
Niedrig	143	142
Mittel	191	198
Hoch	264	286

**Tab. 6.3:** Interne Lasten pro m<sup>2</sup><sub>NGF</sub> gemäß [SWKI 95-3, 2001]

## Einflussnahme und Anpassung der Nutzer

Ein nicht klimatisiertes Gebäude sollte es den Nutzern ermöglichen, die klimatische Umgebung zu verändern und anzupassen (z. B. durch Öffnen der Fenster und Betätigen des Sonnenschutzes, siehe Kap. 3.2). Nach [Kruppa et al., 2002] äußern 85 % von befragten Büronutzern den Wunsch nach direkter Einflussnahme auf das Raumklima. Die Untersuchung zeigt auch, dass in diesem Falle die – selbstberichteten - Befindlichkeitsstörungen der Gebäudenutzer geringer sind, als in einem Gebäude ohne diese Einflussmöglichkeit.

Das Gebäude sollte keine Nutzung beinhalten, die eine strikte Kleiderordnung erfordert, da diese die Anpassung der Nutzer an das Klima erschwert. Ein Berechnungsbeispiel für unterschiedliche Bekleidungsgrade in der gleichen thermischen Umgebung unterstreicht die negativen Auswirkungen von Kleiderordnungen auf die thermische Behaglichkeit (Tab. 6.4). Das Kleiderordnungen auch flexibel gehandhabt werden können, zeigt die Energiesparinitiative „Cool Biz“ in Japan. Danach waren Regierungsangestellte und die Wirtschaft dazu aufgerufen, zwischen dem 01.06. und dem 30.09.2005 ohne Krawatte und Jackett im Büro zu arbeiten [Arita, 2005]. Die Raumtemperatur soll so bis 28 °C ansteigen können. Bei einer Befragung von 50.000 Angestellten am 01.08.2004 gaben 43 % an, der Initiative zu folgen [Anonym, 2005].

Wärmeschutzgrade der Bekleidung	PMV	PPD	Kategorie
clo 0,5: leichte lange Hose (kurzer Rock), T-Shirt	0,22	5,97	A (PPD < 6)
clo 0,7: lange Hose (Rock), Unterhemd, langärmeliges Hemd	0,52	10,72	C (PPD < 15)
clo 1,0: Anzug (Kostüm)	0,85	20,36	-

**Tab. 6.4:** Auswirkungen unterschiedlicher Bekleidungsgrade auf die thermische Behaglichkeit. Die operative Temperatur liegt bei 26 °C, die relative Luftfeuchte bei 50 %, die Raumluftgeschwindigkeit bei 0,13 m/s und die metabolische Rate bei 1,2 (sitzende Tätigkeit). Die [DIN EN ISO 7730:2006-05] legt unterschiedliche Kategorien für das thermische Empfinden fest (Tab. 3.6). Danach wird mit der sehr leichten Bekleidungskombination Kategorie A und mit dem mittleren Bekleidungsgrad (clo 0,7) Kategorie C erreicht. Mit einem Anzug (Kostüm) ist das PPD-Votum im angegebenen Klima nicht mehr akzeptabel.

## Temperaturerwartung der Nutzer

Ein Gebäude ohne aktive Kühlung weist in heißen Sommerperioden eine erhöhte Temperaturdynamik auf. Bei der Entscheidung zu solch einem Sanierungskonzept sollten die Nutzer möglichst früh und realistisch informiert werden, um eine Entscheidung gegen ihren Willen zu vermeiden. Wird auf eine vorhandene Klimaanlage aus Gründen eines zu hohen Energieverbrauchs und

nicht wegen Nutzerunzufriedenheit verzichtet und sind die Nutzer vor und nach der Sanierung identisch, so ist Vorsicht geboten. Da die Nutzer auch im Sommer an konstant kühle Raumtemperaturen gewöhnt sind, werden sie einer größeren Temperaturdynamik besonders kritisch gegenüber stehen (siehe Kap. 3.2.2). Ein Instrument die Nutzererwartungen an das Raumklima auszuloten sind z. B. Nutzerbefragungen [Gossauer et al., 2006]. Von Bedeutung ist hier auch die rechtliche Seite, siehe „Besitzstruktur“.

### **Besitzstruktur**

In den letzten Jahren wurden eine Reihe von Gerichtsurteilen (z. B. [OLG Hamm, 1994], [OLG Rostock, 2000] und [LG Bielefeld, 2003]) zum Thema der sommerlichen Raumlufttemperaturen gefällt, bei denen stets Mieter gegen Vermieter mit dem Argument der eingeschränkten Gebrauchstauglichkeit der Immobilie geklagt hatten (siehe Kap. 3.4).

Bei Sanierungen mit Maßnahmen der passiven Kühlung ist es aufgrund des dynamischen Raumklimas kaum möglich, feste Temperaturgrenzen (z.B. 26 °C) zu garantieren. Auch ist der Betrieb eines Gebäudes mit passiven Kühlungsmaßnahmen gegen den Willen der Mieter nicht denkbar.

Vorteilhaft ist daher eine Struktur, bei der Nutzer und Besitzer identisch sind. Hier ist die Akzeptanz von teilweise höheren Innenraumtemperaturen nach vorheriger Absprache unproblematisch, da das Mietrecht nicht zur Anwendung kommt. Sonderabmachungen zwischen Planer und Gebäudebesitzer zu Temperaturüberschreitungen helfen nachfolgende Rechtsstreitigkeiten zu vermeiden.

### **Sicherheit**

Soll die Außenluft über Nachtlüftung als Wärmesenke erschlossen werden, so ist das Lüftungskonzept auf die Sicherheitsanforderungen abzustimmen. Bei Räumen, deren Tür nachts aus Sicherheitsgründen (Datenschutz, Geschäftsunterlagen) geschlossen bleiben muss, sollte frühzeitig geklärt werden, ob geöffnete Oberlichter oder Überströmelemente zum Flur möglich sind (freie Lüftung oder Abluftabsaugung im Flur), oder nicht (mechanische Abluftanlage mit Abluftabsaugung im Büro). Der Versicherungsschutz von Gebäuden birgt bei nachts geöffneten Fassadenbereichen (Lüftungsklappen, Fenster) aus Sicht der Versicherer zwei kritische Punkte: Schäden durch Einbruch (EG) oder über die Lüftungsklappen eindringendes Regenwasser. Die Versicherungssumme wird immer objektbezogen festgelegt, eine frühzeitige Klärung welche Lösungen für die Versicherung zu welchem Preis akzeptabel sind, ist von Vorteil.

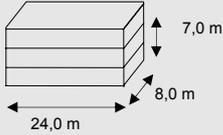
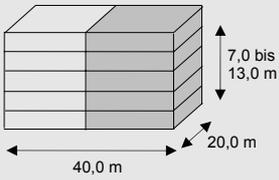
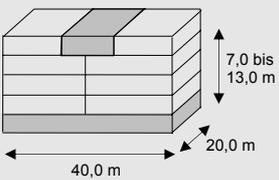
### **Schall / Akustik- Anforderungen**

Es muss untersucht werden, welches Maß an Schallübertragung bzw. Sprachverständlichkeit zwischen den Büros und dem Flur tolerabel ist. Hohe Anforderungen an den Schallschutz können zwar erfüllt werden, sind jedoch in Verbindung mit passiver Kühlung über die Lüftung technisch aufwändiger und weisen höhere Investitionskosten auf. Die raumakustischen Verhältnisse (Nachhallzeit) stellen bei den hier betrachteten Raumgrößen in der Regel auch bei unverkleideten, also akustisch unbedämpften, Decken kein Problem dar.

## Brandschutz - geplante Nutzungseinheiten und Größe

In kleinen Bürogebäuden ist die freie Lüftung bezüglich des Brandschutzes fast ohne besondere Anforderungen einsetzbar. In größeren Bürogebäuden ist die Zusammenfassung von Nutzungseinheiten mit weniger als 400 m<sup>2</sup> ohne notwendige Flure zu empfehlen, da in diesen Einheiten ohne Einschränkungen frei gelüftet werden kann. Mit Nutzungseinheiten < 400 m<sup>2</sup> kann eine Einstufung in die Gebäudeklasse (GK) 4 erfolgen, was weniger Festlegungen bezüglich der Baumaterialien und die Raumaufteilung zur Folge hat. Enthält das Gebäude Nutzungseinheiten > 400 m<sup>2</sup> erfolgt eine Einstufung in die GK 5 und die Gebäudekonstruktion muss der Feuerwiderstandsklasse F90-A entsprechen. Manche Landesbauordnungen können aber auch abweichende Regelungen enthalten. Bei einem – in Bürogebäuden eher unüblichen – Einsatz von Sprinkleranlagen gelten weniger restriktive Anforderungen. Eine nach [Neumann, 2004] erstellte Übersicht über die Vereinbarkeit von Anforderungen des Brandschutzes und der freien Lüftung gibt Tab. 6.5.

**Tab. 6.5:** Vereinbarkeit von Anforderungen des Brandschutzes und der freien Lüftung anhand von Beispielen, Quelle: [Neumann, 2004]  
Verwendete Abkürzungen:  
FW = Feuerwiderstandsklasse,  
A<sub>NE</sub> = Fläche Nutzungseinheit,  
Notwendige Flure (NF): Flure mit bestimmten Anforderungen – z. B. Materialien, Kennzeichnungen -, über die Rettungswege von Aufenthaltsräumen zu Treppenträumen oder ins Freie führen

Gebäudetyp	Anforderung Brandschutz
 <p>7,0 m 24,0 m 8,0 m</p>	<p>Erschließung der Obergeschosse über Treppe Gebäudeklasse 3</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tragende Bauteile inkl. Geschossdecken: FW F30</li> <li>• Treppe: nicht brennbare Stoffe</li> <li>• Offene Verbindung der Geschosse möglich. Bei Rettungsweglänge (Raum im 2. OG mit dem längsten Weg zur Treppe bis zum Ausgang im EG) von ≤ 35 m, keine Außentreppe als Rettungswege erforderlich. Freie Lüftung ohne Einschränkungen möglich</li> </ul>
 <p>7,0 bis 13,0 m 40,0 m 20,0 m</p>	<p>Erschließung der Obergeschosse über zwei Treppen. Geschosse über Trennwand unterteilt, A<sub>NE</sub> &lt; 400 m<sup>2</sup> Gebäudeklasse 4</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• A<sub>NE</sub> &lt; 400 m<sup>2</sup>: ohne NF als innere Rettungswege möglich, Flure als innerer Verkehrsweg sind zulässig</li> <li>• Ausführung der Treppenträume als notwendiger Treppenraum (als Rettungsweg)</li> <li>• Trennung der Geschosse notwendig</li> <li>• Innerhalb einer A<sub>NE</sub> &lt; 400 m<sup>2</sup> Verbindung von zwei Geschossen über offene Treppe (Σ = &lt; 400 m<sup>2</sup>) möglich</li> <li>• Freie Lüftung innerhalb der A<sub>NE</sub> uneingeschränkt möglich (Querlüftung). Nutzung Auftriebswirkung des Treppenraums nur mit durch Rauchmelder gesteuerte Klappen, oder über Schacht mit Brandschutzklappen möglich.</li> </ul>
 <p>7,0 bis 13,0 m 40,0 m 20,0 m</p>	<p>EG: Nutzung als zusammenhängender Raum, Mindestens ein OG A<sub>NE</sub> &gt; 400 m<sup>2</sup> mit mittigem Kommunikationsbereich Gebäudeklasse 5</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• gesamtes Gebäude: Gebäudekonstruktion FW F90-A. Geschosstrennung notwendig.</li> <li>• Obergeschoss mit A<sub>NE</sub> &lt; 400 m<sup>2</sup> NF zu Treppen erforderlich. Freie Lüftung über NF nicht möglich, Flur kann durch einen Kanal überbrückt werden, ist dann aber von Lüftung abgekoppelt. Wird er in die Lüftung integriert, müssen mit Rauchmelder gesteuerte Klappen eingebaut werden.</li> </ul>

## Bewertung der gebäudeunabhängigen Faktoren

**Tab. 6.6:** Gebäudeunabhängige Faktoren, die für eine Bestimmung des Gebäudepotentials für eine Sanierung mit Maßnahmen der passiven Kühlung relevant sind. Verwendete Abkürzungen:

$\vartheta_a$  = Außentemperatur, KGT = Kühlgradtage

	günstig	mittel	ungünstig
Klima	 Wenige Hitzeperioden Wenige Sommernächte mit $\vartheta_a \leq 18^\circ\text{C}$ Wenige KGT (Bsp. Dresden)	 Einige Hitzeperioden Einige Sommernächte mit $\vartheta_a \leq 18^\circ\text{C}$ Mittlere Anzahl KGT (Bsp. Zürich)	 Viele Hitzeperioden Viele Sommernächte mit $\vartheta_a \geq 18^\circ\text{C}$ Hohe Anzahl KGT (Bsp. Rom)
Interne Lasten	 <150 Wh/[m <sup>2</sup> <sub>NGFd</sub> ]	 <200 Wh/[m <sup>2</sup> <sub>NGFd</sub> ]	 >200 Wh/[m <sup>2</sup> <sub>NGFd</sub> ]
Kleidung	 Bekleidung frei wählbar		 Kleiderordnung
Temperaturerwartung	 Nutzer sind bereit im Sommer höhere Temperaturen zu akzeptieren		 Nutzer sind nicht bereit im Sommer höhere Temperaturen zu akzeptieren
Sicherheit	 Raumtüren innerhalb einer Nutzungseinheit können nachts offen bleiben, Außenfassade kann geöffnet werden		 Raumtüren innerhalb einer Nutzungseinheit müssen nachts geschlossen werden, Außenfassade muss geschlossen werden.
Schall	 Geringfügige Geräuschübertragungen zwischen Büros und Verkehrsflächen ist akzeptabel		 Hohe Anforderungen an den Schallschutz zwischen Büros und Verkehrsfläche
Brandschutz	 Nutzungseinheiten von < 400 m <sup>2</sup> sind möglich		 Nutzungseinheiten von > 400 m <sup>2</sup> sind notwendig
Besitz	 Nutzer und Besitzer sind identisch		 Nutzer und Besitzer sind nicht identisch

### 6.2.2 Gebäudebezogene Faktoren

#### Umgebende Bebauung

Neben dem Position des Gebäudes (freistehend, Bestandteil einer Zeilenbebauung, etc.) spielt das nahe Umfeld eine große Rolle für das Mikroklima (siehe Kap. 5.1.2). Eine städtische Lage sorgt für Temperaturen, die von den Klimadaten einer nahe gelegenen Messstation erheblich nach oben abweichen können (Hitzeinsel). Ist das Gebäude Bestandteil eines engen Straßenzuges mit hohen Gebäuden, so sind die Fassaden tagsüber durch gegenüberliegende Gebäude teilweise verschattet mit geringeren Wärme-

einträgen (solar) als Konsequenz. Nachts verhindert dagegen der kleinere „sichtbare Himmelsausschnitt“ die Emission von langwelliger Strahlung zum Himmel und die Temperaturen im Straßenzug sinken nur langsam [Geros et al., 2005].

Die umgebende Bebauung beeinflusst die Wirksamkeit der freien Nachtlüftung des Gebäudes in zweierlei Hinsicht: angrenzende Bebauung vermindert die Anzahl der möglichen Eintrittsflächen der Außenluft in das Gebäude und der bauliche Kontext verändert das Windprofil (Stärke und Richtung). Der Luftstrom in ein Gebäude wird u. a. durch die Druckverteilung um das Gebäude, besonders aber durch diejenige an den Lüftungsöffnungen bestimmt. Die Druckverteilung ist die antreibende Kraft für die Lüftung, während der Strömungswiderstand u. a. durch die Beschaffenheit der Öffnung bestimmt wird.

### Baukonstruktion - Speichermasse

Die Speichermasse (Wärmekapazität) eines Gebäudes stabilisiert die Raumtemperatur. Große Speichermassen sorgen für eine Glättung der Temperaturschwankungen über mehrere Tage.

Das Wärmespeichervermögen eines homogenen Baustoffes kann zunächst mit der potentiell vorhandenen Speichermasse ( $c \cdot \rho$ ) und dem Wärmeeindringkoeffizienten ( $b$ ) beschrieben werden. Die speicherwirksame Schichtdicke wird durch die Eindringtiefe ( $\delta$ ) definiert, die wiederum von der Periodenlänge der Temperaturschwankung abhängig ist.

Das Maß für die Geschwindigkeit, mit der sich eine Temperaturänderung im Material ausbreitet, ist die Temperaturleitfähigkeit ( $\alpha$ ). Eine ausführliche Darstellung enthält Kapitel 5.4. Dort wurde auch dargestellt wie das Wärmespeichervermögen eines Raumes mit mehrschichtigen Bauteilen durch diverse Normen beurteilt wird.

Für eine grobe Bestimmung im Rahmen der Gebäudetypologie sind die Werte der [SIA V382/2, 1992] geeignet (Tab. 6.7).

	Speicherwirksame Masse eines Raumes (kg/[m <sup>2</sup> K])
leicht	< 300
mittel	300 - 400
schwer	> 400

**Tab. 6.7:** Bewertung der speicherwirksamen Masse eines Raumes nach [SIA V382/2, 1992]

### Geschosshöhe

Beim Einbau einer Zu- und Abluftanlage sollte die lichte Raumhöhe in den Räumen mit potentieller Leitungsführung (Flur und an diesen angrenzende Bereiche im Büroraum) mindestens 3,0 m betragen. Bei einer Deckenabhängung von etwa 0,5 m bliebe dann eine Raumhöhe von 2,5 m erhalten. Bei reinen Abluftanlagen sind auch Raumhöhen von 2,8 m denkbar, da hier eine Deckenabhängung von 0,3 m möglich ist (keine Kreuzungspunkte). Bei diesen Mindesthöhen ist allerdings nicht der Raumeindruck berücksichtigt, der sich mit Verringerung der Deckenhöhe unvorteilhaft verändern kann.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Anmerkung: Die Vorgängerregelung der jetzigen ArbStättV sah im § 23 eine Mindesthöhe von 2,5 m für Räume < 50 m<sup>2</sup> vor, die jetzige [ArbStättV, 2004] schreibt nur noch eine „ausreichende lichte Höhe“ vor.

### Außenbezug - Stellenwert der Gebäudehülle

Sind die Räume und die Arbeitsplätze an die Außenfassade angebunden, so sind in der Regel eine freie Belüftung und eine gute Tageslichtversorgung der Arbeitsplätze möglich. Tageslicht hat mit - abhängig vom Himmelszustand - 90 bis 130 Lumen/Watt<sup>2</sup> eine weitaus höhere Lichtausbeute und damit geringere Wärmelasten als Kunstlicht, sofern es anforderungsgemäß dosiert wird.

Bei „fassadenunabhängigen“ Räumen und Arbeitsplätzen entstehen durch den verstärkten Einsatz von elektrischer Beleuchtung Wärmelasten und es ist in der Regel eine mechanische Lüftung notwendig.

### Verglasungsanteil

Da die Wärmeeinträge über die opaken Flächen dank des heute üblichen Wärmeschutzes gering sind, sind es die Verglasungsanteile und die Kombination aus Glasart und Sonnenschutzsystem ( $g_{\text{tot}}$ -Wert), die in Verbindung mit der Orientierung die Größe der solaren Wärmelasten bestimmen.

Für eine überschlägige Bestimmung bieten zunächst Verglasungsanteile bis 40 % gute Voraussetzungen für geringe externe Wärmelasten. Die Raumtemperaturen der Gebäude sind auch bei ungünstigem Nutzerverhalten beherrschbar. Liegen die Verglasungsanteile höher, so sollten die übrigen Eigenschaften des Gebäudes daraufhin betrachtet werden, ob eine „Kompensation“ durch Speichermasse, reduzierte interne Lasten und eine tiefe Nachtlüftungstemperatur möglich ist [Birtles et al., 1996]. Nachteilig dabei ist, dass die Gebäude, z. B. bei ungünstigem Nutzerverhalten, für Überhitzungen anfälliger sind.

Im Zuge einer Sanierung ist es wahrscheinlich, dass die Fassade (wenn sie nicht tragender Bestandteil der Gebäudehülle ist) erneuert wird. In diesem Fall können auch der Fensterflächenanteil und die Verglasungseigenschaften angepasst werden (siehe Kap. 5.3.1).

### Bürokonzept - Innere Aufteilung

Vorteilhaft sind Ein- oder Mehrpersonenbüros. Diese können einerseits frei belüftet und belichtet werden und ermöglichen andererseits die Einflussnahme der Nutzer auf das Raumklima (Lüften, Sonnenschutz). Auch Kombibüros sind unter bestimmten Voraussetzungen<sup>3</sup> geeignet. Ungünstig sind Großraumbüros mit flexiblen Möblierungsoptionen. Hier muss beispielsweise der ganze Raum mit einer Nennbeleuchtungsstärke von 500 Lux beleuchtet werden, da sich die Differenzierung in Arbeits- und Verkehrsflächen ändern kann. Weiter muss bei dieser Raumart ein statistisch mittleres (konstantes) Klima bereitgestellt werden.

<sup>2</sup> mit Sonnenschutzglas sind auch 200 Lumen/Watt zu erreichen

<sup>3</sup> z. B. Zweibünder mit mittiger Kombizone, die nicht als vollwertiger Arbeitsplatz genutzt wird

**Bewertung der gebäudebezogenen Faktoren**

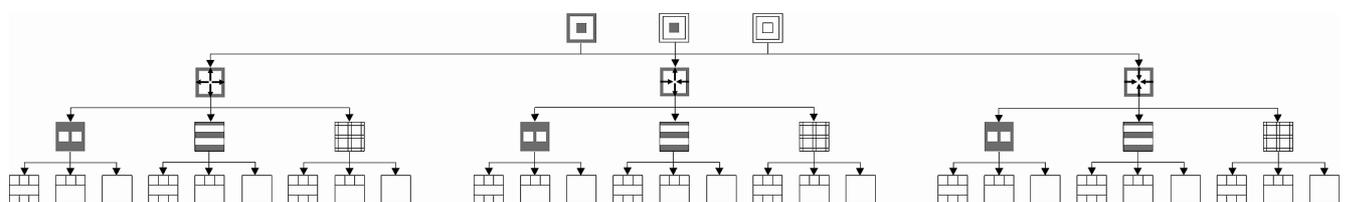
**Tab. 6.8:** Gebäudebezogene Faktoren, die für eine Bestimmung des Gebäudepotentials für eine Sanierung mit Maßnahmen der passiven Kühlung relevant sind. Verwendete Abkürzungen: F = Fassade, IW = Innenwände

	günstig	mittel	ungünstig
<b>Kontext</b>			
	Freistehend (gute freie Durchlüftung möglich)	Zweiseitig angrenzende Gebäude (Querlüftung möglich)	Zweiseitig angrenzende Bebauung, enge Hofsituation
<b>Speicher- masse</b>			
	Schwere Bauweise (Beton, Mauerwerk) > 400 kg/m <sup>2</sup>	Mittelschwere Bauweise 300 – 400 kg/m <sup>2</sup> IW z. T. leicht, F z. T. massiv / F leicht, IW schwer	Leichte Bauweise < 300 kg/m <sup>2</sup> (Holzständer- oder Pfosten / Riegelkonstruktionen)
<b>Außenbezug</b>			
	Räume an Umgebung angebunden (freie Belüftung, Tageslichtnutzung)	tiefe und / oder „gefangene“ Räume	Räume nicht an Umgebung angebunden (mech. Be- und Entlüftung, elektr. Beleuchtung)
<b>Fassade</b>			
	Verglasungsanteil 25 - 35 % (Lochfassade)	Verglasungsanteil 35 - 60 %, (Bandfassade)	Verglasungsanteil ≥ 60 % (Ganzglasfassade)
<b>Bürokonzept</b>			
	Zellenbüros	Grosse Mehrpersonenbüros, Kombibüros	Großraumbüros
<b>Geschoss- höhe</b>			
	> 3 m (licht)		< 3 m (licht)

**6.2.3 Typologie**

Zu welchen Gebäudetypen sich die genannten Eigenschaften zusammenstellen lassen, zeigt Abb. 6.3. Hier wird allerdings noch nicht die Wahrscheinlichkeit möglicher Kombinationen berücksichtigt. So ist bei der leichten Bauweise der Typ mit einer Ganzglasfassade und Großraumbüros, die nicht an die Umgebung angebunden sind, wahrscheinlich, ein Gebäude mit den selben Eigenschaften und einer Lochfassade hingegen eher selten.

**Abb. 6.3:** Gebäude mit schwerer, mittelschwerer und leichter Bauweise



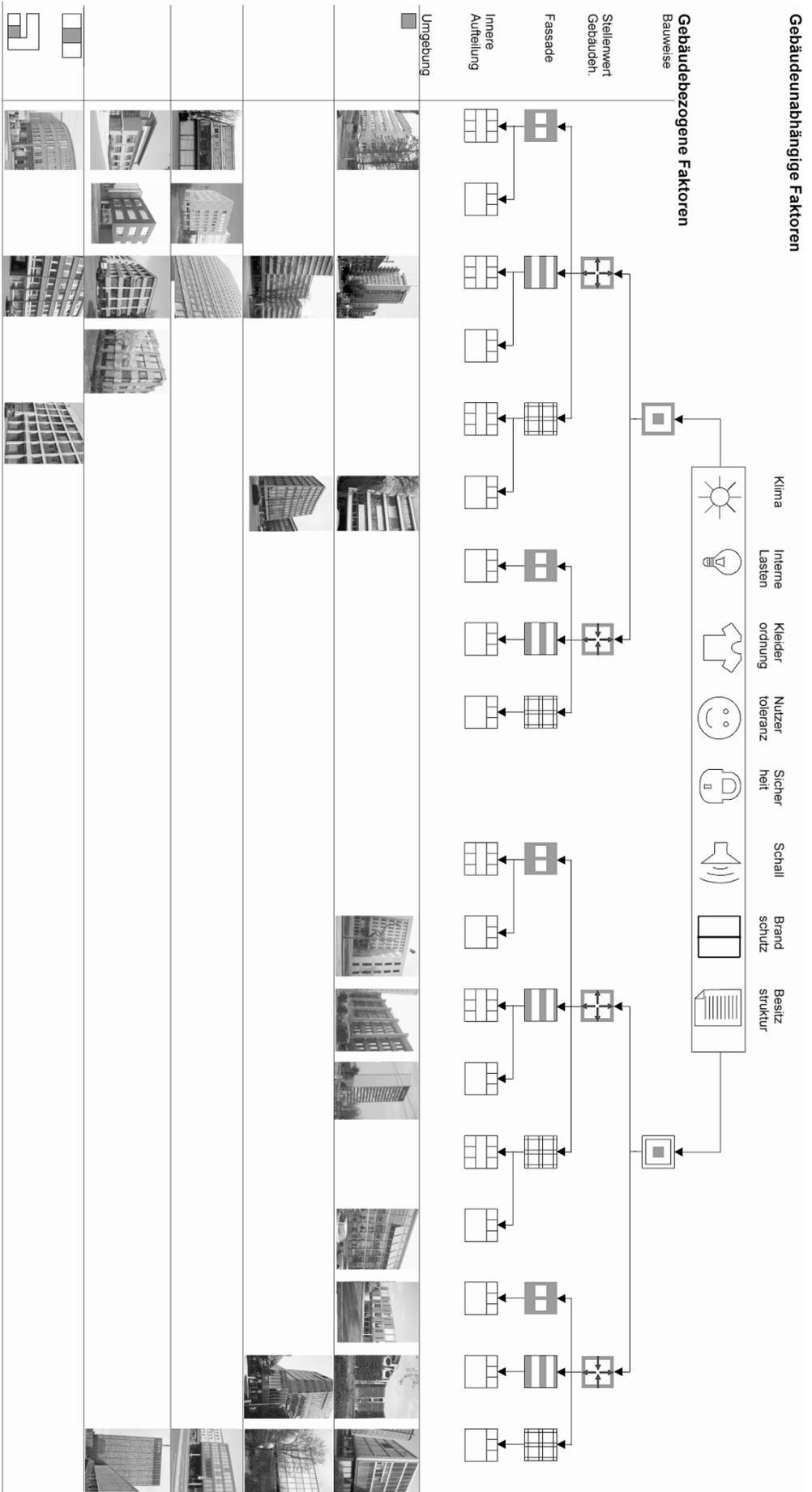
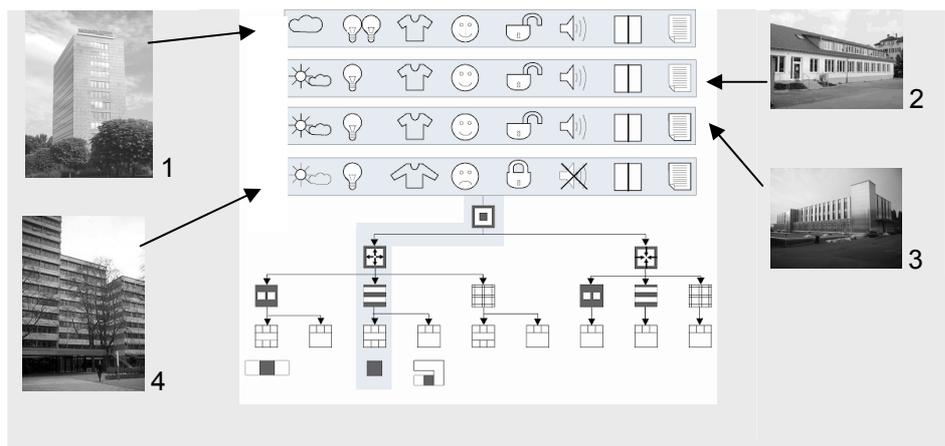


Abb. 6.4: Gebäude, die für die Sanierung mit Maßnahmen der passiven Kühlung in Frage kommen.

Abb. 6.4 zeigt die Gebäudetypen, die günstige Voraussetzungen für die Sanierung mit Maßnahmen der passiven Kühlung bieten (detaillierte Beschreibung der Gebäudetypen, siehe Tab. A6.2.3-1 und -2). Dabei entfallen zunächst die Gebäude mit leichter Bauweise und diejenigen, die als innere Aufteilung eine Großraumstruktur bieten.

Wie sich die Fallbeispiele aus Kap. 2 in die Typologie einordnen lassen zeigt Abb. 6.5. Danach haben die Gebäude sehr ähnliche Eigenschaften, einzig das Gebäude 4 hat abweichende gebäudeunabhängige Parameter, wie z. B. eine gemäßigte Kleiderordnung (im Gegensatz zu keiner Kleiderordnung bei den anderen Gebäuden) und eine wenig tolerante Erwartung an das Raumklima.



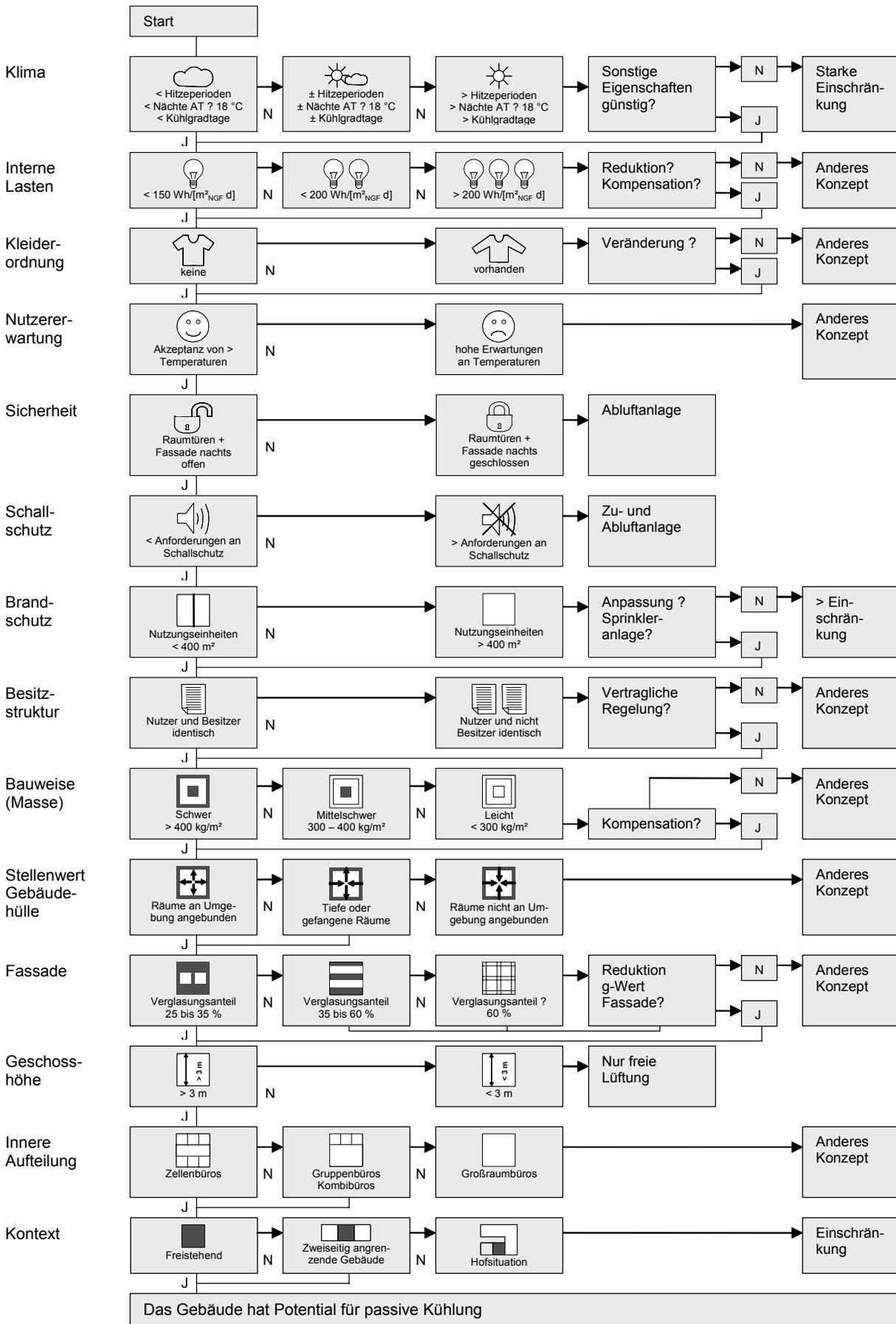
**Abb. 6.5:** Einordnung der Fallbeispiele in die Typologie.

Verwendete Abkürzungen:  
1 = Gebäude 1; 2 = Gebäude 2; 3 = Gebäude 3;  
4 = Gebäude 4

Anmerkung zu Gebäude 4:  
Dieses Gebäude hat eine schwere Bauweise, beim sanierten Gebäude ist die speicherfähige Masse jedoch durch die abgehängten Decken und Brüstungsverkleidungen vom Raumklima entkoppelt.

## 6.2.4 Entscheidungsmatrix zur Einschätzung des Gebäudepotentials

Nachfolgende Matrix (Abb. 6.6) vereint die gebäudeunabhängigen und die gebäudebezogenen Kriterien. Damit ist es möglich, die prinzipielle Eignung eines Gebäudes für ein passives Kühlkonzept (Nachtlüftung) in einem sehr frühen Stadium der Entscheidungsfindung festzustellen. Der nachfolgende Schritt wäre dann die Erarbeitung möglicher Sanierungskonzepte.



**Abb. 6.6:** Entscheidungs-Matrix  
Verwendete Abkürzungen: J = Ja, N = Nein

## 6.3 Zusammenfassung

Die Literaturrecherche zeigt, dass es bisher keine Typologie für Bürogebäude hinsichtlich ihrer Eignung für die passive Kühlung gibt. Daher wurden im weiteren die für ein solches Kühlkonzept relevanten gebäudeunabhängigen und die gebäudebezogenen Eigenschaften erfasst und bewertet. Die vorgestellte Typologie ermöglicht es Bürogebäude zu klassifizieren. Das Gebäudepotential für die passive Kühlung kann mit der Entscheidungsmatrix beurteilt werden.

Es gilt jedoch zu bedenken, dass das Raumprogramm eines Gebäudes in der Regel eine uneinheitliche Raum- und Nutzungsstruktur aufweist. Auch baukonstruktiv können im selben Baukörper unterschiedliche Zonen auftreten<sup>4</sup>. Um miteinander konkurrierende Haustechnikkonzepte zu vermeiden, besteht die Notwendigkeit in der Phase der Grundlagenermittlung (Leistungsphase 1, HOAI) einen Überblick darüber zu gewinnen, wie groß der Anteil des Gebäudes ist, für den eine Sanierung mit Maßnahmen der passiven Kühlung überhaupt in Frage kommt. Ein Fragenkatalog als Entscheidungshilfe für den Teil der Grundlagenermittlung, der sich mit möglichen Haustechnikkonzepten befasst, wurde parallel zur Typologie erarbeitet und findet sich im Anhang (Info A6.3-1).

Wie sich nun anhand von zwei Gebäuden, die ein hohes Eignungspotential für die passive Kühlung aufweisen, im Anschluss an eine Bestandsanalyse Sanierungskonzepte umsetzen lassen, zeigen die nachfolgenden Kapitel.

<sup>4</sup> z. B. Staffelgeschoss in Leichtbauweise auf massivem Baukörper, wie dies bei Gebäude 3 und Gebäude 2 (hier ausgebautes DG) der Fall ist.

## 6.4 Literatur

- [ArbStättV, 2004] *Verordnung über Arbeitsstätten*: BGBl I S. 2179.
- [DIN EN ISO 7730:2006-05] *Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit (ISO 7730:2005); Deutsche Fassung EN ISO 7730:2005*. Berlin: Beuth Verlag.
- [DIN V 18599-10:2005-07] *Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Beheizung, Kühlung, Belüftung, Beleuchtung und Warmwasserbereitung - Teil 10: Nutzungsbedingungen, Klimadaten*. Berlin: Beuth Verlag.
- [LG Bielefeld, 2003] *Bielefelder Klimaurteil*. April 2003. Urteil: 3 O 411/01.
- [OLG Hamm, 1994] *Raumtemperaturgrenzen in gemieteten Gewerberäumen (Reisebüro)*. 18.10.1994. Urteil: 7 U 132/93, 143. Neue Juristische Wochenschrift RR 195.
- [OLG Rostock, 2000] *Sommerliche Aufheizung der Mieträume*. 29.12.2000. Urteil: 3 U 83/98, 802. Neue Juristische Wochenschrift RR 201.
- [SIA 380/1, 2001] *Thermische Energie im Hochbau*. Zürich (CH): Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein.
- [SIA V382/2, 1992] *Kühlleistungsbedarf von Gebäuden*. Zürich (CH): Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein.
- [SWKI 95-3, 2001] *Jährlicher Energiebedarf von Lüftungstechnischen Anlagen*. Schönbühl (CH): Schweizerischer Verein von Wärme- und Klima-Ingenieuren.
- [Anonym, 2005] Anonym. 2005. "Workers eagerly embrace 'Cool Biz'". *The Japan Times*, 19.08.2005, Online Ausgabe.
- [Arita, 2005] Arita, E. 2005. "Remove your tie - save the planet. Are dress codes key to global warming?". *The Japan Times*, 30.04.2005, Online Ausgabe.
- [Birtles et al., 1996] Birtles, A. B.; M. Kolokotroni; M. D. Perera. 1996. "Night Cooling and Ventilation Design for Office-Type Buildings". *Renewable Energy* 8 (1-5), 259-263.
- [Bischof et al., 2003] Bischof, W., et al. 2003. *Exposition und gesundheitliche Beeinträchtigungen in Bürogebäuden - Ergebnisse des ProKlima-Projektes*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- [Burton et al., 2001] Burton, S.; M. Sala. 2001. *Energy efficient office refurbishment*. 1. Auflage. London (GB): James & James (Science Publishers) Ltd.
- [DETR, 2000] DETR. 2000. *Energy Consumption Guide 19 - Energy Use in Offices*. London (GB): Department for Environment, Transport and the Regions (DETR), Energy Efficiency Best Practice Programme.
- [DUDEN, 2005] DUDEN. 2005. *Das Fremdwörterbuch*. 8. Auflage. Mannheim: Bibliographisches Institut & F.A. Brockhaus AG.
- [Erhorn et al., 1992] Erhorn, H.; M. Gierga. 1992. *Bestand und Typologie beheizter Nichtwohngebäude in Westdeutschland - Analyse und Entwicklung energierelevanter Gebäudekenndaten*. Berichts-Nr.: WB 72/1992, Stuttgart: Fraunhofer Institut für Bauphysik.
- [Geros et al., 2005] Geros, V., et al. 2005. "On the cooling potential of night ventilation techniques in the urban environment". *Energy and Buildings* (37), 243-257.
- [Gossauer et al., 2006] Gossauer, E.; R. Leonhart; A. Wagner. 2006. *Workplace occupant satisfaction - a study in sixteen german office buildings*. Comfort and Energy Use in Buildings - getting them right. Windsor (GB).
- [Gottschalk, 1963] Gottschalk, O. 1963. *Flexible Verwaltungsbauten: Entwurf, Ausbau, Einrichtung, Kosten, Beispiele*. Quickborn: Schnelle.
- [Hascher et al., 2002] Hascher, R.; S. Jeska; B. Klauck (Hrsg.). 2002. *Entwurfsatlas Bürobau*. Basel, Boston, Berlin: Birkhäuser - Verlag für Architektur.
- [Kruppa et al., 2002] Kruppa, B.; W. Bischof; M. Bullinger-Naber. 2002. "Positive und negative Wirkungen raumluftechnischer Anlagen auf Befindlichkeit, Leistungsfähigkeit und Gesundheit". *gi Gesundheits-Ingenieur* 123 (2), 88-95.
- [Laing, 1998] Laing, A. 1998. *New environments for working : the re-design of offices and environmental systems for new ways of working*. London (GB): Building Research Establishment (BRE); DEGW London Limited.
- [Neumann, 2004] Neumann, P. 2004. *Untersuchungsbericht Brandschutz*. Kassel / Meschede: Neumann Krex & Partner - Ingenieurbüro für Brandschutz und Bauwesen GmbH.

- [Reinert, 2002] Reinert, M. 2002. *OSCAR 2002 - Büroebenkostenanalyse*. Düsseldorf: Jones Lang LaSalle.
- [Santamouris, 2003] Santamouris, M. 2003. *Energy retrofitting techniques for office buildings*. Harnessing the sun for office buildings. Graz (A), 30. und 31. Mai 2003. EUREC Agency, 75-85.
- [Tombazis et al., 1997] Tombazis, A.; N. Vratsanos. 1997. *Office building Typologies in Europe*. Berichts-Nr.: JOR3-CT96-0034, Athen (GR): Meletitiki - Alexandros N. Tombazis and Associates Architects, Ltd.
- [Wargocki et al., 2006] Wargocki, P.; O. Seppänen (Hrsg.). 2006. *Indoor Climate and Productivity in Offices - How to integrate productivity in life-cycle cost analysis of building services*. Brussels (B): Rehva.



## 7 Vorstellung von zwei Gebäuden mit Sanierungsbedarf

Der erste Teil der Arbeit (Teil A) zeigte deutlich, dass die Entscheidung das sommerliche Raumklima ohne aktive Kühlung zu verbessern weitreichende Konsequenzen auf die Gebäudeplanung hat. Soll ein passives Kühlungskonzept in der Sanierung umgesetzt werden, so lässt sich dieses nicht additiv dem fertigen Gebäudeentwurf hinzufügen, da vielfältige, für das Gelingen des Konzeptes zentrale, Faktoren die Planung von Beginn an beeinflussen. Die Erläuterung dieser Faktoren, wie z. B. die Schaffung optimaler Arbeitsbedingungen, der Umgang mit Rechtsfragen bezüglich des sommerlichen Raumklimas und die Bausteine zur Verbesserung des thermischen Raumklimas, waren Gegenstand des ersten Teils der Arbeit. Den zusammenfassenden Abschluss bildete die Gebäudetypologie, die es erlaubt zu einem frühen Planungszeitpunkt zu bestimmen, welche Gebäude sich für Strategien der passiven Kühlung (Nachtlüftung) eignen.

Der nun folgende zweite Teil der Arbeit (Teil B) wendet die theoretischen Erkenntnisse des ersten Teils auf zwei Gebäude exemplarisch an. Diese Gebäude bieten gemäß der Typologie gute Voraussetzungen für das Senken der Raumtemperaturen mit Nachtlüftung. Gegenstand des folgenden *7. Kapitels* ist zunächst das methodische Vorgehen bei der Gebäudeauswahl und ein Kurzportrait des Ist-Zustands beider Gebäude. Da für eine Sanierung, die angenehme sommerliche Temperaturen schaffen soll, eine über die reine Gebäudeaufnahme hinausgehende Analyse Grundlage ist, werden im *Kapitel 8* die zusätzlichen Werkzeuge vorgestellt und am Beispiel der beiden Gebäude B und W erprobt. Auf Grundlage der Analyseergebnisse stellt das *Kapitel 9* dann Strategien zur Verbesserung des thermischen Komforts für beide Gebäude vor.

### 7.1 Methodisches Vorgehen bei der Gebäudeauswahl

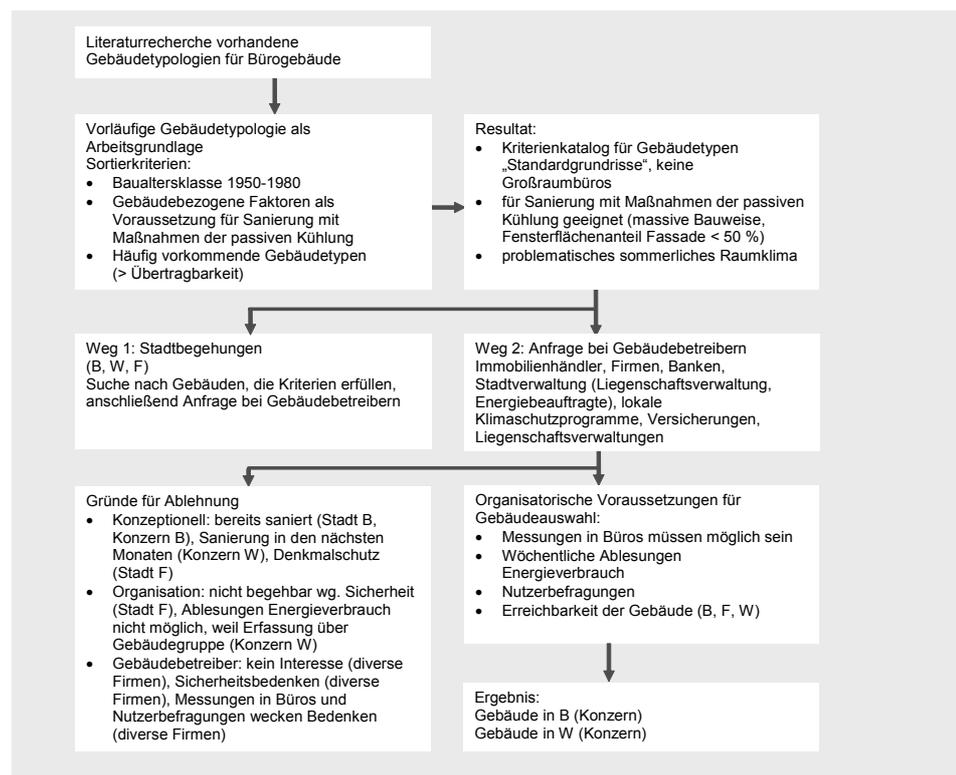
Da die Bestandsanalyse im Sommer und Winter durchgeführt werden sollte, erfolgte die Suche nach geeigneten Gebäuden zu einem frühen Zeitpunkt der Forschungsarbeit. Für den Auswahlprozess wurden somit vorab Kriterien (als Grundlage der später erarbeiteten Typologie, Kap. 6) entwickelt, die Tab. 7.1 zeigt.

	Voraussetzungskriterium	Ausschlusskriterium
Gebäude		
	Baualtersklasse 1950-1980	Denkmalschutz
	Gebäudebezogene Faktoren <ul style="list-style-type: none"> <li>• Schwere Bauweise</li> <li>• Verglasungsanteil &lt; 50 % (bezogen auf Fassade)</li> <li>• Keine Großraumbüros</li> </ul>	Leichtbau
	Häufig auftretende Gebäudetypen (> Übertragbarkeit), Standardgrundrisse	Sonderlösung
	Problematisches sommerliches Raumklima oder hoher Energieverbrauch für Klimatisierung	
	Geplante Sanierung	Nicht in den folgenden zwei Jahren
	Nutzung für Büro und Verwaltung	
Organisation	Durchführbarkeit der Messungen, Ablesungen und Nutzerbefragungen	

**Tab. 7.1:** Vorläufige Auswahlkriterien

Gemäß den gebäudebezogenen Kriterien wurden Stadtbegehungen durchgeführt und parallel dazu diverse Gebäudebetreiber kontaktiert, wobei sich die Strategie der direkten Kontaktaufnahme als erfolgreicher erwies. Viele der angebotenen Gebäude erfüllten jedoch nicht die Voraussetzungskriterien, oder die organisatorischen Voraussetzungen waren nicht gegeben. Häufige Gründe für die Ablehnung seitens der Betreiber waren Sicherheitsbedenken, die geplanten Messungen und Nutzerbefragungen sowie die gebäudebezogene Erfassung der Energieverbräuche. Die Gebäude, die den Auswahlkriterien am besten entsprachen, waren die in Wuppertal (Gebäude W) und Basel (Gebäude B).

Abb. 7.1 zeigt den Akquisitionsprozess in der Übersicht.



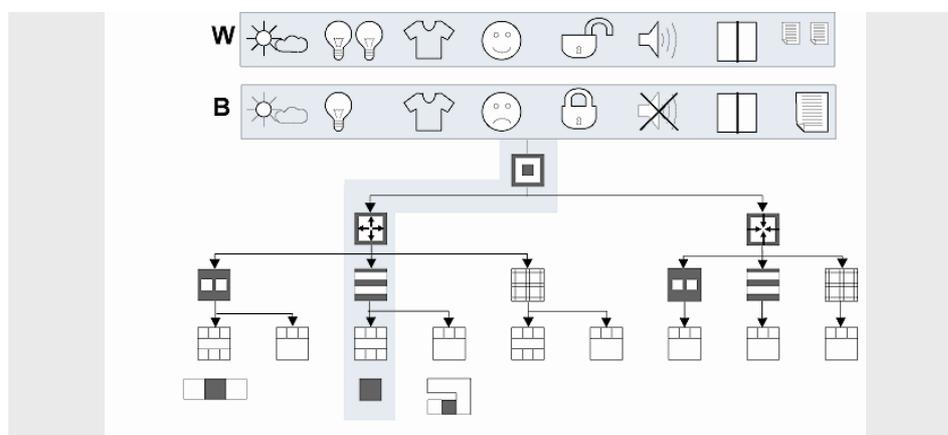
**Abb. 7.1:** Akquisition der Fallbeispiele  
Verwendete Abkürzungen:  
B = Basel, W = Wuppertal,  
F = Freiburg

## 7.2 Einordnung der Gebäude in die Typologie

Die typologische Einordnung beider Gebäude zeigt Abb. 7.2. Danach sind beide Gebäude für die Sanierung mit Maßnahmen der passiven Kühlung geeignet. Zwischen ihnen treten bei einigen gebäudeunabhängigen Faktoren Unterschiede auf:

- Temperaturerwartung der Nutzer ist im Gebäude B höher, da sie von der vorhandenen Klimatisierung geprägt ist.
- Im Gebäude W sind Nutzer und Vermieter nicht identisch.
- Im Gebäude W sind die internen Lasten etwas höher als in Gebäude B.
- Im Gebäude B müssen die Bürotüren nachts geschlossen sein.

Die gebäudebezogenen Faktoren sind bei beiden Gebäuden gleich.



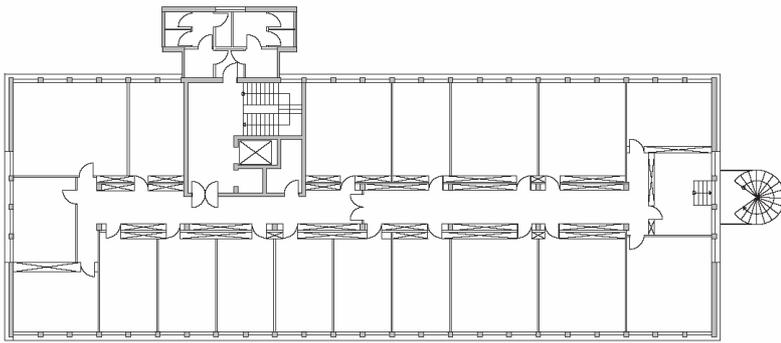
**Abb. 7.2:** Einordnung beider Fallstudien in die Gebäudetypologie.  
Verwendete Abkürzungen:  
B = Gebäude B,  
W = Gebäude W

## 7.3 Kurzportrait Gebäude W

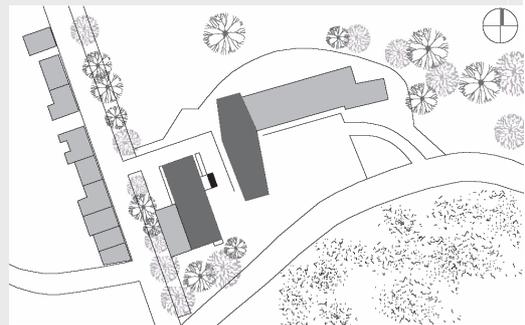
Das Gebäude steht als einer von zwei Hochbauten in städtischer Umgebung und orientiert sich mit seinen Längsfassaden nach Osten und Westen. Der Grundriss des Gebäudes ist als Zweispänner organisiert, in dem sich fast mittig ein Erschließungskern mit massiven Wänden befindet. Seitlich des Erschließungskerns – außerhalb der eigentlichen Gebäudekubatur - ist ein Anbau mit den WC angeordnet. Der Gebäudeeingang befindet sich in einem eingeschossigen Vorbau. Im 3. OG ist das Gebäude durch einen Gang mit dem Nachbargebäude verbunden.



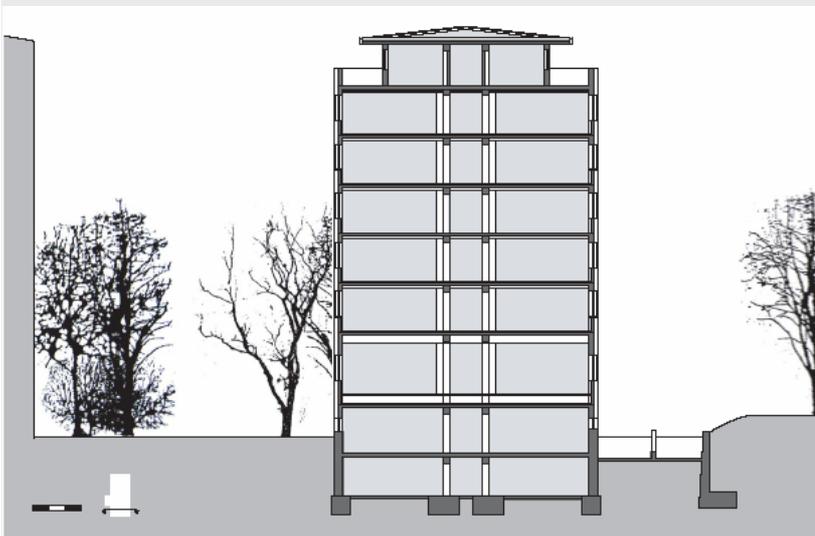
**Abb. 7.3:** Die beiden Gebäude von außen, rechts das in diesem Text dokumentierte Gebäude



**Abb. 7.4:** Regelgrundriss Bestand, der Maßstabsbalken entspricht 3 m



**Abb. 7.5:** Lageplan der Gebäude. Links das als Sanierungsstudie untersuchte Gebäude



**Abb. 7.6:** Schnitt Bestand, der Maßstabsbalken entspricht 3 m



**Abb. 7.7:** Typischer Büroraum

Die Tragstruktur besteht aus dem Kern zur Aussteifung und Stützen. Die Fenster besitzen Kunststoff-Metallverbundrahmen und eine Zweifachverglasung. Bezogen auf die Fassade liegt der Fensterflächenanteil inkl. Rahmen zwischen 17 % (Schmalseiten) und 33 % (Längsseiten). Die Fenster könne geöffnet werden. Die Fassade ist mit hinterlüfteten Natursteinplatten verkleidet.

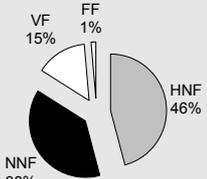
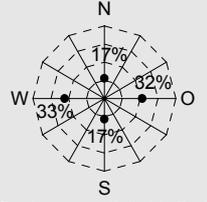
Die Trennwände zwischen den Büros bestehen aus einem recht aufwändigen Leichtbausystem, das zum Planungszeitpunkt eine zukünftig leichte Trennwandversetzung versprach.

### Nutzung

Die Räume vom 2. bis zum 6. OG werden durchweg als Büro- und Besprechungsräume genutzt. Die Belegung der Büros ist unterschiedlich, es gibt Einzel- und Gruppenbüros (bis zu 4 Personen).

Im Erdgeschoss befinden sich ein Lager und der Technikraum für die stillgelegte Klimaanlage. Diese kühlte früher die Räume des 1. OG mit der Telefon- und EDV-Zentrale. Beide Zentralen sind zwischenzeitlich ausgebaut, sodaß sich kein Kältebedarf mehr ergibt. Das 1. OG steht derzeit leer. Im KG sind die Wärmeübergabestation und die Tiefgarage untergebracht. Das 7. OG enthält einen großen Sitzungsraum und eine kleine Wohnung.

**Tab. 7.2:** Gebäudesteckbrief  
Verwendete Abkürzungen:  
VF = Verkehrsfläche,  
FF = Funktionsfläche,  
NNF = Nebennutzfläche,  
HNF = Hauptnutzfläche  
(zur Klärung der Begrifflichkeiten siehe Abb. 4.2).  
Aperturfläche = Lichteintrittsfläche  
Anmerkung zur Grafik  
Raumstruktur: Alle Flächenangaben inkl. KG und EG.  
Die im Vergleich zur HNF große NNF ist auf das KG und das EG zurückzuführen. Der Anteil der momentan genutzten Fläche an der Gesamfläche liegt bei 52 %, die leerstehenden Flächen (eigentlich Büroflächen) machen 14 % aus und der Anteil für Technik und Lager beträgt 34 %.

Gebäude	Baujahr		1972
	Standort		Wuppertal, D
	Nutzung		Verwaltungsgebäude
	Baumaßnahmen		1999 Bau externe Fluchttreppe
Raumstruktur 	Geschosse		EG - 7 OG + DG + KG
	BRI (inkl. EG, KG)	m <sup>3</sup>	26.601
	NGF (inkl. KG, Anlage)	m <sup>2</sup>	6.911
	NGF (exkl. EG, KG)	m <sup>2</sup>	4.246
	HNF	m <sup>2</sup>	3.160
Fassade  Fensterflächenanteil (inkl. Rahmen) bezogen auf Fassade	U-Wert Brüstung und Sturz	W/(m <sup>2</sup> K)	0,33
	U-Wert Fenster	W/(m <sup>2</sup> K)	3,0
	U-Wert Stützen	W/(m <sup>2</sup> K)	2,7
	U-Wert Dach	W/(m <sup>2</sup> K)	0,8
	Aperturfläche / m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub>	-	0,15 – 0,24
	Bauweise		schwer

### Wärmeversorgung

Das Gebäude wird mit Fernwärme in Form von Sattdampf (150 °C) versorgt. Zwei Dampf/Wasser Wärmetauscher erzeugen Warmwasser. Dabei kühlt sich der Dampf auf ca. 55 °C ab<sup>1</sup>.

In einem zweiten Schritt wird das Warmwasser auf Vorlauftemperatur für die Fußbodenheizung gebracht (40 - 45 °C), die im gesamten Gebäude als einziges Wärmeabgabesystem genutzt wird. Die Vorlauftemperatur wird über

<sup>1</sup> Das dabei ausfallende Kondenswasser wird gemessen und so der Wärmeverbrauch bestimmt. Pro Tonne Dampf werden rund 700 kWh frei ( $\Delta T$  95 K).

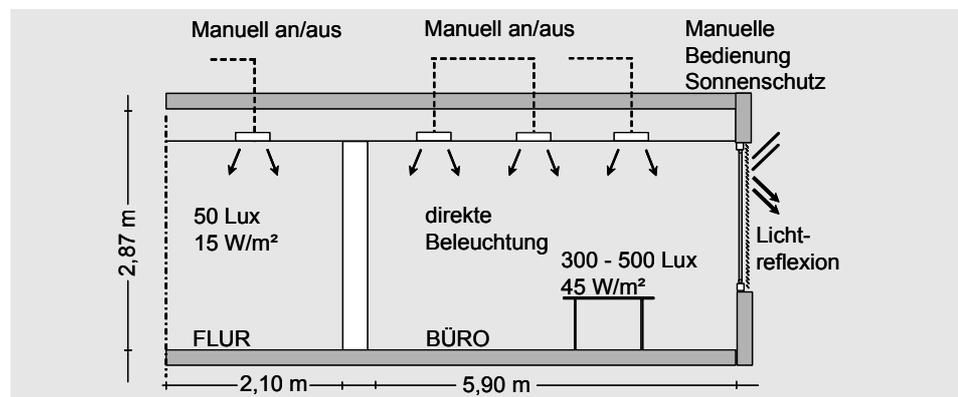
Außen-Temperaturfühler gesteuert, eine raumweise Regelung existiert nicht. Stattdessen können durch Absperrventile nur einzelne Heizschleifen, die mehrere Räume versorgen, abgestellt werden. Für das gesamte Gebäude gibt es eine Nachtabsenkung. Auch das Warmwasser für die Sanitärräume und die Teeküchen wird über die Fernwärme erzeugt. Es gibt keine Zirkulationsleitung. Das gesamte Gebäude (auch die Sanitäranlagen) wird ausschließlich über die Fenster belüftet.

#### *Tageslichtnutzung und elektrische Beleuchtung*

Als Sonnenschutz dient eine außen liegende, manuell bedienbare Jalousie mit Metalllamellen.

Als elektrische Beleuchtung sind pro Fensterachse (Breite: 1,5 m, Raumtiefe: 5,9 m) drei Rasterleuchten, die mit jeweils 4 Fluoreszenzröhren bestückt sind, eingesetzt.

Die Beleuchtung ist in zwei Kreisen schaltbar. Viele der einzelnen Fluoreszenzröhren funktionieren nicht mehr, daher liegt die reale installierte Leistung mindestens 10 % unter den errechneten 45 W/m<sup>2</sup>. Diese installierte Leistung ist fast viermal höher als Angaben nach [DIN EN 13779:2005-05] (12 W/m<sup>2</sup>). In den Büros finden sich nur vereinzelt Tischleuchten, da diese nicht zur regulären Büroausstattung gehören.



**Abb. 7.8:** Schematische Übersicht der Bürobeleuchtung. Weitere Informationen siehe Tab. A7.3-1

### 7.3.1 Sanierungsbedarf Gebäude W

#### *Baulich*

Die Außenfassade ist mit Naturstein verkleidet. Äußerlich weist die Verkleidung keine Schäden auf. Im Bereich Anschluss Fenster / Fassade bestehen Luftundichtigkeiten. Der daraus resultierende (ungewollte) Luftwechsel kann einer der Gründe für die trockene Raumluft sein. Der Luftaustausch führt dazu, dass zusätzlich trockene Außenluft in das Gebäude gelangt, bzw. feuchte Raumluft nach draußen.

Die Eingangssituation über den Vorbau ist nicht repräsentativ. Zusätzlich dazu entsteht ein „Kellereindruck“, da das EG 50 cm unter der Geländekante liegt. Der zweibündige Grundriss ist ungünstig, da die Tiefe der Büros nicht ausgenutzt wird. Der Flur ist schmal und ohne Tageslicht. In einigen Büros gibt

es keinen außen liegenden Sonnenschutz, was im Sommer zu sehr hohen Temperaturen führt.

Im Anbau für die Sanitäranlagen ist nicht ausreichend Raum, um die vorgeschriebene Anzahl der WC für Damen und Herren pro Etage unterzubringen. Weder der Gebäudezugang noch die WC sind barrierefrei.

Das Gebäude entspricht formal den Brandschutzanforderungen, allerdings hat der Zugang zur externen Fluchttreppe über eine innenseitig vor die Bürofenster gestellte Metalltreppe provisorischen Charakter. Bei der Kabelführung ist der Brandschutz nicht gewährleistet, da es keine Abschottung zwischen und auf den Etagen gibt [Puley, 2004].

### Gebäudetechnisch

Die Fußbodenheizung lässt sich schlecht regeln. Dazu kommt, dass einzelne Heizschleifen im Zuge von Trennwandversetzungen beschädigt und daher stillgelegt wurden. Die Räume sind im Winter oftmals zu warm, die Nutzer senken die Temperatur dann über Dauerlüftung. Die Lüftung über die Fenster entspricht nicht mehr den heutigen Komfortanforderungen an Büroarbeitsplätze.

### Motivation für Sanierung mit Maßnahmen der passiven Kühlung

Das Gebäude weist im Sommer gemäß Messung und Befragung zu hohe Raumtemperaturen auf.

**Tab. 7.3:** Übersicht Sanierungsbedarf Gebäude W

Situation			Bewertung
 <p><b>Abb. 7.9:</b> Verbindungsgang</p>	 <p><b>Abb. 7.10:</b> Verbindungsgang von innen</p>	 <p><b>Abb. 7.11:</b> Eingang und Verbindungsgang</p>	<p><b>Eingangssituation, Verbindungsgang</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Unbefriedigende Eingangssituation über Vorbau (Pfeil)</li> <li>• Verbindungsgang erschwert Vermietbarkeit als separate Gebäude</li> <li>• Sanitärräume im Vorbau genügen von der Anzahl der WC nicht den Anforderungen</li> <li>• Vorbau thermisch ungünstig (Transmissionsverluste)</li> </ul>
 <p><b>Abb. 7.12:</b> Treppenhaus</p>	 <p><b>Abb. 7.13:</b> Vorraum</p>	 <p><b>Abb. 7.14:</b> Flur</p>	<p><b>Erschließung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Unattraktives Treppenhaus</li> <li>• Aufzug vorhanden</li> <li>• Flure ohne Tageslicht auf den Etagen</li> </ul>
 <p><b>Abb. 7.15:</b> Unzureichender Sonnenschutz</p>	 <p><b>Abb. 7.16:</b> Zugang zur Feuertreppe</p>	 <p><b>Abb. 7.17:</b> Technische Installationen</p>	<p><b>Büros und Brandschutz</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Unattraktiver, abgewirtschafteter Charakter der Büros, teilweise kein externer Sonnenschutz</li> <li>• Zweiter Fluchtweg vorhanden, Zugang von den Büros hat Baustellencharakter</li> <li>• Kabelverteilung weitgehend ungelöst fehlende Abschottungen zwischen den Abschnitten</li> </ul>

## 7.4 Kurzportrait Gebäude B

Das im Jahr 1957 errichtete Gebäude wird als Verwaltungsgebäude genutzt. Die Tragstruktur besteht aus einem zentralen Kern, durchgehenden Stahlbetonwandscheiben und Stützen. Die Wandscheiben sind mit Naturstein, die Brüstungen sind seit 1980 mit dunkel gestrichenen Metallplatten verkleidet. Ursprünglich bestand die Verkleidung der Brüstungen aus Natursteinplatten. Die Bauweise ist schwer. Im Gebäudekern befinden sich die Aufzüge, eine interne Treppe und die Sanitärräume, die Büros sind fassadenseitig nach Süden, Westen, Norden, oder Osten angeordnet.

Bezogen auf die Fassadenfläche liegt der Fensterflächenanteil (inkl. Rahmen) zwischen 32 und 36 %. Die Fenster sind zu öffnen.

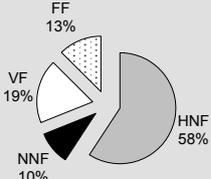
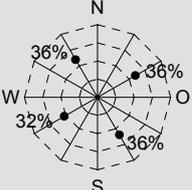
### Nutzung

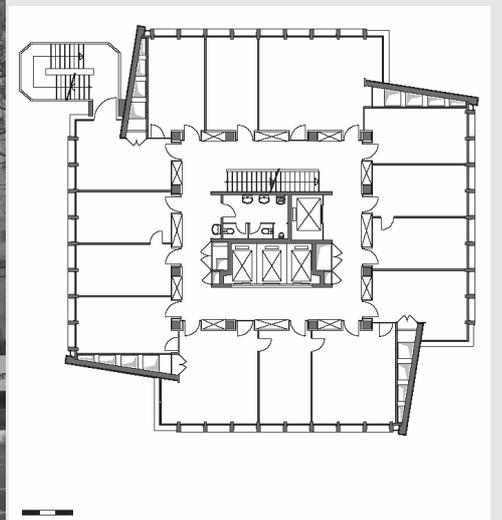
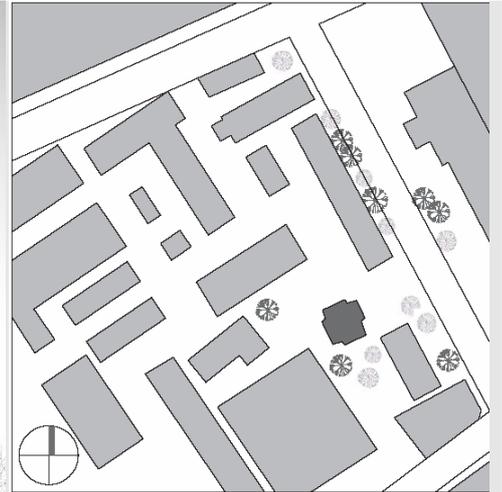
Das Erdgeschoss wird als Eingangsbereich (zweigeschossiger Luftraum) und für die Schalterräume einer Bankfiliale genutzt.

In den übrigen Geschossen befinden sich Ein- bis Dreipersonenbüros und Besprechungsräume, zum Teil auch Archiv- und Kopierräume. Die Haustechnik ist anteilig im DG (Lüftung und Aufzugsmaschinenraum) und im 2. UG (Heiz- und Lüftungszentrale) untergebracht. Das 1. UG dient als Lagergeschoß.

**Tab. 7.4:** Gebäudesteckbrief

Verwendete Abkürzungen:  
 VF = Verkehrsfläche,  
 FF = Funktionsfläche,  
 NNF = Nebennutzfläche,  
 HNF = Hauptnutzfläche  
 (zur Klärung der Begrifflichkeiten siehe Abb. 4.2),  
 Aperturfläche = Lichteintrittsfläche  
 Anmerkung zur Grafik  
 Raumstruktur: alle Flächenangaben inkl. 1. und 2. UG.  
 Der Anteil dieser Geschosse liegt für die FF, VF und NNF jeweils bei 2 % der angegebenen Werte

Gebäude	Baujahr		1957
	Standort		Basel, CH
	Nutzung		Verwaltungsgebäude
	Baumaßnahmen		1975: Bau externe Fluchttreppe 1980: Sanierung Brüstungs- und Sturzelemente
Raumstruktur	Geschosse		EG - 14 OG + DG + 2 KG
	Höhe	m	53
	BRI (inkl. KG 1, KG 2)	m <sup>3</sup>	28.926
	NGF (inkl. KG 1, KG 2)	m <sup>2</sup>	7.315
	NGF (exkl. KG 1, KG 2)	m <sup>2</sup>	6.333
	HNF	m <sup>2</sup>	4.326
Fassade	U-Wert Brüstung und Sturz	W/(m <sup>2</sup> K)	0,4
	U-Wert Wandscheiben	W/(m <sup>2</sup> K)	0,67
	U-Wert Fenster	W/(m <sup>2</sup> K)	3,5
	U-Wert Stützen	W/(m <sup>2</sup> K)	1,17
	U-Wert Dach	W/(m <sup>2</sup> K)	0,93 bzw. 1,03
	Aperturfläche / m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub>	-	0,18 – 0,21
	Bauweise		Schwer
	 <p>FF 13% VF 19% NNF 10% HNF 58%</p>		
 <p>N 36% NE 36% SE 36% S 32% SW 32% W 32%</p>			
Fensterflächenanteil (inkl. Rahmen) bezogen auf Fassade			



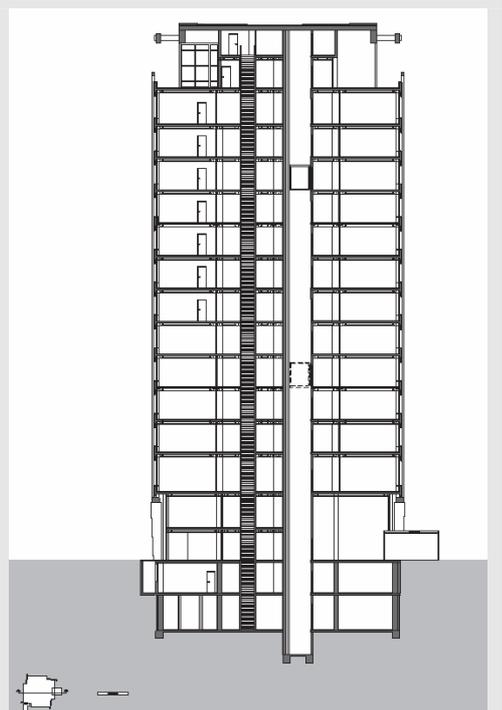
**Abb. 7.18:** (oben links)  
Ansicht Gebäude

**Abb. 7.19:** (oben rechts)  
Lageplan

**Abb. 7.20:** (oben Mitte)  
Regelgrundriß, der Maßstabsbalken entspricht 3 m

**Abb. 7.22:** (unten links)  
Typischer Büroraum

**Abb. 7.21:** (unten rechts)  
Schnitt, der Maßstabsbalken entspricht 3



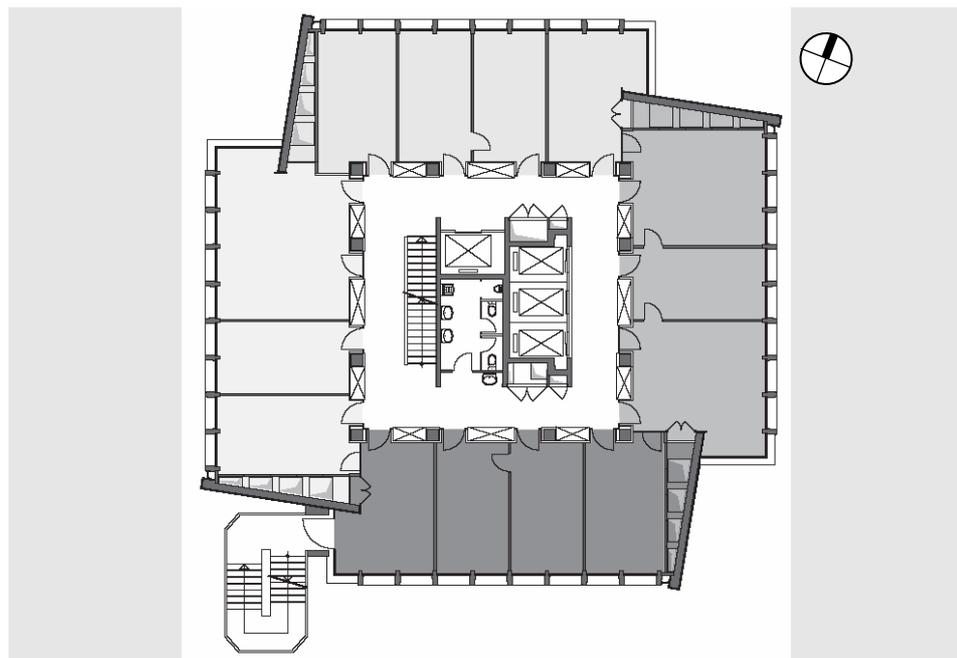
### Wärme- und Kälteversorgung

Die Wärme wird von einer werkseigenen Nahwärmestation bezogen, Kälte erzeugt eine Kältemaschine, die sechs weitere Gebäude auf dem Werksgelände versorgt. Die Nahwärme beliefert das Gebäude mit 110 bis 120 °C heißem Wasser, zwei manuell einstellbare Heißwasser/Warmwasser-Wärmetauscher bringen es auf die gewünschte Vorlauftemperatur zwischen 60 und 70 °C (max. 80 °C) für die Heizungs- und die Lüftungsanlage.

Im Gebäude geben Heizkörper die Grundlast der Wärme ab, die übrige Wärme stellt die Teilklimaanlage mit stillgelegter Be- und Entfeuchtungsfunktion bereit. In den Büros lässt sich die Heizung über thermostatische Ventile regeln, allerdings besteht keine regelungstechnische Verknüpfung zwischen statischer Heizung und der Zuluftanlage.

Die Teilklimaanlage übernimmt auch die Gebäudekühlung im Sommer, indem sie die Büros mit einem konditionierten Frischluft- und einem Umluftanteil teilklimatisiert.

Für die Trinkwarmwasserversorgung steht ein Brauchwarmwasser-Boiler (1500 l) zur Verfügung, der über einen Wärmetauscher an die Nahwärme angeschlossen ist. Das Wasser wird auf einer Temperatur von 55 °C gehalten. Es gibt eine Zirkulationsleitung.



**Abb. 7.23:** Die existierende Teilklimaanlage teilt sich nach der Zentrale in vier Versorgungsstränge auf, die jeweils eine der vier Gebäudeseiten bedienen. Die Abbildung zeigt die Versorgungsbereich für eine Etage (pro Raum ein Bereich). Der Kern (weiß) ist als Abluftzone, mit Absaugung in den WC's organisiert.

### Teilklimaanlage

Die Zuluft wird über eine Hauptanlage und die geschossweisen Umluftzentralen konditioniert. Dabei wird die Zuluft über dem Westeingang im EG angesaugt und mit einem Staubfilter gereinigt. Im Winter bringt ein Luftherhitzer (VL 90 °C und RL 70 °C) die Außenluft auf einen Festwert von 19 °C. Bei Außentemperaturen über 18 °C kühlt ein Luftkühler (VL 8 °C, RL 14 °C) die Zuluft auf konstant 16 °C. Zur Temperaturregelung gibt es einen Temperaturfühler für die bereits konditionierte Zuluft, der auf die Ventilstellung der Heizung und Kühlung wirkt. Da das Gebäude im Winter bei

Anlagenstillstand über das Wochenende stark auskühlt, läuft die Anlage auf Wunsch der Nutzer das ganze Jahr kontinuierlich auf Stufe 1 (50 %) [Vollmer, 2004].

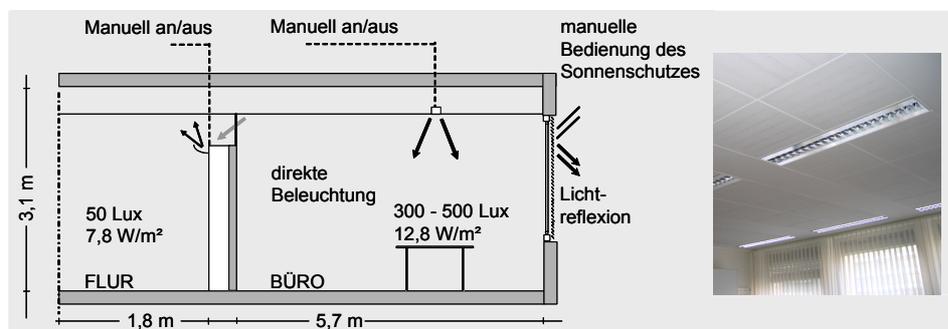
Pro Etage gibt es vier Umluftzentralen, die jeweils die Büros einer Himmelsrichtung zusammenfassen (Abb. 7.23). In den Zentralen wird die aus den Büros abgesaugte Luft über eine Grobstaubfiltermatte gefiltert und mit 15 bis 30 % vorkonditionierter Frischluft vermischt. Über einen Temperaturfühler im Umluftkanal und einen manuell eingestellten Temperatursollwert kann die Zuluft für die Büros über Lamellenrohr-Luftrohre und –Luftkühler weiter erhitzt oder gekühlt werden und gelangt über Druckdecken in die Büros.

Die Umluftanlagen für die Büros sind so dimensioniert, dass im Sommer eine Kühlung auf 26 °C möglich ist. Die Abluft verlässt das Gebäude ohne Wärmerückgewinnung. Die Flure und WC werden mit Überströmluft aus den Büros versorgt. In den WC gibt es eine Abluftabsaugung (ohne Wärmerückgewinnung).

### Tageslichtnutzung und Beleuchtung

Die Büros sind mit einem außen liegenden Sonnenschutz mit Metalllamellen ausgestattet, der – manuell ausgelöst - automatisch hoch- und heruntergefahren wird.

Als Grundbeleuchtung sind je Raster (1,35 m) zwei Einbauleuchten mit Spiegelraster und EVG eingebaut. In den Büros werden nur selten individuelle Arbeitsplatzleuchten eingesetzt.



**Abb. 7.24:** (links) Schematische Übersicht der Bürobeleuchtung. Weitere Informationen siehe Tab. A7.4-1

**Abb. 7.25:** (rechts) Bürobeleuchtung

## 7.4.1 Sanierungsbedarf Gebäude B

### Baulich

Die größtenteils erhaltenen Bestandsfenster haben eloxierte Aluminiumrahmen ohne thermische Trennung mit einer verkitteten Doppelverglasung. Undichtigkeiten führen dazu, dass es bei einer ungünstigen Kombination aus Wind und Regen zum Teil in die Fassade hereinregnet [Georges, 2004] und dass die Infiltration durch die Fenster einen störenden Luftzug verursacht [Vollmer, 2004]. Die U-Werte der Fassade entsprechen nicht mehr dem heutigen Standard, das Gebäude kühlt schnell aus.

Auf den Etagen gibt es keine barrierefreien WC.

### Gebäudetechnisch

Die Rohrführung der Zu- und Abluftanlage ist nicht mit Brandschutzklappen ausgestattet. Dies stellt ein schwerwiegendes brandschutztechnisches Risiko dar.

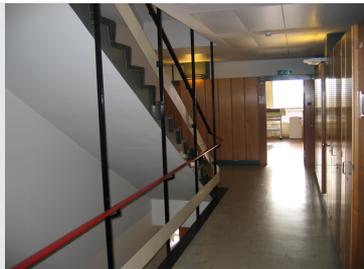
Aufgrund der Rohrführung kann die Lüftungsanlage nicht gereinigt werden, somit hat sich in den Rohren eine rund 2 cm dicke Staubschicht abgelagert [Vollmer, 2004], [Bures et al., 1992]. Diese Ablagerungen stellen unter lufthygienischen Aspekten eine starke Belastung der Mitarbeiter dar. Nach einer Stillstandszeit der Lüftungsanlage wird bei Wiederinbetriebnahme der Raum durch kleine schwarze Staubflocken verschmutzt. Dies beeinträchtigt die Nutzerakzeptanz erheblich. Da die Lüftungszentralen in den Geschossen eine Lärmbelastung für die Angestellten darstellen, wurde auf Wunsch der Mitarbeiter eine Umluftzentrale bereits stillgelegt [Vollmer, 2004].

Es gibt keine Wärmerückgewinnung für die Lüftungsanlage. Alle Anlagen sind an 365 Tagen im Jahr kontinuierlich in Betrieb.

### Motivation für Sanierung mit Maßnahmen der passiven Kühlung

Der Primärenergieverbrauch für das Gebäude ist mit 620 kWh/m<sup>2</sup>a (Heizen, Kühlen und Strom – inkl. nutzungsspezifischen Anwendungen -) sehr hoch.

**Tab. 7.5:** Übersicht Sanierungsbedarf

Situation		Bewertung
 <p><b>Abb. 7.26:</b> Fensterrahmen (keine thermische Trennung) aus Aluminium</p>	 <p><b>Abb. 7.27:</b> Fassadenverkleidung mit Naturstein und dunklen Metallplatten</p>	<p><b>Fassade</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hoher Absorptionsgrad (88 %) der Brüstungsverkleidungen</li> <li>• Aluminiumfensterrahmen nicht mehr dicht</li> </ul>
 <p><b>Abb. 7.28:</b> Typischer Büroraum</p>	 <p><b>Abb. 7.29:</b> Flur</p>	<p><b>Büros und Flur</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ausstattung der Büros (Fußböden, Möblierung) ist hochwertig</li> <li>• Flure nur über offene Bürotüren mit Tageslicht versorgt.</li> </ul>

## 7.5 Literatur

- [DIN EN 13779:2005-05] *Lüftung von Nichtwohngebäuden - Allgemeine Grundlagen und Anforderungen an Lüftungs- und Klimaanlageanlagen.* Berlin: Beuth Verlag.
- [Bures et al., 1992] Bures, P.; G. Voith. 1992. *Analyse und Aufnahme des Ist-Zustandes für die Heizungs-, Raumluf- und Sanitäreanlagen Gebäude R-1002 (Rosenthal).* Basel (CH): BKP Bures & Co. Klima Planing - Heizung, Lüftung, Klima, Kälte, Umwelttechnik.
- [Georges, 2004] Georges. 2004. *Mündliche Auskünfte bei Gebäudebegehung am 22.01.2004.* Basel (CH).
- [Puley, 2004] Puley, D. 2004. *Checkliste zur technischen Bestandsaufnahme (interner Bericht).* Wuppertal: Gebäudemanagement der Stadt Wuppertal.
- [Vollmer, 2004] Vollmer. 2004. *Mündliche Auskünfte bei Gebäudebegehung am 22.01.2004.* Basel (CH).



## 8 Bestandsanalyse als Grundlage für Sanierungskonzepte

Zur Bestandsaufnahme eines Gebäudes gibt es mehrere Herangehensweisen. Diese sind abhängig von den Erkenntnissen, die mit der Analyse gewonnen werden sollen. Ist beispielsweise die Diagnose des baulichen Gebäudezustands das Ziel, so kann auf bestehende Analysehilfsmittel, wie z. B. „epiqr“<sup>1</sup> zurückgegriffen werden, dessen Vorgehensweise exemplarisch skizziert werden soll. Das softwaregestützte Verfahren dient der Ermittlung des Instandhaltungs- und Modernisierungsbedarfs von Bestandsimmobilien (auch für Verwaltungsgebäude) und als Werkzeug zur Erstellung von Budgetplänen. Bei der baulichen Zustandserfassung beschränkt es sich auf die kostenintensivsten Elemente eines Gebäudes, deren Zustand in vier Klassen einzuordnen ist. Jedem dieser Zustände sind die üblicherweise anfallende Instandsetzungsmaßnahmen und Kosten zugeordnet. Als Dauer für die Bestandsaufnahme kann ein Tag veranschlagt werden.

<sup>1</sup> [www.epiqr.de](http://www.epiqr.de)

Da das Hauptaugenmerk der vorliegenden Arbeit auf die Verbesserung des sommerlichen Raumklimas gerichtet ist, müssen zusätzlich zu einer Aufnahme des baulichen Gebäudezustands (hier im Rahmen einer Gebäudebegehung) weitere Analysewerkzeuge eingesetzt werden. Die hier gewählten Analysemethoden konzentrieren sich auf drei Bereiche:

- die Untersuchung des Raumklimas mit Messungen der Raumlufttemperatur und der Luftfeuchte sowie thermischen Simulationen
- die Analyse des Nutzerverhaltens und der Nutzerzufriedenheit über eine Befragung.
- die Betrachtung der wöchentlichen Heizwärme- und Kälteverbräuche

Besonders die beiden ersten Schwerpunkte sind als Einheit zu sehen, da es im Zusammenhang der Arbeit bedeutsam ist, durch zeitgleich zur Befragung durchgeführte Messungen eine objektive Rückkopplung der subjektiven Nutzeraussagen zur Raumtemperatur zu erhalten.

Um das Gebäudeverhalten und die Reaktion der Nutzer in Perioden mit sehr hohen oder tiefen Außentemperaturen zu verstehen, wurden die Messungen und die Nutzerbefragungen sowohl im Winter als auch im Sommer durchgeführt.

Das Kapitel beschreibt zunächst die verwendeten Analyseinstrumente und daran anschließend die Ergebnisse der Bestandsaufnahme sowie die daraus resultierende Bewertung der Werkzeuge.

## 8.1 Werkzeuge der Bestandsanalyse - Methodik

### 8.1.1 Messungen

Die Messungen der Raumlufftemperatur, der relativen Feuchte und der Beleuchtungsstärke wurden mit Datenloggern HOBO H08 durchgeführt. Informationen über die Messspektren und die relative Genauigkeit der Datenlogger finden sich in der Tab. A8.1.1-1 im Anhang. Die Messungen wurden alle 30 Minuten durchgeführt (Momentanwert) und gespeichert.

Vor den Messungen wurden die Logger allesamt in einem Klimaschrank kalibriert. Damit konnten Abweichungen der einzelnen Logger voneinander (offset) bei der Auswertung berücksichtigt werden. Aufgrund der geringen Genauigkeit der Lichtmessfunktion sind die Logger nur zur groben Feststellung der Beleuchtungsstärke (Tag / Nacht) geeignet, auf eine gesonderte Auswertung wird verzichtet.

In den Büros waren die Logger in der Regel am Schreibtisch, auf einer Höhe von  $\pm 80$  cm befestigt (siehe Abb. A8.1.1-1 und -2). Pro Gebäude wurde auf jeweils drei Etagen in Büroräumen und auf dem Flur gemessen (Positionspläne siehe Abb. A8.1.1-3 bis -8).

Zeitgleich wurden für das Gebäude W die Außentemperatur (PT 100) und die Globalstrahlung auf die Horizontale (Pyranometer) aufgezeichnet und mit Messdaten des DWD für Düsseldorf auf Plausibilität geprüft. Für das Gebäude B konnten Daten zur Außentemperatur, relative Feuchte, Wind (Stärke und Richtung) und Globalstrahlung von der Universität Basel bezogen werden. Zusätzlich zu den Zusammenfassungen in Kap. 8.2.1 und Kap. 8.2.2 finden sich die kompletten Auswertungsgrafiken im Anhang.

Wenn nicht gesondert gekennzeichnet, beziehen sich die Auswertungen immer auf eine Arbeitswoche (Mo bis Fr) in der Zeit von 8 bis 18 Uhr.

**Tab. 8.1:** Eckdaten der Messungen

	Gebäude W		Gebäude B	
	Winter	Sommer	Winter	Sommer
Anzahl Datenlogger	25	25	27	27
Etagen für Messungen	2., 4., und 6. OG	2., 4., und 6. OG	2., 6., und 13. OG	2., 6., und 13. OG
Messzeitraum	25. 02.2004 - 25.03.2004	28. 07.2004 - 25.08.2004	26.02.2004 - 01.04.2004	10.07.2004 - 19.08.2004
Besonderheiten	-	62	2. OG: Ab 29.03.2004 wegen Streicarbeiten nicht berücksichtigt. Verlust: 1 Logger	13. OG: 2 Logger falsch eingelesen

### 8.1.2 Nutzerbefragungen

Mitarbeiter, die nur wenige oder gar keine gesundheitlichen Beschwerden verspüren und sich an ihrem Arbeitsplatz wohlfühlen, haben eine größere Chance produktiv zu arbeiten. Daher sollten Eigenschaften des Gebäudes, die

diese Chance verringern identifiziert und wenn möglich beseitigt oder abgemildert werden.

Ein im Zusammenhang von Gebäude und Gesundheit häufig genanntes Phänomen ist das Sick Building Syndrome [Johnson, 1995], [Redlich et al., 1997] (siehe 4.2.2). Anhand der vorliegenden Fragebogenauswertung ist die Diagnose eines SBS nicht möglich. Dafür wären parallele medizinischen Untersuchungen notwendig, wie sie z. B. in der ProKlimA Studie durchgeführt worden sind [Bischof et al., 2003]. Die Ergebnisse lassen es aber zu, Eigenschaften des Gebäudes zu benennen, die die Entwicklung gesundheitlicher Beeinträchtigungen begünstigen können. Die positive Beeinflussung der räumlichen Arbeitsumgebung sollte Aufgabe einer guten Gebäudeplanung sein.

#### *Erstellung der Fragebögen*

Grundlage für den eingesetzten Fragebogen ist ein ursprünglich an der University of California, Berkeley, konzipierter Fragenkatalog [Zagreus et al., 2004], der im Rahmen der Promotion von E. Gossauer an der Universität in Karlsruhe weiterentwickelt wurde (Gossauer, E. in [Voss et al., 2006a], [Gossauer et al., 2006]). Der Fragebogen befasst sich mit den raumklimatischen und gesundheitlichen Aspekten, sowie der Arbeitszufriedenheit. Auf einen einleitenden Teil, mit soziodemografischen und arbeitsstrukturellen Inhalten, folgen Fragen zur Arbeitsumgebung (Temperaturempfinden, Feuchte, Luftqualität, Luftzug, Akustik und Tages- und Kunstlichtsituation). Die Bereiche Gestaltung des Arbeitsplatzes, Gesundheit, Arbeitsumfang und Zufriedenheit schließen den Fragebogen ab. Einige Themen (z. B. Temperatur) werden der Jahreszeit angepasst.

Der Fragebogen umfasst 72 Fragen, die Beantwortung dauert rund 20 Minuten und erfolgt anonym. Die Fragebögen finden sich im Anhang (Info A8.2.1-1).

#### *Ablauf der Nutzerbefragungen*

Auf Wunsch der Gebäudebetreiber wurde die Anzahl der Befragten in beiden Gebäuden auf 50 Personen begrenzt (der Grund war die Länge des Fragebogens und die mit der Beantwortung verbundene Arbeitszeitbindung). Um die ausgewählten Teilnehmer statistisch als Zufallsstichprobe im Sinne eines verkleinerten und strukturgetreuen Abbildes der Grundgesamtheit behandeln zu können, wurde für die Auswahl das Prinzip der Zufallszahlen verwendet. Im Gebäude B schloss die Betriebsleitung vorweg Mitarbeiter mit unzureichenden Deutschkenntnissen aus.

Da die Betriebsleitung aus organisatorischen Gründen die Durchführung an einem Stichtag ablehnte, war bei der Winterbefragung die Abgabe auf einen Zeitraum von sieben Werktagen befristet. Im Gebäude B war der Rücklauf jedoch so gering (32 %), dass per E-Mail nochmals die gesamte Gruppe um Beantwortung der Fragebögen gebeten wurde.

Im Sommer wurden insgesamt 10 Werktage vorgesehen. Im Gebäude W gab es über diesen Zeitraum hinaus noch einige Abgaben, die ebenfalls berücksichtigt wurden. Im Gebäude B steigerte eine nochmalige Erinnerung per E-Mail nach Fristende die Rücklaufquote von ursprünglich 6 % auf 42 %. Die Rücklaufquoten und die Beantwortungszeiträume sind für beide Gebäude in Tab. 8.2 aufgeführt.

<sup>2</sup> Der gesamte Fragenkomplex entfiel auf eigenen Wunsch im Sommerfragebogen, da die Auswertung wenig Erkenntnisse gebracht hatte

**Tab. 8.2:** Kerndaten zu den Nutzerbefragungen in Gebäude B und W im Winter und Sommer

Im Gebäude B wurden seitens der Betriebsleitung folgende Fragenkomplexe oder Teilbereiche aus dem Fragebogen gestrichen:

- „gesundheitliche Beschwerden am Arbeitsplatz“,
- „belastende Bedingungen am Arbeitsplatz“,
- einige Fragen zum Wichtigkeitsrating (Wichtigkeitsbeurteilungen der Arbeitsbedingungen).<sup>2</sup>
- Zufriedenheit mit der Tätigkeit und
- berufliche Stellung.

	Gebäude W		Gebäude B	
	Winter	Sommer	Winter	Sommer
Anzahl Fragebögen	50	50	50	50
Größe Auswahlgruppe	100	78	172	196
Ausgabedatum	25.02.2004	29.07.2004	26.02.2004	12.07.2004
Abgabedatum	15.03.2004	24.08.2004 *	24.03.2004	09.08.2004
Rücklaufquote (%)	82	62	36	42

\* = 87 % bis zum 24.08.2004

#### *Umgang mit der geringen Stichprobengröße im Winter in Gebäude B*

Mit 18 Personen ist die Stichprobe klein. Hinzu kommt, dass einige der Fragen nicht von allen beantwortet wurden. Daher befindet sich an den Enden der Skalen häufig nur eine Gruppe aus ein oder zwei Personen. Um nicht einer kleinen Randgruppe zu großes Gewicht einzuräumen, werden ausschließlich Meinungsäußerungen von mehr als zwei Personen (11 %), gewertet. Dort wo Fragen nicht beantwortet wurden, ist der entsprechende Prozentsatz von fehlenden Antworten ausgewiesen, die Angaben beziehen sich auf die gesamte Stichprobe (z. B. 5 von 18 Personen).

#### **Statistische Methoden zur Fragebogenauswertung**

##### *Verwendete Auswertungsmethoden aus dem Bereich der deskriptiven Statistik*

Die deskriptive Statistik hat die Beschreibung des Ausgangsdatenbestandes zum Ziel. Hier sind dies die Gebäudenutzer als Merkmalsträger und ihre Eigenschaften und gemachten Aussagen als Merkmale. Die erhobenen Merkmale lassen sich nach [Tiede, 2001] in drei Merkmalsgruppen mit unterschiedlich hohen Messniveaus unterteilen (siehe Tab. 8.3 und 8.4).

- Nominale Merkmale (geringstes Messniveau)
- Ordinale Merkmale (die meisten der im vorliegenden Fragebogen erhobenen Merkmale sind ordinalskaliert)
- Metrische Merkmale (höchstes Messniveau)

**Tab. 8.3:** Merkmalsgruppen und zugehörige Lagemaße

	Nominale Merkmale	Ordinale Merkmale	Metrische Merkmale
Messniveau	nominalskaliert	ordinalskaliert	metrisch skaliert
Beispiel	Geschlecht, Glaubensrichtung	Schulnoten, Beurteilungen „sehr wichtig“, „wichtig“, „mittelmäßig“...	Alter, Körpergröße
Besonderheit		Können z. T. wie metrische Merkmale behandelt werden [Bischof et al., 2003]	

	Modus (häufigster Wert)	Median (Zentralwert)	Mittelwert (ungewogenes arithmetisches Mittel)
Messniveau	Nominalskaliert	Ordinalskaliert	Metrisch skaliert
Definition	Modus: Bestimmt den im Datenbestand am häufigsten aufgetretenen Wert (lagetypischer Mittelwert)	Median: Halbiert die der Größe nach geordnete Reihe der Merkmalswerte genau in der Mitte (lagetypischer Mittelwert)	Summe aller Merkmalswerte geteilt durch Anzahl der Merkmalswerte (rechnerischer Mittelwert)
Besonderheit		Extremwerte haben keinen höheren Einfluss auf Median	Extremwerte haben Einfluss auf Mittelwert

**Tab. 8.4:** Lagemaße und mindestens erforderliches Messniveau der Daten

Die deskriptive Statistik bietet unterschiedliche Mittel zur Beschreibung des Datenbestands an.

- Lagemaße, die etwas über die zentrale Tendenz einer Gruppe aussagen. Die einfachste Form ist die Darstellung von Häufigkeiten in Form absoluter Zahlen oder Prozentzahlen. Abhängig vom Messniveau können zusätzlich weitere Lagemaße (siehe Tab. 8.3 und 8.4) eingesetzt werden, die etwas darüber aussagen, um welchen speziellen Merkmalswert herum sich die einzelnen Merkmalswerte einer Häufigkeitsverteilung konzentrieren.
- Streuungsmaße beschreiben die Breite einer Verteilung von metrischen Daten. Das hier verwendete Maß ist die Standardabweichung ( $\sigma$ ). Eine geringe  $\sigma$  bedeutet, dass die Merkmalsausprägungen eng um den Mittelwert herum liegen<sup>3</sup>, eine hohe  $\sigma$  weist auf eine große Streuung um den Mittelwert herum hin<sup>4</sup>.

<sup>3</sup> Die meisten Nutzer lassen das Kunstlicht etwa 3 Stunden ( $\pm 15$  Minuten) brennen.

<sup>4</sup> Der Mittelwert liegt zwar bei 3 Stunden, die Einschaltzeit des Kunstlichts liegt oftmals jedoch deutlich darüber oder darunter.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \mu)^2}{n - 1}}$$

$x_i$  = Ausprägung der Untersuchungsvariablen  
 $n$  = Zahl der Beobachtungen  
 $\mu$  = Arithmetischer Mittelwert

- Zusammenhangsmaße, wie der hier eingesetzte (Rang-) Korrelationskoeffizient ( $r_{sp}$ ) nach Spearman (für ordinalskalierte Daten) beschreiben die Tatsache, ob zwei Merkmale unabhängig oder abhängig voneinander auftreten.

$$r_{sp} = 1 - \frac{6 \cdot \sum D_i^2}{n^3 - n}$$

$D_i$  = Differenz zwischen je zwei Rangplätzen, also  $D_i = R(x_i) - R(y_i)$  mit  $R(x) = \text{Rang von } x$   
 $n$  = Zahl der Beobachtungen

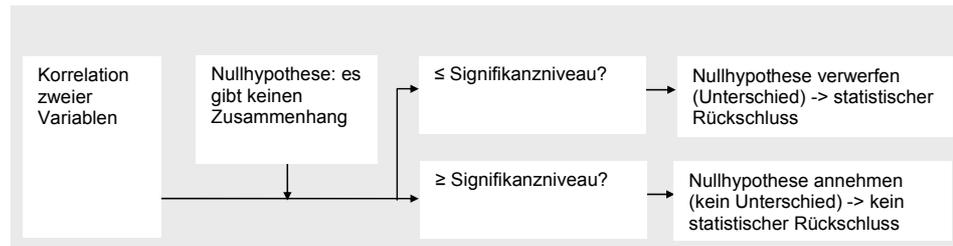
Der Maximalwert liegt bei  $r = 1$ , in diesem Fall ist der Zusammenhang zwischen den beiden Merkmalen maximal (die Punkte der Punktwolke liegen genau auf der Regressionsgraden). Liegt  $r$  bei  $r = -1$  dann besteht ein maximal gegenläufiger Zusammenhang. Bei  $r = 0$  gibt es keinen statistischen Zusammenhang.

**Abb. 8.1:** Ablauf eines Signifikanztests für die Korrelation zweier Variablen.

Die Nullhypothese (kein Zusammenhang) wird dann verworfen, wenn die Wahrscheinlichkeit für den beobachteten Befund kleiner oder gleich dem festgelegten Signifikanzniveau ist. In diesem Fall ist die Wahrscheinlichkeit, dass die gefundenen Abweichungen durch zufällige Stichprobenabweichungen erklärt werden können, gering und es liegen tatsächlich Gruppenunterschiede vor. Die vorgegebenen Wahrscheinlichkeiten („Signifikanzniveau“) liegen üblicherweise im kleinen Bereich von 5 % oder 1 %.

### Verwendete Auswertungsmethoden aus dem Bereich der induktiven Statistik

Ziel der induktiven Statistik ist es, auf Grundlage der Stichprobendaten Rückschlüsse auf die Grundgesamtheit zu ziehen. Zur Gewährleistung, dass die gefundenen Unterschiede oder Zusammenhänge in den Stichprobendaten nicht rein zufällig sind, werden statistische Signifikanztests eingesetzt. Mit ihnen kann untersucht werden, ob festgestellte Zusammenhänge noch dem Zufall alleine zuzuschreiben sind, oder ob sie so groß sind, dass sie im signifikanten (nicht rein zufälligen) Bereich liegen. Den Ablauf eines Signifikanztests für die Korrelation zweier Variablen zeigt Abb. 8.1.



Um die Unterschiede zwischen den beiden Befragungszeitpunkten zu analysieren wird der U-Test (Wilcoxon-Mann-Whitney) verwendet. Er dient zur Überprüfung der Signifikanz der Übereinstimmung zweier Verteilungen, also ob zwei unabhängige Verteilungen A und B (also hier Sommer und Winterbefragung) zu derselben Grundgesamtheit gehören.

Die Auswertung zeigt, dass sich bei jedem Gebäude nur eine statistisch signifikante Abweichung zwischen den beiden Befragungszeitpunkten ergibt. Im Gebäude W ist dies die Beurteilung der Belichtungssituation im Raum durch Tageslicht, in Gebäude B sind es die störenden Geräusche bei geöffnetem Fenster. Beim Gebäude W kann vermutet werden, dass das jahreszeitlich bedingte geringere Tageslichtangebot im Winter zu der Differenz führt (Verschattungen durch Bäume treten allenfalls im 2. OG auf, das EG und das 1. OG sind nicht belegt), beim Gebäude B wird im Sommer etwas mehr über die Fenster gelüftet und der Straßenlärm dringt daher in den Raum.

Diese geringe Zahl der Abweichungen ist überraschend, da sich beim Vergleich der Häufigkeiten beider Befragungszeitpunkte durchaus Abweichungen feststellen lassen. Kann es sein, dass bei den untersuchten Gebäuden die Unterschiede zwischen Sommer und Winter kleiner sind als ursprünglich angenommen? Das dies zutreffen könnte, zeigt die nähere Betrachtung des Bereichs der Raumtemperatur und der Raumlufffeuchte, wo witterungsbedingt die größten Unterschiede vermutet wurden.

- Beim Gebäude B beeinflusst die Lüftungsanlage mit Kühlung (oder Heizung) ganzjährig die Innenraumtemperatur. Zu beiden Befragungszeitpunkten wurde über trockene Raumluff geklagt.
- Beim Gebäude W ist ohne aktive Kühlung eine unterschiedliche Bewertung im Temperaturbereich nahe liegend. Tatsächlich ist hier die Unzufriedenheit mit der Temperatur und mit der Raumlufffeuchte sowohl im Winter als auch im Sommer hoch.

Somit sind die Unterschiede zwischen beiden Befragungszeitpunkten zwar vorhanden, nicht aber stark genug um statistische Signifikanz zu erreichen.

### Skalenwertung im vorliegenden Fragebogen

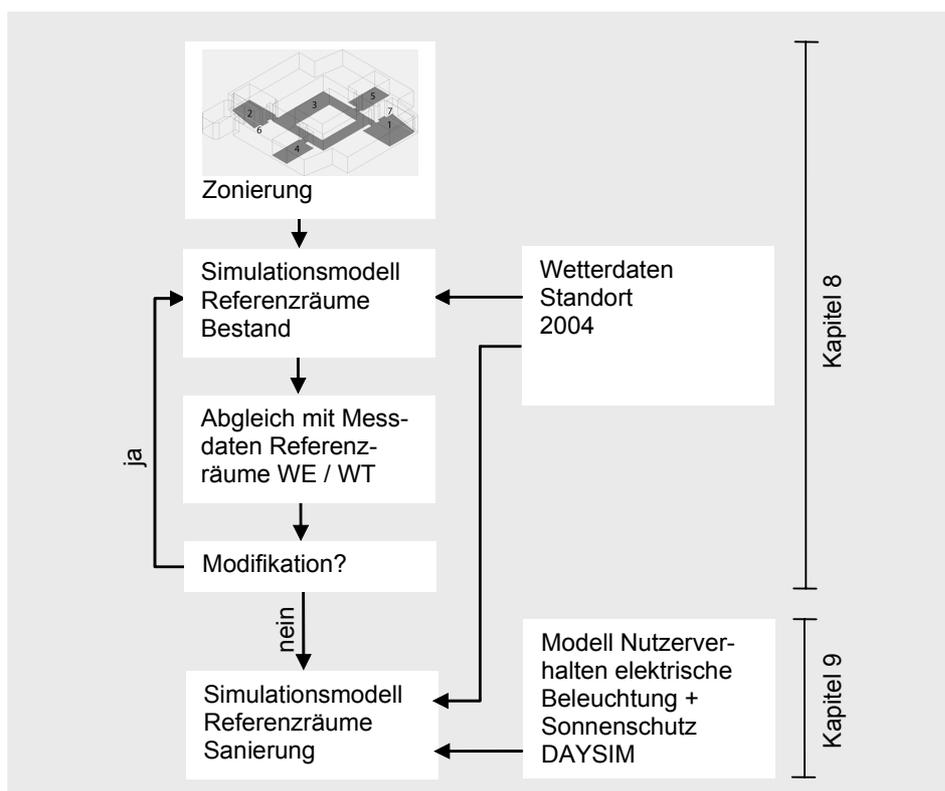
Die meisten Fragen des Fragebogens sind auf einer 5 Punkte Likert-Skala zu beantworten. Dabei werden der Skala („eins“ = „sehr gut“, „drei“ = „mittel“ und „fünf“ = „sehr schlecht“) im Fragebogen Wortanker zugeordnet. Einige Beispiele zeigt Tab. 8.5. Bei einigen Fragestellungen (z. B. Temperaturempfindung) entspricht „drei“ mit „genau richtig“ der bestmöglichen Bewertung, und die Werte „eins“ und „fünf“ geben die Extreme mit „zu warm“ und „zu kalt“ wieder. Bei der Auswertung sind diese Fälle vermerkt.

**Tab. 8.5:** Im Fragebogen verwendete Wortanker für die Bewertungsskala von eins bis fünf

eins	drei	fünf	Beispiel
gar nicht	mittelmäßig	sehr	beeinträchtigt in der Arbeitsleistung
nie	manchmal	immer	heruntergefahrener Sonnenschutz
sehr gute	mittelmäßige	sehr schlechte	Luftqualität
sehr zufrieden	mittelmäßig zufrieden	sehr unzufrieden	mit Temperatur
nie	manchmal	den ganzen Tag	gestört durch Geräusche
trifft gar nicht zu	trifft manchmal zu	trifft immer zu	schmutzige Böden

### 8.1.3 Simulationen

Ziel der Simulationsmodelle ist es, die Wirksamkeit geeigneter Sanierungsmaßnahmen zu untersuchen. Dazu wurde, wie Abb. 8.2 darstellt, zunächst ein mittels der Messdaten kalibriertes Modell des Bestandsgebäudes erstellt. Voraussetzung für dieses Vorgehen ist die Verwendung von Wetterdaten, die zeitgleich zu den Messungen aufgezeichnet werden. Die Kalibrierung wurde in beiden Gebäude für den Sommer durchgeführt, Simulationsprogramm ist TRNSYS, Version 15.0 [Beckman et al., 2000].



**Abb. 8.2:** Vorgehen bei der Erstellung der Simulationsmodelle.

Verwendete Abkürzungen:  
WE = Wochenende,  
WT = Werktag  
Besonderheiten beim Abgleich der Simulationen mit den Messdaten:

- die halbstündlichen Messwerte geben Momentanwerte wieder. Ein Sprung in der Messkurve stellt somit nicht den genauen Zeitpunkt der Temperaturveränderung dar.
- Relativen Genauigkeit der Loggerdaten ( $\pm 0,7$  bei  $21^\circ\text{C}$ )

Die Messwerte sind vom Nutzerverhalten beeinflusst. Daher wurden zunächst die Wochenenden betrachtet und anschließend die Wochentage.

Als Referenzstockwerk für die Simulationen dient in beiden Gebäuden das 6. OG, da hier keine Verschattungen durch die Nachbargebäude vorliegen. Die Messungen wurden im genutzten Zustand durchgeführt. Somit wirkt sich das Nutzerverhalten auf die Raumtemperatur aus und der Einflussgrad der übrigen Parameter (Bauphysik, Meteorologie) lässt sich davon nur schwer abgrenzen. Vorteilhaft an Messungen bei laufendem Gebäudebetrieb ist die Darstellung des Gebäudes unter „realen“ Bedingungen. Nachteilig daran ist die erschwerte Abbildung durch Simulationen. Um das Nutzerverhalten zumindest teilweise auszublenden wurden zunächst die Wochenenden (kein Nutzereinfluss) und erst anschließend die Wochentage untersucht.

Zu Unsicherheiten bei den Simulationen können Fehleinschätzungen in drei Bereichen führen: Bauphysik, Nutzerverhalten und Meteorologie. Um die Einflussgröße der einzelnen Faktoren zu untersuchen, wurden ihre Auswirkung auf das Simulationsergebnis für die Zeitspanne eines Wochenendes am Simulationsmodell Gebäude W getestet.

Es wird deutlich, dass die größten Unsicherheiten in den Bereichen Nutzerverhalten und Strahlungsmodell liegen (Tab. 8.6).

Kommentare:

- Fensteröffnungszeiten: Im Gebäude W sind die Fensteröffnungszeiten für den Tag und für die Nacht unbekannt. Nachts wirkt sich dies stark aus, da dann der Temperaturunterschied zwischen Raumlufttemperatur und Außentemperatur groß ist. Tagsüber liegt die Innentemperatur im Sommer nur wenig unter der Außentemperatur (Baustandard: 70er Jahre), die Auswirkungen sind gering.  
Beim Gebäude B ist der Einfluss geringer, da die Fenster nachts nicht geöffnet werden dürfen, und sich aus den Messdaten und Nutzerbefragungen schließen lässt, dass die Fenster tagsüber seltener geöffnet sind als beim Gebäude W.
- Bedienung Sonnenschutz: Die Messdaten für das Wochenende zeigen, ob der Sonnenschutz ganz geschlossen oder ganz offen ist.  
Zwischenstellungen, die entweder durch die Lamellenstellung oder die Position des Sonnenschutzes hervorgerufen werden, lassen sich abschätzen. Wochentags erschweren das Nutzerverhalten und Überlagerungen mit internen Lasten und Lüftung Rückschlüsse.  
Erwartungsgemäß wirkt sich ein Plus an solaren Wärmequellen sehr stark auf die Simulation aus.
- Interne Wärmequellen: Die Höhe der internen Wärmequellen prägt das Ergebnis stark. Im Verlauf der Analyse wurden beim Gebäude W die internen Wärmequellen vorab zu hoch angesetzt (Abschnitt 8.5.1).  
Veränderungen des zeitlichen Verlaufs des Lastprofils wirken sich auf den Temperaturverlauf, nicht aber auf die Durchschnittstemperatur aus.  
Anmerkung: Bei einer längeren Periode mit hohen Außentemperaturen verhindern nachts auftretende interne Wärmequellen eine nächtliche Auskühlung des Raumes. Während einer fünftägigen Schönwetterperiode mit den nächtlich wirksamen internen Lasten (Luftwechsel permanent 2 1/h) steigt die Temperatur im Mittel um 1,5 K.

- Die fehlenden Angaben zu Wind und zur relativen Feuchte beim Gebäude W beeinflussen das Simulationsergebnis kaum. Die abkühlende Wirkung des Windes auf die Fassade ist im Sommer durch die – schützende – Gebäudehülle gering. Ein Einfluss auf den Luftwechsel (Fenster und Infiltration) besteht nicht, da kein Strömungssimulationsmodell verwendet wird. Die Luftfeuchte würde als Größe in ein – hier nicht nachgewiesenes - PMV-Komfortmodell eingehen.
- Strahlungsmodell: Für das Gebäude W wurde ausschließlich die Globalstrahlung auf eine horizontale Fläche gemessen, daher konnte keine auf Messwerten basierende Trennung zwischen Direkt- und Diffusstrahlung durchgeführt werden. Der Anteil an Diffusstrahlung wird in TRNSYS 15.0 nach Reindl [Beckman et al., 2000] bestimmt. Dabei wird der Diffusanteil anhand des Verhältnisses von Gesamtstrahlung auf eine horizontale Fläche zur extraterrestrischen Strahlung („clearness index“) und dem Sonnenstand errechnet. Die Anteile auf die jeweiligen Fassaden werden nach Perez [Beckman et al., 2000] ermittelt. Trotz – bekannter - Abweichungen zwischen berechneten Stundenwerten und Messwerten sind die Ergebnisse in der Tagessumme auf eine Horizontalebene bezogen korrekt. Fehler entstehen dann, wenn auf Grundlage der Berechnungswerte die Strahlung auf die jeweiligen Fassadenorientierungen ermittelt wird. Dies trifft auf die Simulationsmodelle von Gebäude B und W zu. Beim hier durchgeführten Vergleich waren die Strahlungswerte auf die Fassaden in der Berechnung insgesamt höher (max. 15 %) als bei den gemessenen Daten, was in einer höheren Raumtemperatur resultiert. Dieser Wert für die Sommermonate liegt unter den in [Voss, 1997] angegebenen maximal 20 % für die Wintermonate.

**Tab. 8.6:** Einfluss einzelner Unsicherheitsfaktoren auf das Simulationsergebnis.  
Verwendete Abkürzungen:  
G = Gebäude, A = Auswirkung, L = Luftlinie  
Zeichenerklärung:  
- = keine Auswirkung auf Simulationsmodell (0 K Abweichung des Temperaturmittels der Testsimulation zu dem der Referenzsimulation)  
o = geringe Auswirkung auf Simulationsmodell ( $\leq 0,5$  K Abweichung des Temperaturmittels der Testsimulation zu dem der Referenzsimulation)  
+ = hohe Auswirkung auf Simulationsmodell ( $\geq 0,5$  K Abweichung des Temperaturmittels der Testsimulation zu dem der Referenzsimulation)  
Anmerkung: Das Strahlungsmodell wurde anhand von Wetterdaten für den Standort Kassel (Datenquelle: Universität Kassel, Fachgebiet Bauphysik und TGA) getestet, da hier neben der Globalstrahlung Strahlungsdaten für die einzelnen Himmelsrichtungen zur Verfügung standen.

	G	A	Auswirkung	Test
<b>Bauphysik</b>				
Wandaufbauten	W	o	Temperaturprofil verschiebt sich zeitlich, Mittelwert bleibt gleich	Erhöhung spezifische Wärmekapazität Wandaufbauten bezogen auf NGF um 30 % (mögliche Irrtumsrate bei realem Gebäude geringer)
Konvektiver Wärmeübergang	W+B	-	Temperaturprofil verschiebt sich zeitlich, Mittelwert bleibt gleich	Wände und Decken von 3,5 W/m <sup>2</sup> K auf 5 W/m <sup>2</sup> K
<b>Nutzerverhalten</b>				
Fensteröffnungszeiten	W+B	+		Getestet: 1 1/h und 0 1/h
Türöffnungszeiten	W+B	o	Temperaturprofil verschiebt sich	Luftwechsel Büro und Flur 0 1/h und 4 1/h
Bedienung Sonnenschutz	W+B	+		Ganz hochgefahren und 100 % heruntergefahren
Tatsächliche Höhe interne Lasten	W+B	+(o)		Zwischen 0 und 10 W/m <sup>2</sup>
zeitlicher Verlauf interne Lasten	W+B	o	Temperaturprofil verschiebt sich	Verlauf 8 bis 18 Uhr aktiv und Verlauf 20 bis 6 Uhr aktiv
<b>Gebäudetechnik</b>				
Anlageneinstellung	B	+		Nicht getestet, da hoher Einfluss durch Simulationen (Kap. 8.5.2) bekannt
<b>Randbedingungen</b>				
Fehlende Angaben zu Wind und relativer Feuchte	W	o	Himmelsstrahlung kann nicht berechnet werden	
Wetterdaten nicht lokal aufgenommen (W: 4 km L NW; B: 3 km L SO)	W+B	-		Nicht getestet, da kein Einfluss vermutet
Strahlungsmodell	W+B	+		Vergleich von über Globalstrahlung berechneten und gemessenen Strahlungsdaten auf Ost- und Westfassade

- Bauphysik: Beim Gebäude W sind die Wandaufbauten unbekannt, beim Gebäude B sind sie dokumentiert.
- Anlageneinstellung: Die genaue Einstellung der Kühlung im Gebäude B und die erreichten Luftwechsel in den Räumen sind nicht bekannt (manuelle, ungenaue Einstellung). Die permanente Kühlung verhindert eine messtechnische Ermittlung des ungekühlten Gebäudeverhaltens.

### 8.1.4 Wöchentliche Ablesung des Energieverbrauchs

Bei beiden Gebäuden wurde eine wöchentliche Ablesung der Heizwärmeverbrauchsdaten mit den Gebäudebetreibern vereinbart. Ziel dabei ist es, die Verbrauchsdaten den Wochenmitteln der Außentemperatur gegenüberzustellen und damit das Maß der Abhängigkeit zwischen der Außentemperatur und den Heiz- und Kühlenergieverbräuchen zu ermitteln. Leider war die Ablesung im Gebäude W, die auf einer Gefälligkeit des Gebäudemanagements beruhte, lückenhaft, so dass hier eine Auswertung nicht möglich war.

**Tab. 8.7:** Ablesung wöchentliche Energiebezüge Gebäude B und W

	Gebäude W	Gebäude B
Abgelesene Medien	Sattdampf Fernwärme (Heizung, Trinkwarmwasser), Stromverbrauch (Gebäudetechnik, Geräte)	Bezug Heißwasser (Heizung, Teilklimaanlage, Trinkwarmwasser) , Bezug Kaltwasser (Teilklimaanlage) Stromverbrauch (Gebäudetechnik, Geräte)
Zeitraum	05.01.2004 – 31.12.2004	19.01.2004 – 03.01.2005
Bemerkungen	lückenhafte Ablesung, monatliche Verbrauchsdaten wurden aus Abrechnung mit Energieversorgungsunternehmen bezogen	regelmäßige Ablesung, seitens des Gebäudebetreibers erfolgt monatliche Ablesung seit 2002

## 8.2 Gebäudeanalyse mit Messungen

Die nachfolgenden zwei Unterkapitel fassen die Ergebnisse der Messungen für beide Gebäude jeweils für Winter und Sommer getrennt zusammen. Der Hauptfokus besteht dabei darin, das Gebäudeverhalten auf extreme Außentemperaturen (kalt, warm) zu untersuchen. Besonders im Sommer kann zwischen beiden Gebäuden ein unterschiedliches Verhalten erwartet werden, da Gebäude B im Gegensatz zu Gebäude W aktiv gekühlt wird.

Die kompletten Auswertungen finden sich im Anhang zu Kap. 8.2.

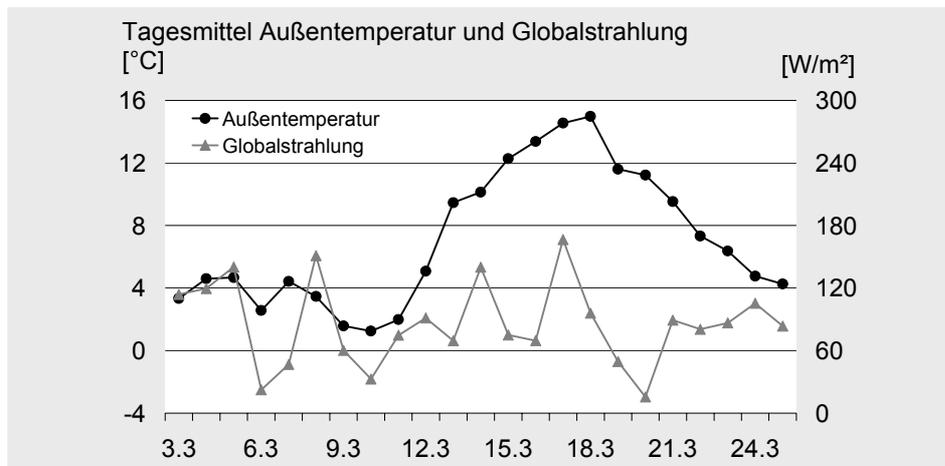
### 8.2.1 Messungsergebnisse Gebäude W

#### Winter

##### *Meteorologische Bedingungen*

Beim Vergleich der eigenen Messungen mit den Referenzwerten von Meteororm zeigt sich, dass der März `04 in Wuppertal wärmer als der Referenzmonat war und eine höhere Globalstrahlung aufwies (Abb. 8.3). Die

Messperiode wird von einem relativ kalten Beginn und einer daran anschließenden wärmeren Periode gekennzeichnet.



**Abb. 8.3:** Tagesmittelwerte der Außentemperatur und der Globalstrahlung für die Periode vom 03.03. bis zum 25.03.2004, Wuppertal. Das gemessene Monatsmittel für März 2004 lag bei 7,2 °C (107 W/m<sup>2</sup>), das Monatsmittel aus Meteororm, Vers. 5.0 liegt bei 4,7 °C (65 W/m<sup>2</sup>).

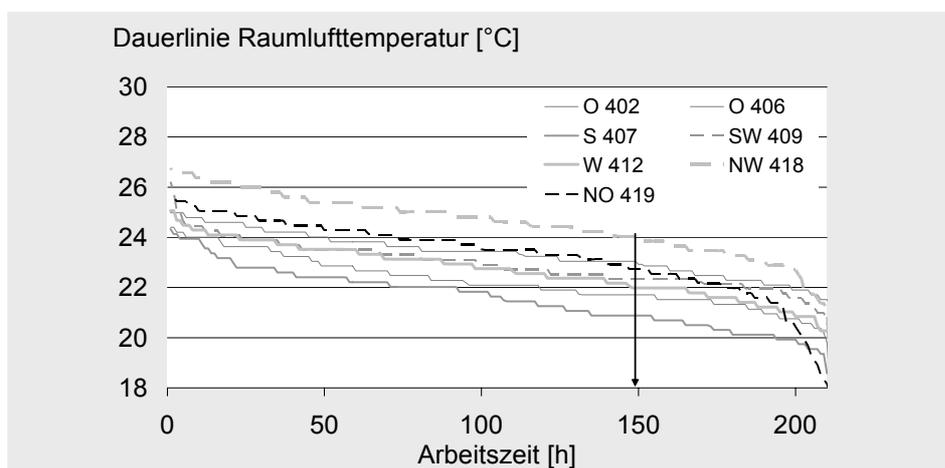
### Raumlufttemperatur und Raumluftfeuchte

Im Winter unterscheiden sich die Mittelwerte für die Raumlufttemperatur zwischen den Geschossen mit 0,5 K kaum (Tab. 8.8). Wie zu erwarten, schwanken die Temperaturen im Tagesverlauf, dies belegt die Standardabweichung. Die Raumluftfeuchte ist sehr gering, die relative Feuchte liegt während 80 % der Arbeitszeit unter 30 %.

Innerhalb der Geschosse weichen die Temperaturen von Raum zu Raum voneinander ab, dies zeigt exemplarisch Abb. 8.4 für das 4. OG. Die Unterschiede für die relative Feuchte in den einzelnen Räumen pro Geschöß sind geringer.

**Tab. 8.8:** Mittelwerte, Mediane, Standardabweichungen und Stunden  $\geq 24$  °C der Raumlufttemperatur und relativen Feuchte für die Büros des 2., 4. und 6. OG während der Arbeitszeit. Gebäude W. Ermittlung: Jeder Raum wird einzeln ausgewertet. Zum Vergleich wird aus diesen Werten ein Mittelwert gebildet. Auswertungen für jeden Raum, siehe Anhang Tab. A8.2.1-1 bis -3.

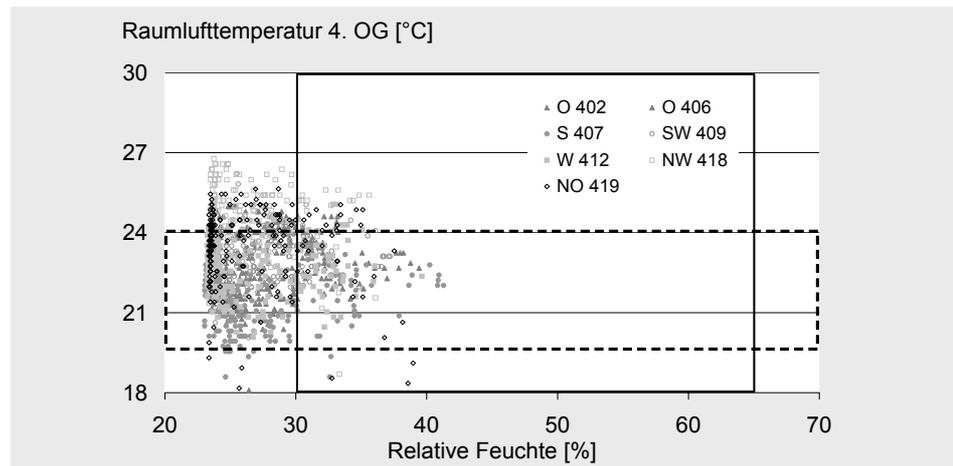
	Raumlufttemperatur				Feuchte			
	Mittelwert	Median	SD	$\geq 24$ °C	Mittelwert	Median	SD	$\leq 30$ %
	(°C)	(°C)	(-)	(%)	(%)	(%)	(-)	(%)
Büros 2. OG	$\pm 22,5$	22,5	0,9	21	$\pm 25,0$	24,6	1,5	81
Büros 4. OG	$\pm 22,9$	22,9	1,1	23	$\pm 26,8$	25,6	3,4	82
Büros 6. OG	$\pm 22,7$	23,0	1,6	26	$\pm 26,5$	24,9	3,3	83



**Abb. 8.4:** Dauerlinie für die Raumlufttemperatur im 4. OG, Gebäude W. Berücksichtigt wurden Stundenwerte für die Arbeitszeit. Lesebeispiel: Im Raum 418 (Orientierung Nordwest) liegt die Raumlufttemperatur an 149 Stunden über 24 °C. Die Treppenstruktur der Dauerlinien spiegelt die Loggerauflösung von 0,4 °C wider.

**Abb. 8.5:** Raumlufttemperatur und Raumluftfeuchte im 4. OG, Gebäude W. Eingezeichnet sind hier die Anforderungen für die relative Feuchte nach [DIN EN 13779:2005-05]. Prinzipiell sind Werte zwischen 30 und 70 % relativer Feuchte für die Raumluft empfohlen (schwarzer Rahmen). Gelegentliche Unterschreitungen und Überschreitungen sind jedoch zulässig. Für die Raumlufttemperatur gibt die [DIN EN ISO 7730:2006-05] im Winter eine operative Temperatur zwischen 20 °C und 24 °C vor (gestrichelter Rahmen, PPD < 10 %). Es sind die Stundenwerte der Arbeitszeit aufgeführt.

Die Darstellung der Messergebnisse innerhalb der normativen Grenzen (Abb. 8.5) macht deutlich, dass die meisten Werte für die Raumlufttemperatur im empfohlenen Bereich zwischen 19 und 24 °C liegen. An 23 % der Arbeitsstunden überschreitet die Raumlufttemperatur 24 °C. Die relative Feuchte liegt an 82 % der Arbeitsstunden während der Messperiode unter 30 %, also unter den Vorgaben. Dass gesundheitliche Einschränkungen der Belegschaft durch die geringe relative Feuchte der Luft auftreten, geht aus den Fragebögen hervor.



### Einflussfaktoren auf die Raumlufttemperatur im Winter

Die Raumlufttemperatur wird durch interne (Heizung, interne Wärmequellen) und externe (Außentemperatur, Globalstrahlung) Faktoren beeinflusst, die unterschiedlichen Zeitrhythmen unterworfen sind. Die internen Wärmequellen stehen im Zusammenhang mit den Arbeitszeiten und der An- und Abwesenheit von Personen. Die „externen Faktoren“ wirken zum einen direkt im Tagesrhythmus, zum anderen indirekt über das Nutzerverhalten (Lüftung, Sonnenschutz) auf die Raumtemperatur. Da sich diese Phänomene zeitlich überlagern, stellt die isolierte Betrachtung der einzelnen Bereiche einen Kompromiss dar.

#### Heizung

Bei der Analyse der Raumlufttemperatur ist der Selbstregelungseffekt der Fußbodenheizung zu beachten. Dieser drosselt die Wärmeabgabe bei einer Raumlufttemperaturerhöhung automatisch: steigt die Raumlufttemperatur z. B. durch Sonneneinstrahlung oder interne Wärmequellen an, so verringert sich die Temperaturdifferenz zwischen Fußbodenoberfläche und Raumluft und es findet eine geringere Wärmeabgabe statt (siehe Tab. A8.2.1-4). Daher ist der Einfluss der Außentemperatur<sup>5</sup> und der Globalstrahlung auf die Raumlufttemperatur erwartungsgemäß gering.

#### Interne Wärmequellen

Die über Raumbegehungen ermittelten internen Wärmequellen für die Büros liegen im Mittel bei 141 Wh/(m<sup>2</sup>d) (Daten siehe Tab. A8.2.1-6 und Abb. A8.2.1-10). Dies liegt primär an der hohen Belegungsichte der Büros im Gebäude W<sup>6</sup>. Weitere Gründe sind die hohe installierte Leistung für die elektrische

<sup>5</sup> max. Temperaturanstieg 0,14 K bei 1 K Anstieg Außentemperatur

<sup>6</sup> 11 m<sup>2</sup><sub>NGF</sub> Bürofläche pro Person, Gebäude B: 18,5 m<sup>2</sup><sub>NGF</sub>

Beleuchtung und der Einsatz von Röhrenbildschirmen.

Die Simulationen legen jedoch den Schluss nahe, dass die veranschlagten internen Lasten zu hoch waren. Da das Gebäude von Projektgruppen, deren Zusammensetzung sich häufig ändert, genutzt wird, ist anzunehmen, dass einige der Arbeitsplätze, die Grundlage der rechnerischen Ermittlung der internen Lasten waren, nicht besetzt sind.

Ein Bezug zwischen internen Lasten und der mittleren Raumlufttemperatur der Büros konnte erwartungsgemäß nicht festgestellt werden, da der Heizbetrieb für den Ausgleich sorgt.

### Strahlung

Eine Analyse der Zeiträume im Monat März, wann auf die jeweiligen Fassaden direkte Sonneneinstrahlung trifft, macht deutlich, wo Verschattungen auftreten (Abb. A8.2.1-11):

- im Osten Verschattungen durch das gleich hohe Nachbargebäude
- im Süden und im Westen im 2. OG durch Bäume
- das 6. OG ist bis auf die Ostfassade frei von Verschattungen.

Zwischen Strahlung und Raumlufttemperatur bestehen daher nur in wenigen Räumen Korrelationen. Im 2. OG treten entweder keine oder nur sehr schwache Beziehungen auf, im 6. OG ist die Tendenz teilweise sogar leicht gegenläufig. Dies kann auf einen vermehrten Einsatz des Sonnenschutzes bei hohem Globalstrahlungsangebot draußen zurückgeführt werden.

Insgesamt entspricht dies den Erwartungen an die ausgleichende Wirkung der Raumheizung.

### Verglasungsanteil der Gebäudehülle

Aufgrund der Varianz des Verglasungsanteils (solare Aperturfläche als Strahlungseintrittsfläche) im Verhältnis zur Größe des dahinter liegenden Raumes, wurde ein eventueller Zusammenhang zwischen der Größe der Aperturfläche und den Raumlufttemperaturen überprüft. Eine Abhängigkeit konnte nicht festgestellt werden. Gründe dafür sind der Selbstregelungseffekt der Heizung und die Bedienung des Sonnenschutzes.

**Tab. 8.9:** Übersicht über die eingesetzten Methoden, um aus den Messdaten Informationen über die Fensterlüftung und die Bedienung des Sonnenschutzes zu gewinnen.  
Verwendete Abkürzungen:  
S = Strahlungsangebot draußen, B = Beleuchtungsstärke Raum

	These	Ergebnis	Begründung
Lüftungsverhalten	Messwert bei Stoßlüftung $\leq$ Wert vorher und nachher. Untersuchung $\Delta \vartheta \geq 1$ K bis 0,4 K.	Keine / zu viele Lüftungsereignisse. Ergebnisse nicht plausibel	Aufzeichnung Momentanwert alle 30 Minuten zu grob. Raumluft nicht isotherm.
	Werte $\leq$ Temperaturmittel Geschoss = Lüftungseignis	Keine / zu viele Lüftungsereignisse. Ergebnisse nicht plausibel	Temperaturgrenze über Mittel zu statisch.
Bedienung Sonnenschutz	Verschattung ist geschlossen wenn: a) $\geq S$ und $\leq B$ b) S schwankt, B konstant	Ergebnisse nicht plausibel	Platzierung Logger (Schreibtischseite), Messungenauigkeit Logger. Position Jalousie und Stellung Lamellen unberücksichtigt
	Werte B Raum $\leq$ Mittelwert B Geschoss = geschlossene Verschattung	Teilweise Räume mit $< B$ auch $<$ Raumtemperatur	siehe oben

### Messungen und Nutzerverhalten

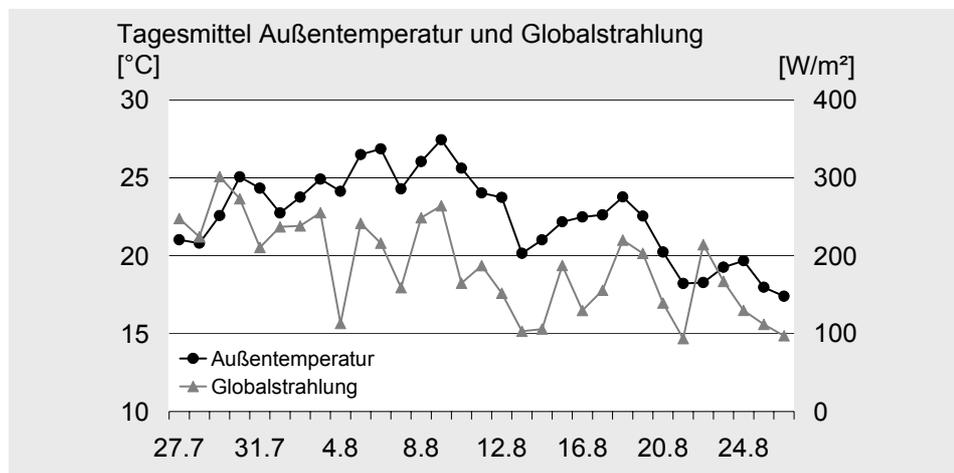
Eine Fragestellung der Auswertungen war, ob die Messungen Rückschlüsse auf das Nutzerverhalten bezüglich der Fensterlüftung und der Bedienung des Sonnenschutzes zulassen. Mit den verwendeten Methoden war es jedoch nicht möglich, belastbare Aussagen über das Nutzerverhalten zu machen, siehe Tab. 8.9.

### Sommer

#### Meteorologische Bedingungen

Auch im Sommer lag die gemessene Außentemperatur über den Referenzwerten von Meteonorm. Auf eine wärmere Periode mit einigen Tagesmittelwerten  $\geq 25$  °C Anfang August folgten ab Mitte des Monats kühlere Tage mit Tagesmittelwerten von zunächst  $\leq 25$  °C und später  $\leq 20$  °C. Die Globalstrahlung (Abb. 8.6) verhält sich entsprechend.

**Abb. 8.6:** Tagesmittelwerte der Außentemperatur und der Globalstrahlung für die Periode vom 27.07. bis zum 26.08.2004, Wuppertal. Das gemessene Monatsmittel lag für Juli bei 19,7 °C (185 W/m<sup>2</sup>) und für August bei 21,7 °C (164 W/m<sup>2</sup>). Die Werte nach Meteonorm, Vers. 5.0 liegen für Juli bei 17,3 °C (147 W/m<sup>2</sup>) und für August bei 17,1 °C (112 W/m<sup>2</sup>).



#### Raumlufttemperatur und Raumluftfeuchte

Im Sommer gibt es keine Einrichtung (Heizung, Kühlung) zur Kontrolle der Raumtemperaturen.

Die mittlere Raumlufttemperatur, sowie die mittlere Anzahl der Stunden  $\geq 26$  °C nehmen von Geschoß zu Geschoß etwas zu. Die Standardabweichung ist im 2. OG mit 1,9 an höchsten und verringert sich mit zunehmender Gebäudehöhe. Wie die Zunahme der Raumlufttemperatur erwarten lässt, so ist beim Stockwerksmittel der Raumluftfeuchte eine leichte Abnahme von 45,9 % im 2. OG bis zu 42,7 % im 6. OG zu beobachten.

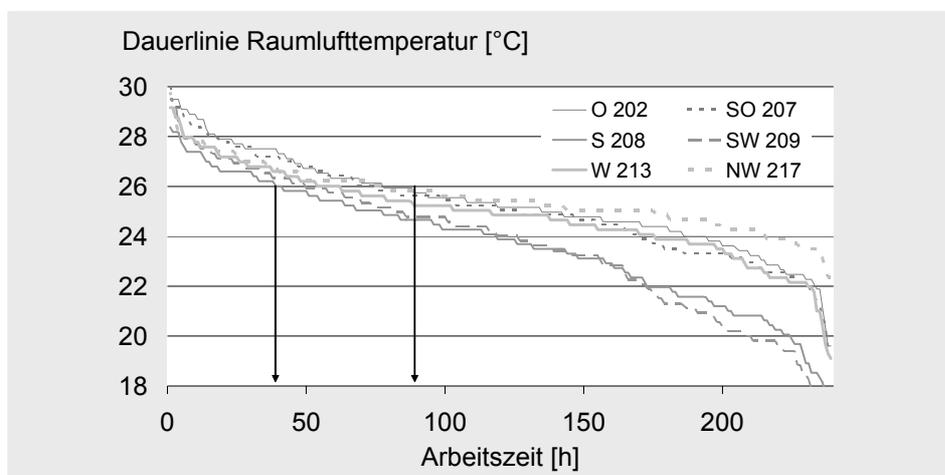
**Tab. 8.10:** Mittelwerte, Mediane, Standardabweichungen und Stunden  $\geq 26$  °C der Raumlufttemperatur und relativen Feuchte für die Büros des 2., 4. und 6. OG während der Arbeitszeit. Gebäude W. Ermittlung: Jeder Raum wird einzeln ausgewertet. Zum Vergleich wird aus diesen Werten ein Mittelwert gebildet. Auswertungen für jeden Raum, siehe Anhang Tab. A8.2.1-7 bis -9.

	Raumlufttemperatur				Feuchte		
	Mittelwert	Median	SD	$\geq 26$ °C	Mittelwert	Median	SD
	(°C)	(°C)	(-)	(%)	(%)	(%)	(-)
Büros 2. OG	±24,6	24,7	1,9	60,4	±45,9	46,2	7,9
Büros 4. OG	±25,1	25,1	1,6	68,1	±44,4	45,1	7,1
Büros 6. OG	±25,7	25,7	1,5	99,5	±42,7	43,1	6,1

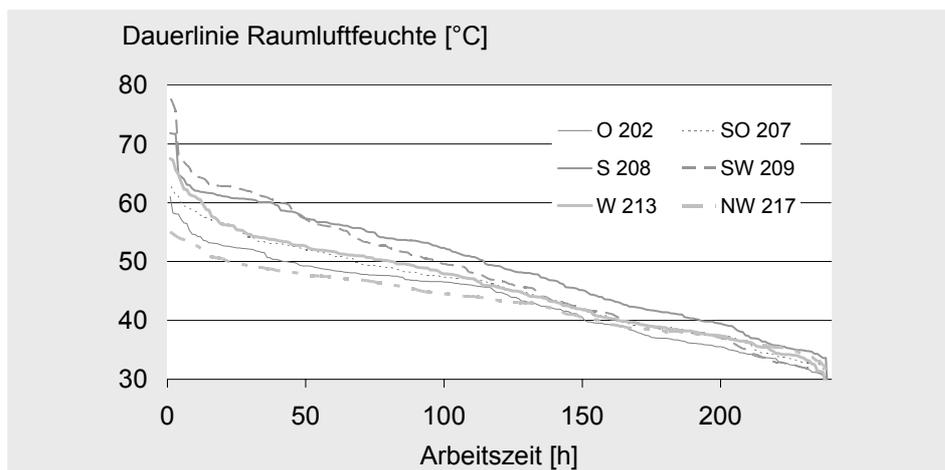
Die Dauerlinie für die Raumlufttemperatur während der Messperiode zeigt Abb. 8.7 beispielhaft für das 2. OG. Zunächst ist festzustellen, dass die Raumlufttemperaturen sich von Raum zu Raum (auf allen Geschossen) unterscheiden. Wie groß diese Unterschiede sind, wird an den Stunden der Arbeitszeit, während denen die Raumlufttemperatur  $\geq 26^\circ\text{C}$  war, deutlich. Im Südbüro (S 208) waren dies 39, im Ostbüro (O 202) 88 Stunden. Im 6. OG betrug die Differenz rund 100 Stunden (N 617: 51, SW 607: 150 Stunden).

Auffallend niedrige Temperaturen weisen die Räume S 208 und SW 209 auf. Die Tatsache, dass es in beiden Räumen auch nachts kühler als in den anderen Räumen ist, in Verbindung mit einer über dem Mittel liegenden Standardabweichung (2,3 und 2,75), lässt auf häufig offene Fenster schließen.

Wie Abb. 8.8 für das 2. OG zeigt, treten auch bei der relativen Feuchte Unterschiede zwischen den Räumen auf.



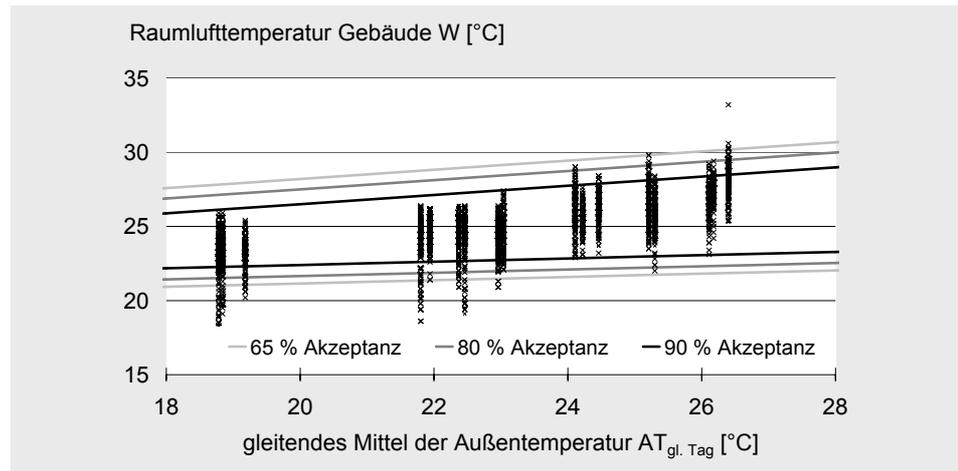
**Abb. 8.7:** Dauerlinie für die Raumlufttemperatur im 2. OG, Gebäude W. Berücksichtigt wurden Stundenwerte für die Arbeitszeit. Ablesebeispiel: Im Raum 208 überschritt die Raumtemperatur an 39 Stunden während der Arbeitszeit  $26^\circ\text{C}$ , in Raum 202 war dies an 88 Stunden der Fall.



**Abb. 8.8:** Dauerlinie der relativen Raumluftfeuchte für das 2. OG, Gebäude W.

Die Bewertung der Raumlufttemperatur in Abhängigkeit vom gleitenden Mittel der Außentemperatur nach der ATG-NL zeigt Abb. 8.9. Es zeigt sich die Tendenz des Gebäudes, die Komfortgrenzen bei niedriger Außentemperatur zu unter- und bei steigender Außentemperatur zu überschreiten.

**Abb. 8.9:** Anwendung der ATG-NL auf das Gebäude W. Abweichend vom Standard, der die Verwendung der operativen Raumtemperatur vorsieht, wurde hier die Raumlufttemperatur verwendet, da nur diese gemessen wurde. Die Grafik stellt die Stundenwerte für jeden Raum dar.



## Einflussfaktoren auf die Raumlufttemperatur im Sommer

### Interne Wärmequellen

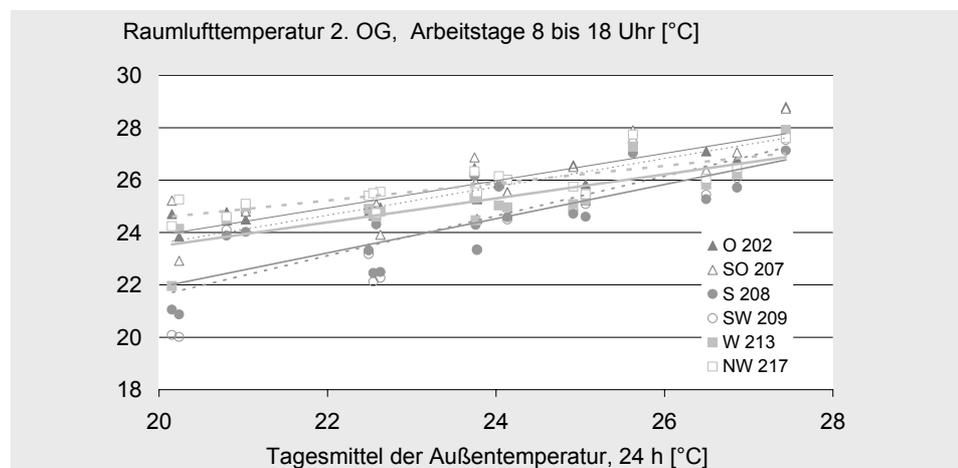
Entgegen der Erwartung konnte ein Zusammenhang zwischen internen Lasten (Aufstellung, siehe Abb. A8.2.1-25) und der mittleren Raumlufttemperatur der Büros auch in der warmen Jahreszeit nicht festgestellt werden. Das deutet auf unterschiedlich intensive kompensative Maßnahmen der Nutzer hin (Fensterlüftung, Verschattung).

### Außentemperatur

Im Sommer ist die Raumlufttemperatur sehr stark an die Außentemperatur gekoppelt. Im 2. OG ist dieses Phänomen am stärksten (Abb. 8.10). Steigt die Außentemperatur um 1 K, so wird es z. B. in Raum S 208 um 0,76 K wärmer, im Raum SW 209 um 0,65 K (unterste Regressionsgraden). Die Ursache dafür ist sehr wahrscheinlich das Lüftungsverhalten<sup>7</sup>, was die Größe des Nutzereinflusses auf die Raumlufttemperatur unterstreicht. Eine weitere Ursache ist die Korrelation zwischen der Außentemperatur und der Strahlung.

<sup>7</sup> Hier sei auf die Kommentare zu den Dauerlinien der Raumlufttemperatur der beiden Räume verwiesen.

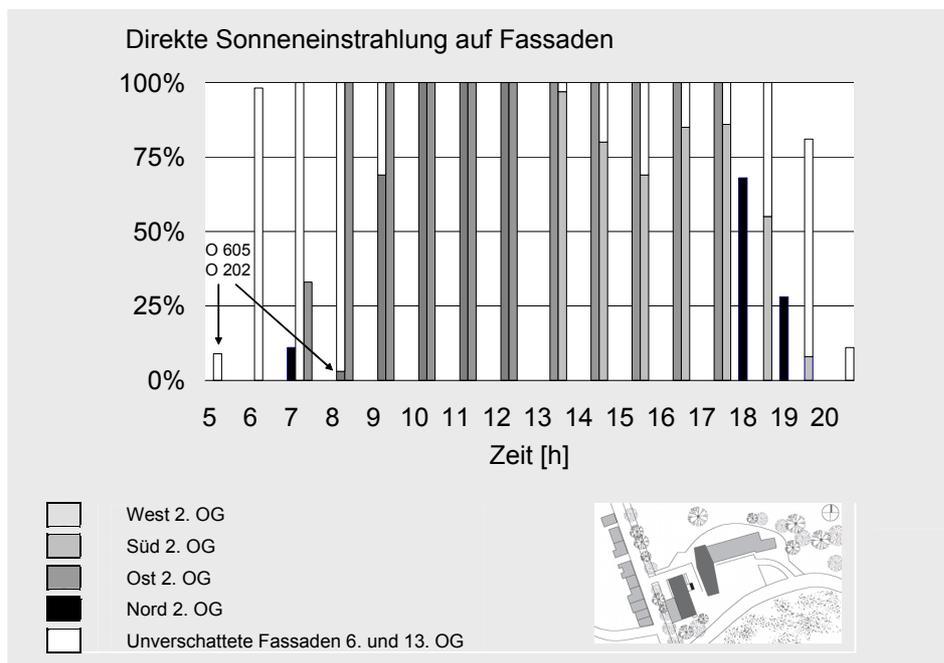
**Abb. 8.10:** Zusammenhang zwischen Raumlufttemperatur und Außentemperatur für das 2. OG, Gebäude W. Dargestellt sind die Mittelwerte für die Raumlufttemperatur bezogen auf die Arbeitszeit. Die Mittelwerte für die Außenluft (ab 20 °C) gelten jeweils für 24 h.



Im 4. und 6. OG ist die Ankopplung insgesamt etwas schwächer (Maximalwert 6. OG: 0,55 K). Die Korrelationen sind insgesamt hoch, sie liegen im 2. OG zwischen  $r = 0,85$  (W 213) und  $r = 0,93$  (O 202) sowie im 6. OG zwischen  $r = 0,79$  (NO 618) und  $r = 0,91$  (W 610).

### Strahlung

Im 2. OG ist die Ostfassade durch das gegenüberliegende Gebäude größtenteils und die Westfassade durch den Baumbestand teilweise verschattet (Abb. 8.11). Das 4. OG entspricht bis auf eine geringere Verschattung auf der Westseite durch den Baumbestand dem 2. OG. Im 6. OG erhält nur die Ostfassade teilweise keine direkte Sonneneinstrahlung.



**Abb. 8.11:** Analyse der direkten Sonneneinstrahlung auf die Fassaden im August, Gebäude W. Die gefüllten Balken stellen das 2. OG dar, die weißen Ergänzungen das 6. OG.

Anmerkungen: Der Eckraum Nord-Ost im 2. OG (NO 218) erhält auf der Ostfassade keine direkte Sonneneinstrahlung. Dargestellt („Ost“) ist der Raum in der Gebäudemitte mit Ostfassade (O 202). Im 6. OG ist der Eckraum Süd-Ost mit der Ostfassade (O 605) gezeigt. Der Raum in Gebäudemitte mit Ostfassade (O 602) hat die gleiche direkte Sonneneinstrahlung wie der darunterliegende Raum im 2. OG (O 202).

Als Berechnungsprogramm wurde „Sombrero“ eingesetzt.

Trotz der verminderten direkten Sonneneinstrahlung ist im 2. OG die Abhängigkeit zwischen Raumlufttemperatur und Globalstrahlung am stärksten<sup>8</sup>. Im 4. OG sind die Zusammenhänge am schwächsten<sup>9</sup>.

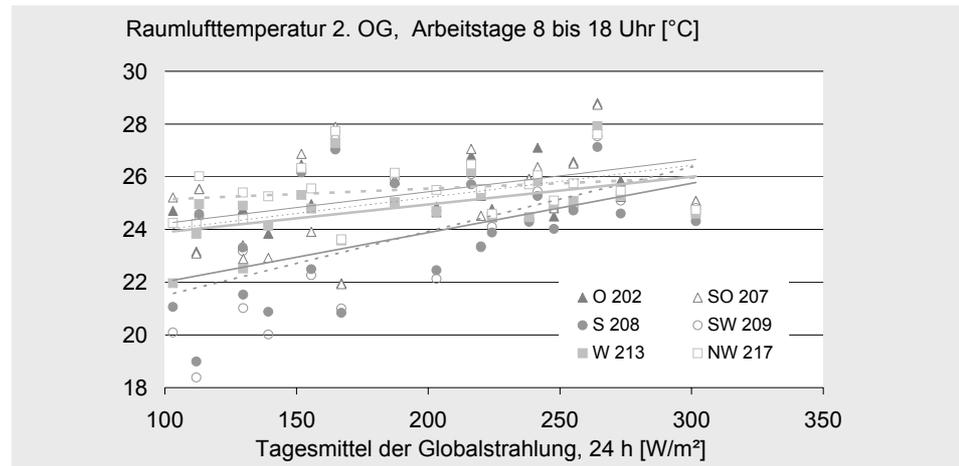
Die Korrelationen sind etwas schwächer als bei der Außentemperatur, sie reichen im 2. OG vom  $r = 0,32$  (NW 217) bis  $r = 0,64$  (SW 209), im 4. OG liegen sie zwischen  $r = 0,09$  (NO 618) und  $r = 0,68$  (O 605).

Insgesamt ist bei der Interpretation des Zusammenhangs zwischen Globalstrahlung und Raumlufttemperatur zu berücksichtigen, dass die Abhängigkeit im großen Maße von der Bedienung des Sonnenschutzes abhängt. In Räumen mit einer starken Abhängigkeit ist der Sonnenschutz mit großer Wahrscheinlichkeit sehr häufig hochgefahren (ev. Nutzer abwesend), in Räumen mit einer schwachen Abhängigkeit ist der Sonnenschutz oftmals heruntergefahren. Eine zeitlich aufgelöste Interpretation ist nicht möglich (siehe Winter, Anmerkungen Tab. 8.9).

<sup>8</sup> Maximalwert: SW 209 pro 100 W/m<sup>2</sup> Strahlungsleistung Anstieg Raumlufttemperatur 2,44 K, siehe Abb. 8.12.

<sup>9</sup> Maximalwert: S 407 pro 100 W/m<sup>2</sup> Anstieg Raumlufttemperatur 0,94 K.

**Abb. 8.12:** Zusammenhang zwischen Raumlufttemperatur und Globalstrahlung im 2. OG, Gebäude W. Als Raumlufttemperatur sind hier die Stundenmittelwerte der Arbeitstage aufgeführt.



### Verglasungsanteil der Gebäudehülle

Entgegen der Erwartung ist auch im Sommer kein Zusammenhang zwischen solarer Aperturfläche (als Strahlungseintrittsfläche) und Raumlufttemperatur festzustellen. Dies ist auf das kompensatorische Handeln der Nutzer zurückzuführen, die im Sommer aufgrund der erhöhten Blendung den Sonnenschutz häufiger heruntergefahren haben.

### Temperaturverhalten des Gebäudes in der Sommerperiode

In diesem Abschnitt soll anhand der Verschiebung zwischen den mittleren Temperaturextremalwerten (Maxima und Minima) drinnen und draußen gezeigt werden, wie das Gebäude zeitlich gesehen auf äußere thermische Gegebenheiten reagiert. Voraussetzung dafür ist eine Periode mit gleichmäßigen Amplituden der Außentemperatur als Untersuchungszeitraum<sup>10</sup> und die Aufteilung des Gebäudes in Zonen ähnlichen thermischen Verhaltens. Dabei wurden zwei unterschiedliche Arten der Zonierung untersucht:

- Die einzelnen Geschosse
- Räume mit Fenstern in die gleichen Himmelsrichtungen, wobei Gruppen von unterschiedlicher Größe entstehen.

Da das Gebäude nicht klimatisiert wird, ist mit einer zeitverzögerten Reaktion der Raumlufttemperatur auf die Außentemperatur zu rechnen. Die Dauer der Verzögerung ist von folgenden Faktoren abhängig:

- Speichermasse der Räume:  
Aufgrund der abgehängten Decken und der leichten Trennwände zwischen den Büros ist mit einer eher kürzeren Zeitverzögerung zu rechnen (Wandaufbauten siehe Tab. A8.5.1-1).
- Zeitpunkt maximaler Solarstrahlung auf jeweilige Fassade (Ost- vor Westorientierung).
- An das Nutzerverhalten gekoppelte – und daher nicht exakt bekannte - Parameter (Fensterlüftung, Sonnenschutzbedienung, Höhe und zeitlicher Verlauf der internen Wärmequellen).

Im Untersuchungszeitraum lag das Temperaturmaximum außen um 13:00 Uhr. Auf die Geschosse bezogen sind im 2. OG 4,0 h, im 4. OG 3,5 h und im 6. OG 4,5 h Zeitverzögerung zu beobachten. Geht man davon aus, dass die Speichermassen auf den Geschossen gleich sind, so sind diese Unterschiede auf das Nutzerverhalten zurückzuführen (Abb. A8.2.1-34).

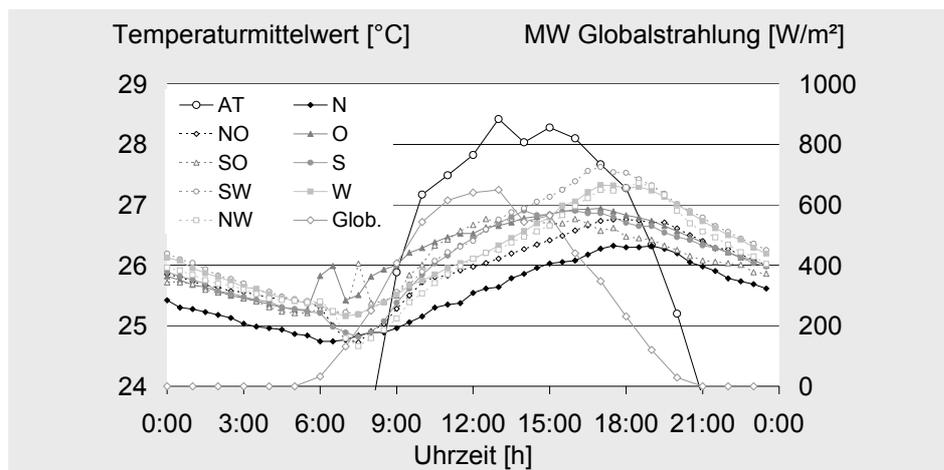
<sup>10</sup> 28.07.04 bis zum 12.08.04, grafische Darstellung, siehe Abb. A8.2.1-33

Betrachtet man die Zonierung entsprechend der Orientierung (Abb. 8.13), so lässt sich ein dem zeitlichen Verlauf der direkten solaren Einstrahlung entsprechendes Verhalten der Raumgruppen beobachten.

Die Ost- und Südräume erwärmen sich zuerst, der exakte Zeitpunkt des Temperaturmaximums ist aber schwer bestimmbar, da der Verlauf der Kurve flach (Amplitude: 1,5 bis 2,0 K) ist. Die Maximalwerte treten zwischen 14:00 und 17:00 Uhr auf.

Die Räume nach Südwest, West und Nordwest erwärmen sich zunächst etwas langsamer, weisen aber am späten Nachmittag von allen Räumen die höchsten Temperaturen und Temperaturamplituden (2,1 bis 2,7 K) auf. Ihr Temperaturmaximum liegt zwischen 17:00 (West, Südwest) und 18:30 Uhr (Nordwest).

Die Temperaturkurven der Räume nach Nord und Nordost verlaufen auf etwas tieferem Niveau (Unterschied Südwest (hoch) und Nord (niedrig) 1,3 K) und haben ihr – schwer bestimmbares - Temperaturmaximum um 17:30 Uhr (Amplitude: 1,6 bis 2,0 K). Die Verzögerung aller untersuchten Büros liegt im Mittel bei 4,0 h. Am Morgen ist außen das Minimum um 5:00 Uhr erreicht, das Mittel für alle untersuchten Büros liegt bei 2 h Verzögerung.



**Abb. 8.13:** Mittelwerte für den Tagesgang der Raumlufttemperatur und der Außentemperatur für die Periode vom 28.07.04 bis zum 12.08.04, Gebäude W. Die untersuchten Büros sind entsprechend ihrer Orientierung gruppiert. Anmerkung: Der Temperaturanstieg in den Süd und Südostbüros zwischen 5:30 und 6:00 Uhr ist dadurch zu erklären, dass an einigen Tagen ab dem 08.08. Temperaturen auftraten, die um 1-2 K vom Mittel abwichen. Die Ursache (systematischer Messfehler, Veränderung interne Lasten) konnte nicht geklärt werden.

## Rückschlüsse auf die Gebäudesanierung aus den Messungen

### Winter

Raumtemperatur und Raumluftfeuchte entsprechen nicht den Komfortansprüchen, die an ein Bürogebäude gestellt werden. Die Raumtemperatur ist schlecht regelbar, oft zu hoch und die Raumluft ist zu trocken.

Für alle Büros gibt es eine Fußbodenheizung, deren Vorlauftemperatur zentral über einen Außentemperaturfühler gesteuert wird. Pro Geschoss besteht für vier Abschnitte, die jeweils mehrere Büros umfassen, eine manuelle Regelungsmöglichkeit. Einzelne Heizschleifen sind wegen Undichtigkeit abgeschaltet. Es gibt eine Nachtabsenkung.

Die schlechten Wärmedämmeigenschaften der Fenster führen zu einer „Strahlungsasymmetrie“, der mittels einer hohen Raumlufttemperatur

entgegengewirkt wird. Beim Aufheizen der Luft sinkt mit steigender Temperatur die relative Luftfeuchte.

Während der Winter-Messungen liegt die Raumlufftemperatur meist im Bereich zwischen 19 und 24 °C, an 26 % der Arbeitsstunden ist es in den Büros wärmer als 24 °C. Die relative Feuchte beträgt während 83 % der Arbeitsstunden innerhalb der Messperiode weniger als 30 %. Dass Beeinträchtigungen der Belegschaft durch die geringe relative Feuchte der Luft auftreten, geht aus den Fragebögen hervor. Die Raumtemperaturen werden als zu warm eingestuft.

Sanierung: Der Einbau eines anderen, besser regelbaren Wärmeabgabesystems ist notwendig. Werden die Wärmedämmeigenschaften der Fenster verbessert, kann auch die Raumlufftemperatur sinken, die relative Luftfeuchte steigt (auch in Verbindung mit einer erhöhten Luftdichtheit der Fassade).

### *Sommer*

Die Werte für die Raumlufffeuchte liegen innerhalb der normativen Anforderungen (ehemals DIN 1946-2:1994-01, ersetzt durch DIN EN 13779:2005-05). Anders ist dies bei der Raumlufftemperatur, die beispielsweise im 6. OG an 68 % der Arbeitsstunden während der Messperiode über 25 °C und an 42 % der Arbeitsstunden über 26 °C liegt. In den übrigen Geschossen sind diese „Überschreitungszeiten“ etwas geringer. Die Nutzerbefragung bestätigt die Unzufriedenheit mit den hohen Temperaturen.

Die Raumlufftemperatur ist stark an die Außentemperatur gekoppelt. Steigt die Außentemperatur um 1 K, so erhöht sich die Raumlufftemperatur zwischen 0,55 und 0,82 K.

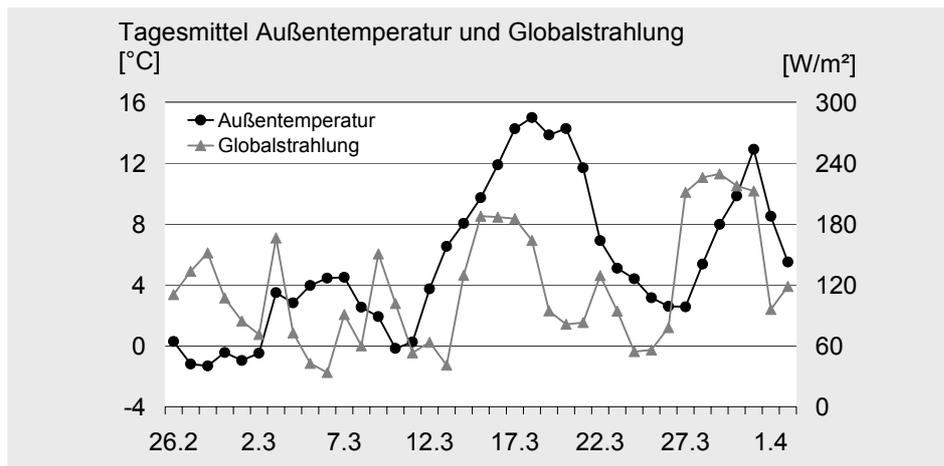
Sanierung: Durch geeignete Maßnahmen der passiven Kühlung kann die Raumlufftemperatur gesenkt werden.

## **8.2.2 Messungsergebnisse Gebäude B**

### **Winter**

#### *Meteorologische Bedingungen*

Die gemessene Lufttemperatur im Februar lag 1,3 K über dem Referenzwert von MeteoSchweiz, der März hingegen war ungewöhnlich kalt, die gemessene Lufttemperatur unterschritt den Referenzwert im Mittel um 2,1 K (Abb. 8.14). Der Durchschnittswert für Globalstrahlung im März entspricht dem Normwert für Februar. Die Außenbedingungen stellen damit eine gute Grundlage zur Untersuchung des Gebäudeverhaltens im Winter dar.



**Abb. 8.14:** Tagesmittelwerte der Außentemperatur und der Globalstrahlung für die Periode vom 26.02. bis zum 01.04.2004, Basel, CH. Das gemessene Monatsmittel lag für Februar bei 3,7 °C (70 W/m<sup>2</sup>) und für März bei 3,6 °C (72 W/m<sup>2</sup>). Die Werte nach MeteoSchweiz liegen für Februar bei 2,4 °C (78 W/m<sup>2</sup>) und für März bei 5,7 °C (73 W/m<sup>2</sup>). Die Normwerte von Meteo-Schweiz gelten für den Zeitraum von 1961 bis 1990.

### Raumlufttemperatur und Raumluftfeuchte

Der Vergleich der Mittelwerte der Raumlufttemperatur und der Anteil der Arbeitsstunden mit einer Raumlufttemperatur  $\geq 24$  °C zeigen, dass sich innerhalb des Gebäudes eine nach oben zunehmende Temperaturschichtung ergibt. Dies könnte daran liegen, dass die Zuluftheizung konstant warme Luft in den Raum bringt (z. B. 22 °C) und nur das Thermostat der Heizkörper die Wärmelieferung stoppt. Da mit zunehmender Gebäudehöhe auch die Strahlungseinträge zunehmen, tritt in den oberen Geschossen öfters die Situation ein, dass selbst bei geschlossenem Ventil der Heizkörper allein über die Zuluftheizung zu viel Wärme in den Raum gelangt.

Die Raumlufttemperaturen während der Arbeitszeit weisen eine durch bestimmte Einflüsse (interne Lasten, Außentemperatur, Lüften, Globalstrahlung) motivierte Streuung auf, da die Lüftungsanlage –zumindest theoretisch– Tag und Nacht eine konstante Temperatur liefert. Die Höhe der Standardabweichung unterscheidet sich in Abhängigkeit von der Orientierung (hohe Werte auf der Süd- und auf der Westseite), die Geschoßhöhe hat keinen durchgängig erkennbaren Einfluss.

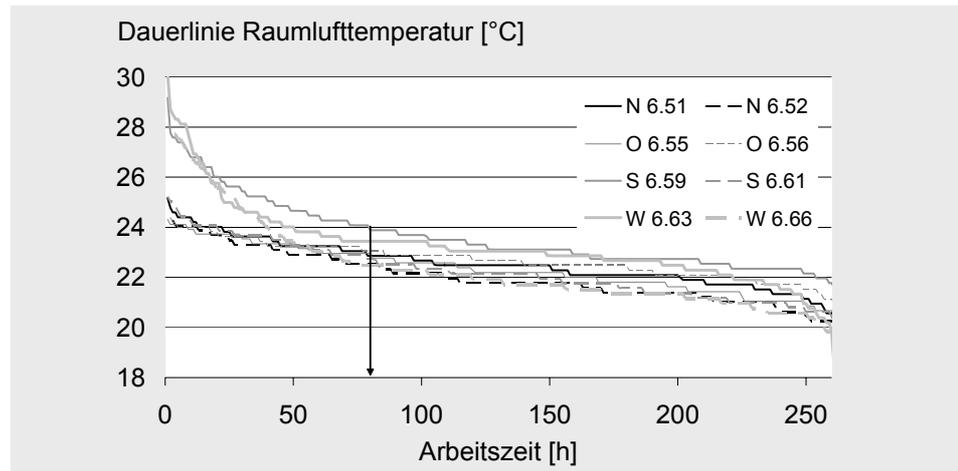
Die Raumluft ist auf allen Geschossen extrem trocken und die relative Feuchte liegt während fast 100 % der Arbeitszeit unter 30 %.

**Tab. 8.11:** Mittelwerte, Mediane, Standardabweichungen und Stunden  $\geq 24$  °C der Raumlufttemperatur und relativen Feuchte für die Büros des 2., 4. und 6. OG während der Arbeitszeit. Gebäude B. Ermittlung: Jeder Raum wird einzeln ausgewertet. Zum Vergleich wird aus diesen Werten ein Mittelwert gebildet. Auswertungen für jeden Raum, siehe Anhang Tab. A8.2.2-1 bis -3.

	Raumlufttemperatur				Feuchte			
	Mittelwert	Median	SD	$\geq 24$ °C	Mittelwert	Median	SD	$\leq 30$ %
	(°C)	(°C)	(-)	(%)	(%)	(%)	(-)	(%)
Büros 2. OG	$\pm 21,9$	21,8	0,9	5	$\pm 24,8$	23,7	1,8	98
Büros 6. OG	$\pm 22,6$	22,4	1,2	12	$\pm 24,7$	23,9	1,6	99
Büros 13. OG	$\pm 23,2$	23,2	1,0	22	$\pm 24,5$	23,7	1,5	99

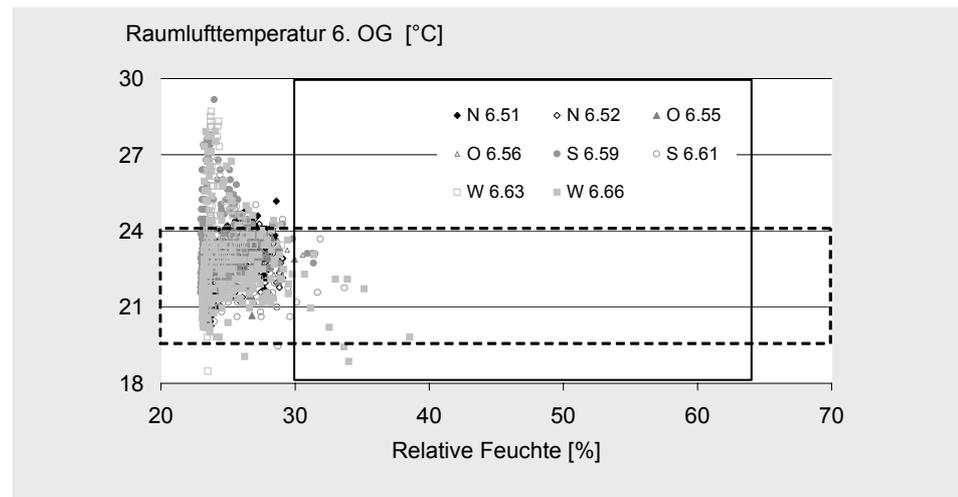
Bei der Analyse der Dauerlinien der Raumlufttemperatur wird deutlich, dass es Temperaturunterschiede zwischen den einzelnen Räumen gibt (Abb. 8.15 zeigt exemplarisch das 6. OG). Der wärmste Raum im 2. OG liegt auf der Ostseite, die wärmsten Räume des 6. und 13. OG sind nach Süden orientiert.

**Abb. 8.15:** Dauerlinie für die Raumlufthtemperatur im 6. OG, Gebäude B. Berücksichtigt wurden Stundenwerte für die Arbeitszeit. Lesebeispiel: Im Raum S 6.59 (Orientierung Süd) liegt die Raumlufthtemperatur an 80 Stunden über 24 °C.



**Abb. 8.16:** Raumlufthtemperatur und Raumlufthfeuchte im 6. OG, Gebäude B. Eingezeichnet sind die Anforderungen nach [SIA V382/1, 1992]. Danach sind prinzipiell Werte zwischen 30 und 65 % relativer Feuchte für die Raumlufth empfohlen (durchgezogene Linie). Gelegentliche Unterschreitungen an wenigen Tagen pro Jahr bis 20 % und gelegentliche Überschreitungen bis 75 % sind jedoch physiologisch zulässig. Als Raumlufthtemperatur wird im Winter ein Betriebsbereich zwischen 19 °C und 24 °C vorgegeben (gestrichelte Linie). Die Angaben der [DIN EN 13779:2005-05] sind bezüglich der relativen Feuchte gleich. Nach [DIN EN ISO 7730:2006-05] gelten für die Raumlufthtemperatur 20 – 24 °C, siehe Abb. 8.5. Es sind die Stundenwerte der Arbeitszeit aufgeführt.

Insgesamt ist die Raumlufth in den einzelnen Geschossen sehr trocken. Wie Raumlufthtemperatur und Raumlufthfeuchte gemäß den gesetzlichen Anforderungen nach [SIA V382/1, 1992] und [DIN EN 13779:2005-05] einzuordnen sind zeigt Abb. 8.16 beispielhaft für das 6. OG. Die relative Feuchte unterschreitet die Grenzwerte nahezu immer.



### Einflussfaktoren auf die Raumlufthtemperatur im Winter

Die Raumlufthtemperatur wird durch interne (Heizung, Teilklimaanlage, interne Wärmequellen) und externe (Außentemperatur, Globalstrahlung) Faktoren beeinflusst. Heizung und Teilklimaanlage wirken konstant, die übrigen Faktoren in unterschiedlichen Zeitrhythmen.

#### Heizung

Die Heizung wird pro Geschöß und raumgruppenweise für die Büros einer Himmelsrichtung geregelt. Ein Teil der Wärme wird über die Lüftungsanlage mit einer Zulufttemperatur von ca. 22 °C abgegeben. Durch die Konstanz der Wärmelieferung und den Umluftanteil ist zu erwarten, dass der Einfluss der externen Faktoren eher gering ist, da er „verteilt“ wird.

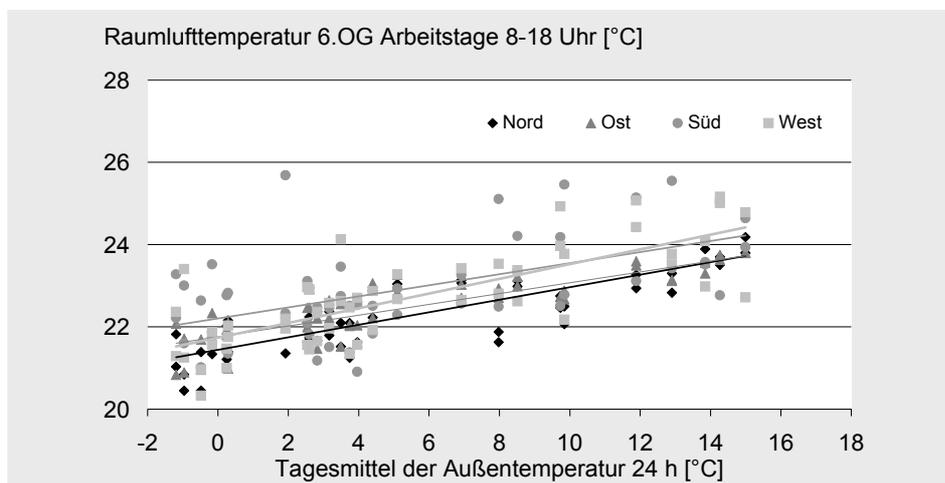
### Interne Wärmequellen

Die internen Wärmequellen liegen im Mittel bei 94 Wh/(m<sup>2</sup>d) pro Raum. Die Spannweite reicht<sup>11</sup> von 65 Wh/(m<sup>2</sup>d) (Raum 2.59) bis 137 Wh/(m<sup>2</sup>d) (Raum 6.61). Nach [SWKI 95-3, 2001] sind die internen Wärmequellen noch im niedrigen Bereich. In keinem der Geschosse konnte eine Korrelation zwischen internen Wärmequellen und der Raumlufttemperatur nachgewiesen werden.

<sup>11</sup> entsprechend Belegung, Geräteausstattung und elektrischer Beleuchtung

### Außentemperatur

Zwischen Raumlufttemperatur und Außentemperatur besteht ein schwacher Zusammenhang. Steigt die Außentemperatur um 1 K an, so erwärmt sich z. B. im 6. OG die Raumlufttemperatur um 0,13 bis 0,18 K (Abb. 8.17). Dies liegt zum einen am konstanten Heizanteil der Zuluft und zum anderen daran, dass sich die Heizung zwar abschaltet, wenn sich der Raum erwärmt, die Wärme aber im Raum bleibt. Erwartet wurde ein noch schwächerer Zusammenhang. Entweder ist also die Wirkung der Lüftungsanlage (Umluft) weniger ausgleichend als vermutet, oder die „Überhitzungen“ sind stark.



**Abb. 8.17:** Zusammenhang zwischen Raumlufttemperatur und Außentemperatur im 6. OG, Gebäude B. Die Regressionslinien sind den Räumen der jeweiligen Himmelsrichtung zugeordnet.

### Strahlung

Eine Analyse der Zeiträume, wann auf die jeweiligen Fassaden direkte Sonneneinstrahlung trifft, zeigt, dass im 2. OG die Westseite zum Teil durch umgebende Bebauung verschattet ist (Abb. A8.2.2-10). Das 6. und 13. OG sind unverschattet.

Zwischen Globalstrahlung und Raumlufttemperatur lässt sich ein abhängig von Himmelsrichtung und Geschöß unterschiedlich ausfallender Zusammenhang feststellen. Insgesamt ist der Einfluss der Globalstrahlung auf die Raumlufttemperatur im 6. OG am größten. Steigt das Tagesmittel der Globalstrahlung um 100 W/m<sup>2</sup> an, so erwärmt sich die Raumluft um 1,3 K. Die schwächere Korrelation auf den anderen Geschossen könnte auf eine abweichende Bedienung des Sonnenschutzes zurückzuführen sein. Auch hier war eine weniger starke Verbindung prognostiziert worden (Erklärung, siehe „Außentemperatur“).

### Verglasungsanteil der Gebäudehülle

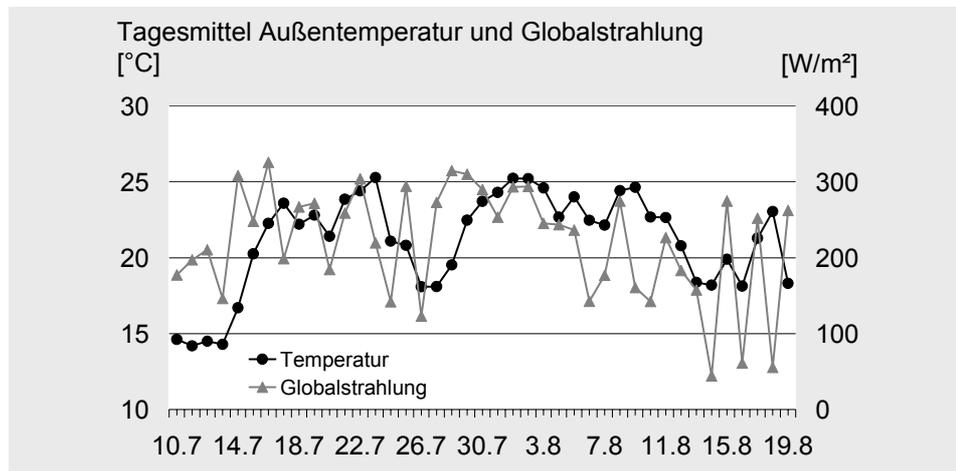
Zwischen Fenstergröße und der Raumlufthtemperatur gibt es im Winter keine Beziehung. In den untersuchten Räumen tritt nur ein enger Variationsbereich der Fenstergrößen auf.

### Sommer

Die gemessenen Temperaturen im Juli und August lagen 1,1 K, bzw. 2,6 K über den Normdurchschnittswerten von MeteoSchweiz. Bei der Globalstrahlung sind die Abweichungen gering (Abb. 8.18).

Zu Beginn der Aufzeichnungen traten Tagesmittelwerte unter 15 °C auf, später folgten zwei wärmere Abschnitte. Im Vergleich zum Sommer 2003 sind diese Temperaturen trotz Überschreitung der Norm-Monatsmittel moderat. Die Monatsmittel für Juli und August 2003 lagen bei 21,1 °C und bei 23,6 °C. Im August 2003 war das Tagesmittel an 11 Tagen  $\geq 26$  °C, im Juli 2003 war dies an 2 Tagen der Fall.

**Abb. 8.18:** Tagesmittelwerte der Außentemperatur und der Globalstrahlung für die Periode vom 10.07. bis zum 19.08.2004, Basel, CH. Das gemessene Monatsmittel betrug für Juli bei 19,8 °C (232 W/m<sup>2</sup>) und für August 20,4 °C (181 W/m<sup>2</sup>). Die Werte nach MeteoSchweiz liegen für Juli bei 18,7 °C (226 W/m<sup>2</sup>) und für August bei 17,8 °C (195 W/m<sup>2</sup>). Die Normwerte von MeteoSchweiz gelten für den Zeitraum von 1961 bis 1990.

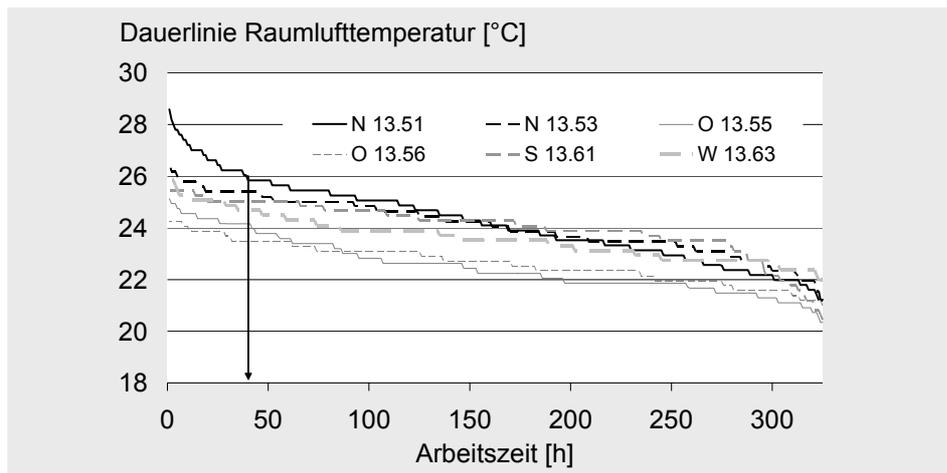


### Raumlufthtemperatur und Raumlufthfeuchte

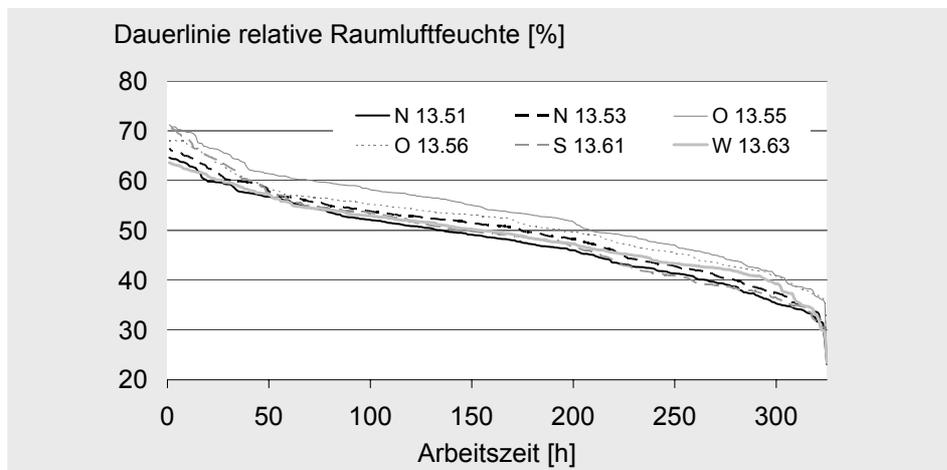
Im Sommer lässt sich keine Temperaturerhöhung zwischen den Geschossen feststellen. Das 6. Geschoss weist den höchsten Mittelwert für die Büroräume auf. Im 2. OG überschreiten an 9 % der Arbeitsstunden die Raumlufthtemperaturen  $\geq 26$  °C, mit zunehmender Geschosshöhe sinkt der Überschreitungswert. Die Standardabweichung variiert auf den Geschossen unabhängig von der Orientierung und ist im Mittel im 2. OG etwas höher als auf den übrigen Etagen.

**Tab. 8.12:** Mittelwerte, Mediane, Standardabweichungen und Stunden  $\geq 26$  °C der Raumlufthtemperatur und relativen Feuchte für die Büros des 2., 6. und 13. OG während der Arbeitszeit. Gebäude B. Ermittlung: Jeder Raum wird einzeln ausgewertet. Zum Vergleich wird aus diesen Werten ein Mittelwert gebildet. Auswertungen für jeden Raum, siehe Anhang Tab. A8.2.2-6 bis -8.

	Raumlufthtemperatur				Feuchte		
	Mittelwert	Median	SD	$\geq 26$ °C	Mittelwert	Median	SD
	(°C)	(°C)	(-)	(%)	(%)	(%)	(-)
Büros 2. OG	$\pm 23,2$	23,2	1,3	8,7	$\pm 51,3$	51,7	6,9
Büros 4. OG	$\pm 23,9$	23,9	1,1	5,0	$\pm 48,1$	48,4	6,9
Büros 6. OG	$\pm 23,5$	23,5	1,0	1,7	$\pm 50,1$	50,8	8,1



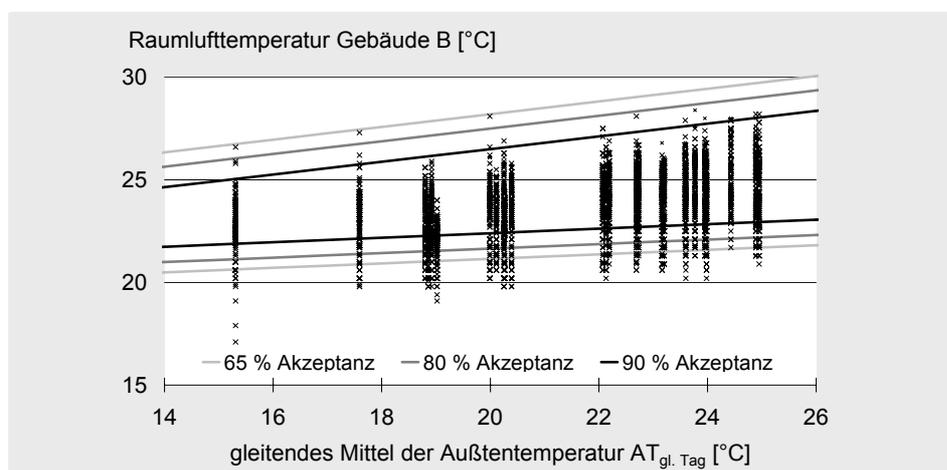
**Abb. 8.19:** Dauerlinie für die Raumlufthtemperatur im 13. OG, Gebäude B. Berücksichtigt wurden Stundenwerte für die Arbeitszeit. Ablesebeispiel: In Raum N 13.51 ist die Raumlufthtemperatur an 40 h der Arbeitszeit (8 bis 18 Uhr, Mo-Fr)  $\geq 26$  °C.



**Abb. 8.20:** Dauerlinie für die relative Raumlufthfeuchte im 13. OG, Gebäude B.

Der Flur im 13. OG weist als einziger sehr hohe Temperaturen auf, sie liegen zu 61 % der Arbeitszeit über 26 °C. Der Flur ist eine reine Abluftzone, ob die hohen Temperaturen aus dem darüberliegenden Geschoss kommen, ist unklar.

Die Analyse der kumulierten Raumlufthtemperaturen zeigt, dass zwischen den einzelnen Räumen im 2. OG die größten Temperaturunterschiede (Differenz Mittelwerte für Raumlufthtemperatur 3,7 K) und im 6. OG die geringsten Unterschiede (Differenz von 1 K, 13. OG: 1,7 K, Abb. 8.19) auftreten.



**Abb. 8.21:** Anwendung der ATG-NL auf das Gebäude B. Abweichend vom Standard, der die Verwendung der operativen Raumtemperatur vorsieht, wurde hier die Raumlufthtemperatur verwendet, da nur diese gemessen wurde. Die Grafik stellt die Stundenwerte für jeden Raum dar. Anmerkung: Trotz der aktiven Kühlung ist das Gebäude als Gebäude mit hoher Einflussmöglichkeit für die Nutzer (Typ Alpha), siehe Kap. 3.2.3, einzuordnen. Bewertet man die Raumlufthtemperatur nach der ATG-NL, so zeigt sich, dass das Gebäude eine Tendenz zur Unterschreitung der Komfortgrenzen aufweist.

Unterschiede bei der relativen Feuchte zwischen den Räumen sind zwar vorhanden, aber eher gering (Abb. 8.20, maximale Differenz 13. OG: 5,5 %).

Im Kontext der gesetzlichen Anforderungen liegen die Messwerte im geforderten Bereich. [SIA V382/1, 1992] empfiehlt für die Raumlufthtemperatur im Sommerbetrieb einen Betriebsbereich zwischen 22 und 28 °C. Während Hitzetagen (AT > 30 °C) darf die Raumlufthtemperatur während der Nutzungszeit auf über 28 °C ansteigen (ohne Garantieansprüche für diese Ausnahmezzeit). Die Raumlufthfeuchte sollte im Bereich zwischen 30 bis 65 % liegen. Wie die Raumlufthtemperatur im Zusammenhang der ATG-NL zu bewerten ist zeigt Abb. 8.21. Danach treten aufgrund der Kühlung eher Unterschreitungen der Komfortgrenzen auf.

### **Einflussfaktoren auf die Raumlufthtemperatur im Sommer**

Das Gebäude wird im Sommer über die Teilklimaanlage gekühlt, die Luft wird weder be- noch entfeuchtet. Bei einer ideal funktionierenden Anlage wären nahezu konstante Raumtemperaturen zu erwarten. Da dies nicht der Fall ist, sollen im Folgenden die Faktoren untersucht werden, die die Innenraumtemperatur zusätzlich beeinflussen.

#### *Steuerung der Kühlung über die Lüftungsanlage*

Die Kühlung wird – analog zur Heizung im Winter – raumgruppenweise für die Büros einer Himmelsrichtung gesteuert und ist potenziell Tag und Nacht in Betrieb. Es besteht die begründete Vermutung<sup>12</sup>, dass die Anlage real nicht entsprechend der in Kap. 7.4 gemachten Angaben läuft.

<sup>12</sup> Alter der Anlage, manuelle Temperatureinstellungen über Drehschalter

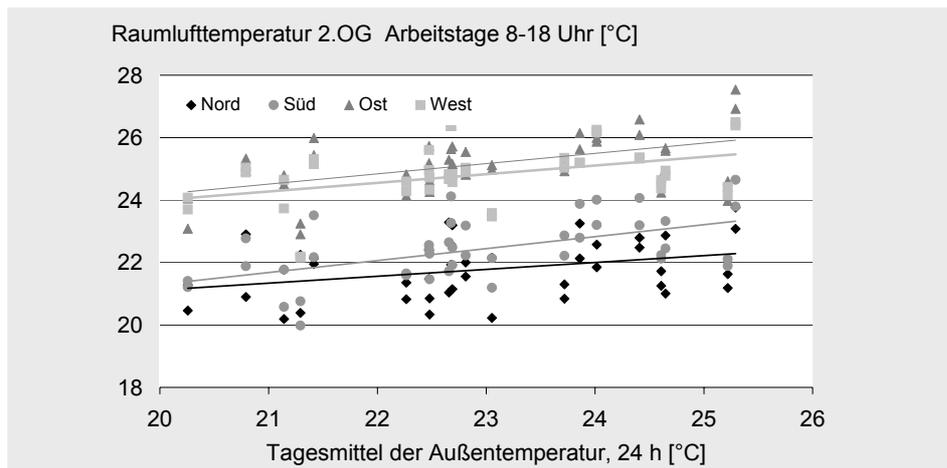
#### *Interne Wärmequellen*

Ein Bezug zwischen internen Lasten (Aufstellung, siehe Anhang) und der mittleren Raumlufthtemperatur der Büros konnte auch im Sommer nicht festgestellt werden.

#### *Außentemperatur*

Die Raumlufthtemperatur steht mit der Außentemperatur im Zusammenhang. Am stärksten ist dies im 2. OG zu beobachten, wobei die Räume auf der Südseite die stärkste Ankopplung aufweisen. Steigt die Außentemperatur um 1 K, so wird es in den Büros um 0,4 K wärmer ( $r = 0,57$ ), auf den übrigen Etagen ist die Verbindung schwächer, die stärksten Steigungen pro 1 K Außentemperatur betragen hier 0,3 K. Es ist keine von der Orientierung abhängige Rangfolge der Korrelationen zu erkennen.

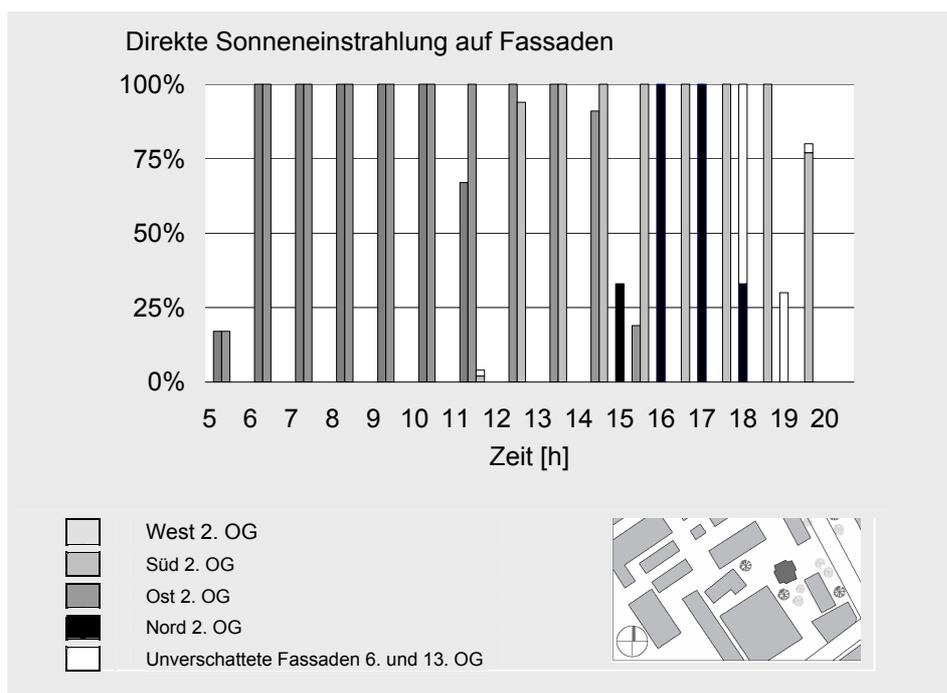
Die Ankopplung der Räume ist schwächer als beim Gebäude W, jedoch wird deutlich, dass die konstante Kühlung die Einwirkung der Außentemperatur nicht ganz kompensiert.



**Abb. 8.22:** Zusammenhang zwischen Raumlufttemperatur und Außentemperatur (Tagesmittel  $\geq 20$  °C) im 2. OG, Gebäude B. Steigt die Außentemperatur um 1 K, so wird es in den Büros auf der Südseite um 0,4 K wärmer.

### Strahlung

Eine Analyse der Zeiträume, wann auf die jeweiligen Fassaden direkte Sonneneinstrahlung trifft, zeigt, dass auf der West- und Nordfassade Verschattungen auftreten (Abb. 8.23).

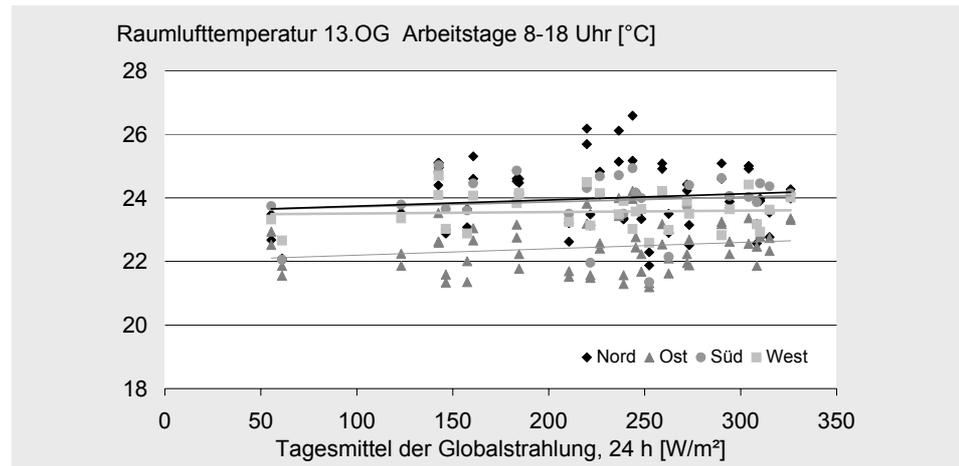


**Abb. 8.23:** Analyse der direkten Sonneneinstrahlung auf die unterschiedlichen Fassaden im August, Gebäude B. Das Gebäude ist mit einer Abweichung von  $28^\circ$  gegenüber einer exakten Nordausrichtung nach Nordosten orientiert. Die gefüllten Balken stellen das 2. OG dar, die weißen Ergänzungen (z. B. 18 Uhr), das 6. und 13. OG ohne Verschattungen. Als Berechnungsprogramm wurde „Sombbrero“ eingesetzt.

Zwischen Globalstrahlung und Raumlufttemperatur besteht fast keine Beziehung (Abb. 8.24). Dies ist auf allen Geschossen so, stellvertretend ist hier das 13. OG gezeigt<sup>13</sup>. Als Erklärung dient primär die Teilklimatisierung, die Temperaturerhöhungen in den Räumen abschwächt, und sekundär der Einsatz des externen Sonnenschutzes.

<sup>13</sup> Die Korrelationskoeffizienten liegen für dieses Geschoss zwischen  $r = 0,06$  für Raum 13.63 und  $r = 0,27$  für Raum 13.56.

**Abb. 8.24:** Zusammenhang zwischen Raumlufttemperatur und Globalstrahlung im 13. OG, Gebäude B. Aufgeführt sind hier die Tagesmittelwerte der Arbeitstage (8-18 Uhr) und das Tagesmittel (24 h) der Globalstrahlung.



### Verglasungsanteil der Gebäudehülle

Auch im Sommer ist kein Zusammenhang zwischen solarer Aperturfläche (als Strahlungseintrittsfläche) und Raumlufttemperatur festzustellen.

### Temperaturverhalten des Gebäudes in der Sommerperiode

Die Untersuchung des Temperaturverhaltens im Sommer entspricht von der Systematik her dem Vorgehen beim Gebäude W. Als Untersuchungsperiode diente der Zeitraum vom 27.07.04 bis zum 05.08.04 (Abb. A8.2.2-36). Das Temperaturmaximum außen in der Messperiode war um 17:00 Uhr.

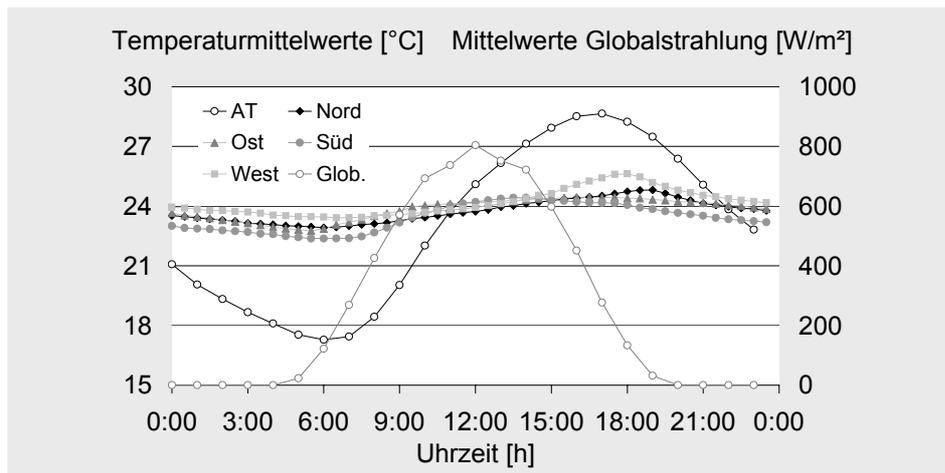
Die Erwartungen an das Temperaturverhalten sind beim Gebäude B jedoch anders. Da die Teilklimatisierung konstant läuft, ist davon auszugehen, dass dies die übrigen Einflüsse<sup>14</sup> sehr stark abdämpft.

Unterscheidet sich die Zeitverzögerung zwischen Maximal- und Minimalwerten drinnen und draußen unter den einzelnen Geschossen nur in geringem Maße (Abb. A8.2.2-37), so treten bei der Unterteilung des Gebäudes in Zonen entsprechend der Orientierung größere Unterschiede auf (Abb. 8.25).

Die Tagesgänge der Süd- und der Ostseite weisen sehr flache Temperaturmaxima auf, die vor dem Temperaturmaximum außen liegen. Auch die Minima greifen der Außentemperatur um eine Stunde vor (Amplitude Süd: 2,0 K, Ost: 1,7 K).

Die Nord- und die Westseite liegen 2, bzw. 1 Stunde hinter dem äußeren Temperaturmaximum (Amplitude Nord: 1,9 K, West: 2,2 K). Im Mittel liegt die zeitliche Verzögerung für alle gemessenen Räume bei einer Stunde. Die Temperaturminima innen sind auf der Nordseite und Westseite etwa (Nord: 0,0 h, West: 0,5 h) zeitgleich mit dem Außenminimum erreicht (Abb. 8.25).

<sup>14</sup> Außentemperatur, Solarstrahlung auf Fassade, Speichermasse der Räume, Nutzerverhalten



**Abb. 8.25:** Mittelwerte für den Tagesgang der Raumlufttemperatur, der Außentemperatur und der horizontalen Globalstrahlung für die Periode vom 27.07.04 bis zum 05.08.04. Gebäude B. Die untersuchten Büros sind entsprechend ihrer Orientierung gruppiert.

Die Unterschiede bei den Temperaturmaxima, die bezüglich der Orientierung auftreten, sind durch den Tagesgang der Solarstrahlung auf die Fassade erklärbar: die Süd- und Ostfassade erhalten vormittags und mittags direkte Solarstrahlung, die West und Nordfassade nachmittags. Da aber auch die Teilklimaanlage pro Geschoss für Bürogruppen gleicher Orientierung einheitlich geregelt wird, kommt sie als primärer oder sekundärer Einflussfaktor auf die eben beschriebenen Unterschiede in Frage. Dass die Temperaturminima innen vor denen der Temperatur außen liegen, ist allein durch die Teilklimaanlage zu erklären.

### Rückschlüsse auf die Gebäudesanierung aus den Messungen

#### Winter

Die Mittelwerte der Raumlufttemperaturen liegen im Gebäude B bei  $\pm 22,6$  °C. Gemäß der Nutzerbefragung empfindet etwa die Hälfte der Nutzer die Raumtemperatur als „gerade richtig“. Ein Grund für die Unzufriedenheit der übrigen Befragten könnte sein, dass die Nutzer die Zulufttemperatur der Teilklimaanlage nicht verändern können und dies die Wirksamkeit der Regelung der statischen Heizung begrenzt.

Die Mittelwerte der relativen Feuchte liegen bei  $\pm 24,6$  %. Dieser geringe Wert könnte zu Gesundheitsbeeinträchtigungen der Nutzer führen (der entsprechende Fragenkomplex war bei der Befragung gestrichen). Grund für die trockene Luft ist u. a. der hohe Luftwechsel durch die Anlage, die mangelhafte thermische Qualität der Gebäudehülle, die eine hohe Raumlufttemperatur erfordert und die Infiltration durch die undichten Fenster.

Sanierung: Wird die Wärme allein über die Heizkörper abgegeben, erhöht sich der Einfluss der raumweisen Regelung. Eine Senkung des Luftwechsels in Verbindung mit einer Verbesserung der Luftdichtigkeit und einer höheren thermischen Qualität der Außenhülle bewirken einen Anstieg der relativen Luftfeuchte.

#### Sommer

Da das Gebäude teilklimatisiert wird, liegt dort der Mittelwert für die Raumlufttemperatur während der Arbeitszeit bei  $\pm 23,5$  °C. Die Raumtemperatur ist für jeweils etwa 40 % der Befragten am Vor- und am Nachmittag „genau

richtig“. Da trotz der aktiven Kühlung besonders am Nachmittag einige Nutzer die Raumtemperatur als zu warm empfinden, ist bei einem Sanierungskonzept ohne aktive Kühlung Vorsicht geboten.

Rückschlüsse auf das Gebäudeklima ohne Klimatisierung im Sommer sind ansatzweise durch Simulationen zu ziehen. Diese zeigen, dass ohne Teilklimaanlage zeitweise kritische Raumtemperaturen auftreten (siehe Abschnitt 9.2.3).

Sanierung: Die Nutzererwartung an das Raumklima ist hoch. Daher ist bei einem Sanierungskonzept, das das thermische Raumklima ohne aktive Kühlung verbessert, Vorsicht geboten.

## 8.3 Gebäudeanalyse mit Nutzerbefragungen

Die folgenden zwei Unterkapitel stellen die zentralen Befragungsergebnisse für beide Beispielgebäude dar. Dabei werden Sommer und Winterbefragung für jeweils ein Gebäude zusammengefasst und kontrastiert. In der Auswertung der Befragungen ist bezüglich des sommerlichen Raumklimas von Interesse, ob sich die Bewertungen der Nutzer in beiden Gebäuden unterscheiden. Zu erwarten wäre im Gebäude B ein bessere Bewertung des thermischen Raumklimas im Sommer, da das Gebäude – im Gegensatz zum Gebäude W – aktiv gekühlt wird.

Die komplette Auswertung für die zwei Befragungszeitpunkte pro Gebäude finden sich im Anhang (Info A8.3.1-1 und -2 sowie A8.3.2-1).

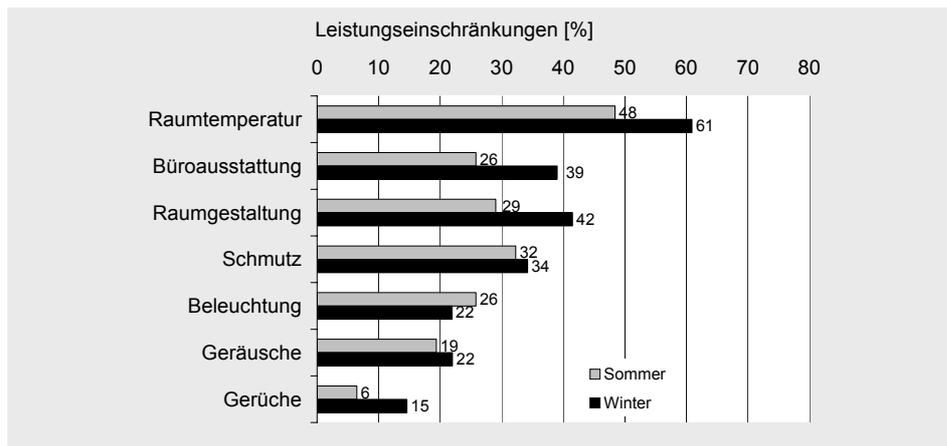
### 8.3.1 Befragungsergebnisse in Gebäude W

#### Soziodemografische Merkmale

Die Struktur der Befragten unterscheidet sich im Winter und Sommer geringfügig. Zu beiden Zeitpunkten ist der männliche Anteil (mit 70 – 80 %) bedeutend höher als der weibliche. Die Altersstruktur ist fast gleich, es überwiegt die Altersgruppe zwischen 36 und 45 Jahren (über 40 %). Die Arbeitszeit im Gebäude liegt bei den meisten unter drei Jahren, zwischen Winter und Sommer fand vermutlich eine interne Umstrukturierung statt, da im Winter mehr Personen zwischen einem und drei Jahren „an diesem Arbeitsplatz“ saßen, als im Sommer. Die tägliche Aufgabenverteilung ist zu beiden Befragungszeitpunkten sehr ähnlich, es dominiert die Bildschirmarbeit (gewogenes arithmetisches Mittel W (Winter): 53 %, S (Sommer): 57 %).

#### Raumklima und Nutzerverhalten

Unter „Raumklima“ werden in diesem Abschnitt folgende Faktoren verstanden: Temperatur, Luftqualität, Licht, Geräusche, Raumgestaltung und Sauberkeit. Die selbstberichteten Leistungseinschränkungen durch das Raumklima sind im Winter – außer im Bereich Beleuchtung – insgesamt höher als im Sommer.



**Abb. 8.26:** Leistungseinschränkungen durch raumklimatische Faktoren, Gebäude W.

Die prozentualen Angaben beziehen sich auf die Aussage „ziemlich“ oder „sehr beeinträchtigt“. Lesebeispiel: 61 % der Nutzer fühlen sich im Winter durch die Raumtemperatur „ziemlich“ oder „sehr beeinträchtigt“.

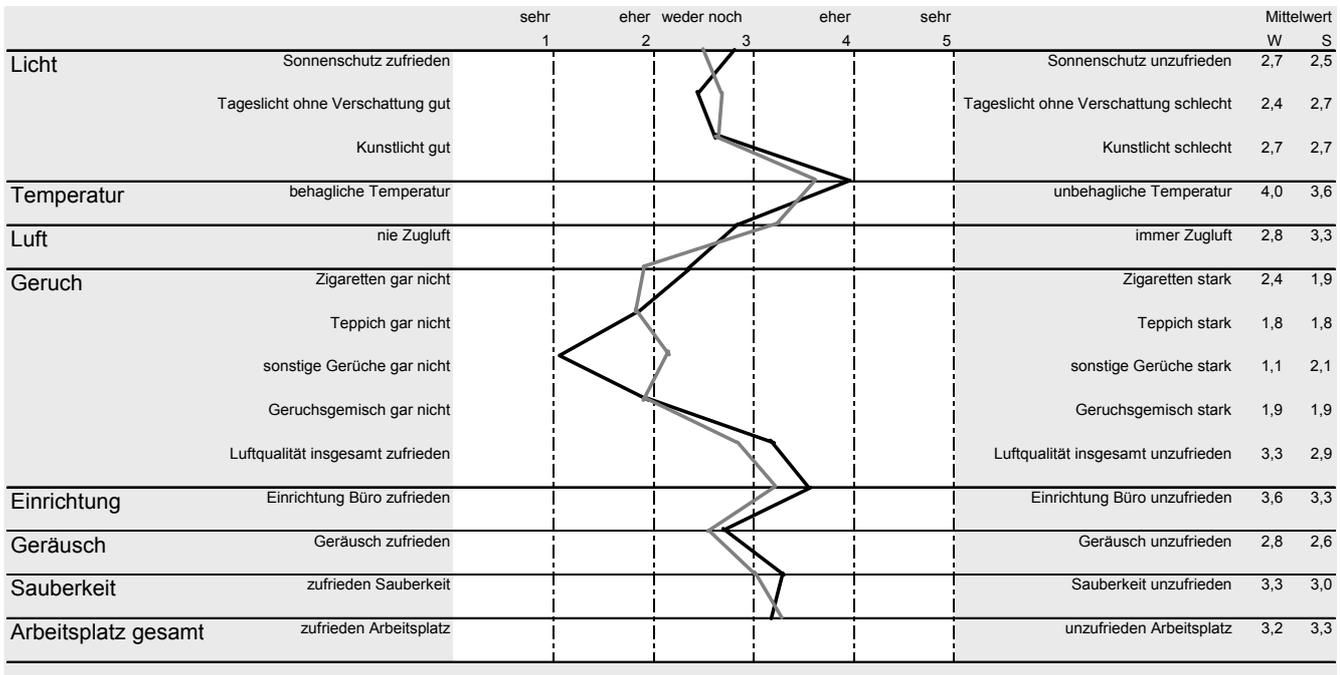
		Winter	Sommer
Raumtemperatur	Mittelwert	3,66	2,65
	SD	1,15	1,3
Raumgestaltung	Mittelwert	2,83	2,65
	SD	1,39	1,3
Büroausstattung	Mittelwert	3,05	2,81
	SD	1,34	1,2
Schmutz	Mittelwert	2,78	2,84
	SD	1,31	1,24

**Tab. 8.13:** Leistungseinschränkungen Gebäude W. Angabe arithmetisches ungewichtetes Mittel (Mittelwert) und Standardabweichung (SD) für den Winter und Sommer. Angaben zum Mittelwert: Der beste erreichbare Mittelwert liegt bei 1,0, der schlechteste bei 5,0.

Auffallend ist, dass sich im Winter durch die Raumtemperatur noch mehr Nutzer beeinträchtigt fühlen als im Sommer (Mittelwert W: 3,66; S: 2,65). Dass das Gebäude einen Sanierungsbedarf aufweist, geht aus den Aussagen zu den Bereichen „Raumgestaltung“ und „Büroausstattung“ hervor. Diese werden im Winter tendenziell als störender empfunden. Der vorhandene Schmutz geht zum einen auf den Sanierungsbedarf, aber auch auf eine mangelhafte Reinigung des Gebäudes zurück.

Wie die raumklimatischen Parameter von den Nutzern bewertet werden zeigt das Polaritätenprofil (Abb. 8.27) für den Winter und den Sommer. Der Mittelwert einiger Parameter (Temperatur, Einrichtung und Sauberkeit Büro, sowie Zufriedenheit mit Arbeitsplatz) ist schlechter als drei. Abweichend von einer ähnlichen Tendenz der Bewertungen im Winter und Sommer fällt die geringere Zufriedenheit mit dem Bereich „sonstige Gerüche“ auf. Die nachfolgenden Abschnitte besprechen die raumklimatischen Parameter im einzelnen.

**Abb. 8.27:** Polaritätenprofil zur Beurteilung einzelner raumklimatischer Faktoren durch die Nutzer, Gebäude W. Es bildet den Mittelwert (ungewichtetes arithmetisches Mittel) der Antworten aller Personen auf eine Frage ab. Das Polaritätenprofil ist seitenweise zu lesen, Beurteilungen auf der linken Seite sind positiv. Farbgebung: schwarz = Winter, grau = Sommer

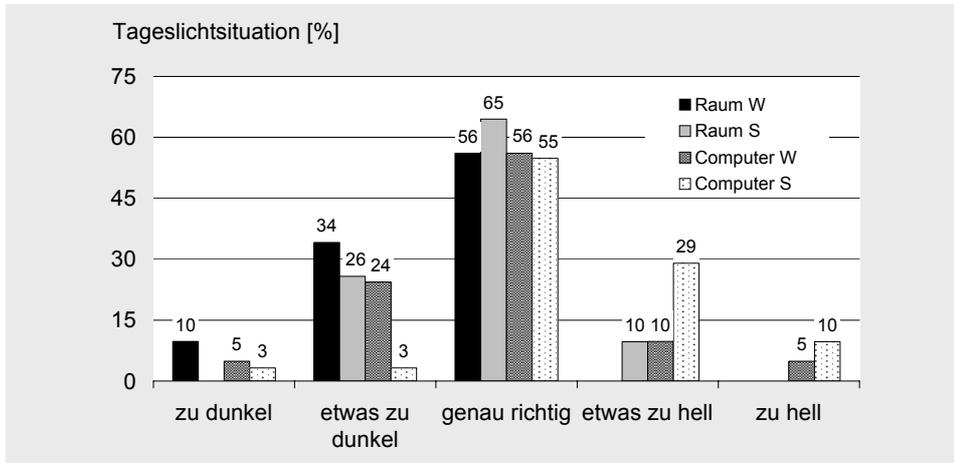


*Tageslicht und elektrische Beleuchtung*

<sup>15</sup> Fensteranteil inkl. Rahmen an den Schmalseiten 17 %, an den Längsseiten 32 %, bzw. Lichteintrittsfläche 0,15 – 0,24 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup><sub>NGF</sub>

Die Fenstergröße<sup>15</sup> bezeichnen zu beiden Jahreszeiten 87 % der Nutzer als „gerade richtig“. Die Bewertung der Belichtungssituation durch Tageslicht fällt im Winter aber schlechter aus als im Sommer („ziemlich“ oder „zu dunkel“ W: 44 %, S: 26 %). Es ergibt für den Raum eine hochsignifikante, jahreszeitlich bedingte unterschiedliche Bewertung. Gründe dafür können jahreszeitliche Schwankungen mit geringerem Tageslichtangebot im Winter sein.

**Abb. 8.28:** Bewertung der Tageslichtsituation im Raum und am Computer durch die Nutzer im Winter und Sommer, Gebäude W. Angaben in Prozent



Die Blendung ist insgesamt nicht stark, ist aber im Sommer etwas höher als im Winter. Dies könnte an der Nord-West Ausrichtung des Gebäudes liegen. Die Sonne steht im Sommer und im Winter tief, scheint aber im Sommer länger. Zu

beiden Jahreszeiten betätigen über 80 % der Nutzer den Sonnenschutz selber, wenn sie geblendet werden, jeweils über 60 % schließen die Lamellen des Sonnenschutzes nur halb. Insgesamt ist die Zufriedenheit mit der Tageslichtsituation mit hochgefahrenem Sonnenschutz im Winter höher als im Sommer („etwas“ oder „sehr zufrieden“ W: 66 %; Sommer: 48 %, siehe auch Abb. 8.27 Mittelwert).

Blendungen durch das Kunstlicht treten fast gar nicht auf. Die Einschaltdauer für das Kunstlicht ist im Winter bei weitem höher als im Sommer (Einschaltdauer > 5 h W: 54 %, S: 16 %). Da einige Nutzer im Winter mit dem Tageslichtangebot im Raum nicht zufrieden sind, könnte es sein, dass viele das Kunstlicht morgens beim Betreten des Raumes einschalten und dann vergessen, oder das Kunstlicht unabhängig vom Tageslichtangebot draußen betätigen [Reinhart, 2001]. Die Zufriedenheit mit dem Kunstlicht ist im Winter und Sommer ähnlich mittelmäßig (Mittelwert W und S: 2,7). Da vom Gebäudebetreiber keine Schreibtischleuchten gestellt werden, haben sich einige der Nutzer (W: 32 %; S: 19 %) ihre Arbeitsplatzleuchte selber mitgebracht.

Warum die Bewertung für den Bereich Tageslicht und elektrische Beleuchtung im Winter besser ist als im Sommer, kann durch die etwas höhere Blendung im Sommer teilweise aber nicht ganz erklärt werden.

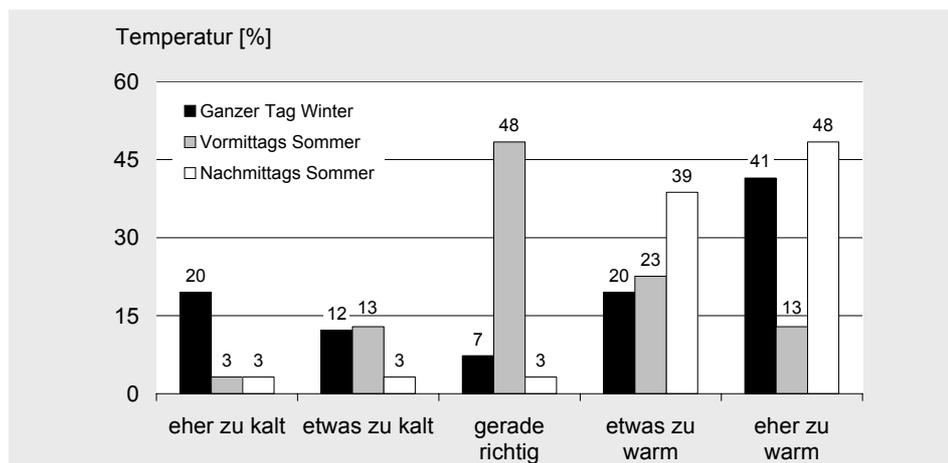
#### *Raumtemperatur und Feuchte*

Im Winter stufen 61 % der Nutzer die Temperatur als „etwas“ oder „zu warm“ ein. Als „eher zu kalt“ oder „etwas zu kalt“ empfinden 32 % die Raumtemperatur. Dies bestätigt die Unzulänglichkeit der Fußbodenheizung. Bemerkungen auf den Fragebögen und eigene Beobachtungen weisen darauf hin, dass die Temperatur in vielen Räumen über gekippte Fenster „geregelt“ wird. Die Mehrheit von 85 % beurteilt die Raumluft als „etwas“ oder „zu trocken“. Die Messungen zeigen (Tab. 8.15), dass die mittlere Raumlufttemperatur im Bereich der Empfehlungen der [DIN EN ISO 7730:2006-05] Kategorie A liegen<sup>16</sup>. Die gemessene relative Feuchte ist zu gering, was sich mit den Nutzeraussagen deckt (sehr geringe Streuung, siehe Tab. 8.14). Nach [DIN EN 13779:2005-05] gilt eine – für einen begrenzten Zeitraum unterschreitbare - untere Grenze von 30 %, die trockene Augen und Schleimhautreizungen vermeiden soll.

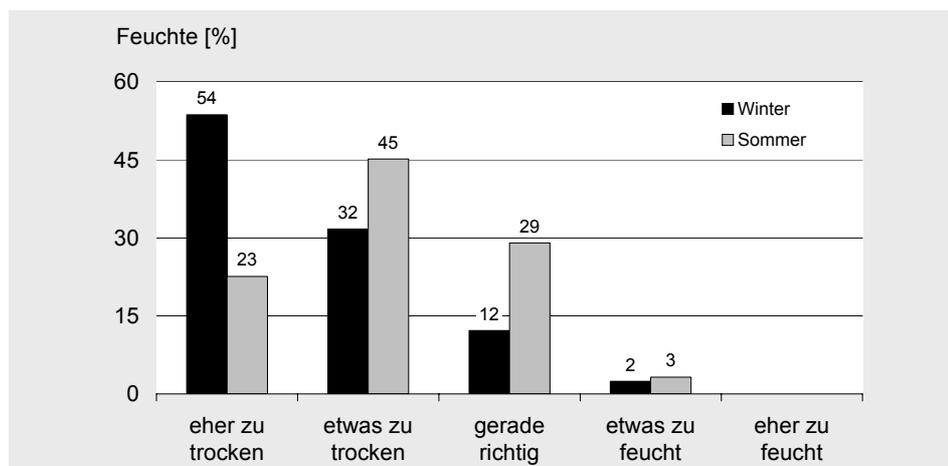
Im Sommer ist die Zufriedenheit mit der Raumtemperatur am Vormittag (48 % „genau richtig“, 36 % „etwas warm“ oder „zu warm“) höher als am Nachmittag. Diese wird von 87 % als „etwas zu warm“ oder „zu warm“ bezeichnet (siehe auch schlechter Mittelwert, Tab. 8.14). Der Zeitraum, auf den sich die Befragung bezieht, enthielt sieben „Sommertage“ ( $T_{\max} \geq 25 \text{ °C}$ ), war also von den Außentemperaturen her eher moderat.

<sup>16</sup> Innerhalb des Tagesverlaufs treten natürlich Schwankungen auf, die der Mittelwert nicht abbildet.

**Abb. 8.29:** Beurteilung der Temperatur während der „letzten vier Wochen“, Gebäude W. Im Winter bezog sich die Frage auf den ganzen Tag, im Sommer wurden Vormittag und Nachmittag getrennt beurteilt. Angaben in Prozent



**Abb. 8.30:** Beurteilung der Raumluftfeuchte in den „letzten vier Wochen“ im Winter und Sommer, Gebäude W. Angaben in Prozent



**Tab. 8.14:** Temperatur und Raumluftfeuchte, Gebäude W. Angabe arithmetisches ungewichtetes Mittel (Mittelwert) und Standardabweichung (SD) für den Winter und Sommer. Anmerkung: die Frage nach der Raumtemperatur bezog sich im Winter auf den ganzen Tag, im Sommer wurden Vor- und Nachmittag getrennt bewertet.

		Winter	Sommer
Raumtemperatur (Mitte Optimum)	Mittelwert	3,51	
	SD	1,59	
Raumtemperatur Vormittag (Mitte Optimum)	Mittelwert		3,29
	SD		0,97
Raumtemperatur Nachmittag (Mitte Optimum)	Mittelwert		4,16
	SD		1,21
Luftfeuchte (Mitte Optimum)	Mittelwert	1,63	2,13
	SD	0,79	0,8
Temperaturzufriedenheit	Mittelwert	3,95	3,58
	SD	1,02	0,92

Unangenehme Temperaturschwankungen bei wechselhaftem Wetter nahmen im Sommer 52 % „ziemlich“ oder „sehr stark“ wahr.

Die Zufriedenheit mit der Temperatur insgesamt ist im Winter noch geringer als im Sommer („ziemlich“ oder „sehr unzufrieden“ W: 68 %, S: 48 %, siehe auch schlechter Mittelwert, Tab. 8.14). Dies liegt u. a. an der Möglichkeit der Einflussnahme (Thermostatventil, Fensteröffnen) auf die Raumtemperatur. Die Wahrnehmung einer Einflussnahmemöglichkeit ist im Winter geringer als im Sommer (W: 34 %, S: 45 %), dementsprechend groß ist in der kalten Jahreszeit die Gruppe, die die Raumtemperatur nie aktiv beeinflusst (W: 61 %, S: 16 %).

Mit der Wirksamkeit der Temperaturänderung, die nur im Sommer erfragt wurde, sind jedoch 24 % „ziemlich“ oder „sehr unzufrieden“ (bei mehr als einem Drittel Enthaltungen).

Es kann gefolgert werden, dass eine raumweise Regelungsmöglichkeit der Heizung die Nutzerzufriedenheit im Winter erheblich steigern würde.

**Tab. 8.15:** Übersicht über die gemessenen Raumlufttemperaturen und die relative Feuchte (Mittelwert) auf den einzelnen Geschossen sowie die Empfehlungen nach [DIN EN ISO 7730:2006-05] für den Winter und den Sommer. Gebäude W

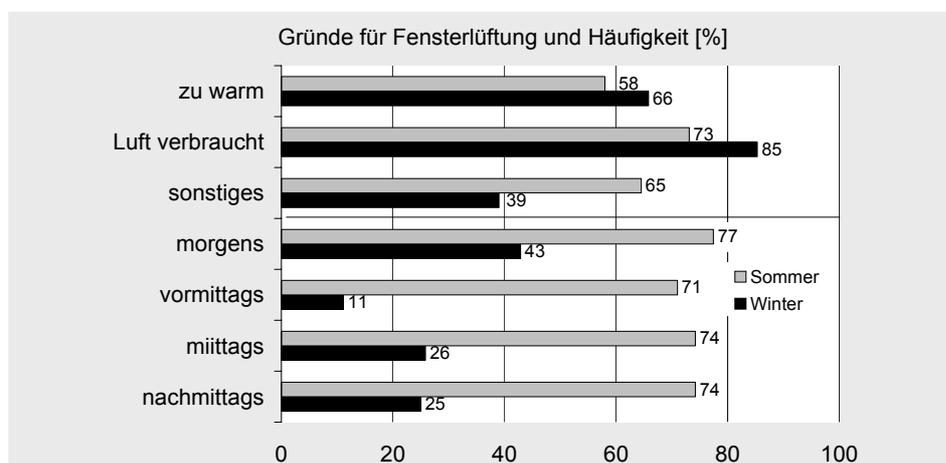
		Winter Temperatur	Feuchte	Sommer Temperatur	Feuchte
		(°C)	(%)	(°C)	(%)
Raumlufttemperatur und Feuchte gemessen	2. OG	± 22,5	± 25,3	± 25,0	± 39,0
	4. OG	± 22,6	± 25,2	± 25,1	± 38,3
	6. OG	± 22,6	± 24,5	± 25,8	± 37,1
Raumlufttemperatur Empfehlung für Büroräume, PPD < 6 (PPD<15)		22,0 ± 1,0 (22,0 ± 3,0)	-	24,5 ± 1,0 (24,5 ± 2,5)	-

### Lüftungsverhalten

Im Sommer wird häufiger (Abb. 8.31) gelüftet als im Winter. Dabei sind im Winter die Fenster öfters gekippt (W: 73 %, S: 48 %), im Sommer wird meist mit ganz geöffnetem oder gekipptem Fenster gelüftet („mal so, mal so“ 52 %). Als Grund für das Lüften überwiegt zu beiden Jahreszeiten die „verbrauchte Luft“, gefolgt von „zu warm“ (Abb. 8.31). Die Fensterlüftung im Zusammenhang mit auf Wunsch der Betriebsleitung geöffneten Bürotüren, ruft wohl auch die Zuglufterscheinungen hervor, die im Sommer öfter auftreten als im Winter („häufig“ bis „immer“ W: 32 %; S: 48 %, schlechter Mittelwert mit geringer Streuung, Abb. 8.27). Das Lüftungsverhalten unterstreicht die Unzulänglichkeit einer reinen Fensterlüftung für Büros.

Die Geruchsbelastung ist auf allgemein niedrigem Niveau im Winter stärker ausgeprägt als im Sommer. Die stärkste Beeinträchtigung tritt im Winter durch Zigarettergeruch auf („ziemlich“ oder „sehr stark“ W: 19 %, S: 10 %).

Die Zufriedenheit mit der Luftqualität insgesamt ist im Winter geringer („etwas“ oder „sehr unzufrieden“ W: 39 %, S: 23 %, schlechter Mittelwert im Winter mit sehr geringer Streuung, Abb. 8.27) als im Sommer.



**Abb. 8.31:** Angaben von Gründen für das geöffnete Fenster und prozentuale Verteilung der Antworten auf die Frage, wann in den vergangenen vier Wochen die Fenster im Raum „häufig“ oder „immer“ offen standen. Gebäude W. Bei der Frage nach den Gründen geben unter „sonstiges“ im Winter 22 % an, „morgens beim Betreten des Raumes“ zu lüften, im Sommer waren dies 48 %. Beide Angaben in Prozent

### *Geräusche*

Störende raumeigene Geräusche wie Geräte und Telefonate werden im Winter häufiger und stärker wahrgenommen als im Sommer. Dies deckt sich mit der Belegung der Räume, die im Winter mehr Gruppenbüros umfasst (siehe nachfolgender Abschnitt). Gerätegeräusche werden insgesamt als störendstes Geräusch bewertet („häufig“ oder „den ganzen Tag“ W: 39 %, S: 19 %), gefolgt von Telefongeräuschen im eigenen und im Nachbarbüro. Störende Geräusche durch geöffnete Fenster werden im Sommer häufiger bemerkt („häufig“ oder „den ganzen Tag“ W: 7 %, S: 16 %). Mit dem Geräuschpegel insgesamt im Büro sind die Nutzer aber eher zufrieden („etwas“ oder „sehr zufrieden“ W: 49 %, S: 45 %, „mittelmäßig“ W: 29 %, S: 36 %).

### *Raumgestaltung und Sauberkeit*

Die meisten Nutzer arbeiten in Zweipersonen (W: 41 %, S: 64 %) oder Gruppenbüros (W: 49 %, S: 32). Da die Zweipersonenbüros mit 3,5 m sehr schmal sind, tritt auf Fragen zum Platz im Raum die stärkste Unzufriedenheit mit dem Platz um den Schreibtisch herum auf („unzufrieden“ oder „sehr unzufrieden“ W: 44 %, S: 26 %). Die Bewertung der Privatheit ist im Sommer, (mehr Personen arbeiten in Zweierbüros) etwas besser als im Winter („etwas“ oder „sehr zufrieden“ W: 45 %, S: 58 %).

Da die Betriebsleitung einen baldigen Auszug aus dem Gebäude plant, wird im Bereich Raumausstattung und –gestaltung vermutlich nur das Nötigste investiert. Die Erhebung der Zufriedenheit in diesem Bereich zeigt bei beiden Befragungen deutlich, dass Veränderungen gewünscht werden und auch notwendig sind. So sind im Winter die Hälfte der Befragten „unzufrieden“ oder „sehr unzufrieden“ mit der Einrichtung des Büros (S: 39 %, siehe auch schlechter Mittelwert, Abb. 8.27). Eine ähnliche Tendenz haben die Aussagen zur Sauberkeit im Büro, auch hier ist das Urteil im Winter schlechter als im Sommer („unzufrieden“ oder „sehr unzufrieden“ W: 41 %, S: 26 %).

### *Einflussnahme Raumklima*

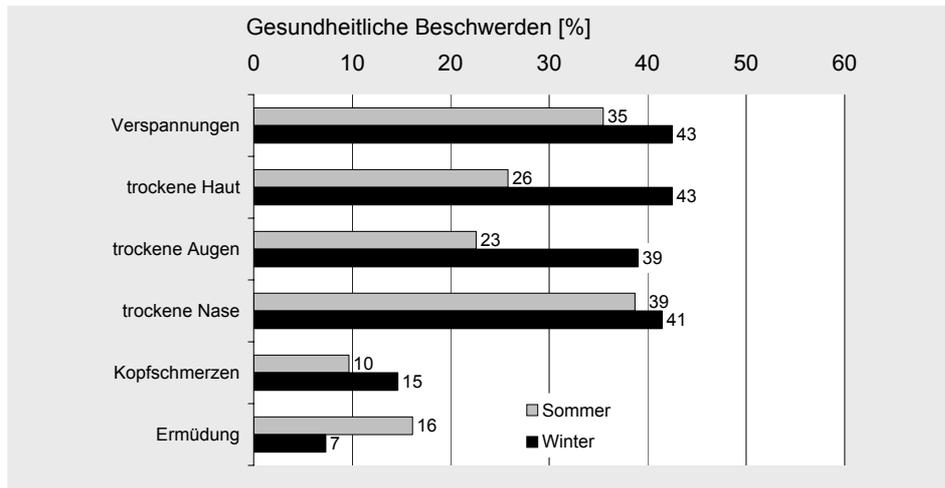
Insgesamt entscheiden trotz der wenigen Einzelbüros die meisten Nutzer selbstständig über die raumklimatischen Einflussparameter. Im Winter besteht „manchmal“ Abstimmungsbedarf bei der Lüftung (46 %) und beim Licht (32 %). Im Sommer tritt die Notwendigkeit noch seltener auf. Zu beiden Jahreszeiten besteht der Wunsch nach mehr Eigenständigkeit bei der Einflussnahme auf die Raumtemperatur (Einflussnahme Heizung, W: 41 %, Einflussnahme Temperatur, S: 42 %).

### *Gesundheitliche Aspekte*

Gesundheitliche Beeinträchtigungen, die in den letzten vier Wochen stark am Arbeitsplatz auftraten, sind im Sommer und Winter unterschiedlich ausgeprägt. Abb. 8.32 zeigt die Beeinträchtigungen, die zu mindestens einem Befragungszeitpunkt von über 15 % als „häufig“ oder „immer“ vorkommend genannt werden. Es ist zunächst festzustellen, dass zu beiden Zeitpunkten Verspannungen und nachfolgend mit Lufttrockenheit verbundene Beschwerden dominieren (schlechtester Mittelwert von 3,2, Tab. 8.16). Weiter sind die Beschwerden im Winter insgesamt stärker, nur die „Ermüdung“ tritt im Sommer häufiger auf. Stärker im Winter ausgeprägt (mehr als 10 % Abweichung) sind „trockene Haut“, „trockene Augen“ sowie Verspannungen (häufigste Orte sind

Nacken, Schulter und Rücken). Trockene Nase und Kopfschmerzen weichen zwischen den Befragungszeitpunkten weniger als 10 % voneinander ab.

Dass die Merkmale „trockene Haut“ und „trockene Augen“ im Sommer zurückgehen, lässt sich durch die etwas höhere relative Feuchte (ca. 40 %) in der warmen Jahreszeit erklären. Warum damit nicht auch die Einschränkung „trockene Nase“ zurückgeht, ist unklar.



**Abb. 8.32:** Angaben zu gesundheitlichen Beschwerden, die innerhalb der letzten vier Wochen während der Arbeitszeit auftraten, Gebäude W. Die prozentualen Angaben beziehen sich auf die Aussage „häufig“ oder „immer“.

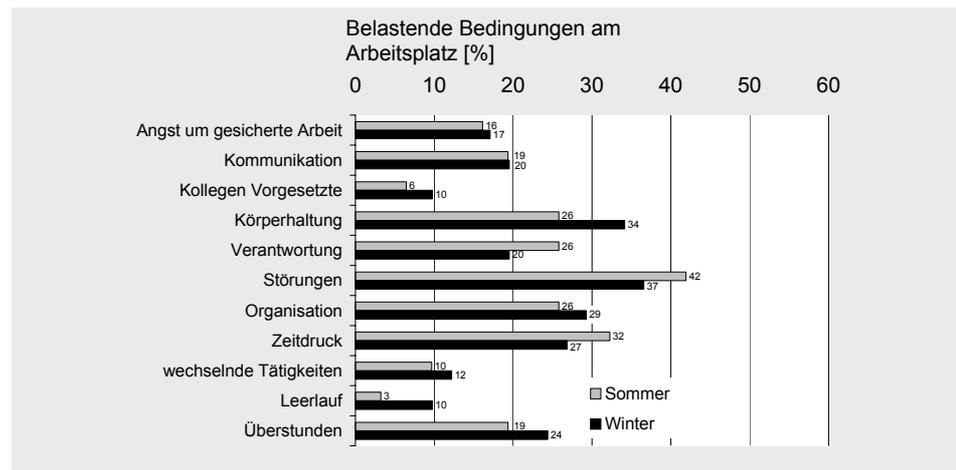
		Winter	Sommer
Verspannungen	Mittelwert	3,2	3,1
	SD	1,33	1,23
trockene Haut	Mittelwert	2,9	2,39
	SD	1,46	1,28
trockene Augen	Mittelwert	3,0	2,48
	SD	1,29	1,28
trockene Nase	Mittelwert	3,1	2,87
	SD	1,41	1,23

**Tab. 8.16:** Angaben zu gesundheitlichen Beschwerden, die zu beiden Befragungszeitpunkten am stärksten auftraten, Gebäude W. Angabe arithmetisches ungewichtetes Mittel (Mittelwert) und Standardabweichung (SD) für den Winter und Sommer

Zu beiden Befragungszeitpunkten ist der Großteil der Befragten zum Befragungszeitpunkt gesund (W: 78 %, S: 68 %). Als Leistungseinschränkungen am Arbeitsplatz, die nicht mit dem Raumklima zusammenhängen, werden im Sommer und im Winter an erster Stelle technische Probleme genannt („ziemlich“ oder „sehr belastend“ W: 29 %, S: 26 %), gefolgt im Winter von „Software“ und im Sommer vom eigenen Gesundheitszustand.

„Ziemlich“ oder „sehr belastende“ Bedingungen am Arbeitsplatz werden zu beiden Befragungen durch häufige Störungen (hier auch der schlechteste Mittelwert, siehe Tab. 8.17) ausgelöst, im Winter folgen dann eine unangenehme Körperhaltung, mangelnde Organisation und Zeitdruck, im Sommer kommen darauf Zeitdruck, unangenehme Körperhaltung, mangelnde Organisation und hohe Verantwortung.

**Abb. 8.33:** Belastende Bedingungen am Arbeitsplatz, Gebäude W. Die prozentualen Angaben beziehen sich auf die Aussage „ziemlich“ oder „sehr belastend“.



**Tab. 8.17:** Die häufigsten belastenden Bedingungen am Arbeitsplatz und die Zufriedenheit mit der Tätigkeit und mit dem Arbeitsplatz, Gebäude W. Angabe arithmetisches ungewichtetes Mittel (Mittelwert) und Standardabweichung (SD) für den Winter und Sommer

		Winter	Sommer
Häufige Störungen	Mittelwert	2,85	3,1
	SD	1,45	1,04
Ungenehmen Körperhaltung	Mittelwert	2,83	2,83
	SD	1,26	1,26
Zeitdruck	Mittelwert	2,71	2,84
	SD	1,45	1,44
Mangelnde Organisation	Mittelwert	2,95	2,58
	SD	1,07	1,2
Zufriedenheit Tätigkeit	Mittelwert	2,9	2,6
	SD	0,905	0,83
Zufriedenheit Arbeitsplatz	Mittelwert	3,22	3,26
	SD	1,116	1,03

Die Zufriedenheit mit der Tätigkeit insgesamt ist im Winter höher („etwas“ oder mittelmäßig zufrieden“ W: 73 %, S: 84 %), ähnlicher ausgeprägt ist die Zufriedenheit mit dem Arbeitsplatz („etwas“ oder „mittelmäßig zufrieden“ W: 53 %, S: 58 %).

### Gebäude, Gesundheit und Arbeitsmotivation

Ein Ziel des nachfolgenden Abschnittes ist es Gebäudeeigenschaften, die die Entwicklung gesundheitlicher Beeinträchtigungen begünstigen, zu identifizieren, und gebäudeunabhängige (d. h. arbeitsbezogene) Faktoren auszuklammern. Dazu wurden folgende Fragestellungen untersucht:

- Weicht die Gruppe, die mehrere Befindlichkeitseinschränkungen hat, in der Beurteilung raumklimatischer Parameter und der Bewertung der Arbeitsbedingungen vom – gesünderen – Rest der Stichprobe ab?
- Lassen sich bei der Betrachtung einzelner gesundheitlicher Beschwerden stärkere Zusammenhänge mit raumklimatischen oder mit arbeitsbezogenen Parametern feststellen?
- Welche Rückschlüsse können für die Sanierung gezogen werden?

*Abweichungen der Gruppe, die „starke Beeinträchtigungen“ verspürt*

Personen, die im Winter mindestens drei Beschwerden „häufig“ oder „immer“ verspüren machen 41 % der gesamten Stichprobe aus. Die Untersuchung dieser Gruppe hinsichtlich gebäudeabhängigen (z.B.: Blendung) und gebäudeunabhängigen Parametern (Geschlecht) ergibt keine signifikanten Korrelationen, bis auf eine hochsignifikante Korrelation mit der Bewertung der Luftfeuchtigkeit. Dies überrascht nicht, da die häufig genannten Befindlichkeitsstörungen (außer Verspannungen) wie trockene Augen, Nase, und Haut ursächlich mit der Luftfeuchte zusammenhängen. Die Untersuchung für den Sommer zeigte eine hochsignifikante Korrelation zwischen „trockener Nase“ und Luftfeuchtigkeit.

*Zusammenhang Befindlichkeitseinschränkungen mit raumklimatischen und arbeitsbezogenen Parameter*

Im weiteren Vorgehen werden einzelne Befindlichkeitseinschränkungen auf signifikante Korrelationen mit Leistungseinschränkungen durch raumklimatische Parameter und durch belastenden Bedingungen am Arbeitsplatz getestet (Darstellung und Auswertung siehe Anhang Info A8.3.1-2).

Summiert man die Korrelationen zwischen gesundheitlicher Beeinträchtigung und Leistungseinschränkungen durch das Gebäude einerseits und belastenden Bedingungen andererseits, zeigen sich für den Winter folgende Zusammenhänge (Abb. A8.3.1-1):

- Gleiche Anzahl von Zusammenhängen: Verspannung, generelles Unwohlsein
- Mehr Zusammenhänge mit raumklimatischen Parametern: trockene Augen, trockene Nase, Halsschmerzen, trockene Haut und Kopfschmerzen
- Mehr Zusammenhänge mit belastenden Arbeitsbedingungen: Atembeschwerden, Konzentration und Ermüdung

Eine Analyse nach der selben Vorgehensweise zeigt für den Sommer, dass weitaus mehr Befindlichkeitsstörungen mit arbeitsbezogenen Parametern verbunden sind. Keine Befindlichkeitsstörung hat verstärkte raumklimatische Tendenzen, gleiche Tendenzen zu raumklimatischen und arbeitsbezogenen Parametern haben die Merkmale Allergie, trockene Haut und Kopfschmerzen (Abb. A8.3.1-2).

Es bietet sich folgende Schlussfolgerung an: Die Gebäudeeigenschaften können das Nutzerwohlbefinden beeinflussen. Sie tun dies im Gebäude W im Winter stärker als im Sommer. Raumklimatisch günstige Bedingungen verringern die Gefahr, durch langandauernde Belastung Befindlichkeitsstörungen zu entwickeln. Grundsätzlich verhält es sich mit den Arbeitsbedingungen ähnlich. Sie und die Gebäudeeigenschaften beeinflussen sich in ihrer Wirkung gegenseitig.

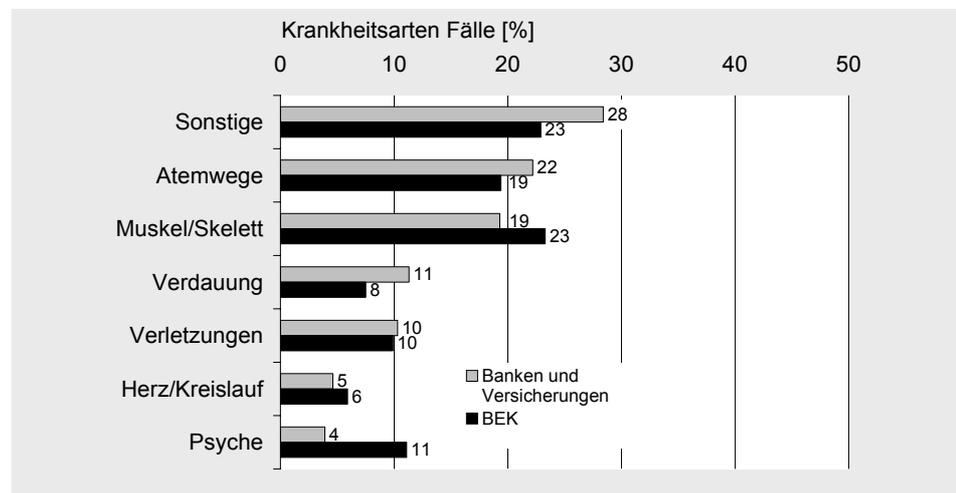
Zusätzlich bestimmen die individuelle Verfassung der Person und ihre Fähigkeit mit Belastungen umzugehen, wie stark der Effekt der ungünstigen Bedingungen ist. Dennoch gilt: die Wahrscheinlichkeit, dass ein mit einer unbehaglichen Raumtemperatur, störenden Geräuschen und schlechter Beleuchtung konfrontierter Gebäudenutzer beispielsweise Überstunden als belastend einstuft, ist hoch.

Diese Betrachtungsweise schließt sich dem in [Mohr et al., 2002] erweiterten, in der Arbeitspsychologie zentralen Modell von R. S. Lazarus an. Es geht davon

aus, dass „individuelle Interpretationen darüber entscheiden, ob Menschen in Stress geraten oder nicht und wie sie damit umgehen“(S.77). Da so die individuelle Interpretation maßgeblich ist, könnte mit diesem Konzept die Existenz von allgemein existenten Stressfaktoren abgestritten werden. Als Synthese schlagen die Autoren vor, Stressoren so zu definieren, dass ihre Existenz die Wahrscheinlichkeit für eine Wahrnehmung von Stress erhöht.

Die bisherige Betrachtung umfasste gebäude- und arbeitsbezogene Parameter. Die ausgeübte Beschäftigung selber beeinflusst als weitere Größe die Leistungsfähigkeit und das Befinden des Menschen. Da Arbeitsstruktur und Inhalte nicht Gegenstand der Befragung waren, wird hier auf eine theoretische Erörterung dieses Bereichs verzichtet.

Um die Ergebnisse der Befragung zum Thema Befindlichkeitsstörungen in einen größeren Rahmen zu stellen, werden abschließend die Krankenstandsdaten in der Bundesrepublik betrachtet. In der Branche „Banken und Versicherungen“ waren 19 % der Fehlzeiten durch Erkrankungen im Muskel- und Skelettbereich hervorgerufen und 22 % der Krankmeldungen durch eine Erkrankung der Atemwege motiviert (Abb. 8.34). Zum Vergleich sind auch die Zahlen die Versicherten der BARMER Ersatzkasse aufgeführt. Die Rangfolgen unterscheiden sich dadurch, dass hier die Krankheiten im Muskel- und Skelettbereich an oberster Stelle stehen und psychische Erkrankungen insgesamt häufiger auftreten. Insgesamt decken sich die Zahlen von der Tendenz her gut mit den Ergebnissen der Befragung (häufiges Auftreten von Beschwerden im Muskel- und Skelettbereich und bei den Atemwegen). Allerdings erfasst die Nutzerbefragung nicht die Fehlzeiten, die durch die Beschwerden auftraten.



**Abb. 8.34:** Arbeitsunfähigkeit bei Banken und Versicherungen, nach Krankheitsarten, Angabe Fälle in %, 2002 [Badura et al., 2004].  
BEK: Arbeitsunfähigkeit bei allen Versicherten der BARMER Ersatzkasse nach Krankheitsarten, Angabe Fälle in %, 2003 [Wieland et al., 2004]

### Rückschlüsse auf die Gebäudesanierung aus der Befragung

- Raumtemperatur Winter und Sommer  
Siehe Messungsergebnisse Gebäude W, Kap. 8.2.1
- Luftqualität  
Nur 17 % der Befragten sind im Winter mit der Luftqualität „etwas“ oder „sehr zufrieden“. Auch im Sommer ist die Unzufriedenheit hoch, es wird sehr viel über die Fenster gelüftet, da der Raum nachts nicht abkühlen konnte.

Sanierung: Luftqualität verbessern durch Einbau einer ventilatorgestützten Lüftung. Erhöhung der sommerlichen, nächtlichen Abkühlung des Raumes.

- Tageslicht und Kunstlicht

Die Fenstergröße wird mit einer Lichteintrittsfläche zwischen 0,15 – 0,24 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup><sub>NGF</sub> zu beiden Jahreszeiten von 87 % der Nutzer als „gerade richtig“ bezeichnet. Die Bewertung der Beleuchtungssituation durch Tageslicht fällt im Sommer besser aus als im Winter. Beim Kunstlicht ist zu untersuchen, welche Maßnahmen die relativ hohen (54 % der Nutzer haben die Deckenleuchte länger als 5 Stunden am Tag angeschaltet) Einschaltzeiten im Winter für das Kunstlicht verringern können. Im Sommer wird über „zu viel Licht“ (besonders am Computer) berichtet. Dies könnte an der Ost-West Orientierung liegen (Sonne steht immer tief, scheint aber im Sommer mehr).

Sanierung: Nutzung Tageslicht (z. B. durch konsequent tageslichtorientierte Arbeitsplätze) verbessern, Einschaltzeiten Kunstlicht verringern, Sonnen- und / oder Blendschutz einsetzen.

- Raumgestaltung und Aufteilung

Als Faktoren, die von den Befragten als „ziemlich“ oder „sehr leistungseinschränkend“ wahrgenommen werden, sind die Raumgestaltung, die Büroausstattung und der Schmutz zu nennen. Einige Nutzer wünschen sich eine geringere Belegungsdichte der Büros.

Sanierung: Raumaufteilung ändern, Innenausbau

- Eigenständigkeit

Die meisten Nutzer wünschen sich mehr Eigenständigkeit bei der Regelung der Raumtemperatur (besonders im Winter, aber auch im Sommer).

Sanierung: Im Winter ist dies z. B. über eine raumweise zu regelnde Heizung zu gewährleisten, im Sommer sollte im Rahmen des Sanierungskonzeptes überlegt werden, wie ein höherer Nutzereinfluss auf die Raumtemperatur ermöglicht werden kann (Lüftung, Sonnenschutz, weniger Nutzer in einem Büro).

### 8.3.2 Befragungsergebnisse in Gebäude B

#### Soziodemografische Merkmale

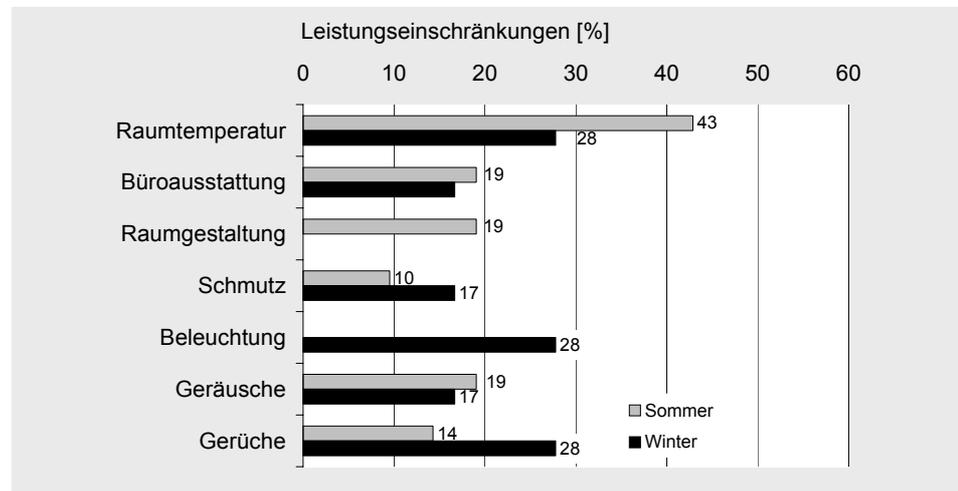
Zu beiden Befragungen überwiegt der Anteil der Männer (zwischen 60 und 70 %), insgesamt dominiert die Altersgruppe zwischen 36 und 45 Jahren (über 60 %). Im Winter sind die Nutzer, die schon mehr als ein Jahr in dem Gebäude sind, in der Mehrzahl, im Sommer arbeiten mehr Personen erst seit weniger als einem Jahr in diesem Gebäude. Diese Veränderung trifft auch auf die Zeit zu, die die Nutzer an diesem Arbeitsplatz verbringen. Die Aufgabenverteilung ähnelt sich im Sommer und Winter, die meiste Arbeitszeit wird vor dem Computer verbracht (gewichtetes arithmetisches Mittel W: 53 %, S: 60 %).

#### Raumklima und Nutzerverhalten

Insgesamt sind die Leistungseinschränkungen, die durch raumklimatische Parameter (Temperatur, Luftqualität, Licht, Geräusche, Raumgestaltung und Sauberkeit) ausgelöst werden, im Sommer stärker als im Winter. Am stärksten fühlen sich die Nutzer zu beiden Zeitpunkten durch die Raumtemperatur

eingeschränkt (Mittelwert W: 2,11; S: 2,67), wobei sich im Sommer die Anzahl der Nutzer verdoppelt. Im Sommer folgen darauf Büroausstattung, Raumgestaltung und Geräusche, im Winter werden aufgrund der geringen Stichprobengröße die starken Leistungseinschränkungen („ziemlich“ oder „sehr stark“) nicht gewertet.

**Abb. 8.35:** Leistungseinschränkungen durch raumklimatische Faktoren, Gebäude B. Die prozentualen Angaben beziehen sich auf die Aussage „ziemlich“ oder „sehr beeinträchtigt“. Prozentuale Angaben im Winter  $\leq 11\%$  werden aufgrund der geringen Stichprobengröße nicht gewertet.



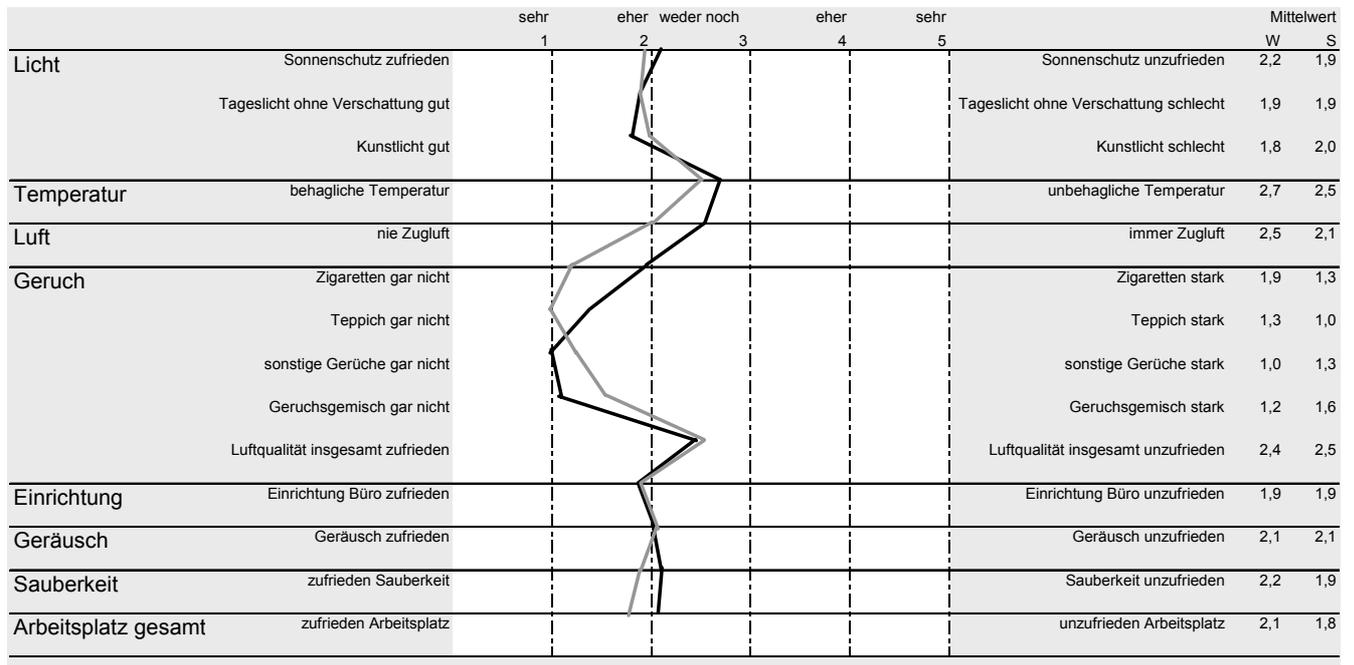
**Tab. 8.18:** Leistungseinschränkungen, Gebäude B. Angabe arithmetisches ungewichtetes Mittel (Mittelwert) und Standardabweichung (SD) für den Winter und Sommer

		Winter	Sommer
Raumtemperatur	Mittelwert	2,11	2,67
	SD	1,23	1,3
Raumgestaltung	Mittelwert	1,1	1,95
	SD	0,46	1,43
Büroausstattung	Mittelwert	1,66	2,14
	SD	0,82	1,24
Geräusche	Mittelwert	1,77	2,33
	SD	0,92	1,28

Betrachtet man die Zufriedenheit der Nutzer mit den raumklimatischen Parametern, so zeigt sich, dass die Bewertungen eher positiv sind, alle Mittelwerte sind  $\leq 3$ . Am zurückhaltendsten werden die Bereiche Temperatur (W, S), Zugluft (W) und Luftqualität (W, S) beurteilt. Abweichungen treten zwischen den Befragungszeitpunkten in den Bereichen Gerüche und Zugluft auf.

Die nachfolgenden Abschnitte gehen auf die raumklimatischen Aspekte im einzelnen ein.

**Abb. 8.36:** Polaritätenprofil zur Beurteilung einzelner raumklimatischer Faktoren durch die Nutzer, Gebäude B. Es bildet den Mittelwert (arithmetisches ungewichtetes Mittel) der Antworten aller Personen auf eine Frage ab. Das Polaritätenprofil ist seitenweise zu lesen, Beurteilungen auf der linken Seite sind positiv. Farbgebung: schwarz = Winter, grau = Sommer



### Tageslicht und elektrische Beleuchtung

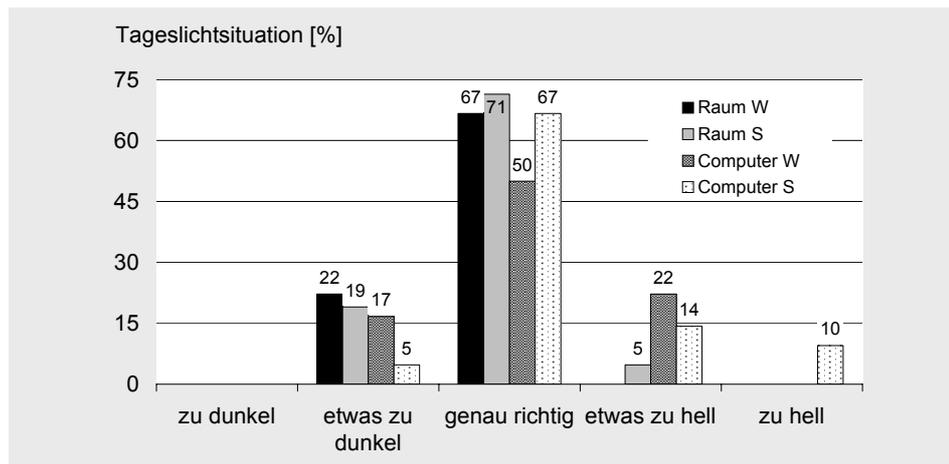
Die Fenstergröße wird zu beiden Befragungszeitpunkten ähnlich positiv bewertet, beinahe alle Nutzer empfinden sie als „gerade richtig“<sup>17</sup>. Auch die Belichtungssituation durch Tageslicht im Raum beurteilen die Befragten im Winter und Sommer ähnlich gut. Am Computer wird die Situation geringfügig schlechter gewertet mit der Tendenz im Winter „etwas zu dunkel“ und im Sommer „etwas zu hell“ zu sein. Blendung durch das Tageslicht tritt im Winter am stärksten auf dem Bildschirm auf („häufig“ oder „immer geblendet“ W: 28 %; S: 21 %), im Sommer ist die Blendung am Bildschirm etwas geringer, dafür treten eher Blendungen über das Fenster („häufig“ oder „immer geblendet“ S: 24 %; W: nicht wertbar) auf.

<sup>17</sup> Fensteranteil inkl. Rahmen 32 % bis 36 %, bzw. Lichteintrittsfläche 0,18 – 0,21 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup><sub>NGF</sub>.

Erwartungsgemäß ist der Sonnenschutz im Sommer öfter heruntergefahren als im Winter (zu den unterschiedlichen Tageszeiten haben über die Hälfte den Sonnenschutz „häufig“ oder „immer“ geschlossen). Auf Blendung reagieren zu beiden Jahreszeiten jeweils fast 90 % mit Betätigung des Sonnenschutzes, wobei die Mehrheit die Lamellen nur halb schließt. Die Bewertung der Tageslichtsituation ist insgesamt gut, im Winter aber noch etwas besser („etwas“ oder „sehr zufrieden“ W: 83 %; S: 76 %).

Zu beiden Befragungszeitpunkten sind durch das Kunstlicht hervorgerufene Blendungen gering. Die Einschaltzeit für Kunstlicht ist laut Befragungen im Sommer gegenüber dem Winter reduziert (1-4 h W: 61 %, S: 39 %). Dies schlägt sich allerdings nicht in einer Senkung des Stromverbrauchs nieder (Kap. 8.4.2). Insgesamt sind zu beiden Jahreszeiten jeweils gleich viele der Befragten mit der Beleuchtungssituation durch Kunstlicht zufrieden („etwas“ oder „sehr zufrieden“ W: 78 %, S: 77 %).

**Abb. 8.37:** Bewertung der Tageslichtsituation im Raum und am Computer durch die Nutzer im Winter und Sommer. Gebäude B. Angaben in Prozent

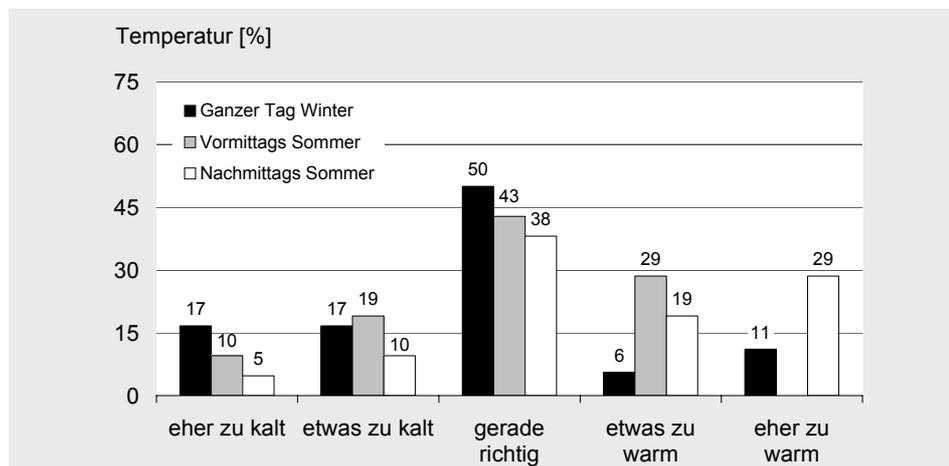


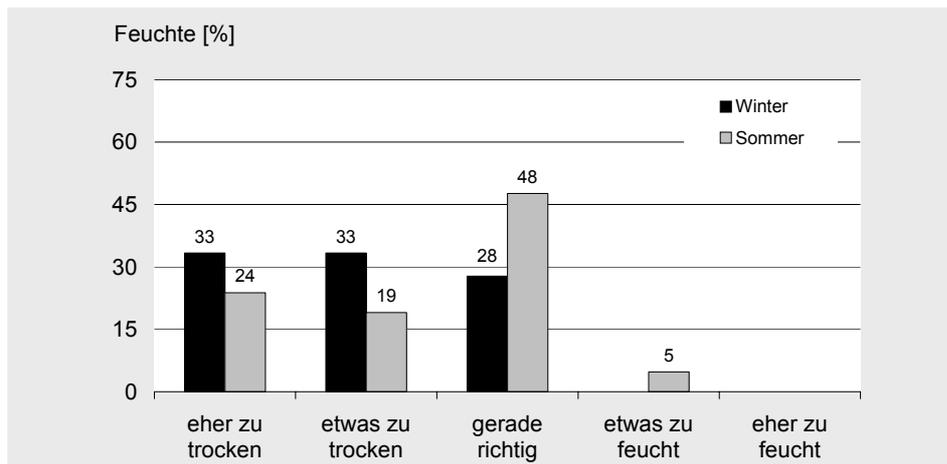
### Raumtemperatur und Feuchte

Die Temperatur der letzten vier Wochen empfand im Winter die Hälfte als „gerade richtig“, einem Drittel war es „etwas zu kalt“, einer kleinen Minderheit war es zu warm. Zwei Drittel bewerten die Raumluftfeuchte während der letzten vier Wochen als „etwas“ oder „eher zu trocken“ (mit geringer Streuung, Tab. 8.19). Wie die Messungen zeigen (Tab. 8.20), liegen die mittleren Raumlufttemperaturen für die einzelnen Geschosse im Bereich der Empfehlung der EN ISO 7730 und etwas über der in [SIA V382/1, 1992] empfohlenen Mindesttemperatur von 20 °C. Die relative Feuchte ist in Übereinstimmung mit dem Nutzerurteil zu gering, [SIA V382/1, 1992] schreibt eine untere Grenze von 30 % vor, die nur an wenigen Tagen unterschritten werden sollte.

Im Sommer wird die Raumlufttemperatur am Vormittag von jeweils 29 % als „eher“ oder „etwas zu kalt“ oder als „etwas zu warm“ beschrieben. Für 43 % der Personen war sie „gerade richtig“. Am Nachmittag war es 48 % „etwas“ oder „eher zu warm“, 38 % empfanden es als „gerade richtig“. Der Bezugszeitraum war für sommerliche Verhältnisse eher kühl und wies nur vereinzelte „Sommertage“ ( $T_{\max} \geq 25$  °C) auf. Auch im Sommer bewerten noch 43 % die Raumluftfeuchte als „etwas“ oder „eher zu trocken“ (mit geringer Streuung). Die gemessenen Werte entsprachen den normativen Anforderungen. Unangenehme Temperaturschwankungen bei wechselhaftem Wetter nehmen im Sommer 38 % „ziemlich“ oder „sehr stark“ wahr.

**Abb. 8.38:** Beurteilung der Temperatur während der „letzten vier Wochen“, Gebäude B. Im Winter bezog sich die Frage auf den ganzen Tag, im Sommer wurden Vormittag und Nachmittag getrennt beurteilt. Angaben in Prozent





**Abb. 8.39:** Beurteilung der Raumluftfeuchte während der „letzten vier Wochen“ im Winter und Sommer. Gebäude B. Angaben in Prozent

		Winter	Sommer
Raumtemperatur (Mitte Optimum)	Mittelwert	2,78	
	SD	1,16	
Raumtemperatur Vormittag (Mitte Optimum)	Mittelwert		2,9
	SD		0,94
Raumtemperatur Nachmittag (Mitte Optimum)	Mittelwert		3,57
	SD		1,16
Luftfeuchte (Mitte Optimum)	Mittelwert	1,83	2,24
	SD	0,92	1,04
Temperaturzufriedenheit	Mittelwert	2,71	2,5
	SD	0,95	0,98

**Tab. 8.19:** Temperatur und Raumluftfeuchte, Gebäude B. Angabe arithmetisches ungewichtetes Mittel (Mittelwert) und Standardabweichung (SD) für den Winter und Sommer. Anmerkung: die Frage nach der Raumtemperatur bezog sich im Winter auf den ganzen Tag, im Sommer wurden Vor- und Nachmittag getrennt bewertet.

Die Temperaturzufriedenheit insgesamt ist im Winter geringer als im Sommer (Tab. 8.19). Aktiven Einfluss auf die Raumtemperatur nehmen im Winter nur 29 %, im Sommer sind dies 48 %. Mit der Wirksamkeit des Eingriffes sind im Sommer (die Frage entfiel im Winter) jedoch 24 % „ziemlich“ oder „sehr unzufrieden“ (bei etwa einem Drittel Enthaltungen). Dies könnte die eher schlechte Bewertung der sommerlichen Raumtemperaturen zumindest teilweise erklären.

**Tab. 8.20:** Übersicht über die gemessenen Raumlufttemperaturen und die relative Feuchte (Mittelwert) auf den einzelnen Geschossen und die Empfehlungen nach [DIN EN ISO 7730:2006-05] und nach [SIA V382/2, 1992] für den Winter und den Sommer. Gebäude B

		Winter Temperatur	Feuchte	Sommer Temperatur	Feuchte
		(°C)	(%)	(°C)	(%)
Raumlufttemperatur und Feuchte gemessen	2. OG	± 21,9	± 24,7	± 23,4	± 49,3
	6. OG	± 22,6	± 24,7	± 24,9	± 45,3
	13. OG	± 23,1	± 24,5	± 23,7	± 48,1
Raumlufttemperatur Empfehlung für Büroräume, PPD < 6 (PPD < 15)		22,0 ± 1 (22,0 ± 3,0)	-	24,5 ± 1 (24,5 ± 2,5)	-
Auslegungswerte für Anlagen, üblicher Bereich [SIA V382/2, 1992], Sommer gekühlt		19 – 24	30 - 70	22 – 28	30 - 70

### Lüftungsverhalten

Im Sommer wird mehr über die Fenster gelüftet als im Winter (Abb. 8.40). Gelüftet wurde im Winter hauptsächlich bei Frischluftbedarf (72 %), im Sommer öffnen mehr Nutzer das Fenster wenn es zu warm ist (62 %). Insgesamt wird aber deutlich weniger über die Fenster gelüftet als z. B. beim Gebäude W (S „häufig“ oder „immer“ 70 %). Dies zeigt, dass die Teilklimaanlage, die Büros zumindest so weit mit Frischluft versorgt, um eine permanente Fensterlüftung zu unterbinden.

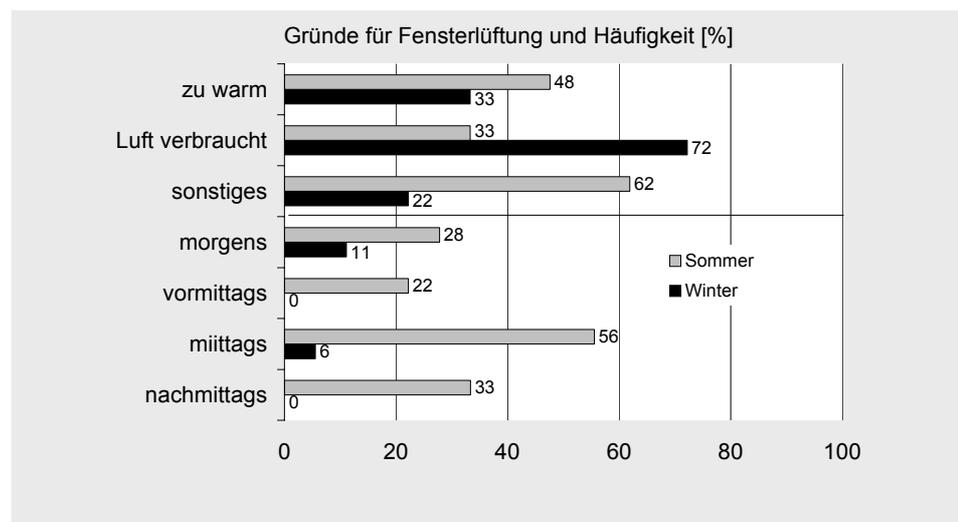
Im Winter berichten mehr Befragte über Zugluft als im Sommer („manchmal“, „häufig“ oder „immer“ W: 56%, S: 33 %, siehe auch schlechterer Mittelwert im Winter, Abb. 8.36). Die vermehrte Zugluft im Winter erklärt sich durch den Kaltluftabfall an der Scheibe bei Fenstern mit schlechten Wärmeschutzigenschaften ( $U_{\text{Fenster}} = 3,5 \text{ W}/[\text{m}^2\text{K}]$ ).

Die Geruchsbelastung ist insgesamt sehr gering. Im Winter wird am ehesten noch Zigarettergeruch wahrgenommen („stark“ oder „sehr stark“: 17 %), im Sommer dagegen ein Gemisch aus Gerüchen („stark“ oder „sehr stark“: 10 %). Über das Vorhandensein der Teilklimaanlage sind nicht alle Personen im Gebäude B informiert (W: 28 %, S: 52 %), die Differenz zwischen Sommer und Winter ist auf die unterschiedlichen Befragungsgruppen zurückzuführen, eine Information zum Gebäude hat nicht stattgefunden. Kommentare auf den Fragebögen weisen auf Staubpartikel hin, die aus der Anlage austreten.

Zu beiden Befragungszeitpunkten ist jeweils knapp ein Fünftel unzufrieden mit der Anlage („ziemlich“ oder „sehr unzufrieden“ W: 17 %, S: 19 %).

Mit der Luftqualität insgesamt ist zu beiden Jahreszeiten etwa die Hälfte der Nutzer „etwas“ oder „sehr zufrieden“. Im Sommer gibt es am Ende der Skala jedoch etwas mehr Unzufriedene („ziemlich“ oder „sehr unzufrieden“ S: 18 %; W aufgrund < 11 % nicht wertbar). Dies zeigt sich auch am etwas schlechteren Mittelwert mit einer höheren Streuung in Sommer als im Winter, Abb. 8.36).

**Abb. 8.40:** Angaben von Gründen für das geöffnete Fenster und prozentuale Verteilung der Antworten auf die Frage, wann in den vergangenen vier Wochen die Fenster im Raum „häufig“ oder „immer“ offen standen. Die Zahlen für den Winter sind aufgrund der geringen Stichprobengröße nur bedingt zu werten. Auf die Frage nach den Gründen für die Lüftung geben unter „sonstiges“ im Sommer 24 % an, „morgens beim Betreten des Raumes“ zu lüften. Alle Angaben in Prozent, Gebäude B



### *Geräusche*

Da im Winter wie auch im Sommer jeweils über 70 % der Befragten in Einzelbüros arbeiten, fällt die Störung durch raumeigene Geräusche sehr gering aus. Im Winter werden „sonstige Geräusche“ als am stärksten wahrgenommene Störung angegeben („häufig“ oder „immer gestört“ W: 17 %). Im Sommer fühlen sich durch Geräusche bei geöffnetem Fenster sehr viele Befragungsteilnehmer irritiert („häufig“ oder „immer gestört“ W: 6 %, S: 38 %). Dieser Punkt ist in der Befragung im Gebäude B der einzige, bei dem zwischen Sommer- und Winterbefragung ein signifikanter Unterschied auftritt. An zweiter Stelle werden im Sommer Geräusche bei geschlossenem Fenster genannt („häufig“ oder „immer gestört“ S: 19 %; W: nicht wertbar). Die Zufriedenheit mit dem Geräuschpegel insgesamt ist zu beiden Befragungszeitpunkten hoch („etwas“ oder „sehr zufrieden“ W: 78 %, S: 72 %).

### *Raumgestaltung und Sauberkeit*

Da die meisten Personen in einem Einzelbüro arbeiten, ist die Zufriedenheit mit der Privatheit, die im Winter noch besser als im Sommer ist („etwas“ oder „sehr zufrieden“ W: 94 %, S: 71 %), sehr hoch. Auch die Zufriedenheit mit dem Platz im Raum ist allgemein hoch („ziemlich“ oder „sehr unzufrieden“ W: 0, S: 24 %). Die Zustimmung zur Ausstattung des Büros insgesamt ist zu beiden Befragungszeitpunkten sehr hoch („etwas“ oder „sehr zufrieden“ W: 78 %, S: 77 %). Auch die Sauberkeit in den Büros wird gut bewertet („etwas“ oder „sehr zufrieden“ W: 61 %, S: 77 %).

### *Einflussnahme Raumklima*

Der Abstimmungsbedarf über raumklimatische Parameter ist auf Grund der Raumbelastung zu keinem Zeitpunkt sonderlich hoch. Einzig beim Licht müssen sich im Winter 11 % manchmal absprechen. Der Wunsch nach mehr Eigenständigkeit wird im Sommer im Bereich der Regelung der Raumtemperatur von 52 % genannt, im Winter sind dies 17 %.

### *Gebäudeunabhängige Parameter*

Die Leistungseinschränkungen, die nicht ursächlich mit dem Gebäude im Zusammenhang stehen, sind zu beiden Befragungszeitpunkten im Bereich der technischen Probleme am höchsten („ziemlich“ oder „sehr eingeschränkt“ W: 28 %, S: 24 %). Die Zufriedenheit mit dem Arbeitsplatz (einschließlich Architektur, räumliche Gegebenheiten, Ausstattung etc.) ist - auf hohem Niveau - im Sommer mit einer sehr geringen Streuung noch höher als im Winter („etwas“ oder „sehr zufrieden“ W: 72 %; S: 90 %).

## **Rückschlüsse auf die Gebäudesanierung aus der Befragung**

- Raumtemperatur Winter und Sommer  
siehe Messungsergebnisse Gebäude B, Kap. 8.2.2
- Luftqualität  
Trotz der Lüftungsanlage mit hohem Umluftanteil sind 57 % der Befragten mit der Luftqualität „etwas“ oder „sehr zufrieden“.  
Sanierung: Es sollte wieder eine Lüftungsanlage eingesetzt werden.

- **Tageslicht**  
Die Fenstergröße wird von 78 % als „gerade richtig“ eingestuft. Im Winter ist der Großteil (83 %) der Nutzer mit der gesamten Tageslichtsituation „etwas“ oder „sehr zufrieden“. Im Sommer ist es einigen Nutzern am PC zu hell. Bei heruntergefahrenem Sonnenschutz sind die Einschaltzeiten für das Kunstlicht hoch (38 % schalten das Kunstlicht „häufig“ oder „immer“ bei heruntergefahrenem Sonnenschutz ein).  
Sanierung: Sonnenschutz verbessern (z. B. geteilter Behang, oder von unten nach oben)
- **Raumgestaltung und Aufteilung**  
Die Zufriedenheit mit der Raumgestaltung und Aufteilung ist mit 78 % der Befragten, die „ziemlich“ oder „sehr zufrieden“ sind, hoch.  
Sanierung: Raumgestaltung und Aufteilung können beibehalten werden.

### 8.3.3 Vergleich Gebäude W und Gebäude B

Insgesamt ist es sehr auffällig, dass die Bewertungen zu beiden Befragungszeitpunkten im Gebäude W weitaus schlechter ausfallen als dies im Gebäude B der Fall ist. Ein Punkt, den es hierbei allerdings zu bedenken gilt, ist die Tatsache, dass das Befragungsklima im Gebäude B restriktiver war (bestimmte Fragen im Vorfeld gestrichen) als beim Gebäude W. Ob diese Tatsache einen Einfluss auf das Befragungsergebnis hat, kann nicht geklärt werden.

Der Vergleich zeigt, dass im Winter (grafische Darstellung siehe Abb. A8.3.3-1) die größte Differenz im Bereich der Büroausstattung, die den Sanierungsbedarf des Gebäudes unterstreicht, und bei der Bewertung der raumeigenen Geräusche, die die höhere Raumebelegung im Gebäude W spiegelt, auftritt. Die hohe Differenz bei der Zufriedenheit mit der Raumtemperatur unterstreicht die Unzulänglichkeit der Fußbodenheizung im Gebäude W. Auch die Zufriedenheit mit dem Arbeitsplatz fällt im Gebäude W weit schlechter aus als im Gebäude B, gefolgt vom Bereich der Sauberkeit.

Im Sommer treten die größten Abweichungen bei der Zufriedenheit mit dem Arbeitsplatz auf (siehe Abb. A8.3.3-2). Weiter wird erneut die Raumausstattung kritischer beurteilt als im Gebäude B. Große Abweichungen treten bei der Bewertung der Zugluft auf, die im Gebäude W auf eine ungewünschte Querlüftung durch ständig geöffnete Fenster zurückzuführen ist. Wie im Winter wird auch die Sauberkeit im Sommer im Gebäude W schlechter beurteilt. Die aktive Kühlung lässt die Bewertung der Raumtemperatur im Gebäude B besser ausfallen als im Gebäude W. Dies deckt sich mit den eingangs formulierten Erwartungen an die Ergebnisse der Befragung.

## 8.4 Gebäudeanalyse mit Aufzeichnungen des Energieverbrauchs

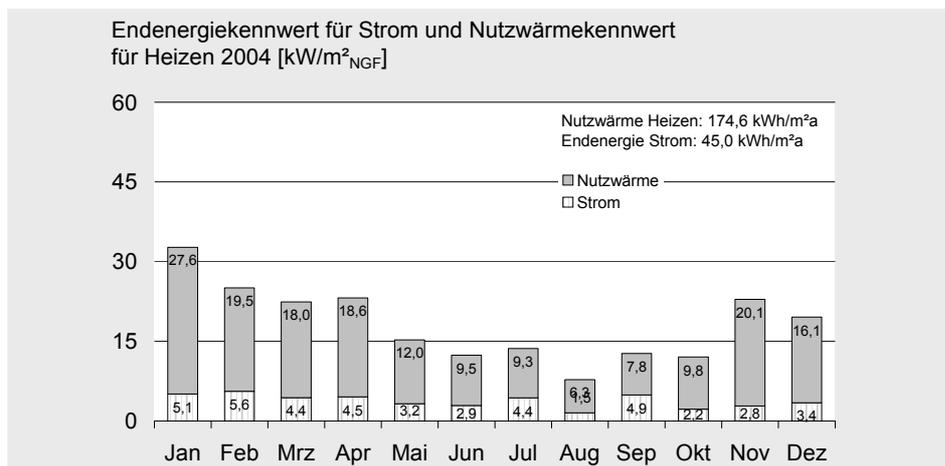
### 8.4.1 Kennwerte Gebäude W

#### Nutzenergiekennwert Heizung und Endenergiekennwert Strom 2004

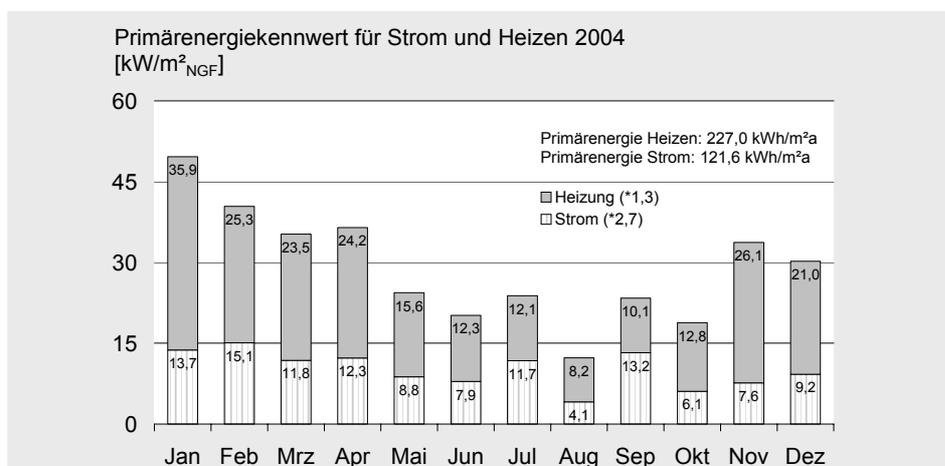
Der spezifische Primärenergieverbrauch des Gebäudes einschließlich nutzungsspezifischer Geräte liegt bei 349 kWh/m<sup>2</sup>a (Abb. 8.41 und 8.42) und ist damit hoch. Im Sommer tritt ein beachtlicher Wärmebezug auf, die vermuteten Ursachen sind regelungstechnische und hydraulische Fehler und eine nichtvorhandene saisonale Abschaltung der Heizung.

Bei der Sanierung soll der primärenergetisch günstige Fernwärmeanschluss<sup>18</sup> beibehalten werden. Der Heizwärmeverbrauch (Beseitigung sommerliche Wärmebezüge, Senken der Transmissions- und Lüftungsverluste) und der Strombedarf (Reduktion der elektrischen Beleuchtung) sollen gesenkt werden.

<sup>18</sup> Das örtliche Heizkraftwerk erzeugt Strom und Wärme über Kraft-Wärme-Kopplung.



**Abb. 8.41:** Aufgezeichnete Endenergiekennzahl (Ableseung) für Strom (inkl. nutzungsspezifischer Anwendungen) und Nutzenergiekennwert (Ableseung) für Gebäudeheizung 2004. Der Strombedarf für die Hilfsenergie ist hier nicht enthalten, sondern im Allgmeinestrom) 2004, Gebäude W.

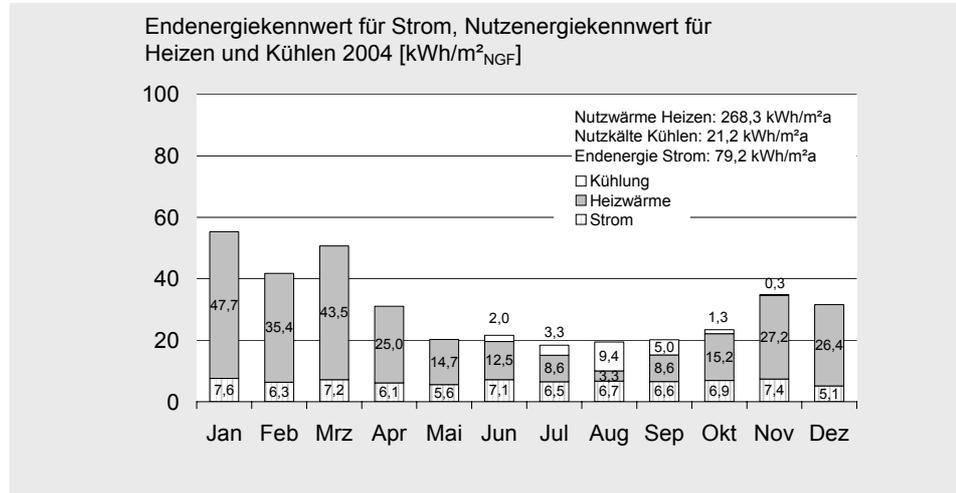


**Abb. 8.42:** Primärenergiekennwert für Strom und Gebäudeheizung 2004. Gebäude B  
Umrechnungsfaktoren (nicht erneuerbarer Anteil) nach [DIN V 18599-1:2005-07]

### 8.4.2 Kennwerte Gebäude B

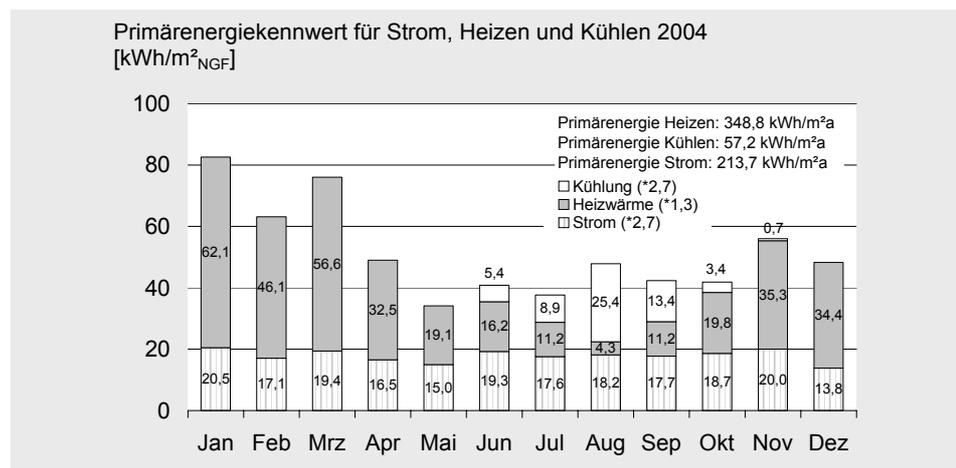
#### Aufzeichnungen Nutzenergiekennwert für Heizen und Kühlen, sowie Endenergiekennwert Strom 2004

**Abb. 8.43:** Aufgezeichnete Endenergiekennzahlen (Ablesung) für Strom (inkl. nutzungsspezifische Anwendungen) und Nutzenergiekennwert (Ablesung) für Gebäudeheizung und Kühlung, 2004. Gebäude B. Der Strombedarf für die Hilfsenergie ist hier nicht enthalten, sondern im Allgemeinstrom. Anmerkung: Der Nutzenergiekennwert für die Kälte scheint gering. Der Grund dafür ist der Flächenbezug, da sich der Wert auf die gesamte Fläche (inkl. nicht gekühlte Bereiche wie die Flure) bezieht.

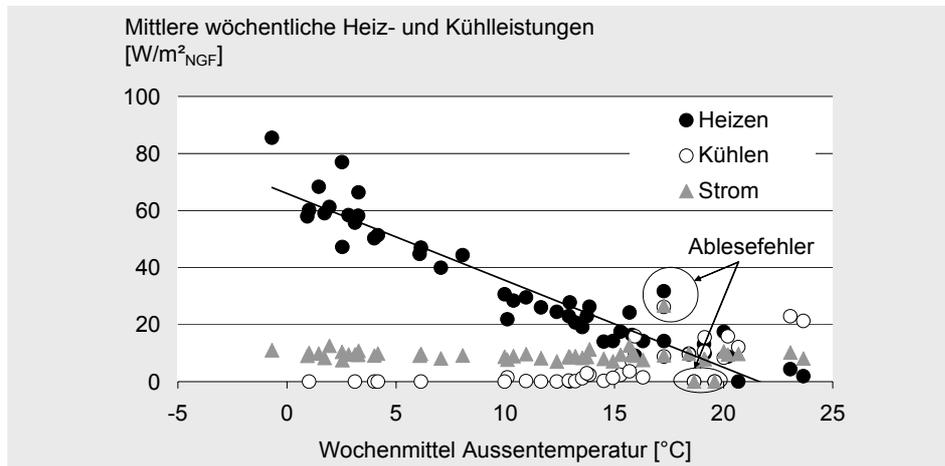


Der Primärenergieverbrauch für das Gebäude ist mit 620 kWh/m<sup>2</sup>a sehr hoch. Sowohl Stromverbrauch als auch die Nutzwärmebezüge sind höher als beim Gebäude W. Beim Stromverbrauch ist dies auf die Hilfsenergie für die Teilklimaanlage und die Gebäudeausstattung (das Gebäude W ist nicht vollständig belegt) zurückzuführen. Der höhere Nutzwärmebezug liegt hauptsächlich am höheren Luftwechsel durch die Anlage, der nach Abschätzungen konstant bis zu 2,0 1/h betragen kann (siehe auch Tab. 9.15).

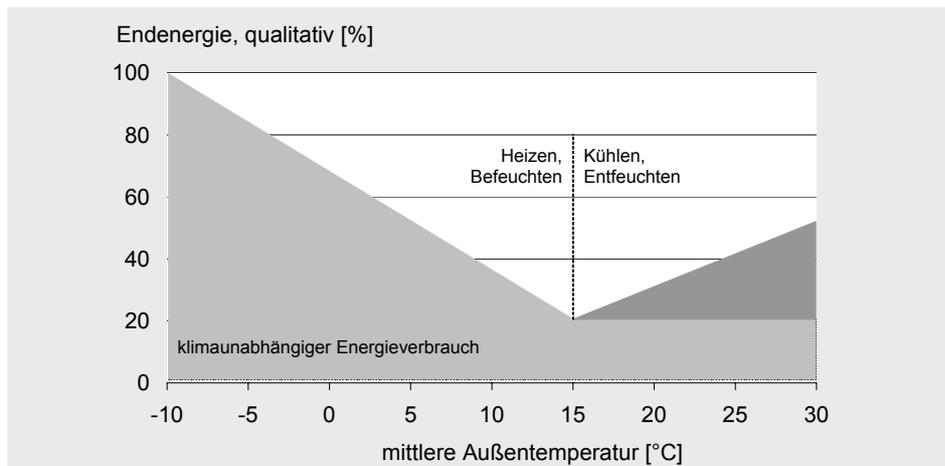
**Abb. 8.44:** Primärenergiekennwert für Strom und Gebäudeheizung- und Kühlung, 2004. Gebäude B. Umrechnungsfaktoren nach (nicht erneuerbarer Anteil) [DIN V 18599-1:2005-07]. Hier wären eigentlich die Faktoren für die Schweiz anzuwenden, der größte Unterschied ergibt sich dabei für den Strom (Strom: 2,0; ermittelt mit GEMIS 4.14). Anmerkung: Das Kaltwasser stammt aus einer Anlage für sechs Gebäude. In [DIN V 18599-1:2005-07] ist kein Wertungsfaktor für eine solche Konstellation angegeben, da die Kälte mit Strom erzeugt wird, wird hier ein Faktor von 2,7 eingesetzt.



Die wöchentliche Aufzeichnung Abb. 8.45 zeigt, dass starke Überschneidungen zwischen Heizen und Kühlen auftreten. Auch bei Außentemperaturen über 15 °C wird geheizt. Einen typischen Verlauf des Endenergieverbrauchs für Heizen und Kühlen in Abhängigkeit von der Außentemperatur zeigt Abb. 8.46 zum Vergleich. Dies unterstreicht nochmals die Defizite in der Regelung der vorhandenen Anlage.



**Abb. 8.45:** Zusammenhang zwischen Wochenmittel der Außentemperatur und der Leistung für Gebäudeheizung und Kühlung sowie Strom im Gebäude B, 2004. Anmerkung: Für das Gebäude W konnte diese Grafik wegen einer lückenhaften Aufzeichnung der Daten nicht erstellt werden.

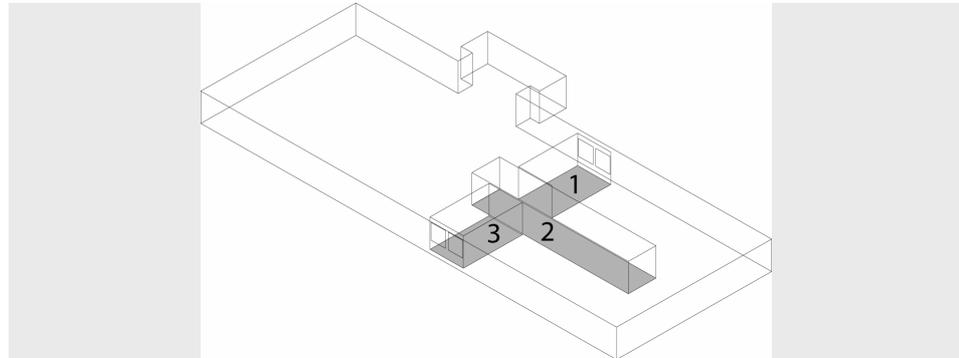


**Abb. 8.46:** Qualitativer Verlauf des Endenergieverbrauchs in einem typischen Bürogebäude aus dem Bestand mit mäßigem Wärmeschutz und aktiver Kühlung. Darstellung Abhängigkeit Gesamtverbrauch (TGA und nutzungsspezifische Geräte) von der Außentemperatur auf der Basis von Tagesmittelwerten. Quelle: [Voss et al., 2006a]

## 8.5 Gebäudeanalyse mit Simulationen

### 8.5.1 Kalibrierung Simulationsmodell Gebäude W

#### Simulationsmodell



**Abb. 8.47:** Simulationsmodell Gebäude W (grau markierten Flächen).  
Verwendete Abkürzungen:  
Ostbüro = 1, Flur = 2,  
Westbüro = 3

		Büro 1 + 2	Flur
Tiefe	(m)	6,2	
Breite	(m)	3,6	
Außenwand	(m <sup>2</sup> )	9,4	
Rohbauöffnung Fenster	(m <sup>2</sup> )	4,5	
Rahmenanteil	(%)	30	
Glas	m <sup>2</sup>	3,2	
Glasfläche pro m <sup>2</sup> Fassade	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	0,34	
Glasfläche pro m <sup>2</sup> NGF	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	0,14	
Boden / Decke	(m <sup>2</sup> )	22,3	40,0
Höhe (bis abgehängte Decke)	(m <sup>2</sup> )	2,6	2,6

**Tab. 8.21:** Abmessungen des Ost- und Westraums (lichte Maße)

#### Abmessungen und Baukonstruktion

Das Simulationsmodell besteht aus einem Ost-, einem Westbüro, dem Flur sowie adiabaten Grenzflächen (Abb. 8.47, Tab. 8.21). Die Wandaufbauten wurden gemäß der Pläne und der Gebäudebegehungen angenommen (Tab. 8.22).

**Tab. 8.22:** Kennwerte der Umfassungsflächen. Der U-Wert für das Fenster wurde nach [Loga et al., 2001] angesetzt (2-Scheiben-isolier-Verglasung, Kunststoffrahmen). Der g-Wert wird durch Verschmutzung (visueller Eindruck Begehung und Ergebnis Nutzerbefragung) um 15 % gemindert [DIN 5034-3:1994-09] eingesetzt. Weitere Angaben zu den Wandaufbauten, siehe Tab. A8.5.1-1.

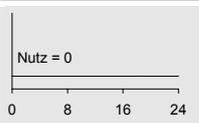
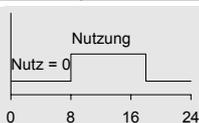
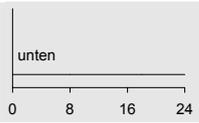
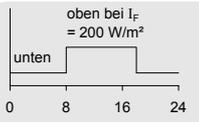
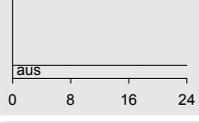
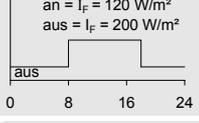
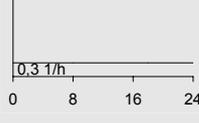
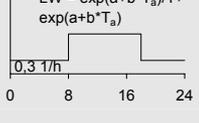
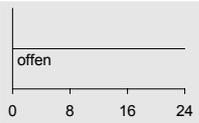
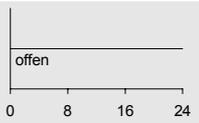
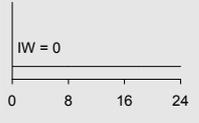
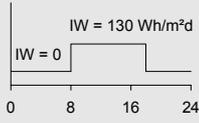
	U-Wert (W/[m <sup>2</sup> K])	g-Wert (%)
Brüstung / Sturz	0,33	
Stütze (zw. Fenstern)	2,74	
Fenster	3,0	76
Innenwand z. Flur	3,83	
Trennwand Büros	0,43	
Decke / Fußboden	0,64	

### Gebäudebetrieb und Raumnutzung

Das Gebäude wird wie in Tab. 8.23 dargestellt betrieben. Die Parameter der Gebäudenutzung am Wochenende (Sonnenschutz, Lüftung) können teilweise aus den Messdaten abgeleitet werden, für die Werktage müssen Steuerungs- und Regelungsmechanismen festgelegt werden (Sonnenschutz und elektrische Beleuchtung entsprechend der solaren Einstrahlung auf die Fassade). Um dem Verhalten der Nutzer Rechnung zu tragen, die bei zunehmenden Außentemperaturen die Fenster öffnen, wird die in Kapitel 5.3.1 vorgestellte Funktion verwendet. Anstelle des Anteils geöffneter Fenster wird in der Simulation ein bestimmter Luftwechsel angenommen. So ergibt sich z. B. bei einer Außentemperatur von 30 °C eine Luftwechselrate von 2,7 1/h (zusammen mit Fugenlüftung 3,0 1/h). Dieser Gesamtwert deckt sich mit der in [Deutscher et al., 2000] empfohlenen Annahme für einen durch Fensterlüftung erhöhten sommerlichen Luftwechsel.

**Tab. 8.23:** Gebäudebetrieb und Raumnutzung – Annahmen für die Simulation, Gebäude W.

Verwendete Abkürzungen:  
WE = Wochenende,  
WT = Werktag, LW = Luftwechsel,  $I_F$  = Solare Einstrahlung auf Fassade, AT = Außentemperatur

	Wochenende	Werktag	Anpassung und Kommentar
Nutzung			WE: keine Nutzung WT: 8 bis 18 Uhr
Sonnenschutz			Abminderungsfaktor $F_c = 0,3$ [TRANSSOLAR, 2003] (außen liegende hellgraue Metalllamellen) WE: Festlegung entsprechend Messdaten
Elektrische Beleuchtung			Quelle: [TRANSSOLAR, 2003] an = $I_F = 120 \text{ W/m}^2$ aus = $I_F = 200 \text{ W/m}^2$
Luftwechsel			LW WE: Berechnung Fugenlüftung nach Angaben aus [Orme et al., 1998] und [DIN EN ISO 13791:2005-02]. Fenster gekippt im Bereich von 0,0 1/h bis 1,0 1/h. Festlegung entsprechend Messdaten. LW WT: Fensterlüftung abhängig von AT (Abb. 5.23) Nachts: Fenster gekippt über Zufallszahl
Interzonaler Luftwechsel (Bürotür)			Luftaustausch Büros / Flur WE, WT: 0 1/h - 2,0 1/h (Bezugsvolumen: Büro).
Interne Wärmequellen			Interne Wärmequellen (IW) waren ursprünglich höher beanschlagt (2 PC-Arbeitsplätze / Büro, elektrische Beleuchtung 20 W/m <sup>2</sup> ). Korrigiert auf: 1 PC-Arbeitsplatz / Büro, elektrische Beleuchtung 10 W/m <sup>2</sup> ) Flur WT: 30 Wh/m <sup>2</sup> d

### Vorgehen bei den Simulationen

#### Wochenenden

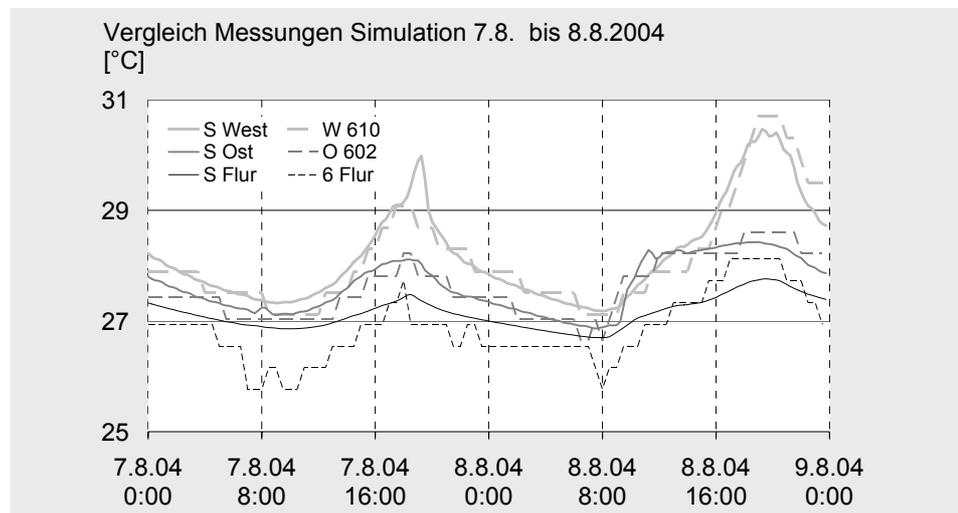
Das Temperaturverhalten des Gebäudes am Wochenende wird nicht durch aktuelle Nutzereinflüsse beeinflusst, allenfalls zeichnen sich diese aus der „thermischen Vergangenheit“ noch zu Beginn des Wochenendes ab.

Die gemessenen Zustände sind in der Simulation abgebildet, indem anhand der Messergebnisse die Position des Sonnenschutzes abgeschätzt und der Luftwechsel sowie der Luftaustausch zwischen den Zonen angepasst werden.

Abb. 8.48 zeigt exemplarisch die Untersuchung eines Wochenendes mit sommerlichen Temperaturverhältnissen (Meteorologische Bedingungen, siehe Abb. A8.5.1-1). Das Aufwärmverhalten der simulierten Räume entspricht nicht ganz den Messwerten, was auf das von der Realität abweichende Strahlungsmodell der Simulationen zurückzuführen ist (siehe Kap. 8.1.3). Das Abkühlverhalten vollzieht die Messwerte gut nach, somit gibt die Simulation das Speicherverhalten der Räume wieder. Die Messwerte legen den Schluss nahe, dass der Flur noch aus anderen, nicht zum Modell gehörigen, Büros mit kühlerer Luft versorgt wird; sein Verhalten ist in der Messung etwas dynamischer als in der Simulation.

Insgesamt lassen sich die Wochenenden gut abbilden, da das Nutzerverhalten ausgeblendet ist. Die Differenzen zwischen dem Mittelwert der Messungen und dem der Simulationen für das jeweilige Wochenende liegen zwischen +0,4 K und -0,4 K, (siehe Tab. A8.5.1-2).

**Abb. 8.48:** Vergleich Messungen und Simulation für das Wochenende vom 07.08. bis zum 08.08.2004. Gebäude W. Verwendete Abkürzungen: S = Simulation W 610, O 602 und 6 Flur: Messdaten für den jeweiligen Raum im 6. OG



**Tab. 8.24:** Simulationsparameter Verwendete Abkürzungen: LW = Luftwechsel (bezogen auf Bürovolumen), S = Simulation

	LW Gang / Büro (1/h)	LW (1/h)	Sonnenschutz* (%)
S Ost	2	0,3	0
S West	2	0,3	30
S Flur	2	-	-

\* = Wirksamkeit

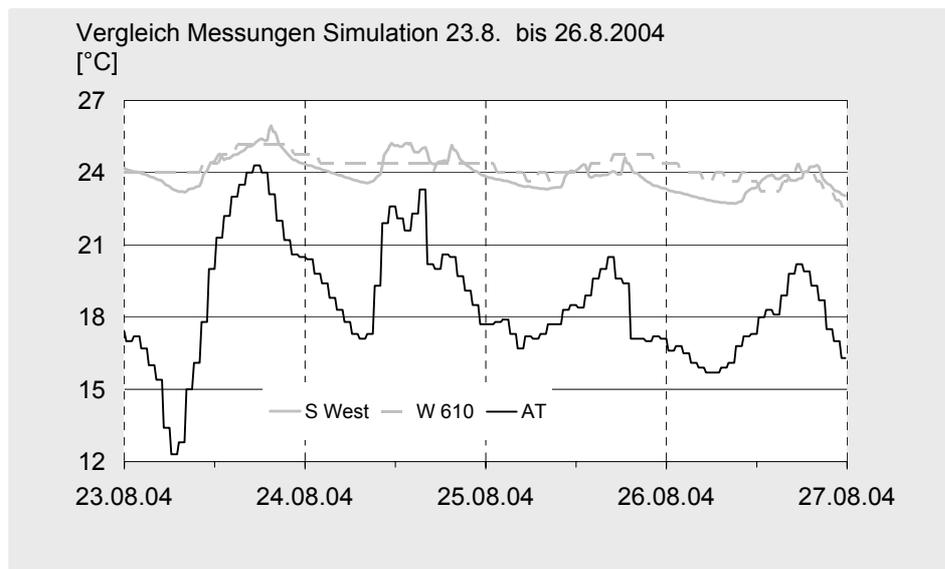
### Arbeitswochen

Die Anpassung über Infiltration und den interzonalen Luftwechsel gelingt für die Arbeitswochen etwas schlechter, da sich die Raumnutzung (Lüftung, Bedienung Sonnenschutz) von Tag zu Tag unterscheidet. Anhand einer Arbeitswoche, mit anfangs warmen und dann kühleren Außentemperaturen, lassen sich einige Phänomene, die für den Vergleich von Simulation und Messung charakteristisch sind, erläutern (Abb. 8.49 zeigt das Westbüro, übrige Räume siehe Abb. A8.5.1-2 bis -4).

Die Raumlufttemperatur sinkt zunächst bei Messungen und Simulation, die Temperaturamplituden sind bei der Simulation während der ersten beiden Tage

jedoch höher. Die Nutzer könnten versucht haben, die Raumlufttemperatur durch erhöhte Stoßlüftung zu senken. Allgemein gehen die simulierten Temperaturen nachts stärker zurück als die gemessenen, das reale Gebäude verhält sich durch die ausgleichenden thermischen Wechselwirkungen vieler Räume träger. Charakteristisch dafür ist die Nacht vom 25. auf den 26.08: Das Simulationsmodell reagiert unmittelbar auf die Temperatursenkung der Außenluft, das reale Gebäude kühlt zwar auch ab, aber merklich langsamer.

Beim Vergleich der gemessenen und simulierten Temperaturmittelwerte jeder Arbeitswoche liegen die Abweichungen zwischen  $-0,2$  und  $+0,5$  K (siehe Tab. A8.5.1-3). Innerhalb der Woche gleichen sich die Unterschiede in den Tagesverläufen zwischen Messung und Simulation also aus.



**Abb. 8.49:** Arbeitswoche vom 23.08. bis zum 26.08.2004 (am 27.08. Ende der Messungen), Gebäude W. Verwendete Abkürzungen: LW = Luftwechsel (bezogen auf Bürovolumen), S = Simulation, AT = Außentemperatur, W 610: Messdaten für diesen Raum im 6. OG

**Tab. 8.25:** Simulationsparameter

	LW Gang / Büro (1/h)	LW (1/h)
S Ost	3,5	0,3 + Fensterlüftung

### Gesamte Messperiode

Zur Untersuchung der gesamten Messperiode wurden die Parameter Infiltration und interzonaler Luftwechsel – mit fast gleichem Ergebnis - stündlich oder tageweise jeweils im Bereich von 0 und 2,5 1/h (interzonaler Luftwechsel) und 0 und 1 1/h (Infiltration) per Zufallszahl variiert. Die Ergebnisse zeigt Tab. 8.26.

**Tab. 8.26:** Vergleich der gemessenen und simulierten Raumtemperaturen über die gesamte Periode vom 28.07. bis zum 25.08.2004, Gebäude W. Verwendete Abkürzungen: S = Simulation, M = Messung

	Temperaturmittel		Differenz	Standardabweichung		Differenz	Überschreitung „Klasse A“ ATG-NL		
	S (°C)	M (°C)	(M – S) (K)	S (-)	M (-)	(M – S) (-)	S (h)	M (h)	
Zufall 24 h	Ost	25,8	25,9	0,0	1,6	1,4	-0,2	38	17
	Flur	25,1	25,1	0,0	1,3	1,3	0,0		
	West	26,0	25,7	-0,3	1,6	1,5	0,0	36	24
Zufall 1h	Ost	25,8	25,9	0,1	1,6	1,4	-0,2		
	Flur	25,1	25,1	0,0	1,3	1,3	-0,1		
	West	25,9	25,7	-0,2	1,6	1,5	-0,1		

Der Vergleich von Messung und Simulation anhand der ATG-NL [van der Linden et al., 2006] macht deutlich, dass die simulierten Räume die

Anforderungen der Klasse A häufiger überschreiten als die Messungen. Die Überschreitungen der Simulation für die Klasse „B“ entsprechen denen der Messung (Tab. 8.26, Abb. A8.5.1-6). Dies bestätigt erneut, dass das Gebäude in Realität etwas träger reagiert als dies im Simulationsmodell dargestellt wird, die Temperaturspitzen also abfängt. Auch der Vergleich der Dauerlinie von Messungen und Simulationen unterstreicht dies (Abb. A8.5.1-7). Differenzen werden besonders im Bereich der Temperaturen ab 28 °C festgestellt. Dies entspricht dem Nutzerverhalten, da die Nutzer versuchen, extreme Temperaturzustände durch abweichendes Verhalten abzumildern.

#### *Erkenntnisse anhand der Simulationen*

- Insgesamt waren die internen Lasten in der Messperiode niedriger als mittels der Gebäudebegehungen abgeschätzt. Ein Grund könnte eine geringere Nutzerzahl, bedingt durch die Ferienzeit und die Gebäudenutzung durch wechselnde Projektgruppen, sein. Ein Beleg für die geringeren internen Lasten sind die monatlich aufgezeichneten Stromverbräuche (Abb. 8.41), die im August niedriger als in den anderen Monaten sind.
- Das reale Gebäude reagiert träger auf klimatische Einwirkungen als das Simulationsmodell. Im realen Gebäude bildet sich aus einer Vielzahl unterschiedlicher Nutzermodelle ein Mittelwert und es findet innerhalb des Gebäudes ein thermischer Austausch statt (hier durch die gemessene, nach oben hin zunehmende Temperaturschichtung belegt). Um dem Simulationsmodell mehr thermische Trägheit zu verleihen, wurde der Flur (bis zur Brandschutztür) als Zone integriert.

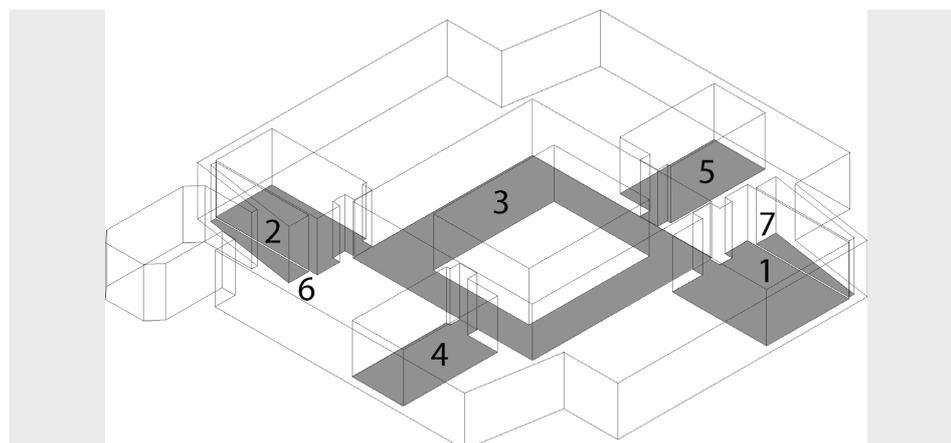
### 8.5.2 Kalibrierung Simulationsmodell Gebäude B

#### Simulationsmodell

##### *Abmessungen und Baukonstruktion*

Das Simulationsmodell besteht aus einem nach Ost und einem nach West orientierten Büroraum, dem Flur, den Technikbereichen, sowie adiabaten Grenzflächen (Abb. 8.50, Tab. 8.28). Ein weiteres Simulationsmodell stellt dieselbe Konfiguration für ein nach Nord und ein nach Süd ausgerichtetes Büro dar.

**Abb. 8.50:** Das Simulationsmodell (grau angelegte Flächen), Gebäude B. Die Technikbereiche (6,7) sind als separate Zone modelliert. Das Gebäude weicht von einer eindeutigen Nordorientierung um 28° nach Nordosten ab. Verwendete Abkürzungen: Ostbüro = 1, Westbüro = 2, Südbüro = 4, Nordbüro = 5, Flurbereich = 3, Technikbereiche = 6,7



		Büro O	Büro W	Büro S + N	Flur
Tiefe	(m)	5,6	5,6	5,6	-
Breite	(m)	5,0	3,4	3,1	-
Außenwand	(m <sup>2</sup> )	15,5	10,5	9,6	-
Rohbauöffnung Fenster	(m <sup>2</sup> )	9,5	6,4	6,4	
Glas	(m <sup>2</sup> )	6,0	4,0	4,0	
Rahmenanteil	(%)	37 %	37 %	37 %	
Glasfläche pro m <sup>2</sup> Fassade	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	0,39	0,38	0,42	
Glasfläche pro m <sup>2</sup> NGF	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	0,2	0,2	0,23	
Boden / Decke	(m <sup>2</sup> )	29,1	20,3	17,4	76,4
lichte Höhe (bis abgehängte Decke)	(m <sup>2</sup> )	2,9	2,9	2,9	2,9

**Tab. 8.27:** Abmessungen der Räume (lichte Maße)

Die Abmessungen der Räume und die Wandaufbauten gemäß [Bures et al., 1992] sind Tab. 8.27 und 8.28 zu entnehmen.

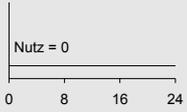
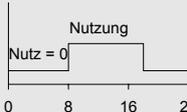
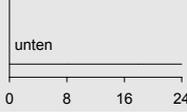
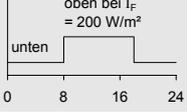
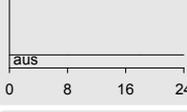
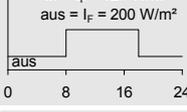
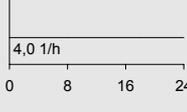
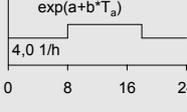
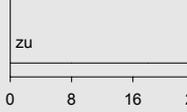
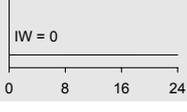
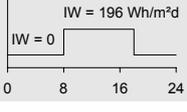
	U-Wert (W/[m <sup>2</sup> K])	g-Wert (%)
Brüstung / Sturz	0,29	
Stütze (zw. Fenstern)	1,47	
Fenster	3,2	76
Innenwände	1,6	
Decke / Fußboden	0,69	

**Tab. 8.28:** Kennwerte der Umfassungsflächen. Der U-Wert für das Fenster wurde nach [Loga et al., 2001] angesetzt (2-Scheiben-isolier-Verglasung, Metallrahmen), der g-Wert wird durch Verschmutzung (visueller Eindruck Begehung und Ergebnis Nutzerbefragung) um 15 % gemindert [DIN 5034-3:1994-09] angenommen. Weitere Angaben siehe Tab. A8.5.2-1.

### Gebäudebetrieb und Raumnutzung

Die Annahmen für den Gebäudebetrieb zeigt Tab. 8.29. Ein Unsicherheitsfaktor bei den Simulationen ist die Betriebsweise der Lüftung und Kühlung, die nicht genau bekannt ist.

Für das Wochenende können anhand der Messdaten Parameter (Sonnenschutz, Luftwechsel) angepasst werden. Für die Woche werden Steuerungs- und Regelungsmechanismen festgelegt (Sonnenschutz, elektrische Beleuchtung). Die Infiltration (ähnlicher Wert wie Gebäude W) kann bei der Simulation vernachlässigt werden, da der Anlagenluftwechsel dominiert. Der Flur ist eine Abluftzone, der Luftwechsel beträgt 0,8 1/h. Aufgrund der mechanischen Lüftung und der Gebäudehöhe wird im Gebäude B weniger über die Fenster gelüftet, daher wird die in Kap. 5.3.1 vorgestellte Funktion wie beim Gebäude W mit einem reduzierten Luftwechsel (Außentemperatur 30 °C: Luftwechselrate 1,0 1/h) verwendet. Über Nacht müssen die Fenster und Bürotüren geschlossen werden.

	Wochenende	Werktag	Anpassung und Kommentar
Nutzung			WE: keine Nutzung WT: 8 bis 18 Uhr
Sonnenschutz			Abminderungsfaktor $F_c = 0,3$ [TRANSSOLAR, 2003] (außen liegende hellgraue Metalllamellen) WE: Festlegung entsprechend Messdaten
Elektrische Beleuchtung			Quelle: [TRANSSOLAR, 2003]
Luftwechsel			LW WE: Lüftungsanlage LW 4,0 1/h, Fenster geschlossen LW WT: Lüftungsanlage LW 4,0 1/h, Fensterlüftung abhängig von AT (Abb. 5.23), vermindert (30 °C: 1,0 1/h) Nacht: wie WE
Interzonaler Luftwechsel (Bürotür)			Luftaustausch Büros / Flur WE: Türen geschlossen WT: Türen tagsüber teilweise offen, nachts geschlossen
Interne Wärmequellen			Interne Wärmequellen: 1 PC-Arbeitsplatz (+ Drucker) / Büro, elektrische Beleuchtung 12,8 W/m²) Flur WT: 30 Wh/m²d

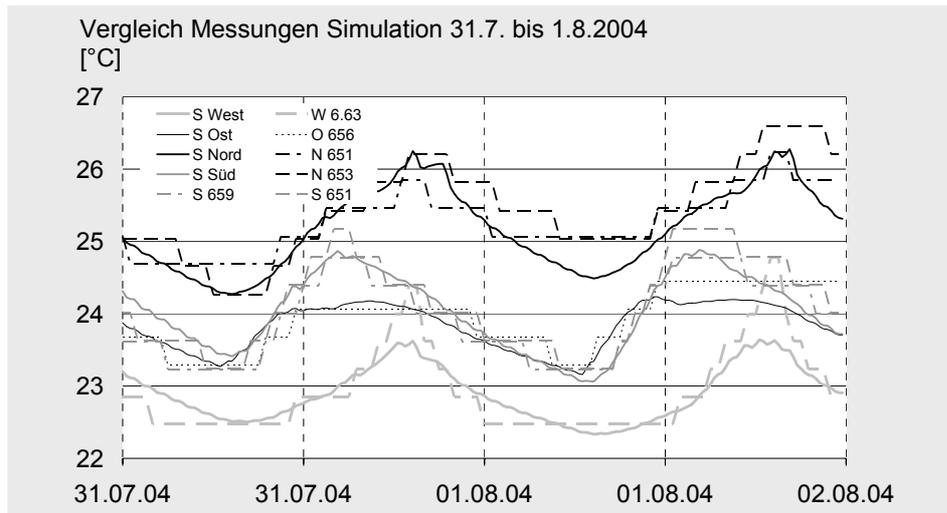
**Tab. 8.29:** Gebäudebetrieb und Raumnutzung – Annahmen für die Simulation, Gebäude B.  
Verwendete Abkürzungen:  
WE = Wochenende,  
WT = Werktag, LW = Luftwechsel,  $I_F$  = Solare Einstrahlung Fassade, AT = Außentemperatur

## Vorgehen bei den Simulationen

### Wochenenden

Die Messergebnisse lassen Rückschlüsse auf die Position des Sonnenschutzes zu, die Betriebsweise der Lüftung und die Zulufttemperatur werden abgeschätzt. Beispielhaft wird nachstehend (Abb. 8.51) ein Wochenende mit sommerlichen Temperaturen und unbewölktem Himmel untersucht (meteorologische Bedingungen, siehe Abb. A8.5.2-1).

Es wird deutlich, dass das thermische Verhalten der Büros in der Simulation prinzipiell abgebildet werden kann. Zeitliche Verschiebungen im Aufwärmverhalten der Räume sind auf das Strahlungsmodell zurückzuführen (siehe Kap. 8.1.3). Das Abkühlverhalten der Räume ähnelt dem der Messungen, wobei sich im Nordraum größere Abweichungen zeigen. Da Veränderungen der Zulufttemperatur nur eine Verschiebung der Kurve bewirkten, könnten die Ursachen auf ein ungewöhnliches Nutzerverhalten (z. B. Tür oder Fenster über das Wochenende offen gelassen), oder das Strahlungsmodell zurückzuführen sein. Dass die gemessenen Temperaturen im Ostbüro die des Westbüros überschreiten, liegt an den Einstellungen der Lüftungsanlage, da bei gleicher simulierter Zulufttemperatur das Temperaturniveau im Westbüro höher ist. Während aller Wochenenden liegen die maximalen Abweichungen zwischen Simulation und Messung zwischen – 0,8 und + 0,6 K (Tab. A8.5.2-2).



**Abb. 8.51:** Vergleich Messungen und Simulation für das Wochenende vom 31.07. bis zum 01.08.2004, Gebäude B.

Verwendete Abkürzungen: W 655, O 663, S 659, S 661, N 651 und N 652: Messdaten für den jeweiligen Raum im 6. OG

	T <sub>Zuluft</sub> / Anteil F (1/h) / (%)	LW (1/h)	Sonnenschutz* (%)
S Ost	16,5 / 20	3,0	100
S West	15,0 / 30	3,0	100
S Süd	15,5 / 30	3,0	100
S Nord	17,0 / 30	3,0	30
S Flur	-	0,6	-

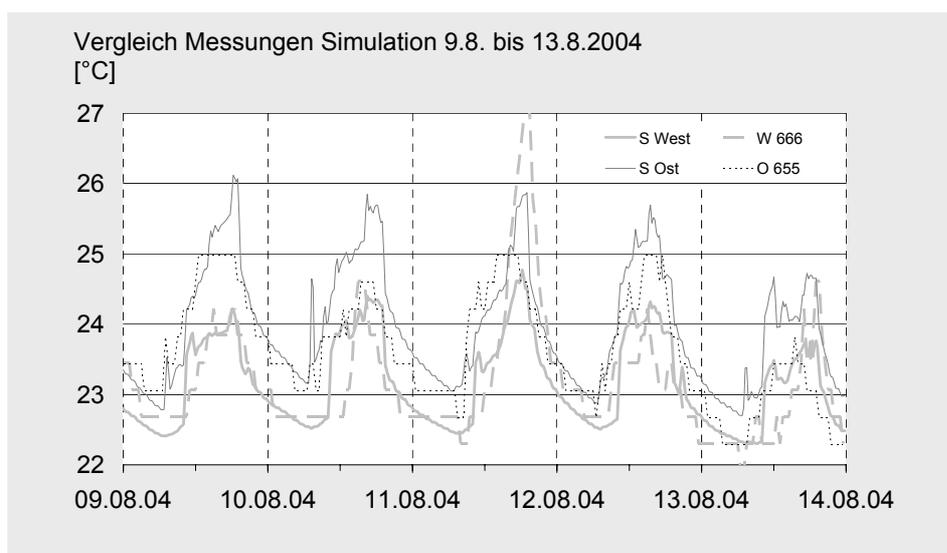
\* = Wirksamkeit

**Tab. 8.30:** Simulationsparameter

Verwendete Abkürzungen: LW = Luftwechsel (bezogen auf Bürovolumen), S = Simulation, F = Frischluft

### Arbeitswochen

Exemplarisch wird hier die Arbeitswoche vom 08.08. bis zum 13.08.2004 für das Ost- und das Westbüro besprochen (Abb. 8.52). Die Außentemperaturen waren warm, lagen jedoch immer unter 30 °C. Am 13.08. tritt eine Abkühlung ein (Abb. A8.5.2-5).



**Abb. 8.52:** Vergleich Messungen und Simulation für die Woche vom 08.08 bis zum 13.08 2004, Gebäude B.

Verwendete Abkürzungen: LW = Luftwechsel (bezogen auf Bürovolumen), S = Simulation, F = Frischluft, W 655 und O 663: Messdaten für den jeweiligen Raum im 6. OG

**Tab. 8.31:** Simulationsparameter

	T <sub>Zuluft</sub> (1/h)	Anteil F (%)	LW (1/h)
S Ost	16,0	30	3,0
S West	15,0	30	4,0
S Flur	-	-	0,8

Das Ostbüro zeigt in der Simulation eine höhere Dynamik als die Messung auf. Ein Hinweis auf die grundsätzlich richtigen Simulationsannahmen ist jedoch die Tatsache, dass an einigen Tagen (z. B. 09.08. und 12.08.) das Aufwärm- und Abkühlungsverhalten des Raumes gut nachgebildet wird. Die höheren Temperaturspitzen in der Simulation wurden in der Realität vermutlich durch das Nutzerverhalten und das Gebäude abgemildert. Am letzten Tag treten Abweichungen auf, da die Messdaten ein tieferes Temperaturniveau als die Simulationen aufweisen. Eventuell wurde stärker über die Fenster gelüftet.

Im Westbüro wird das Aufwärmverhalten von der Tendenz her dargestellt (Steilheit der Steigung), es treten aber zeitliche Verschiebungen auf. Das Abkühlverhalten des Raumes wird tageweise (z. B. 09.08.) gut getroffen. Auffallend ist der 11.08. Hier wurde der Sonnenschutz nicht heruntergefahren, was zu einer Temperaturspitze führt, die in der Simulation nicht erreicht wird.

Die Betrachtung der Mittelwerte für die einzelnen Arbeitswochen zeigt, dass die Abweichungen zwischen Simulation und Messung zwischen -0,3 und + 0,5 K liegen (Tab. A8.5.2-3).

**Tab. 8.32:** Vergleich der gemessenen und simulierten Raumtemperaturen über die gesamte Periode vom 10.07. bis zum 18.08.2004, Gebäude B.  
Verwendete Abkürzungen:  
S = Simulation,  
M = Messung

#### *Gesamte Messperiode*

Aus Tab. 8.32 geht hervor, dass für die gesamte Periode zwischen Simulation und Messung Abweichungen zwischen -0,2 und - 0,1 K auftreten.

	Temperaturmittel		Differenz	Standardabweichung		Differenz	Überschreitung „Klasse A“ ATG-NL	
	S (°C)	M (°C)	(M - S) (K)	S (-)	M (-)	(M - S) (-)	S (h)	M (h)
Ost	23,4	23,4	0,0	1,3	1,2	-0,1	21	22
Flur	24,1	24,4	0,3	1,0	0,8	-0,2	43	40
West	23,2	23,2	-0,1	1,1	1,0	-0,1		

Ein zeitlich aufgelöster Vergleich auf der Basis von Stundenwerten nach der ATG-NL [van der Linden et al., 2006] belegt, dass Simulation und Messungen eng beieinander liegen (Abb. A8.5.2-6). Die Abweichungen treten allesamt nach unten hin auf.

#### *Erkenntnisse anhand der Simulationen*

- Einen Unsicherheitsfaktor stellt die Lüftung und Kühlung der Räume dar, da die Anlageneinstellungen nicht genau bekannt sind. Die Anpassung von Simulation und Messung wurde daher innerhalb realistischer Betriebsbereiche vorgenommen.
- Das reale Gebäude reagiert träger auf klimatische Einwirkungen als das Simulationsmodell. Grund dafür ist das Zusammenwirken unterschiedlicher Nutzermodelle und der thermische Austausch innerhalb des Gebäudes (nach oben zunehmende Temperaturschichtung). Extreme Temperaturspitzen werden zusätzlich durch das Nutzerverhalten ausgeglichen.
- Auf einen Vergleich zwischen Endenergieverbrauch für die Kühlung und dem simulierten Nutzenergiebedarf wurde verzichtet, da der Endenergieverbrauch nur für das gesamte Gebäude, nicht aber für die gekühlte Fläche, bekannt ist (weitere Ausführungen siehe Info A7.5.2-1).

## 8.6 Zusammenfassung: Bewertung Analyseinstrumente

### *Erfahrungen bei der Durchführung*

Die Analyse wurde mit den Analyseinstrumenten

- Gebäudebegehungen
- Recherche Dokumentation Gebäude, Pläne
- Messungen (Innentemperatur, relative Feuchte), Sommer und Winter
- Lokale Wetterdaten (Stundenwerte Solarstrahlung, Außentemperatur)
- Wöchentliche Ablesungen der Energieverbräuche im Gebäude
- Nutzerbefragungen, Sommer und Winter
- Erstellung Simulationsmodell

durchgeführt.

Die Gebäudebegehung und die Recherche zur Dokumentation des Gebäudes bildeten die Grundlage der tiefergehenden Analyse des Bauwerks. Insgesamt traten vor allem Probleme im Bereich Plandokumentation (lückenhaft vorhanden), Nutzerbefragung und wöchentliche Energieverbrauchsablesungen auf. Bei der Nutzerbefragung gab es Bedenken hinsichtlich der Länge des Fragebogens (20 Minuten), der Anzahl der verteilten Exemplare (Arbeitszeitbindung zu vieler Angestellter) und des Arbeitsrechts (Fragen zur Gesundheit und Arbeitszufriedenheit). Die wöchentlichen Ablesungen wurden in beiden Fällen seitens der Gebäudebetreiber ausgeführt, was einen sehr hohen Motivationsgrad und eine gewisse „Ablesedisziplin“ der Beteiligten erforderte.

### *Nutzerbefragungen*

Nutzerbefragungen stellen eine neutrale, vom Betreiber unabhängige, Informationsquelle über das Gebäude dar. Besonders wichtig ist die Meinung der Gebäudenutzer dann, wenn diese das Gebäude auch nach der Sanierung weiternutzen. Werden durch Messungen oder eine Gebäudebegehung Bereiche mit Handlungsbedarf identifiziert, so helfen die Befragungsergebnisse dabei eine Prioritätenliste festzulegen. Ein solcher Bereich mit Handlungsbedarf ist beim Gebäude W die Fußbodenheizung. Erst die Befragungsergebnisse (belegt durch die Messungen) machten deutlich, dass durch die trockene Luft starke Befindlichkeitseinschränkungen auftreten. Dem Einsatz eines anderen Wärmeabgabesystems wird somit eine hohe Priorität verliehen.

Wichtig ist es, parallel zu den Befragungen Messungen der Raumlufttemperatur und Raumluftfeuchte durchzuführen. Der Aufwand für die Durchführung ist gering und sie stellen eine objektive Rückkopplung des subjektiven Nutzereindrucks dar.

Bei der vorliegenden Analyse wurde die Nutzerbefragung im Sommer und im Winter durchgeführt und es konnten zu beiden Befragungszeitpunkten wesentliche Erkenntnisse über das Zusammenspiel Gebäude / Nutzer gewonnen werden. Nachteilig dabei ist der Zeitaufwand für die Durchführung und Auswertung und die Größe des notwendigen Zeitfensters. Daher gilt folgende Empfehlung: Grundsätzlich können bei einem großen Zeitfenster aus beiden Befragungen lohnende Erkenntnisse gewonnen werden. Steht weniger Zeit zur Verfügung und sind vor der Sanierung bereits Komforteinschränkungen zu einer bestimmten Jahreszeit bekannt, so sollten Befragung und Messungen

zu diesem Zeitpunkt durchgeführt werden. Besteht kein Hinweis auf Komforteinschränkungen, so ist entweder der Sommer oder der Winter zu empfehlen, da hier das Gebäude „extremere“ Bedingungen ausgesetzt ist.

### *Messungen*

Bei Sanierungsvorhaben sollte die Raumlufttemperatur ausgewählter Büros auf jeden Fall gemessen werden, um das Gebäudeverhalten einzuordnen. Die Anzahl der zu untersuchenden Büros hängt vom Gebäude ab: Bei mehrgeschossigen Gebäuden sind als Messetagen das unterste und oberste Geschoss (optional noch das Mittelgeschoss) zu empfehlen, um eine mögliche Temperaturschichtung erkennen zu können. Pro Stockwerk sollte mindestens in jeweils einem Büro einer bestimmten Orientierung gemessen werden. Ein Vorteil der eingesetzten Messinstrumente war der geringe Aufwand, allerdings konnten so keine Rückschlüsse auf Nutzerverhalten gewonnen werden.

Unverzichtbarer Bestandteil der Analyse und Grundlage für die Simulation sind zusätzlich Daten der Außentemperatur (und wenn möglich der Globalstrahlung). Oftmals können diese Daten vom Deutschen Wetterdienst oder anderen Anbietern bezogen werden. Müssen die Daten zur Außentemperatur und zur Globalstrahlung selber erhoben werden, steigt der Aufwand. Die Kosten pro Station liegen bei etwa 500 €.

### *Wöchentliche Aufzeichnung der Energiebezüge*

Waren die Ergebnisse zunächst zur Einordnung der Gebäude in eine „Energieverbrauchsklasse“ geplant, so stellen sie bei beiden Untersuchungsobjekten eine wichtige Voraussetzung zur Reduktion des Energieverbrauchs dar. In beiden Fällen wurden Wärmebezüge im Sommer festgestellt, beim Gebäude B konnte gezeigt werden, dass sich Heizung und Kühlung in einem erheblichen Maß überschneiden.

Speziell bei größeren Gebäuden sind über die Eliminierung der sommerlichen Wärmebezüge große monetäre Einsparungen mit geringem Aufwand erreichbar. Das die Gebäudeheizung im Sommer nicht nur eine zufällige Erscheinung bei beiden Gebäuden war, zeigen Messungen in einem sanierten Studentenwohnheim [Engelmann et al., 2006].

### *Simulationen*

Ziel der Simulation des Ist-Zustands ist die Bewertung nachfolgender Sanierungsszenarien. Zur realistischen Abbildung des Gebäudes sollte daher das Simulationsmodell anhand der Messdaten (und der entsprechenden Außentemperatur und Globalstrahlung) kalibriert werden. Ansonsten kann nicht davon ausgegangen werden, dass die Simulationsergebnisse das reale Gebäudeverhalten abbilden. Zusätzlich können die Simulationen zur Verifikation von Annahmen (z. B. interne Lasten) und Messergebnissen dienen.

Bei beiden Gebäuden (B und W) wurde deutlich, dass das reale Gebäudeverhalten träger ist als das in den Simulationen nachgezeichnete. Klimatische Einwirkungen bilden sich am Simulationsmodell deutlicher ab, als dies an den Messwerten ablesbar ist. Ähnliche Erfahrungen wurden auch beim Vergleich von Simulation und Messungen bei fünf Verwaltungsgebäuden gemacht [Voss et al., 2006b].

Der Grund dafür ist das Zusammenwirken unterschiedlicher Nutzermodelle und der thermische Austausch innerhalb des Gebäudes (nach oben zunehmende Temperaturschichtung). Extreme Temperaturspitzen werden zusätzlich durch das Nutzerverhalten (gezieltes Fensteröffnen und –schließen, Bedienung Sonnenschutz) ausgeglichen. Das dem Simulationsmodell zugrunde liegende Nutzermodell berücksichtigt extreme Wettersituationen nicht.

Grundsätzlich zeigen die Simulationsergebnisse so den „schlechtesten Fall“. Um in einer Simulation realistischere Ergebnisse zu erhalten, sollten Nutzermodelle so genau wie möglich angepasst werden, besonders gilt dies für das abweichende Verhalten bei extremen Wetterlagen.

**Tab. 8.33:** Bewertung der Analyseinstrumente

	Nutzerbefragung	Messung	Aufzeichnung Energieverbrauch	Simulation	Gebäudebegehung
Erkenntnis-höhe	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch
Aufwand Durchführung	hoch	gering	hoch	mittel* bis hoch	gering
Aufwand Analyse	hoch	mittel	gering, mittel	mittel	gering
Reduktion	eine Saison	eine Saison	monatliche Bezüge oder Wochenwerte 6 Monate (Jan. - Juni / Juni - Dez.)	kritische Saison	
* = Abhängig von Erfahrung des / der Durchführenden					

## 8.7 Literatur

- [DIN 5034-3:1994-09] *Tageslicht in Innenräumen, Teil 3: Berechnung*. Berlin: Beuth Verlag.
- [DIN EN 13779:2005-05] *Lüftung von Nichtwohngebäuden - Allgemeine Grundlagen und Anforderungen an Lüftungs- und Klimaanlage*. Berlin: Beuth Verlag.
- [DIN EN ISO 7730:2006-05] *Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit (ISO 7730:2005); Deutsche Fassung EN ISO 7730:2005*. Berlin: Beuth Verlag.
- [DIN EN ISO 13791:2005-02] *Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Sommerliche Raumtemperaturen bei Gebäuden ohne Anlagentechnik - Allgemeine Kriterien und Validierungsverfahren (ISO 13791:2004); Deutsche Fassung EN ISO 13791:2004*. Berlin: Beuth Verlag.
- [DIN V 18599-1:2005-07] *Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Beheizung, Kühlung, Belüftung, Beleuchtung und Warmwasserbereitung - Teil 1: Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung und Bewertung der Energieträger*. Berlin: Beuth Verlag.
- [SIA V382/1, 1992] *Technische Anforderungen an Lüftungstechnische Anlagen*. Zürich (CH): Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein.
- [SIA V382/2, 1992] *Kühlleistungsbedarf von Gebäuden*. Zürich (CH): Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein.
- [SWKI 95-3, 2001] *Jährlicher Energiebedarf von Lüftungstechnischen Anlagen*. Schönbühl (CH): Schweizerischer Verein von Wärme- und Klima-Ingenieuren.
- [Badura et al., 2004] Badura, B.; H. Schellschmidt; C. Vetter (Hrsg.). 2004. *Fehlzeiten-Report 2003 - Wettbewerbsfaktor Work-Life-Balance*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- [Beckman et al., 2000] Beckman, W. A., et al. 2000. *TRNSYS - A Transient System Simulation Program*. Madison (USA): Solar Energy Laboratory University of Wisconsin.
- [Bischof et al., 2003] Bischof, W., et al. 2003. *Exposition und gesundheitliche Beeinträchtigungen in Bürogebäuden - Ergebnisse des ProKlima-Projektes*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- [Bures et al., 1992] Bures, P.; G. Voith. 1992. *Analyse und Aufnahme des Ist-Zustandes für die Heizungs-, Raumluft- und Sanitäreinrichtungen Gebäude R-1002 (Rosenthal)*. Basel (CH): BKP Bures & Co. Klima Planung - Heizung, Lüftung, Klima, Kälte, Umwelttechnik.
- [Deutscher et al., 2000] Deutscher, P.; M. Elsberger; L. Rouvel. 2000. "Sommerlicher Wärmeschutz - Eine einheitliche Methodik für die Anforderungen an den winterlichen und sommerlichen Wärmeschutz, Teil 2". *Bauphysik* 22 (3), 178-184.
- [Engelmann et al., 2006] Engelmann, P.; M. Kramp. 2006. *Energie und Ökonomie in der Sanierung - das Studentenwohnheim "Neue Burse", Wuppertal*. 10. Internationale Passivhaustagung. Hannover, Mai 2006.
- [Gossauer et al., 2006] Gossauer, E.; R. Leonhart; A. Wagner. 2006. *Workplace occupant satisfaction - a study in sixteen german office buildings*. Comfort and Energy Use in Buildings - getting them right. Windsor (GB).
- [Johnson, 1995] Johnson, B. G. 1995. *Sick building syndrome*. Kopenhagen (DK): World Health Organization Regional Office for Europe.
- [Loga et al., 2001] Loga, T., et al. 2001. *Energiebilanz-Toolbox; Arbeitshilfen und Ergänzungen zum Energiepass Heizung / Warmwasser*. Darmstadt: Institut für Wohnen und Umwelt.
- [Mohr et al., 2002] Mohr, G.; N. K. Semmer. 2002. "Arbeit und Gesundheit: Kontroversen zu Person und Situation". *Psychologische Rundschau* 53 (2), 77-84.
- [Orme et al., 1998] Orme, M.; M. Liddament; A. Wilson. 1998. *Numerical data for air infiltration & natural ventilation calculations*. Berichts-Nr.: AIC-TN-44-1994, Coventry (GB): Air Infiltration and Ventilation Centre, University of Warwick Science Park.
- [Redlich et al., 1997] Redlich, C. A.; J. Sparer; M. R. Cullen. 1997. "Sick-building syndrome". *The Lancet* 349, 1013-1016.
- [Reinhart, 2001] Reinhart, C. F. 2001. *Daylight Availability and Manual Lighting Control in Office Buildings - Simulation Studies and Analysis of Measurement*. Technische Universität Karlsruhe [Dissertation].
- [Tiede, 2001] Tiede, M. 2001. *Beschreiben mit Statistik - Verstehen*. München, Wien: Oldenbourg Verlag.
- [TRANSSOLAR, 2003] TRANSSOLAR. 2003. *Kursunterlagen TRNSYS 15.0*. Stuttgart.

- [van der Linden et al., 2006] van der Linden, A. C., et al. 2006. "Adaptive temperature limits: A new guideline in The Netherlands. A new approach for the assessment of building performance with respect to thermal indoor climate". *Energy and Buildings* 38, 8-17.
- [Voss, 1997] Voss, K. 1997. *Experimentelle und theoretische Analyse des thermischen Gebäudeverhaltens für das energieautarke Solarhaus Freiburg*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- [Voss et al., 2006a] Voss, K., et al. 2006a. *Bürogebäude mit Zukunft*. 2. Auflage. Berlin: Verlag Solarpraxis.
- [Voss et al., 2006b] Voss, K.; J. Pfafferoth. 2006b. *Energieeinsparung contra Behaglichkeit?* Bonn: Verlag BBR.
- [Wieland et al., 2004] Wieland, R.; K. Scherrer. 2004. *BARMER Gesundheitsreport 2004*. Wuppertal: BARMER Ersatzkasse.
- [Zagreus et al., 2004] Zagreus, L., et al. 2004. "Listening to the Occupants: A Web-based Indoor Environmental Quality Survey". *Indoor Air* 14 (8), 65-75.



## 9 Strategien zur Verbesserung des thermischen Raumklimas - Sanierungsstudien

Trotz der oftmals bestehenden Möglichkeiten zur Verbesserung des sommerlichen Raumklimas ohne aktive Kühlung, gehört die Erschließung dieses Potentials besonders in der Sanierung – noch - nicht zum Planungsalltag. Wie in der Einführung dargestellt, liegt ein wesentlicher Grund dafür im Planungsprozess selber, bei dem Gebäudeentwurf und Technikkonzept in modularen Einheiten („Gewerkedenken“) betrachtet werden.

Im Gegensatz dazu erfordert eine Sanierung, bei der das Raumklima mit passiver Kühlung verbessert werden soll, einen integralen Planungsprozess, bei dem die Aufgaben der Gebäudetechnik in die baukonstruktiven und planerischen Bereiche integriert werden. Dies unterstreicht auch der Planungsprozess für die Sanierung der Fallbeispiele, der – abweichend vom Planungsalltag – jeweils integral durchgeführt wurde. Der Wunsch, auf eine aktive Kühlung zu verzichten, war von Beginn an Bestandteil des architektonischen Konzeptes und es wurden gewerkeübergreifend Lösungen zur Umsetzung gesucht.

In den nachfolgend vorgestellten Sanierungsstudien wird dieser integrative Ansatz verfolgt, indem auch hier die Verbesserung des Raumklimas und die architektonischen Fragen als Einheit betrachtet werden. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Beantwortung der gebäudetechnischen Fragestellungen. Die Umsetzung steht jedoch mit einer tragfähigen architektonischen Lösung in enger Verbindung. Aus diesem Grund werden den gebäudeklimatischen Konzepten entwerferische Lösungsansätze zur Seite gestellt.

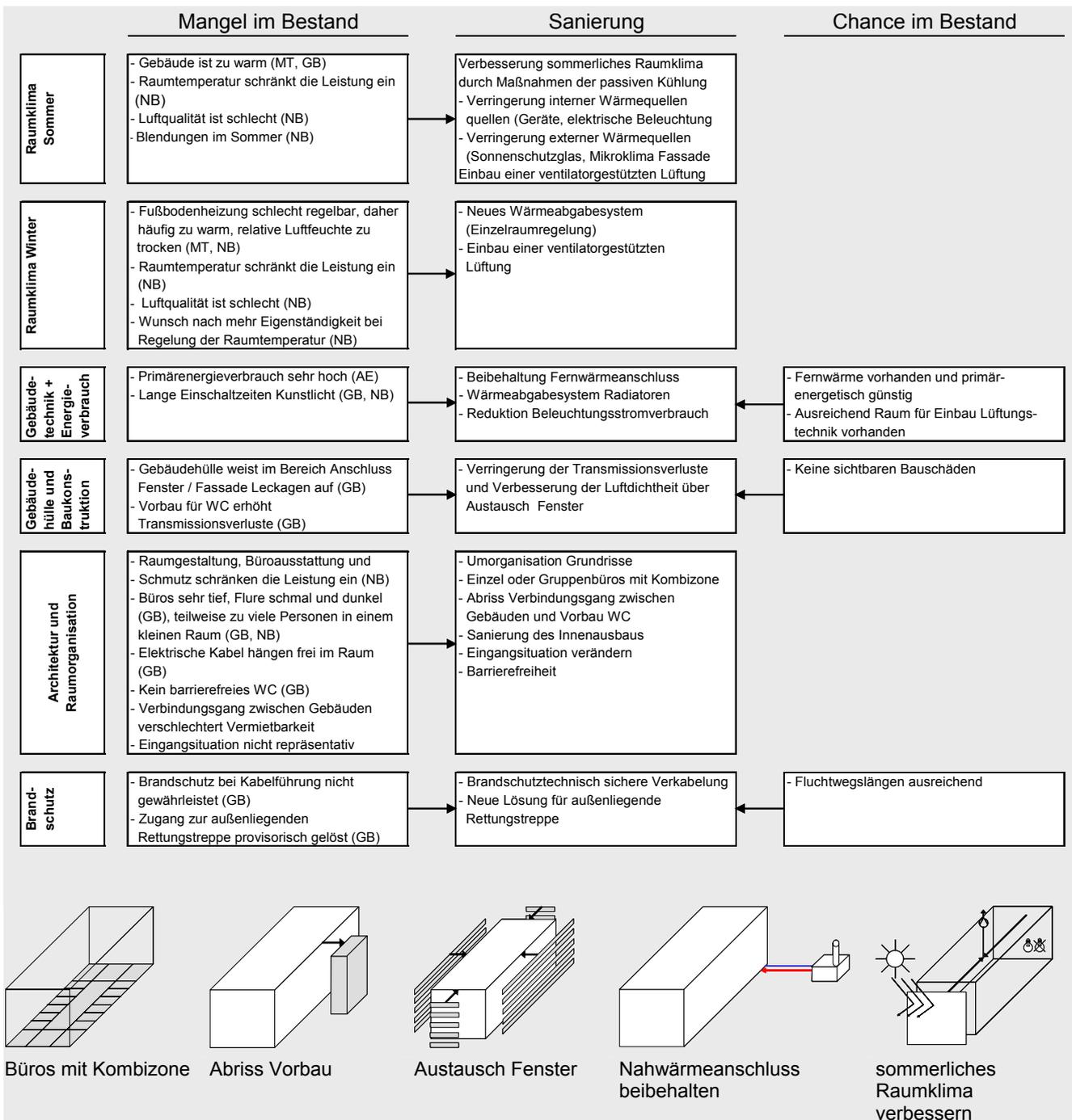
Eine weitere Charakteristik der Studien ist die, dass sie zu einem wesentlichen Teil auf den Analyseergebnissen aus Kapitel 8 aufbauen und Erfahrungen der bereits erläuterten Fallbeispiele (Kap. 2) berücksichtigen.

Die Wirksamkeit der Sanierungskonzepte wird mit Hilfe der kalibrierten Simulationsmodelle der Bestandsgebäude überprüft. Dabei wird – was die Gebäudeausstattung mit Arbeitshilfen angeht – nicht von speziell stromsparenden Geräten ausgegangen (Berechnung des schlechtesten Falls). Zur Verbesserung des thermischen Raumklimas ist es jedoch zwingend, dass die Reduktionspotentiale der internen Lasten im Bereich der Gebäudeausstattung genutzt werden.

# 9.1 Sanierungsstudie Gebäude W

## 9.1.1 Arbeitsfelder für Sanierung: Maßnahmen

Die mit Hilfe der Analyseinstrumente gewonnenen Erkenntnisse und die sich daraus ergebenden Schwerpunkte für die Sanierung zeigen Abb. 9.1 und 9.2 im Überblick.



**Abb. 9.1:** (oben) Übersicht über die Ergebnisse der Analyse und die daraus resultierenden Arbeitsfelder für die Sanierung. Verwendete Abkürzungen: MT = Messung Temperatur und relative Feuchte, AE = Ablesung Energieverbrauch, NB = Nutzerbefragung, GB = Gebäudebegehung

**Abb. 9.2:** (unten) Leitgedanken für die Sanierung

## 9.1.2 Sanierungskonzept

### Gestalt und Struktur

#### *Erschließung und Erscheinungsbild Gebäude*

Das Gebäude wird über eine außen liegende Treppe auf Ebene des 1. OG betreten. Der barrierefreie Zugang erfolgt über eine Rampe in das Untergeschoss (siehe Lageplan Abb. A9.1.2-1). Der Verbindungsgang zwischen den Gebäuden und der Vorbau für die Sanitärräume werden abgerissen. Der Vorbau wird durch eine offene Loggia ersetzt, die als Austritt und Raucherbalkon genutzt werden kann. Das äußere Erscheinungsbild des Gebäudes wird weitgehend gewahrt, da der Baukörper gestalterisch im Zusammenhang mit dem Nachbargebäude zu sehen ist. Somit wird die vorhandene Gebäudehülle mit Natursteinverkleidung erhalten (alle Pläne siehe Anhang Abb. A9.1.2-1 bis -8).

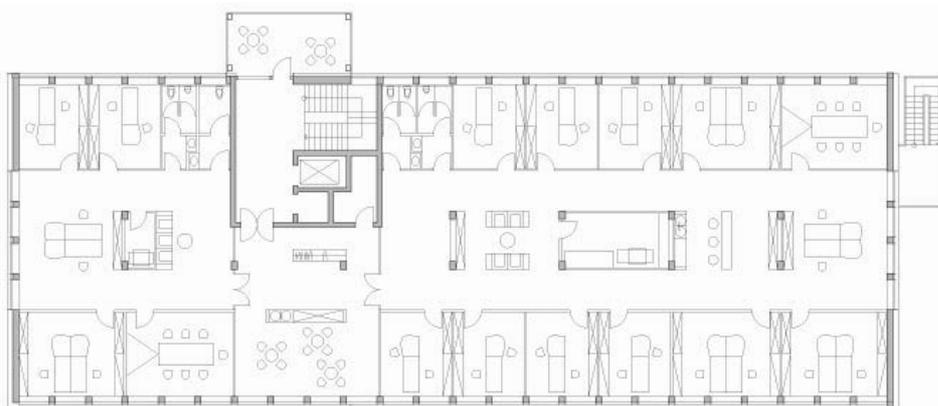
#### *Innere Raumaufteilung*

Die innere Raumaufteilung wird so verändert, dass jedes Geschöß in zwei voneinander unabhängigen Einheiten nutzbar ist. Es werden Einzel- oder Zweipersonenbüros mit einer Raumtiefe von 4,2 m geschaffen, die mittige Kombizone kann als Teeküche, Bibliothek und in geschlossenen Raumeinheiten für zentrale Dienste (Kopierer, Drucker, Server) genutzt werden. Die Innenwand zwischen Büro und Kombizone ist teilweise transparent, die Wandansicht Trennwand Büro / Kombizone zeigt Abb. A9.1.2-9. Die Sanitärräume sind nun in das Gebäude integriert, pro Geschoss gibt es abwechselnd ein barrierefreies Damen- oder Herren-WC. Jede der Nutzungseinheiten bildet einen eigenen Brandabschnitt  $\leq 400 \text{ m}^2$ . Die Kombizone kann somit voll genutzt werden und das Aufstellen von Brandlasten (Kopierer, Akten) ist möglich.

#### *Offene Punkte der Analyse – Ausblick*

Vor einer endgültigen Entscheidung für den Erhalt der Natursteinfassade muss durch Öffnen der Fassade sichergestellt werden, dass die Befestigung der Natursteinplatten (Anker, Schienen) noch den statischen Erfordernissen genügt. Das nachfolgend ausgeführte Sanierungskonzept geht von einer intakten Befestigung aus.

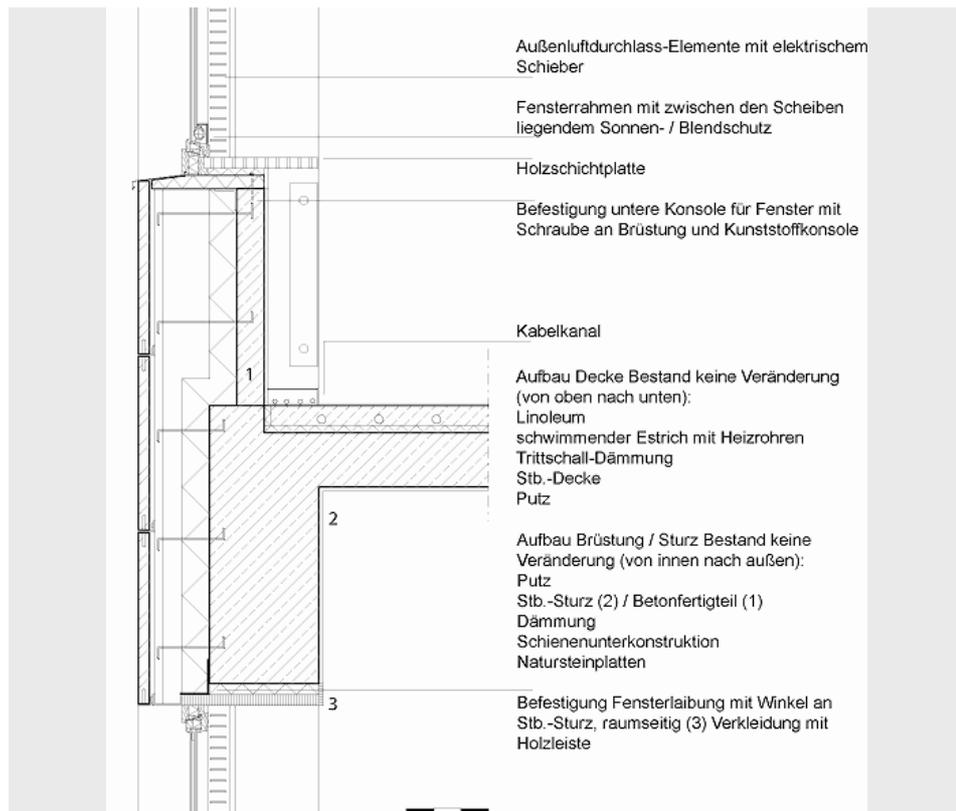
Weiter sollten die Ursachen (regelungstechnische und hydraulische Fehler) des hohen Heizenergieverbrauchs im Sommer geklärt und beseitigt werden.



**Abb. 9.3:** Grundrissstudie für die Büroaufteilung mit Kombizone. Die Büros mit zwei Fensterachsen sind Einperson-, die Büros mit drei Fensterachsen sind Zweipersonenbüros.

### Baukonstruktion

Die bestehenden Fenster werden durch solche mit Holz-Aluminiumrahmen und Sonnenschutzverglasung ausgetauscht. Es gibt einen innen liegenden Sonnen- bzw. Blendschutz. Die Stützen werden außen mit Vakuumdämmung verkleidet. Zwischen Stütze und Fensterrahmen befinden sich Außenluftdurchlass- elemente (ALD) mit elektrischem Schieber. Die ALD stellen Wärmebrücken dar, die zu Gunsten des Lüftungskonzeptes in Kauf genommen werden (Vertikalschnitt siehe Abb. 9.4, Horizontalschnitt siehe Abb. A9.1.2-8). Die U-Werte zeigt Tab. 9.1 in der Übersicht.



**Abb. 9.4:** Vertikalschnitt durch die „sanierte“ Fassade, der Maßstabsbalken entspricht 30 cm

**Tab. 9.1:** Kennwerte der Umfassungsflächen. ALD = Außenluftdurchlasselemente  
Weitere Angaben zu den Wandaufbauten und Produktangaben, siehe Anhang Tab. A9.1.2-1 und Tab. A9.1.2-2.

	U-Wert (W/[m <sup>2</sup> K])	g-Wert (%)	$\tau_{vis}$ (%)
Brüstung / Sturz	0,33		
Stütze (zw. Fenstern)	0,1		
ALD (mit Schieber)	4,0		
Fenster	1,33		
Glas	1,1	36	66
Sonnenschutzrollo	-		1,9
Innenwand transparent	3,0		
Innenwand opak	0,34		
Decke / Fußboden	0,64		
Dach	0,2		

## Bauphysik und Gebäudetechnik

### Lüftung und Heizung im Winter

Zur Wärmeversorgung wird der primärenergetisch günstige Fernwärmeanschluss (Dampf) beibehalten. Die bestehende Fußbodenheizung ersetzen Radiatorenheizkörper mit raumbezogener Regelung.

Zur Sicherstellung des hygienisch notwendigen Luftwechsels wird eine zentrale ventilatorgestützte Lüftung eingebaut<sup>1</sup>. Die Zuluft strömt über die in die Fassade integrierten Außenluftdurchlasselemente (ALD) nach. Die Schieber zum Verschließen der ALD lassen sich automatisch über die Haustechnik ansteuern und manuell betätigen. Die geplanten Luftwechsel zeigt Tab. 9.2. Die WC sind jeweils an einen separaten Abluftstrang angeschlossen.

<sup>1</sup> Für eine Zu- und Abluftanlage mit den entsprechenden Rohrkreuzungen reichte die lichte Deckenhöhe von 2,87 m nicht aus.

Betriebszustände der Lüftungsanlage	LW	
	(1/h)	(m <sup>3</sup> /P*h)
Grundlüftung nachts	keine	
Regellüftung Winter	1,3	
Regellüftung Sommer *	1,3	(je nach Raumgröße) 42 bis 54
Nachtlüftung Sommer **	3,0	

\* = Empfehlung [DIN EN 13779:2005-05]  
 \*\* = Die ALD lassen pro m bei 10 Pa einen Luftwechsel von 96 m<sup>3</sup>/h zu. Pro Büro genügen jeweils ein oder zwei ALD (1,5 m Länge)

**Tab. 9.2:** Luftwechselraten (LW) der Abluftanlage

### Lüftung und passive Kühlung im Sommer

Die sommerlichen Raumtemperaturen werden durch folgende Maßnahmen gesenkt:

#### Senken der Wärmelasten

- Externe Wärmequellen: Die Sonnenschutzverglasung reduziert – unabhängig vom Nutzerverhalten – die solaren Wärmeeinträge. Zusätzliche Wärmeeinträge über die Raumlüftung im Bereich der Zuluftelemente werden über geeignete Maßnahmen beschränkt (siehe Abb. A9.1.2-8).
- Interne Wärmequellen: Die zentralen Dienste (Kopierer, Drucker, Server) werden in der Kombizone zusammengefasst und die entstehenden Wärmelasten direkt durch die Abluftanlage abgeführt. Das Beleuchtungskonzept vermindert den elektrischen Energieverbrauch für Beleuchtung. Der Einsatz stromsparender Geräte ist wünschenswert<sup>2</sup>.

#### Optimierung der Wärmespeicherung

- Die abgehängten Decken in den Büros werden entfernt. Bei einer ausreichenden Überdeckung der Bewehrung, werden die Decken verputzt. Ist die Überdeckung unzureichend, genügt eine unverkleidete Decke den Brandschutzanforderungen nicht und es wird ein spezieller Putz, oder eine Brandschutzverkleidung (z. B. Promat) eingesetzt. Im letzteren Fall sollte der Einsatz von Phasenwechselmaterialien geprüft werden.

<sup>2</sup> Der Einsatz kann nicht vorgeschrieben werden und ist daher nicht Basis der Simulationen, siehe dazu auch Einführung zu diesem Kapitel.

Erhöhung der Wärmeabfuhr

- **Nachtlüftung**

Jedes Büro hat zwei Abluftabsaugungen. Eine davon (a) ist mit einem Schalldämpfelement und Irisblende zur Volumenstromregelung tagsüber versehen. Die andere Öffnung (b) besitzt weder Schalldämpfelement noch Irisblende. Bei der sommerlichen Nachtlüftung wird zur Verhinderung von Druckverlusten die Abluft über Öffnung (b) abgesaugt und Öffnung (a) durch einen Bypass umgangen. Die nächtliche Luftwechselrate beträgt 3,0 1/h. Die Nachtlüftung ist – wenn nötig- auch am Wochenende in Betrieb, um die Speichermassen optimal zu entladen. Ein Plan des Lüftungssystems befindet sich im Anhang Abb. A9.1.2-6.

#### *Tageslicht und Beleuchtung*

Die Fenstergrößen werden beibehalten. Die Sonnenschutzverglasung hat einen Lichttransmissionsgrad von 66 %. Der simulierte Vergleich der Tageslichtautonomie vor und nach der Sanierung zeigt, dass sich die Tageslichtautonomie durch die Reduktion von  $\tau_{\text{vis}}$  etwas verschlechtert. Sie ist aber aufgrund der tageslichtorientierten Arbeitsplätze im vertretbaren Bereich (Abb. 9.5, siehe Infobox: 9.1). Die elektrische Beleuchtung in den Büros wird manuell angeschaltet, ein Präsenzsensoren schaltet die Beleuchtung bei Abwesenheit der Nutzer aus. In den Büros gibt es eine Grundbeleuchtung und eine Arbeitsplatzleuchte. Die installierte Leistung für die Büros beträgt 10 W/m<sup>2</sup>, diejenige für die Kombizone 7,0 W/m<sup>2</sup> (Erfahrungswerte nach [Hoffmann et al., 2005]). Der Sonnen- bzw. Blendschutz besteht aus einem zwischen den Fensterscheiben von unten nach oben laufenden Folienrollo, das die Nutzer bei Bedarf manuell betätigen. Am Wochenende wird das Folienrollo über die Haustechnik geschlossen (Eigenschaften Folienrollo siehe Anhang Tab. A9.1.2-3). Das Folienrollo wird gewählt, da über das Material auch in geschlossenem Zustand eine Resttransparenz erhalten bleibt.

Im Folgenden wird das Sanierungskonzept anhand von Simulationen genauer untersucht.

### **9.1.3 Untersuchung des Sanierungskonzeptes mittels Simulationen**

#### *Simulationsmodell*

Grundlage für die nachfolgenden Simulationen bildet das durch den Vergleich mit den Messungen der Raumlufttemperatur kalibrierte Simulationsmodell (siehe Abschnitt 8.5.1). Es wird, wie in den nachfolgenden Abschnitten beschrieben, verändert.

#### *Wetterdaten*

Als Wetterdatensatz finden die Wetterdaten aus dem Jahr 2004 Verwendung. Datenlücken (siehe Anhang Info A9.1.3-1) wurden mit Daten aus Meteonorm für den Standort Wuppertal geschlossen.

### Simulationsmodell und Baukonstruktion

Das Raummodell besteht aus einem Ost-, einem Westbüro, der Kombizone sowie adiabaten Grenzflächen (Tab. 9.3 und Abb. 8.47). Die U-Werte der Konstruktion sind Tab. 9.2, detaillierte Wandaufbauten und Produkthersteller dem Anhang Tab. A9.1.2-1 und -2 zu entnehmen.

		Büro O + W	Kombi
Tiefe	(m)	4,2	
Breite	(m)	3,6	
Außenwand	(m)	9,4	
Rohbauöffnung Fenster	(m <sup>2</sup> )	4,5	
Glas	(m <sup>2</sup> )	3,2	
Rahmenanteil	(%)	30	
Boden / Decke	(m <sup>2</sup> )	15,1	60,0
Höhe	(m <sup>2</sup> )	2,87	2,87

**Tab. 9.3:** Abmessungen des Ost- und Westraums (lichte Maße)

### Gebäudebetrieb und Raumnutzung

Um das Nutzerverhalten bei der Bedienung des Sonnenschutzes und der elektrischen Beleuchtung zu modellieren, wurde ein dreidimensionales in RADIANCE [Ward et al., 1998] erstelltes Modell beider Büros in Daysim (siehe Infobox: 8.1) importiert. Die dem Simulationsmodell zu Grunde liegenden Parameter sind in Tab. A9.1.3-2 aufgeführt.

Die Abluftanlage erzeugt werktags einen hygienischen Frischluftwechsel von 1,3 1/h. Zusätzlich dazu lüften die Nutzer morgens für 15 Minuten das Büro über die Fenster. Um dem Nutzerverhalten, mit zunehmender Außentemperatur die Fenster zu öffnen, Rechnung zu tragen, wird die in Kap. 5.3.1 vorgestellte Funktion verwendet. Bei einer Außentemperatur von 30 °C ergibt sich so zusammen mit der nach [Orme et al., 1998] und [DIN EN ISO 13791:2005-02] berechneten Infiltration (0,15 1/h) und dem Luftwechsel durch die Abluftanlage eine Gesamtrate von 2,7 1/h. Diese entspricht der in [Deutscher et al., 2000] empfohlenen Annahme für einen durch Fensterlüftung erhöhten sommerlichen Luftwechsel. Überschreitet im Sommer nachts die Raumtemperatur 20 °C und ist die Außentemperatur  $\leq 20$  °C, wird durch die Abluftanlage ein erhöhter Luftwechsel von 3,0 1/h erzeugt. Die Nachtlüftung endet vor 7 Uhr, wenn die Raumtemperatur 20 °C erreicht hat.

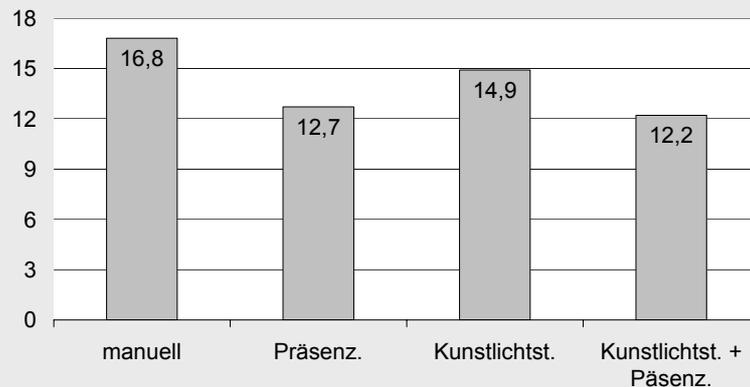
Die der Simulation zugrunde liegenden Parameter zeigt Tab. 9.5 in der Übersicht.

### Infobox 9.1: „Daysim“

Das Programm Daysim ermöglicht eine Ganzjahressimulation mit unterschiedlichen Automatisierungsstrategien für das Kunstlicht und die Verschattung. Die Nennbeleuchtungsstärke und das Nutzungsprofil des Arbeitsplatzes werden mit einer von Feldstudien abgeleiteten Einschaltwahrscheinlichkeit für das Kunstlicht und der Bedienung des Sonnenschutzes kombiniert (Programmbaustein Lightswitch) [Reinhart, 2004]. Bei einer manuellen Bedienung wird der Sonnenschutz vom Nutzer dann heruntergefahren, wenn direkte Strahlung  $\geq 50 \text{ W/m}^2$  auf die Arbeitsfläche trifft. In das Programm können eigene Strahlungsdaten (hier die Strahlungsdaten, die in der TRNSYS Simulation verwendet werden) eingelesen werden. Die Betriebszeiten des Kunstlichtes und des Sonnenschutzes können in TRNSYS importiert werden (Hoffmann, C.: „Importing Daysim Results into TRNSYS“, in: [Reinhart, 2005]). Die möglichen Nutzermodelle zeigt Tab. 9.4. In der vorliegenden Simulation wurde ein gemischtes Nutzermodell eingesetzt, da keine Informationen über das tatsächliche Nutzerverhalten vorliegen.

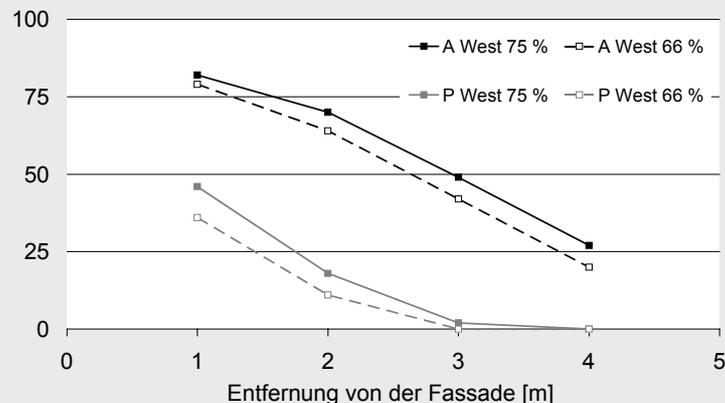
**Abb. 9.5:** Simulationsergebnisse unterschiedlicher Automatisierungsstrategien für Kunstlicht in Daysim. Die Untersuchung zeigt exemplarisch anhand des Westbüros, dass für die konsequent tageslichtorientierten Arbeitsplätze ein Präsenzsensordie wirkungsvollste Maßnahme zur Reduktion des Strombedarfs für die elektrische Beleuchtung ist. Simulationsparameter für den Raum, siehe Tab. A9.1.3-2  
Verwendete Abkürzungen:  
Präsenz. = Präsenzsensord,  
Kunstlicht. = tageslichtabhängige Kunstlichtregelung

Strombedarf elektrische Beleuchtung [ $\text{kWh/m}^2\text{a}$ ]



**Abb. 9.6:** Simulation der Tageslichtautonomie für das unsanierte ( $\tau_{\text{vis}} = 75 \%$ ) und das sanierte ( $\tau_{\text{vis}} = 66 \%$ ) Büro West (Büro Ost, siehe Abb. A9.1.3-1). Die Rahmenbedingungen der Simulation sind Tab. 9.5 zu entnehmen, A („aktiv“, in der Grafik schwarze Farbe) und P („passiv“, in der Grafik graue Farbe) beschreiben die Bandbreite unterschiedlichen Nutzerverhaltens. Die Eigenschaften des RADIANCE-Simulationsmodells entsprechen Tab. A9.1.3-2. Es wird deutlich, dass das Sonnenschutzglas mit dem geringeren Lichttransmissionsgrad die Tageslichtautonomie im hinteren Bereich der Räume vermindert. Die Arbeitsplätze befinden sich dagegen im fassadennahen Bereich. Ein sehr einflussreicher Faktor ist das Nutzerverhalten, das im realen Gebäudebetrieb zwischen dem „aktiven“ und dem „passiven“ Verhalten liegt.

Tageslichtautonomie West [%]



Nutzermodell	Verhalten
Aktiver Nutzer Kunstlicht (AK):	„Ein“ / „Aus“ gemäß Tageslichtangebot
Aktiver Nutzer Jalousie (AJ):	morgendliches Öffnen und Bedienung um Blendung zu vermeiden.
Passiver Nutzer Kunstlicht (PK):	Tagsüber „Ein“
Passiver Nutzer Jalousie (PJ):	immer halbgeschlossen
Mischung aus beiden Nutzertypen:	AK / PJ; PK / AJ

**Tab. 9.4:** Nutzermodelle in Daysim

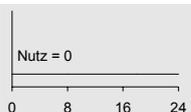
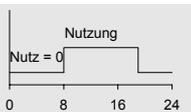
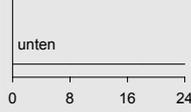
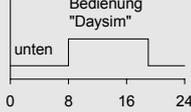
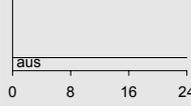
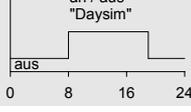
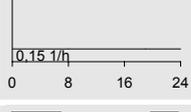
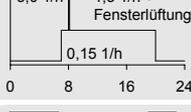
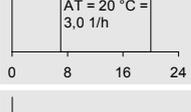
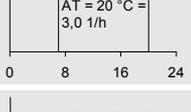
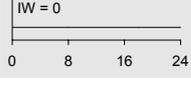
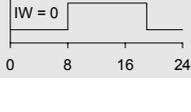
Vorgehen bei den Simulationen

Um die Wirksamkeit des Sanierungskonzeptes zu untersuchen, werden Bestand und Sanierung miteinander verglichen (zum Vorgehen siehe auch Abb. 8.2). Dazu wird das in Abschnitt 8.5.1 vorgestellte Simulationsmodell des Bestands in zwei Bereichen modifiziert.

- Zur manuellen Bedienung des außen liegenden Sonnenschutzes und der elektrischen Beleuchtung im Bestandsmodell wird ein mögliches Nutzerverhalten in Daysim simuliert (gemischtes Nutzermodell, Simulationsparameter siehe Tab. A9.1.3-3) und die Werte in TRNSYS eingelesen.

Aus Gründen der Vergleichbarkeit kommen im Bestandsgebäude die internen Wärmequellen nach Tab. 9.5 zum Einsatz.

**Tab. 9.5:** Gebäudebetrieb und Raumnutzung – Annahmen für die Simulation. Verwendete Abkürzungen: WE = Wochenende, WT = Werktag, LW = Luftwechsel, AT = Außentemperatur

	Wochenende	Werktag	Kommentar
Nutzung			WE: keine Nutzung WT: 8 bis 19 Uhr
Sonnenschutz			WE: unten über Gebäudeautomation WT: manuell durch Nutzer, Modellierung Nutzerverhalten über „Daysim“
Elektrische Beleuchtung			WE: aus WT: manuell durch Nutzer, Modellierung Nutzerverhalten über „Daysim“
Luftwechsel			LW WE: Berechnung Fugenlüftung nach Angaben aus [Orme et al., 1998] und [DIN EN ISO 13791:2005-02]. LW WT: 7 bis 20 Uhr: LW Abluftanlage 3,0 1/h, + Fensterlüftung abhängig von AT (Abb. 5.23)
Nachtlüftung (15.05. -30.09.)			WE, WT: Wenn Außenlufttemperatur (AT) ≤ 20 °C und Raumlufttemperatur (RT) ≥ 20 °C, dann automatische Öffnung ALD und LW Abluftanlage 3,0 1/h.
Interne Wärmequellen			Interne Wärmequellen für Personen und Geräte nach [DIN V 18599-10:2005-07] und [SWKI 95-3, 2001]: 72 Wh/m²d. Elektr. Beleuchtung: 10 W/m², im Jahresmittel 49 Wh/m²d. Kombizone: elektr. Beleuchtung 7 W/m² (77 Wh/m²d).

Auswertung der Simulationen

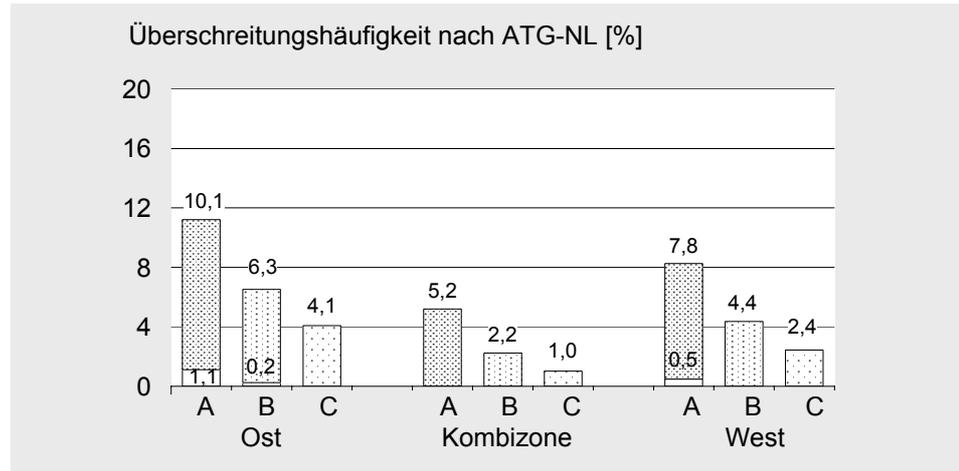
Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Auswertung des gesamten Jahres nach der niederländischen Richtlinie (ATG-NL) für den thermischen Komfort in nicht gekühlten Gebäuden. Aus den Abbildungen 9.7 bis 9.9 geht hervor, dass die Sanierung eine merkliche Verbesserung des sommerlichen Raumklimas bewirkt.

Das Gebäude vor der Sanierung überschreitet die Anforderungen der Klasse C<sup>3</sup> deutlich. Das sanierte Gebäude entspricht den Anforderungen der Klasse B, d. h., dass 80 % der Nutzer die Raumtemperaturen akzeptieren.

<sup>3</sup> Wobei nur 65 % der Gebäudenutzer mit dem Raumklima zufrieden sind.

Den gesamten Vergleich zwischen Bestand und Sanierungsstudie zeigen die Abb. A9.1.3-2 bis -7.

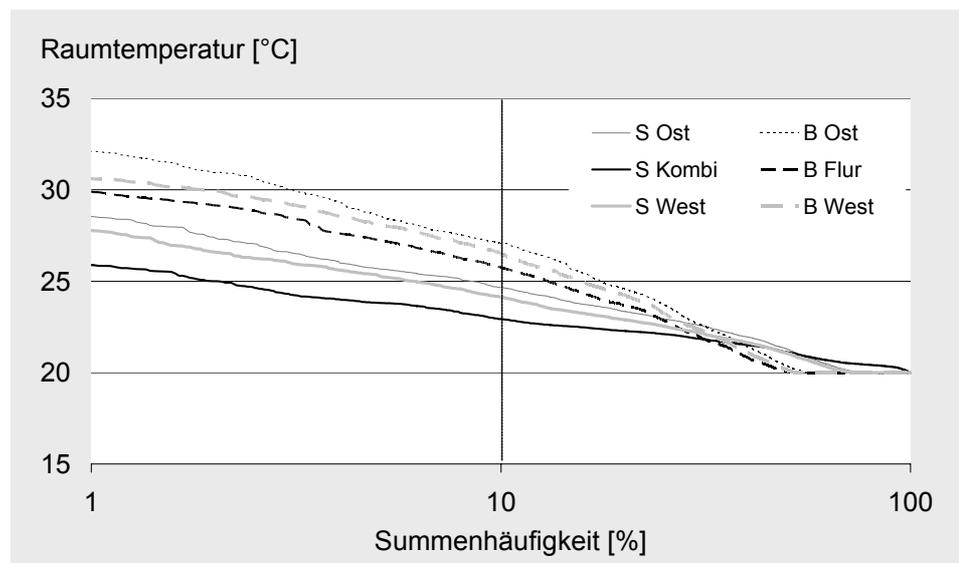
**Abb. 9.7:** Überschreitungshäufigkeit der Raumtemperatur im unsanierten (Grautöne) und sanierten (Weiß) Gebäude für die Gebäudeklassen nach der ATG-NL (bezogen auf 2882 Nutzungsstunden – 11 h/ Werktag, exkl. Wochenenden). Die Werte für das unsanierte Gebäude sind an der Größenachse abzulesen. Ablesebeispiel: Ost, Klasse A: saniert: 1,1 %, unsaniert: 1,1 % + 10,1 % = 11,2 %



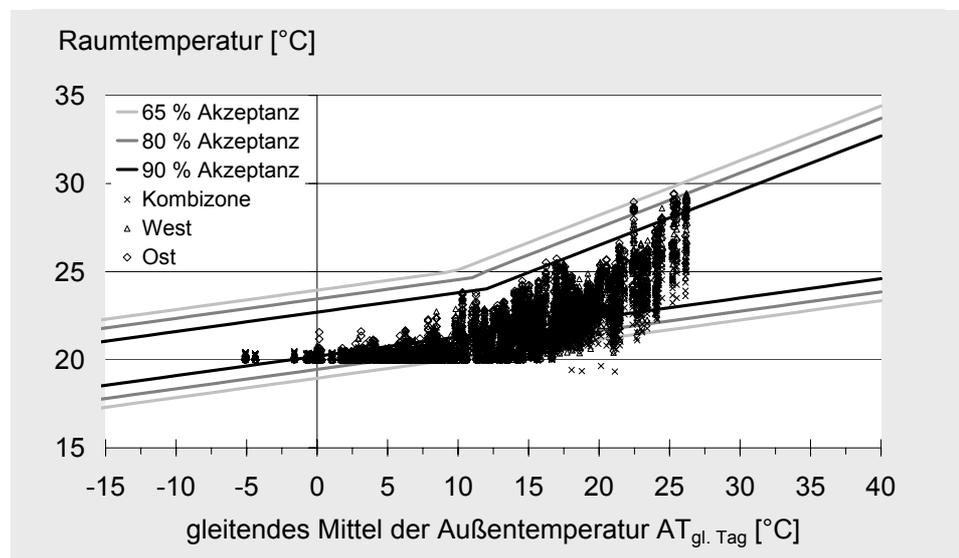
**Tab. 9.6:** Überhitzungsstunden (Bestand / Saniert)

	Ost	Flur	West
	(h)	(h)	(h)
Klasse A	322 / 32	149 / 0	237 / 14
Klasse B	187 / 7	64 / 0	125 / 0
Klasse C	117 / 0	29 / 0	70 / 0

**Abb. 9.8:** Verlauf der operativen Raumtemperatur während der Aufenthaltszeit im unsanierten und sanierten Gebäude. Die x-Achse ist logarithmisch skaliert. Verwendete Abkürzungen: S = Saniert, B = Bestand



**Abb. 9.9:** Komfortauswertung des sanierten Gebäudes nach der ATG-NL: Operative Raumtemperatur in °C des Ost-, des Westbüros und der Kombizone in Abhängigkeit von der Außentemperatur im Jahr 2004.



### Diskussion Modellierung der zwischen den Scheiben liegenden Verschattung in „Daysim“

Da keine Herstellerangaben zu den winkelabhängigen Transmissionseigenschaften der Folie existieren<sup>4</sup>, wurden der Sonnen- und Blendschutz über ein vereinfachtes Modell für eine außen liegende Verschattung im Programm „Daysim“ abgebildet. Es wird davon ausgegangen, dass in geschlossenem Zustand noch 25 % des diffusen Lichts in den Raum gelangen, da entweder der Sonnenschutz nicht ganz heruntergefahren wird, oder die Lamellen nicht völlig geschlossen sind. Dies deckt sich mit der Annahme, dass die Nutzer einen zwischen den Scheiben liegenden Sonnen- und Blendschutz selten ganz schließen werden (zumal, wenn er von unten nach oben läuft). Es gilt jedoch zu bedenken, dass das den Berechnungen in „Daysim“ zugrunde liegende Nutzerverhalten für eine Lamellenjalousie entwickelt wurde und nicht ohne weiteres auf ein Rollo übertragen werden kann. Um eine Berechnung zu ermöglichen, wird diese Abweichung akzeptiert. Allgemein zeigt sich hier ein Forschungsbedarf hinsichtlich der Entwicklung spezieller Nutzerprofile für unterschiedliche Sonnenschutzsysteme.

<sup>4</sup> In erster Näherung ähneln diese einer Glasscheibe.

In TRNSYS wird das Bedienungsprofil aus Daysim eingelesen und dort mit den Angaben für eine innen liegende Verschattung als Bestandteil des thermischen Raummodells verknüpft. Das eine möglicherweise fehlerhafte Abbildung des Sonnen- und Blendschutzes in der Simulation geringe Auswirkungen hat, macht eine Simulation mit wochentags hochgefahrenem Blendschutz deutlich: Die Überschreitungswerte für die Klasse A erhöhen sich nur geringfügig (Ostbüro: von 32 h auf 40 h, Westbüro: von 14 h auf 19 h. Diese Robustheit ist auf das Sonnenschutzglas und die Nachtlüftung zurückzuführen, eine Übertragung auf ein Konzept ohne Sonnenschutzglas ist nicht möglich.

### Berechnung Nutzenergiekennwert für Heizung mit „Bilanz“ - Vergleich mit Messwerten

Der Vergleich zwischen dem aufgezeichneten Nutzenergiekennwert für Heizung und Warmwasser und den mit Bilanz errechneten Kennwerten (Tab. 9.7, Monatsverbräuche Abb. A9.1.3-8) zeigt für das Gesamtgebäude einen geringeren errechneten Bedarf und einen hohen Verbrauch im Sommer.

	Nutzwärmekennwert (kWh/m <sup>2</sup> a)
Aufzeichnung Verbrauch (Heizung, Trinkwarmwasser)	174,6
Aufzeichnung Verbrauch (Heizung, Trinkwarmwasser) abzüglich Juni, Juli und August	105,2
„Bilanz“ (Heizung) Solltemperatur 22 °C	104,4
„Bilanz“ (Heizung) Solltemperatur 20 °C	83,9

**Tab. 9.7:** Aufgezeichneter und berechneter Nutz-  
wärme-kennwert Heizung

Anmerkungen zur Ermittlung und Erklärungen der Abweichungen:

- Auffallend ist der hohe Wärmebezug im Sommer (zwischen 6,3 kWh/m<sup>2</sup> im August und 9,5 kWh/m<sup>2</sup> im Juni). Er lässt sich auf regelungstechnische und hydraulische Fehler und eine nicht erfolgte saisonale Abschaltung der Heizung zurückführen. Die hohen Bezüge allein der Warmwasserbereitung zuzuschreiben, scheint unrealistisch.

- Flächenbezug für Verbrauch und Bedarf ist die Fläche des 1. bis zum 7. OG (4246 m<sup>2</sup>), da diese Geschosse permanent oder zeitweise genutzt und daher beheizt werden.
- Ein Unsicherheitsfaktor bei der Bedarfsberechnung ist die Raumsolltemperatur. Diese liegt gemäß der Messungen meist über 20 °C, was auf nicht bekannte Einstellungen der Raumsolltemperatur und die internen und externen Wärmequellen zurückzuführen ist. Eine Raumsolltemperatur von 22 °C erhöht den Bedarf um 20 kWh/m<sup>2</sup>.
- Das Berechnungsprogramm „Bilanz“ geht bei der Beheizung von einer ideal geregelten Luftheizung aus. Die Realität weicht davon erheblich ab.
- Obwohl das 7. OG teilweise als Wohnung genutzt wird und daher von einer Büronutzung abweichende Verbräuche (Trinkwarmwasser) hat, ist dieser Mehrverbrauch zu vernachlässigen.
- Der aufgezeichnete Verbrauch ist nicht klimanormiert und bezieht sich auf das Klima in Wuppertal im Jahr 2004. Der errechnete Bedarf gilt für den Ort Köln (Klimazone 7).

Wichtige Gründe für die Abweichungen sind die sommerlichen Wärmebezüge und die Raumsolltemperatur. Abzüglich der Nutzenergie für die Monate Juni bis August bleibt ein Verbrauch von 105,2 kWh/m<sup>2</sup>a übrig, der sich mit dem berechneten Nutzwärme-kennwert von 104,4 kWh/m<sup>2</sup> (bei 22 °C Raumtemperatur) gut deckt. Es wird deutlich, dass schon die Beseitigung der sommerlichen Wärmebezüge eine wesentliche Energieeinsparung bewirken würde.

**Abb. 9.10:** Berechneter Nutzwärme-kennwert für die Heizung nach Sanierung mit „Bilanz“:  
 g-Wert 33 % (20 °C):  
 61,4 kWh/m<sup>2</sup> a  
 g-Wert 60 % (20 °C):  
 54,8 kWh/m<sup>2</sup> a

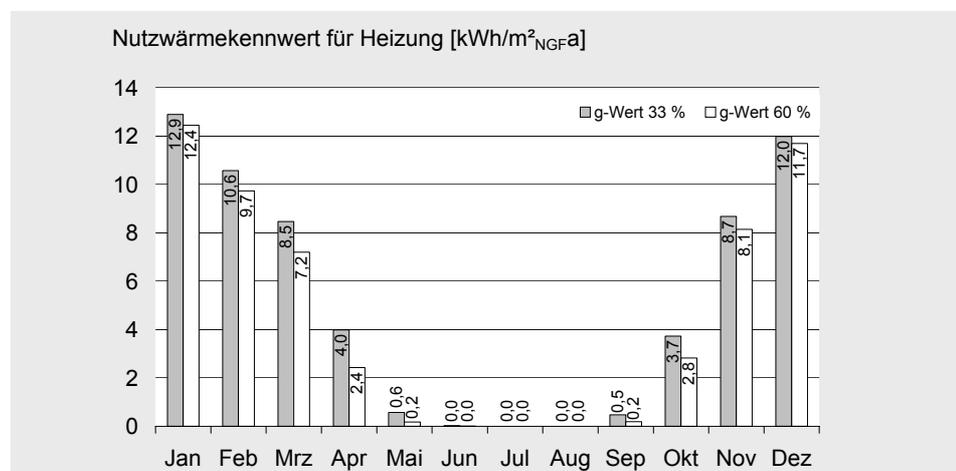
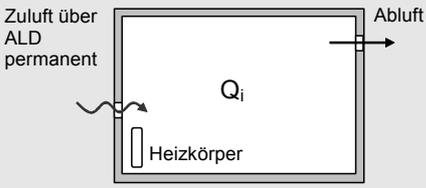
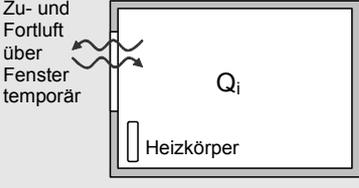


Abb. 9.10 zeigt den berechneten Heizwärmebedarf für das sanierte Gebäude mit und ohne Sonnenschutzglas, wobei in beiden Fällen von einem Gebäude ohne Verschattungseinrichtung ausgegangen wird. Unter diesen Rahmenbedingungen bewirkt der Einsatz des Sonnenschutzglases eine Erhöhung des Nutzwärme-kennwertes um 10,7 %. Es gilt jedoch zu bedenken, dass bei einer Verglasung mit einem g-Wert von 60 % üblicherweise ein außen liegender Sonnenschutz eingesetzt wird, den die Nutzer auch im Winter zur Vermeidung von Blendungen herunterfahren. Daher ist mit einer Minderung der solaren Gewinne im Winter zu rechnen. Wird dies bei einer Simulation mit TRNSYS berücksichtigt, liegt die durch das Sonnenschutzglas verursachte Erhöhung bei 7,0 %. Angesichts der Verbesserung des sommerlichen Komforts wird dies akzeptiert.

### Auswirkung des Zuluft eintritts durch die ALD in den Raum

Wie Tabelle 9.8 zeigt, kann der Zuluft eintritt in den Raum einen Mehrverbrauch auslösen, je nachdem, an welchem Punkt das Heizthermostat die Temperatur misst. Dieser Mehrverbrauch ist in den oben genannten Berechnungsergebnissen nicht berücksichtigt.

Zuluft über ALD mit Abluftanlage	Zu- und Fortluft über Fenster
	
<p><b>Heizwärmebedarf in der Realität</b> Die über die ALD permanent nachströmende kalte Zuluft erfordert auch dann – abhängig von der Position des Heizungsthermostats – eine Nacherwärmung von der Heizung, wenn der hintere Teil des Raumes warm genug ist. Konsequenz: es wird mehr Wärme abgefragt, um auch im Winter den Komfort zu gewährleisten.</p> <p><b>Heizwärmebedarf in der Simulation</b> Pro Zone (hier der Raum) wird ein Luftknoten berechnet. Konsequenz: der Mehrverbrauch an Wärme in der Realität bleibt unberücksichtigt, die Simulation unterschätzt den realen Bedarf.</p>	<p><b>Heizwärmebedarf in der Realität</b> Die über das Fenster (Stoßlüftung vorausgesetzt) in den Raum gelangende Zuluft wird einmalig erwärmt.</p> <p><b>Heizwärmebedarf in der Simulation</b> Pro Zone (hier der Raum) wird ein Luftknoten berechnet. Konsequenz: Simulation stimmt mit der Realität überein.</p>

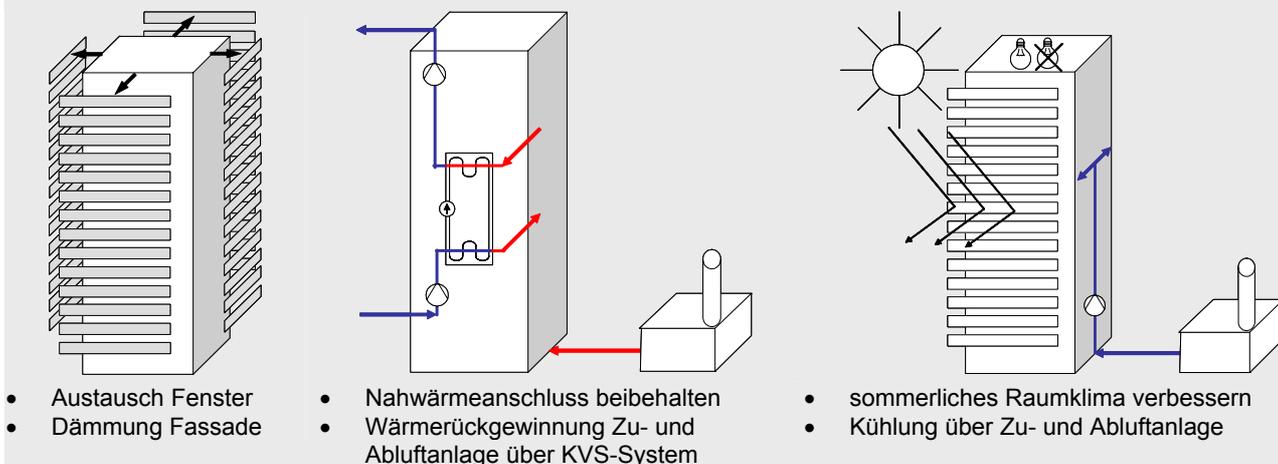
**Tab. 9.8:** Auswirkung des Frischlufteintritts über ALD auf den Heizwärmebedarf.

## 9.2 Sanierungsstudie Gebäude B

### 9.2.1 Arbeitsfelder für Sanierung: Maßnahmen

Die Erkenntnisse aus der Gebäudeanalyse stellt Abb. 9.11 zusammenfassend dar. Die daraus abgeleiteten Schwerpunkte für die Sanierung zeigt Abb. 9.12.

	Mangel im Bestand	Sanierung	Chance im Bestand
<b>Raumklima Sommer</b>	- Gebäude nachmittags etwas zu warm (NB) - Nutzer an Kühlung der Zuluft gewöhnt - Blendungen (NB)	Verbesserung sommerliches Raumklima durch Maßnahmen der passiven Kühlung - Verringerung interner Wärmequellen (Geräte, elektrische Beleuchtung) - Verringerung externer Wärmequellen (Sonnenschutzglas, Mikroklima Fassade) - Zusätzliche aktive Kühlung	
<b>Raumklima Winter</b>	- Geringe relative Feuchte Raumluft (MT, NB) - Wärmeabgabe statische Heizkörper individuell regelbar, Zulufttemperatur Teilklimaanlage nicht (NB, GB) - Wunsch nach mehr Eigenständigkeit bei Regelung der Raumtemperatur (NB)	- Wärmeabgabe ausschließlich über Radiatoren - > Luftwechsel und < Infiltration bewirken höhere relative Feuchte	
<b>Gebäude-technik + Energieverbrauch</b>	- Primärenergieverbrauch sehr hoch, Überschneidung Heizen und Kühlen, Heizen auch bei Außentemperatur > 15 °C (AE) - Teilklimaanlage: Rohrführung nicht reinigbar, daher enthält Zuluft teilweise Schmutzpartikel (NB, GB). Hoher Umluftanteil Anlage, Luftschadstoffe und Gerüche bleiben lange in der Raumluft - Lange Einschaltzeiten Kunstlicht (GB, NB)	- Beibehaltung Nahwärmeanschluss - Beibehaltung Kälteverbund - Wärmeabgabesystem Radiatoren - Austausch Lüftungsrohre, Zu- und Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung	- Nahwärme vorhanden - Kältemaschine für mehrere Gebäude vorhanden - Ausreichend Schächte für Lüftungstechnik vorhanden
<b>Gebäudehülle und Baukonstruktion</b>	- Fenster thermische unzureichend, eindringendes Wasser, Infiltration (GB) - Dämmstandard und mangelnde Dichtheit verursachen schnelle Gebäudeauskühlung (GB)	- Verringerung der Transmissionsverluste und Verbesserung der Luftdichtheit	- Keine sichtbaren Bauschäden
<b>Architektur und Raumorganisation</b>	- Kein barrierefreies WC (GB)	- Grundrisse beibehalten - Barrierefreiheit	- Hohe Zufriedenheit mit Raumaufteilung (NB, GB) - Repräsentative Eingangssituation (GB)
<b>Brandschutz</b>	- Keine Brandschutzklappen in Anlage - Aufzugschacht im Brandfall nicht dichtschießend	- Zu- und Abluftanlage mit Brandschutzklappen - Aufzugschacht mit dichtschießenden Türen versehen	- Fluchtwegslängen ausreichend - 2. außenliegendes Treppenhaus vorhanden



**Abb. 9.11:** (oben) Übersicht über die Ergebnisse der Analyse und die daraus resultierenden Arbeitsfelder für die Sanierung  
Verwendete Abkürzungen: MT = Messung Temperatur und relative Feuchte, AE = Ablesung Energieverbrauch, NB = Nutzerbefragung, GB = Gebäudebegehung

**Abb. 9.12:** (unten) Leitgedanken für Sanierung

## 9.2.2 Sanierungskonzept

### Gestalt und Struktur

#### *Erschließung und Erscheinungsbild Gebäude*

Die Erschließungssituation und die Grundrissorganisation im EG bleiben unverändert. Die Brüstungsverkleidungen aus Metall werden durch hellgraue Zementfaserplatten (Reflexionsgrad 50 %, vorher 12 %) ersetzt, die farblich an die ursprüngliche Brüstungsverkleidung mit Natursteinplatten anknüpfen.

#### *Innere Raumaufteilung*

Die innere Raumaufteilung mit Ein- und Zweipersonenbüros bleibt bestehen. Wie schon jetzt kann prinzipiell ein Büro pro Etage zum Aufstellen von Drucker, Kopierer u. ä. genutzt werden. Aus datenschutzrechtlichen Gründen ist keine Transparenz zwischen Flur und Büros erwünscht. Um dennoch eine optische Verbindung zu schaffen sind zwischen Büros und Flur ein – nicht einsehbarer – Oberlichtbereich und transluzente Bürotüren (siehe Anhang Abb. A9.2.2-8) vorgesehen. Pro Etage gibt es jeweils Sanitäranlagen für Damen oder Herren. Eine Änderung würde – da die doppelte Fläche notwendig wäre - eine Verlegung aus dem Kern an die Gebäudefassade erfordern. Die Einrichtung barrierefreier Toiletten ist notwendig und im bestehenden Grundriss möglich (Abb. A9.2.2-4).

#### *Brandschutz*

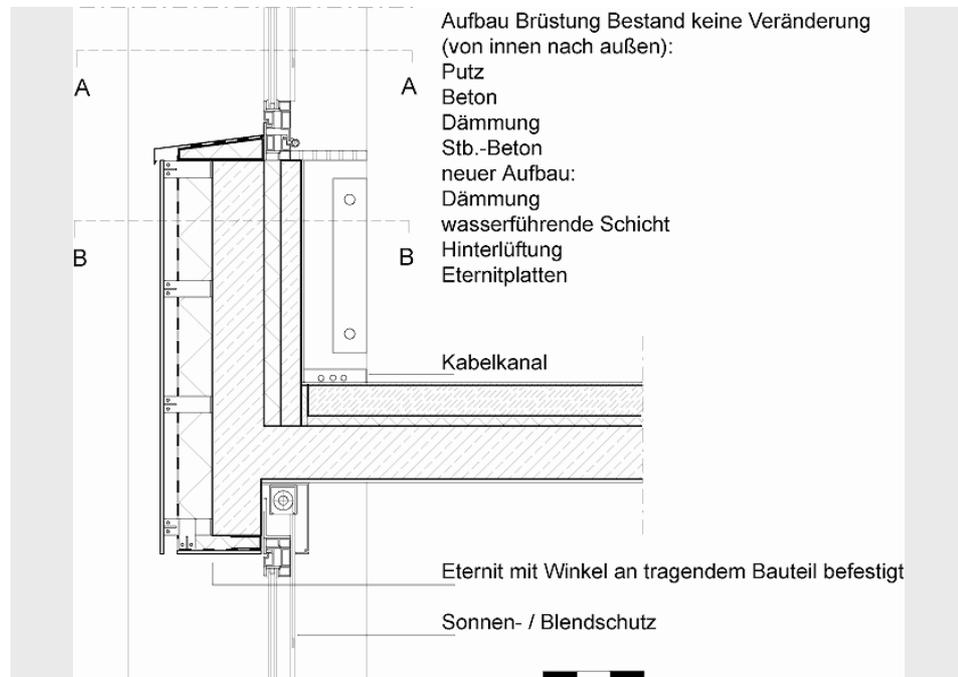
Die Sanierungsstudie geht davon aus, dass es sich bei dem Gebäude um ein genehmigtes Gebäude handelt, daher werden so grundsätzliche Dinge wie die Erschließung als Bestand akzeptiert. Der Luftraum der Geschosse ist auf jeder zweiten Etage durch eine Türe im Bereich der internen Treppenverbindung unterteilt. Die Fahrstuhltüren werden durch brandschutztechnisch klassifizierte Fahrstuhlschächttüren ersetzt, die ein Eindringen von Rauch in den Fahrstuhlschacht und somit eine Ausbreitung auf andere Geschosse verhindern. Pro Etage liegt die Größe der Nutzungseinheit bei 456 m<sup>2</sup>. Die Überschreitung der zulässigen 400 m<sup>2</sup> wird durch die Anordnung von Rauchmeldern und ELA<sup>5</sup> kompensiert. Damit können auch im Flurbereich Brandlasten aufgestellt werden und es ist keine Abschottung zwischen Flur und Büros notwendig.

<sup>5</sup> Elektronische Lautsprecher Anlage

#### *Baukonstruktion*

Im Rahmen der Konzeptfindung für die Sanierungsstudie wurde der Einsatz einer Doppelfassade geprüft und verworfen (Studien zur Entscheidungsfindung, siehe Tab. A9.2.2-1). Die Fenster werden ausgetauscht (Sonnenschutzglas) und der Brüstungs- und Sturzbereich wird verstärkt gedämmt (Vertikalschnitt siehe Abb. 9.13, Horizontalschnitt siehe Abb. A9.2.2.7). Die Stützen, die eine Wärmebrücke darstellen, bleiben außen weiterhin ungedämmt, da hier der Aufwand im Verhältnis zu den erreichbaren Energieeinsparungen hoch ist. Auf der Innenseite sind die Stützen so weit zu dämmen, dass baukonstruktive Schäden durch Tauwasserausfall vermieden werden. Der Durchdringungsbereich Rippe / Decke muss überprüft werden, bei Unterschreitung des Taupunktes wird die Decke im Bereich des Anschlusses gedämmt. Als „Kompensation“ für den Transmissionsverlust über die Stützen werden die

Wände zwischen Büro und Technikabseiten auf der Seite zum Technikraum mit 15 cm Steinwolle (WLG 040) gedämmt. Dies reduziert die Wärmeverluste der ungedämmten Wandscheiben und bewirkt eine Minderung des Heizwärmebedarfs um 15 % (mit Dämmung: 50,0 kWh/m<sup>2</sup>, ohne Dämmung: 58,5 kWh/m<sup>2</sup>a).



**Abb. 9.13:** Vertikalschnitt durch die sanierte Fassade, der Maßstabsbalken entspricht 30 cm

	U-Wert (W/[m <sup>2</sup> K])	g-Wert (%)	$\tau_{vis}$ (%)
Brüstung / Sturz	0,2		
Stütze (zw. Fenstern)	0,8		
Fenster	1,3		
Glas	1,1	36	66
Sonnenschutzrollo	-		1,9
Innenwand transparent	3,0		
Innenwand opak	0,34		
Decke / Fußboden	0,69		
Dach	0,2		

**Tab. 9.9:** Kennwerte der Umfassungsflächen. Weitere Angaben zu den Wandaufbauten und Produktangaben, siehe Anhang Tab. A9.2.2-2 und Tab. A9.2.2-3.

## Bauphysik und Gebäudetechnik

### Lüftung und Heizung im Winter

Der bestehende Nahwärmeanschluss bleibt zusammen mit den Radiatorenheizkörpern in den Büros bestehen. Die vorhandene Kanalführung für die Zu- und Abluftanlage wird demontiert. Die Gebäudehöhe und der daraus resultierende Winddruck und –sog auf die Fassade erfordern – weiterhin - eine Zu- und Abluftanlage. Die bisherige Verteilung der Kanäle (siehe Abb. A9.2.2-5) wird beibehalten. Somit wird jeweils die Raumgruppe einer Himmelsrichtung mit Zu- und Abluft versorgt. Für die Sanitärräume gibt es eine gesonderte Abluftanlage.

Da eine Zusammenführung der Zu- und Abluftstränge nicht möglich ist<sup>6</sup> wird zur Wärmerückgewinnung ein Kreislaufverbund-System (KVS-System) eingesetzt, das die Wärme der Abluft über ein Wasser-Glykol-Gemisch an die Zuluft überträgt. Der trockene Zuluft-Wirkungsgrad liegt bei guten Geräten nach Herstellerangaben (z. B. Mountair KVS2-ZUL) bei 70 %.

<sup>6</sup> Zuluft einlass: Westseite  
1.OG, Fortluftauslass: Dach

Betriebszustände der Lüftungsanlage	LW	
	(1/h)	(m <sup>3</sup> /P*h)
Grundlüftung nachts	keine	
Regellüftung Winter	1,0	(je nach Raumgröße) 42 bis 55
Regellüftung Sommer *	1,3	(je nach Raumgröße) 54 bis 72
Lüftung nachts- wenn Kühlung notwendig	1,3	
* = Empfehlung [DIN EN 13779:2005-05]		

**Tab. 9.10:** Luftwechselraten (LW) der Zu- und Abluftanlage

### Passive und aktive Kühlung im Sommer

Konzeptionelle Überlegungen und Überprüfungen durch Simulationen zeigen, dass aus folgenden Gründen im Gebäude allein mit Maßnahmen der passiven Kühlung kein sommerlicher Komfort erreicht werden kann:

- Eine ausreichende Kühlung des Gebäudes über Nachtlüftung ist nicht möglich. Mit einer Zu- und Abluftanlage kann – unter dem Gesichtspunkt des angemessenen Hilfsenergieverbrauchs - maximal ein Luftwechsel von 2 1/h erreicht werden<sup>7</sup>. Zusätzlich dazu liegt die Einblastemperatur im Raum über der Außentemperatur, da sich die zentral angesaugte Zuluft über die Verteilleitungen im Gebäude erwärmt.
- Die Nutzererwartung an das sommerliche Raumklima ist hoch, da das Gebäude bisher gekühlt wurde.
- Die Außenlufttemperaturen können in Basel höher sein als in Wuppertal.

<sup>7</sup> Weitere Ausführungen zu diesem Thema finden sich in [Feist, 2005].

Das Gebäude wird somit bei hohen Temperaturen mit den in Tab. 9.10 genannten Luftwechselraten über die Zuluftanlage gekühlt. Diese Kälteabgabe ist beim Gebäude B sinnvoll, da eine Kälteanlage für insgesamt sechs Gebäude bereits existiert und die Kälte im Bestandsgebäude ebenso übertragen wurde (kein Systemwechsel). Die nachstehenden Maßnahmen verringern die Lasten für die aktive Kühlung:

#### Senken der Wärmelasten

- Externe Wärmelasten: Alle Fenster werden mit Sonnenschutzglas (g-Wert 36 %) versehen. Da die Eckräume einen erhöhten Glasanteil aufweisen, wird das Eckfenster mit einer Sonnenschutzverglasung mit einem g-Wert von 22 % verglast. Der Reflexionsgrad ( $\rho_{sol} = 50 \%$ ) der Brüstungsverkleidung ( $\rho_{sol}$  Bestand: 12 %) vermindert ein Aufheizen der Fassade und verhindert somit Wärmeeinträge über eine zusätzliche Fensterlüftung.
- Interne Wärmelasten: Die zentralen Dienste (Kopierer, Drucker, Server) werden in einem abgeschlossenen Raum pro Etage zusammengefasst und die entstehenden Wärmelasten direkt durch die Zu- und Abluftanlage abgeführt. Das Beleuchtungskonzept reduziert den elektrischen Energieverbrauch für Beleuchtung. Der Einsatz stromsparender Geräte ist wünschenswert<sup>8</sup>.

<sup>8</sup> Er kann aber nicht vorgeschrieben werden und ist auch nicht Basis der Simulationen.

### Optimierung der Wärmespeicherung

- Die abgehängten Decken in den Büros werden entfernt. In Abhängigkeit von der Überdeckung der Bewehrung wird die Deckenunterseite verputzt, oder - bei unzureichender Überdeckung – ein spezieller Putz oder alternativ eine Brandschutzverkleidung z. B. Promat eingesetzt. Ist eine Verkleidung notwendig, so sollte der Einsatz von Phasenwechselmaterialien geprüft werden. Die Rohrführung im türnahen Bereich wird verblendet (Abb. A9.2.2-6).

### Erhöhung der Wärmeabfuhr

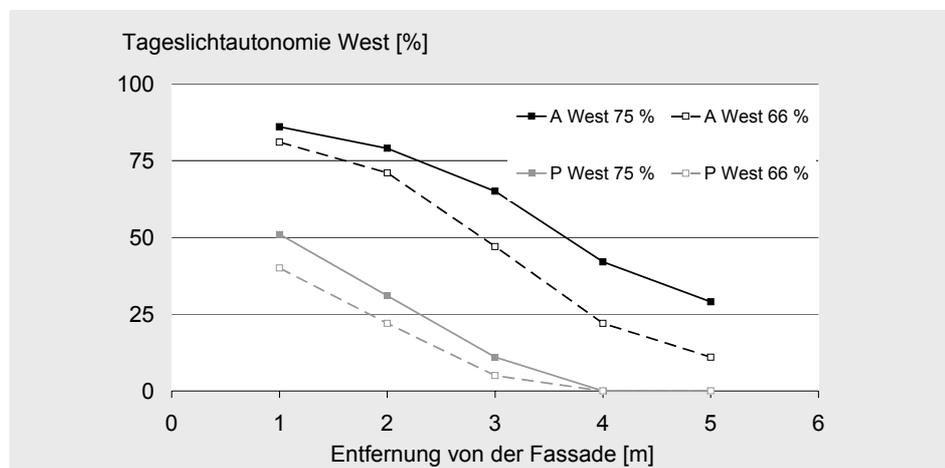
- Eine zusätzliche Kühlung der Räume über die Lüftungsanlage ist erforderlich. Die Räume werden tagsüber ab der Grenztemperatur von 25 °C (Südraum: 24 °C) so lange mit gekühlter Zuluft<sup>9</sup> versorgt, bis die Grenztemperatur unterschritten ist. Wird nachts ab 24 Uhr die Grenztemperatur von 24 °C überschritten, so wird so lange eine Zulufttemperatur von 16 °C eingebracht, bis der Raum 22 °C erreicht hat (siehe auch Abschnitt 9.2.3). Zur gleichmäßigen Verteilung der gekühlten Zuluft kann ein kreisförmiger Wandauslass mit einstellbarem Zuluftschlitz, der die Decke anströmt, eingesetzt werden (Kennwerte und weitere Informationen siehe Info A9.2.2-1).

<sup>9</sup>  $T_{\text{diff}} \text{ Zuluft / Raumluf} = 8 \text{ K}$   
[Recknagel et al., 2001], [DIN V 18599-7:2005-07].

**Abb. 9.14:** Simulation der Tageslichtautonomie für das unsanierte ( $\tau_{\text{vis}} = 75 \%$ ) und das sanierte ( $\tau_{\text{vis}} = 66 \%$ ) Gebäude. A („aktiv“, in der Grafik schwarz) und P („passiv“, in der Grafik grau) beschreiben das unter 9.1.3 (Infobox 9.1) näher erläuterte unterschiedliche Nutzerverhalten. Die Eigenschaften des RADIANCE-Simulationsmodells entsprechen Tab. A9.2.2-5. Es wird deutlich, dass das Sonnenschutzglas mit dem geringeren Lichttransmissionsgrad die Tageslichtautonomie im hinteren Bereich der Räume stark vermindert. Die Arbeitsplätze befinden sich im fassaden-nahen Bereich. Ein sehr einflussreicher Faktor ist das Nutzerverhalten, das im realen Gebäudebetrieb zwischen dem „aktiven“ und dem „passiven“ Verhalten liegt.

### Tageslicht und Beleuchtung

Die Fenstergrößen werden beibehalten. Die Sonnenschutzverglasung hat einen Lichttransmissionsgrad von 66 %. Abb. 9.14 zeigt eine Untersuchung der Tageslichtautonomie vor und nach der Sanierung beispielhaft für das Westbüro (übrige Orientierungen, siehe Abb. A9.2.2-10 bis -13).

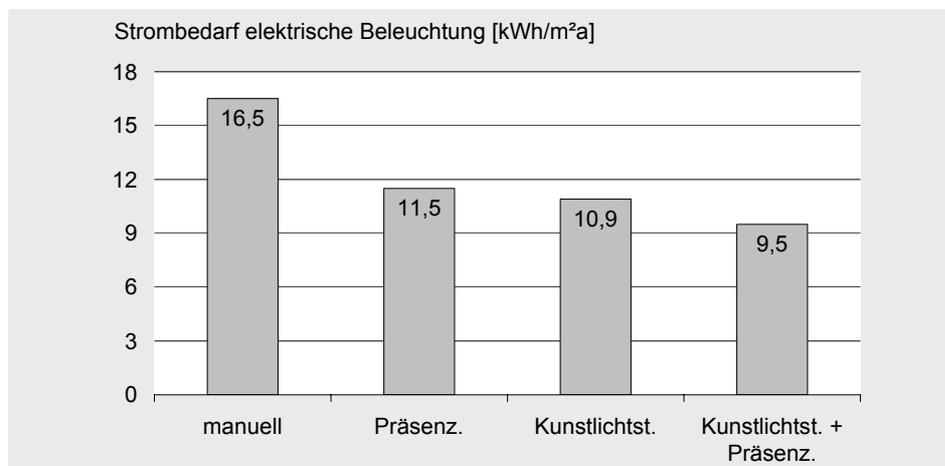


Die elektrische Beleuchtung wird manuell angeschaltet, ein Präsenzsensoren schaltet die Beleuchtung bei Abwesenheit der Nutzer aus (siehe auch Abb. 9.15). Für jedes Büro gibt es eine Grundbeleuchtung und eine Arbeitsplatzleuchte. Die installierte Leistung beträgt 10 W/m<sup>2</sup>, die für den Flur liegt bei 7 W/m<sup>2</sup> (Erfahrungswerte nach [Hoffmann et al., 2005]).

Der Sonnen- bzw. Blendschutz besteht aus einem innen vor dem Fenster laufenden Folienrollo (Eigenschaften siehe Tab. A9.2.2-4). Das Material gewährleistet auch bei geschlossenem Zustand eine Resttransparenz. Das Rollo wird werktags manuell betrieben und nur am Wochenende über die

Haustechnik geschlossen.

Nachfolgend wird das Sanierungskonzept anhand von thermischen Simulationen überprüft.



**Abb. 9.15:** Simulationsergebnisse unterschiedlicher Automatisierungsstrategien für Kunstlicht in Daysim. Die Untersuchung zeigt den Mittelwert für das Nord-, Ost-, Süd- und das Westbüro. Für die konsequent tageslichtorientierten Arbeitsplätze stellt ein Präsenzsensoren einen sinnvollen Kompromiss zwischen Investitionskosten und der Reduktion des Strombedarfs für die elektrische Beleuchtung dar. Simulationsparameter für die Räume siehe Tab. A9.2.2-5.

Verwendete Abkürzungen: Präsenz. = Präsenzsensoren, Kunstlichtst. = tageslichtabhängige Kunstlichtregelung

### 9.2.3 Untersuchung des Sanierungskonzeptes mittels Simulationen

#### Simulationsmodell

Das in Abschnitt 8.5.2 beschriebene Ost-West- und das Nord-Süd-Modell des Bestandsgebäudes wurden zusammengefasst und um den – bezogen auf die Temperatur – kritischsten Eckraum Südost erweitert. Weitere Veränderungen beschreiben nachfolgende Absätze.

#### Wetterdaten

Als Wetterdatensatz werden die von der Universität Basel aufgezeichneten Wetterdaten aus dem Jahr 2004 verwendet (weitere Informationen siehe Anhang Info A9.2.3-1).

#### Simulationsmodell und Baukonstruktion

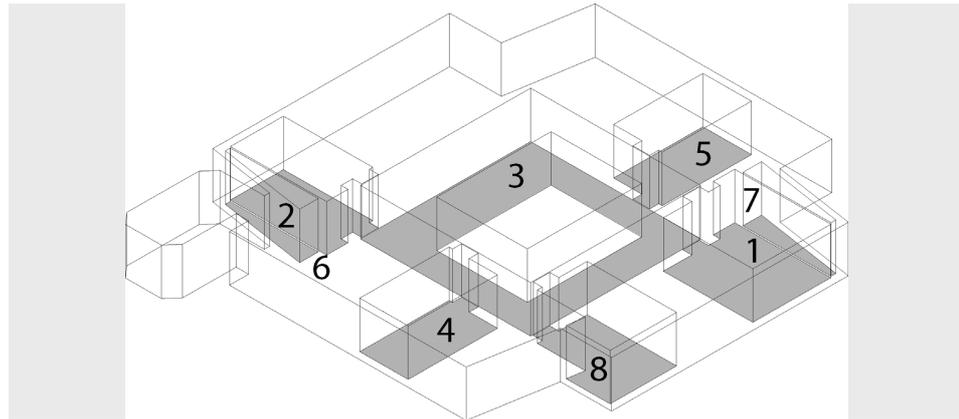
Das Raummodell besteht aus einem Nord, einem Süd, einem Ost-, einem Westbüro, den Technikbereichen Ost- und West, dem Südostbüro und dem Flurbereich sowie adiabaten Grenzflächen (Tab. 9.11 und Abb. 9.16).

**Tab. 9.11:** Abmessungen der Räume im Simulationsmodell.

Verwendete Abkürzungen: Büro SO: (O) = nach Osten orientiert, (S) = nach Süden orientiert

		Büro O	Büro W	Büro S + S	Büro SO	Flur
Tiefe	(m)	5,6	5,6	5,6	5,6	-
Breite	(m)	5,0	3,4	3,1	4,2	-
Außenwand	(m)	15,5	10,5	9,6	12,9 (O), 8,5 (S)	-
Rohbauöffnung Fenster	(m²)	9,5	6,4	6,4	6,4 (O), 6,5 (S)	-
Glas	(m²)	6,0	4,0	4,0	4,0 (O), 4,3 (S)	-
Rahmenanteil	(%)	37 %	37 %	37 %	37 (O), 34 (S)	-
Boden / Decke	(m²)	29,1	20,3	17,4	21,7	76,4
lichte Höhe	(m²)	3,1	3,1	3,1	3,1	2,9

**Abb. 9.16:** Das Simulationsmodell. Die Technikbereiche (6,7) sind als separate Zone modelliert. Das Gebäude weicht von einer eindeutigen Nordorientierung um  $28^\circ$  nach Nordosten ab.  
 Ostbüro = 1  
 Westbüro = 2  
 Südbüro = 4  
 Nordbüro = 5  
 Flurbereich = 3  
 Technikbereiche = 6, 7  
 Südostbüro = 8



Die U-Werte der Außenbauteile zeigt Tab. 9.9, die Wandaufbauten und Angaben zur Verglasung und zum Blendschutz finden sich im Anhang Tab. A9.2.2-3 und Tab. A9.2.2-4.

#### *Gebäudebetrieb und Raumnutzung*

Das Nutzerverhalten bei der Bedienung der elektrischen Beleuchtung wird auf Basis eines dreidimensionalen in RADIANCE erstellten Simulationsmodells (Simulationsparameter siehe Tab. A9.2.2-5) für jedes Büro in „Daysim“ (siehe Infobox: 9.1) berechnet und in TRNSYS importiert.

Die Zu- und Abluftanlage erzeugt werktags von 7 bis 20 Uhr einen hygienischen Frischluftwechsel von  $1,3 \text{ 1/h}$ . Zusätzlich dazu lüften die Nutzer in allen Büros morgens für 15 Minuten das Büro über die Fenster (Luftwechsel  $3,0 \text{ 1/h}$ ). Um die Fensterlüftung durch die Nutzer abzubilden, wird die in Kap. 5.3.1 vorgestellte Funktion verwendet. Insgesamt ergibt sich bei einer Außentemperatur von  $30^\circ\text{C}$  zusammen mit der Fugenlüftung<sup>10</sup> und dem Luftwechsel über die Anlage eine Luftwechselrate von  $2,7 \text{ 1/h}$ , die der nach [Deutscher et al., 2000] empfohlenen Annahme für einen durch Fensterlüftung erhöhten sommerlichen Luftwechsel entspricht.

Überschreitet die Raumlufttemperatur im Sommer tagsüber die in Tab. 9.12 genannte Grenztemperatur, werden die Räume über die Lüftungsanlage mit gekühlter Luft versorgt. Die Zulufttemperatur tagsüber liegt  $8 \text{ K}$  unter der Raumlufttemperatur, beträgt aber minimal  $16^\circ\text{C}$ . Ist die Raumlufttemperatur nachts (zwischen 24 und 7 Uhr) wärmer als die Grenztemperatur, so wird mit einem Luftwechsel von  $1,3 \text{ 1/h}$  und einer Zulufttemperatur von  $16^\circ\text{C}$  gekühlt. Die Kühlung (und nachts auch der Luftwechsel) hört dann auf, wenn die jeweilige Grenztemperatur unterschritten ist. Am Wochenende wird weder gelüftet noch gekühlt.

Raumorientierung	Grenztemperatur Kühlung Tag	Grenztemperatur Kühlung Nacht LW = $1,3 \text{ 1/h}$	Grenztemperatur Kühlung Nacht LW = $0,0 \text{ 1/h}$
	( $^\circ\text{C}$ )	( $^\circ\text{C}$ )	( $^\circ\text{C}$ )
Nord	26	24	22
Ost	25	24	22
Süd	25	24	22
West	25	24	22
Südwest	24	23	21

**Tab. 9.12:** Kühlstrategie für Tag- und Nachtbetrieb im Sommer (15.05. bis 30.09.). Die Zuluft wird dann nicht gekühlt, wenn die Außenlufttemperatur ohnehin  $8 \text{ K}$  unter der Raumlufttemperatur liegt oder  $\leq 16^\circ\text{C}$  ist.

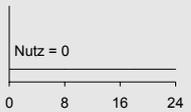
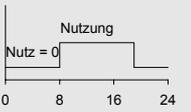
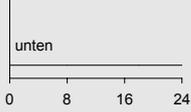
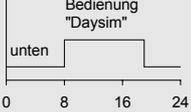
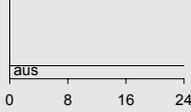
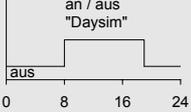
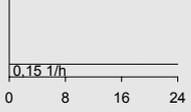
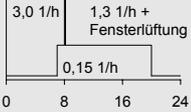
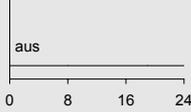
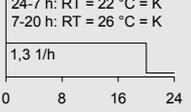
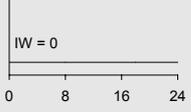
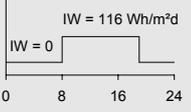
<sup>10</sup> Berechnet nach [Orme et al., 1998] und [DIN EN ISO 13791:2005-02]  $0,15 \text{ 1/h}$ .

### Vorgehen bei den Simulationen

Das Sanierungskonzept wird mittels der Simulationsergebnisse für das in drei Punkten veränderte Bestandsgebäude (8-Zonen-Modell) überprüft (zum Vorgehen siehe auch Abb. 8.2).

- Die manuelle Bedienung des Sonnenschutzes und der elektrischen Beleuchtung wird in Daysim simuliert (gemischtes Nutzermodell, Simulationsparameter siehe Tab. A9.2.3-1) und die Werte in TRNSYS eingelesen.
- Die internen Wärmequellen sind mit den Werten des Sanierungskonzeptes gleichgesetzt.
- Im simulierten Bestandsgebäude gibt es zu Vergleichszwecken keine Kühlung.

**Tab. 9.13:** Gebäudebetrieb und Raumnutzung – Annahmen für die Simulation  
Verwendete Abkürzungen:  
WE = Wochenende,  
WT = Werktag, LW = Luftwechsel, AT = Außentemperatur

	Wochenende	Werktag	Kommentar
Nutzung			WE: keine Nutzung WT: 8 bis 19 Uhr
Sonnenschutz			WE: unten über Gebäudeautomation WT: manuell durch Nutzer, Modellierung Nutzerverhalten über „Daysim“
Elektrische Beleuchtung			WE: aus WT: manuell durch Nutzer, Modellierung Nutzerverhalten über „Daysim“
Luftwechsel			LW WE: Berechnung Fugenlüftung nach Angaben aus [Orme et al., 1998] und [DIN EN ISO 13791:2005-02]. LW WT: 7 bis 20 Uhr: LW Abluftanlage 3,0 1/h, + Fensterlüftung abhängig von AT (Abb. 5.23)
Kühlung (15.05. -30.09.)			WE: aus WT Nacht: Raumlufttemperatur (RT) ≥ 22 °C = Kühlung (K) mit LW 1,3 1/h + Temperatur 16 °C WT Tag: RT ≥ 26 °C = K Temperatur ≤ 8 K RT
Interne Wärmequellen			Interne Wärmequellen für Personen und Geräte nach [DIN V 18599-10:2005-07] und [SWKI 95-3, 2001]: 72 Wh/m²d. Elektr. Beleuchtung: 10 W/m², im Jahresmittel 44 Wh/m²d. Flur: elektr. Beleuchtung 7 W/m² (77 Wh/m²d).

### Auswertung der Simulationen

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Auswertung des gesamten Jahres nach der niederländischen Richtlinie (ATG-NL) für den thermischen Komfort in nicht gekühlten Gebäuden<sup>11</sup>.

Aus den Abbildungen 9.17 bis 9.18 und Tab. 9.14 geht hervor, dass die Sanierung gegenüber dem Bestand eine merkliche Verbesserung des sommerlichen Raumklimas darstellt.

Das – ungekühlte - Gebäude vor der Sanierung überschreitet die Anforderungen der Klasse C<sup>12</sup> deutlich. Das sanierte Gebäude entspricht für die Nordbüros exakt den Anforderungen der Klasse B<sup>13</sup>, das Süd- und Westbüro überschreiten die Grenze um 26, bzw. 13 Stunden, die Überschreitung des Ostbüros beträgt 2 Stunden.

<sup>11</sup> Trotz des Technikkonzeptes ist das Gebäude hier einzuordnen, siehe Kap. 3.3.2.

<sup>12</sup> 65 % der Gebäudenutzer sind mit dem Raumklima zufrieden.

<sup>13</sup> 80 % der Nutzer akzeptieren die Raumtemperaturen.

Das Südostbüro überschreitet die Anforderungen der Klasse B an 40 Arbeitsstunden (1 %).

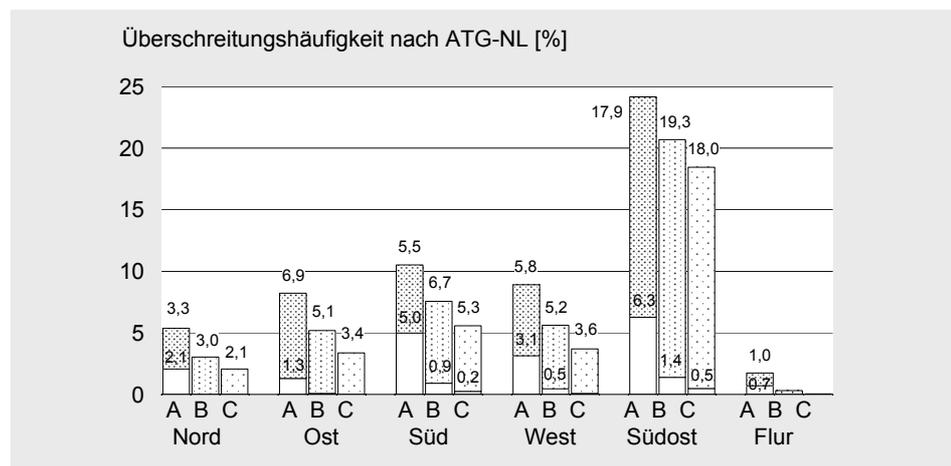
Anmerkung zum Süd- und Südostbüro: Dieses Büro stellt in der Simulation den „schlechtesten Fall“ dar, da die solare Aperturfläche bezogen auf die Raumfläche sehr hoch ist. In der Regel ist die Fläche der Eckräume größer und die Räume werden nicht permanent, sondern als Besprechungsräume genutzt<sup>14</sup>.

<sup>14</sup> Bei kleiner Grundfläche befinden sich hier oft zentrale Dienste, wie z. B. Kopierer, Drucker etc.

Sollten sich im Verlauf der Nutzung im Südbüro und in den Eckbüros die Raumtemperaturen als inakzeptabel hoch erweisen, so kann in diesen Räumen ein zusätzliches Deckenkühlsegel installiert werden. Dieses wäre an die Kälteverteilung im Gebäude angeschlossen und würde – mit Kaltwasser durchströmt – für eine zusätzliche Wärmeabfuhr sorgen. Da die Kälteverteilung im Gebäude bereits existiert ist diese Nachrüstung realistisch durchführbar. Im Vergleich zum unsanierten Gebäude wäre selbst mit dieser Zusatzmaßnahme die erreichte Energieverbrauchssenkung noch immer beträchtlich.

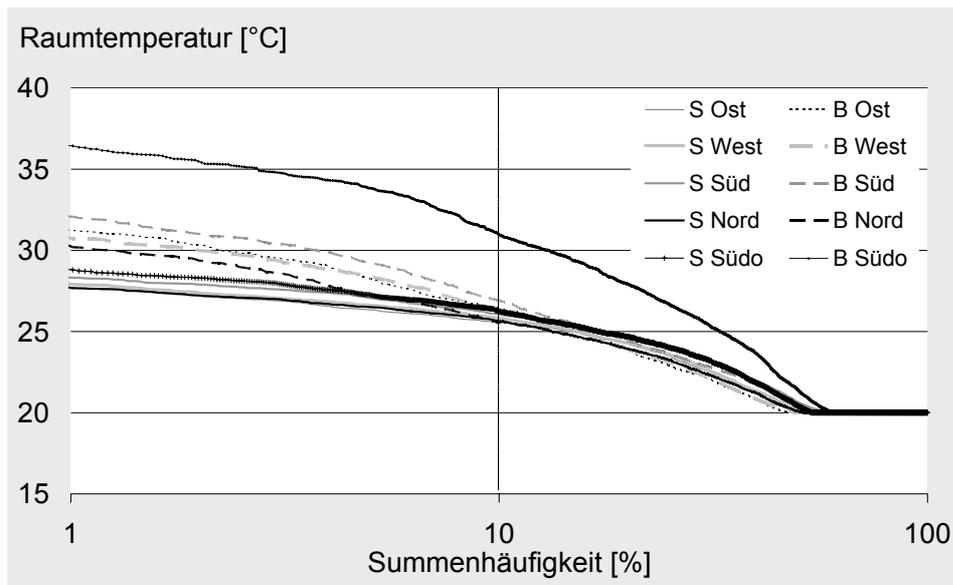
Den gesamten Vergleich zwischen Bestand und Sanierung zeigen Abb. A9.2.3-1 bis -6.

**Abb. 9.17:** Überschreitungshäufigkeit der Raumtemperatur im unsanierten (Grautöne) und sanierten (Weiß) Gebäude für die Gebäudeklassen nach der ATG-NL (bezogen auf 2882 Nutzungsstunden – 11 h/ Werktag, exkl. Wochenenden). Die Werte für das unsanierte Gebäude sind an der Größenachse abzulesen. Ablesebeispiel: Ost, Klasse A: saniert: 1,3 %, unsaniert: 6,9 % + 1,3 % = 8,2 %.  
Verwendete Abkürzungen: S = Saniert, B = Bestand  
Anmerkung: Der Flur als nichtpermanente Aufenthaltszone ist der Vollständigkeit halber aufgeführt.

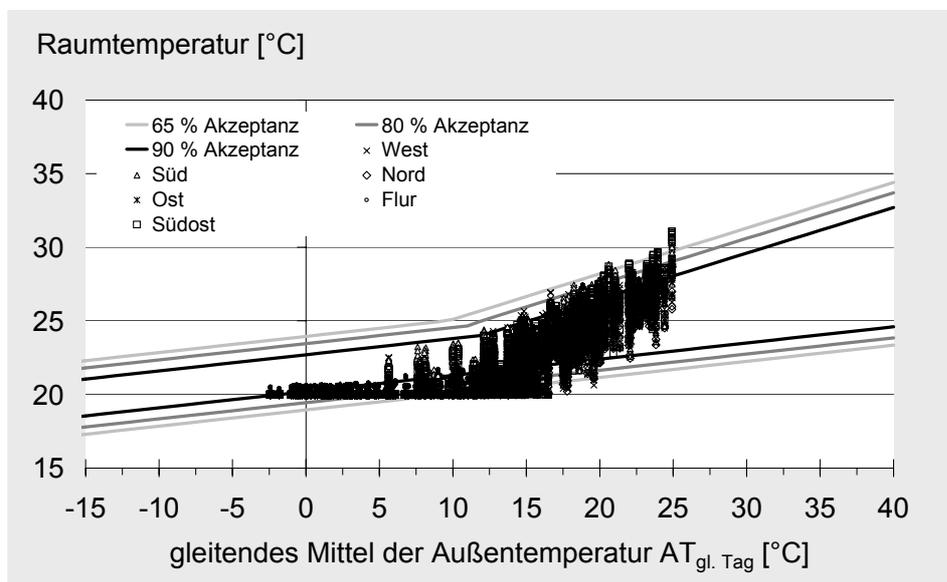


	Nord	Ost	Süd	West	Südost	Flur
	(h)	(h)	(h)	(h)	(h)	(h)
Klasse A	154 / 59	236 / 37	302 / 143	256 / 90	694 / 180	50 / 20
Klasse B	87 / 0	139 / 2	217 / 26	161 / 13	594 / 40	9 / 0
Klasse C	59 / 0	97 / 0	160 / 7	106 / 2	530 / 14	1 / 0

**Tab. 9.14:** Überhitzungsstunden (Bestand / Saniert)



**Abb. 9.18:** Verlauf der operativen Raumtemperatur während der Aufenthaltszeit im unsanierten und sanierten Gebäude. Die x-Achse ist logarithmisch skaliert. Verwendete Abkürzungen: S = Saniert, B = Bestand



**Abb. 9.19:** Komfortauswertung des sanierten Gebäudes nach der ATG-NL: Operative Raumtemperatur in °C des Nord-, Ost-, Süd-, West-, des Südostbüros und des Flurs in Abhängigkeit von der Außentemperatur im Jahr 2004.

#### Diskussion Modellierung der innen liegenden Verschattung in „Daysim“

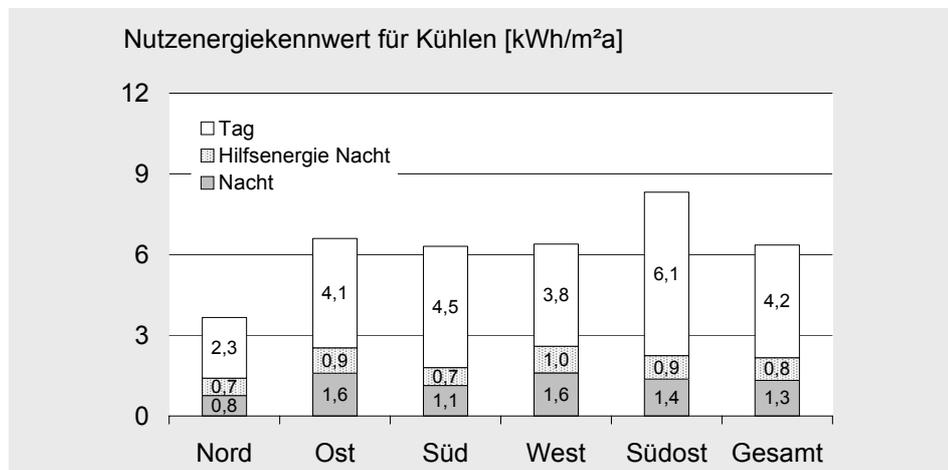
Hier gelten prinzipiell die Aussagen für das Simulationsmodell Gebäude W. Die Auswirkungen einer möglichen fehlerhaften Abbildung des Sonnen- und Blendschutzes auf das thermische Verhalten der Räume wurde auch hier untersucht. Im Fall eines werktags permanent hochgefahrenem Sonnen- und Blendschutzes erhöht sich im kritischsten Raum Südost der Kühlenergiebedarf um 8 % ( $8,3 \text{ kWh/m}^2\text{a}$  auf  $9,0 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ ). Das Gebäude reagiert also dank des Sonnenschutzglases weitgehend robust auf eine mögliche fehlerhafte Abbildung des Sonnen- und Blendschutzes oder ein von der Simulation abweichendes Nutzerverhalten.

#### Diskussion Kühlenergiebedarf

Für die simulierten Büros ergibt sich über das Jahr ein Nutzkältebedarf von  $6,4 \text{ kWh/m}^2\text{a}$  (Abb. 9.20). Darin sind keine Verteilungsverluste etc. inbegriffen. Dieser Wert stellt eine erhebliche Minderung gegenüber dem abgelesenen Wert von  $21,2 \text{ kWh/m}^2\text{a}$  dar, der, da er sich auf die gesamte Nutzfläche des

Gebäudes bezieht, auch nichtgekühlte Bereiche, wie z. B. die Verkehrsflächen enthält. Um den sommerlichen Komfort im Gebäude zu gewährleisten, ist der Kühlenergiebedarf von 6,4 kWh/m<sup>2</sup>a (bezogen auf die gekühlte Fläche) vertretbar.

**Abb. 9.20:** Errechneter Nutzenergiekennwert für das vorgeschlagene Kühlkonzept. Die Hilfsenergie für die Ventilatoren nachts ist ausgewiesen, da bei nicht erforderlicher Kühlung die Lüftungsanlage ausgeschaltet ist. Tagsüber wird die Hilfsenergie nicht berücksichtigt, da die Lüftungsanlage ohnehin betrieben wird. Hilfsenergie (Schätzwert) für die Ventilatoren: 0,6 W/m<sup>3</sup> Luft und Stunde



#### Berechnung Nutzenergiebedarf für Heizung mit Bilanz - Vergleich mit Messwerten

Der Vergleich zwischen dem aufgezeichneten Nutzenergiekennwert für Heizung und Warmwasser und dem mit „Bilanz“ errechneten Kennwert (Tab. 9.15, Monatsverbräuche Abb. A9.2.3-7) zeigt einen geringeren Bedarf und einen hohen Verbrauch im Sommer.

**Tab. 9.15:** Aufgezeichneter und berechneter Nutzenergiekennwert Heizung

	Nutzenergiekennwert (kWh/m <sup>2</sup> a)
Aufzeichnung Verbrauch (Heizung, Trinkwarmwasser)	268,3
Aufzeichnung Verbrauch (Heizung, Trinkwarmwasser) abzüglich Juni, Juli und August	235,2
„Bilanz“ (Heizung) Solltemperatur 22 °C, LW 2,0 1/h	237,7
„Bilanz“ (Heizung) Solltemperatur 20 °C, LW 2,0 1/h	193,4
„Bilanz“ (Heizung) Solltemperatur 22 °C, LW 0,7 1/h	86,5

Anmerkungen zur Ermittlung und Erklärungen der Abweichungen:

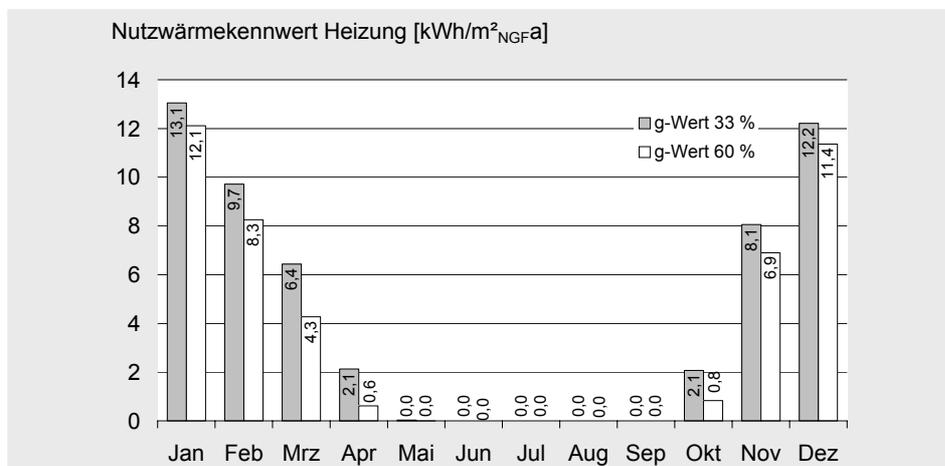
- Im Sommer treten hohe Wärmebezüge (z. B. Juni 12,5 kWh/m<sup>2</sup>a, August: 3,3 kWh/m<sup>2</sup>a) auf. Die Heizung wird saisonal nicht abgeschaltet und es bestehen regelungstechnische und hydraulische Fehler.
- Bei der Berechnung des Bedarfs ist eine einflussreiche unbekannte Größe der tatsächliche Luftwechsel in den Büros. Die Auswirkungen eines veränderten Luftwechsels (0,7 1/h und 2,0 1/h) zeigt Tab. 9.15.
- Ein weiterer Unsicherheitsfaktor ist die Raumsolltemperatur, die gemäß der Messungen oft über 20 °C liegt. Dies ist zum einen auf nicht bekannte Einstellungen der Raumsolltemperatur, sowie die internen und externen Wärmequellen zurückzuführen. Die Auswirkungen der Veränderung der Solltemperatur auf den Nutzenergiebedarf zeigt Tab. 9.15.
- Das Berechnungswerkzeug „Bilanz“ geht bei der Beheizung von einer ideal geregelten Luftheizung aus. Die Realität weicht davon erheblich ab.

- Die aufgezeichneten Verbräuche sind nicht klimanormiert, d. h. sie gelten für das Klima in Basel im Jahr 2004. Der errechnete Bedarf bezieht sich auf den Ort Freiburg (Klimazone 13).

Es konnte gezeigt werden, dass die hohen Wärmebezüge im Sommer, der Luftwechsel und die Raumsolltemperatur wichtige Gründe für die Unterschiede zwischen Berechnung und Aufzeichnung sind. Zieht man die aufgezeichneten Wärmebezüge für Juni, Juli und August von der Gesamtsumme der Verbräuche ab, so bleibt ein Verbrauch von 235,2 kWh/m<sup>2</sup>a übrig, der sich mit dem berechneten Nutzwärmekennwert von 237,7 kWh/m<sup>2</sup><sup>15</sup> gut deckt.

Den mit „Bilanz“ berechneten Heizwärmebedarf nach der Sanierung stellt Abb. 9.21 dar. Beim Gebäude ohne Sonnenschutzeinrichtungen würde der Einsatz des Sonnenschutzglases eine Erhöhung des Nutzwärmekennwerts um 11,0 % (5,6 kWh/m<sup>2</sup>a) bewirken. Bezieht man einen außen liegenden Sonnenschutz in die Überlegungen mit ein, so vermindern sich bei einer Verglasung mit einem g-Wert von 60 % die solaren Gewinne im Winter und die Erhöhung für das Sonnenschutzglas liegt bei 6 % (dynamische Simulation mit TRNSYS). Angesichts der Verbesserung des sommerlichen Komforts wird eine Erhöhung des Nutzwärmekennwerts akzeptiert.

Insgesamt zeigen die Berechnungen, dass der Heizwärmebedarf – trotz Sonnenschutzglas - durch eine Wärmerückgewinnung und eine erhöhte Dämmung der Fassade gesenkt werden kann. Schon allein die Beseitigung der Wärmebezüge im Sommer könnte den Heizwärmeverbrauch deutlich vermindern.



<sup>15</sup> Bei 22 °C Raumtemperatur und einem Luftwechsel von 2,0 1/h.

**Abb. 9.21:** Berechneter Nutzwärmekennwert für Heizung nach Sanierung mit „Bilanz“  
g-Wert 33 % (20 °C):  
50,0 kWh/m<sup>2</sup> a  
g-Wert 60 % (20 °C):  
44,4 kWh/m<sup>2</sup> a

## 9.3 Zusammenfassung und Fazit zu den Sanierungsstudien

### *Vergleich des Ist-Zustands und der Sanierung*

Wie der Vergleich der Überhitzungsstunden zwischen beiden Gebäuden zeigt, weist das Gebäude W vor der Sanierung mehr Überhitzungsstunden auf als das – ohne aktive Kühlung berechnete - Gebäude B. Dieses Verhältnis bleibt auch nach der Sanierung bestehen (Gebäude W weniger Überhitzungsstunden). Die Gründe dafür werden weiter unten diskutiert.

Der Heizwärmeverbrauch ist im Gebäude B vor der Sanierung höher als im Gebäude W, durch die neue Dämmung der Fassade (zusätzlich zum Austausch der Fenster), kann im Gebäude B allerdings eine größere Verbesserung erreicht werden.

	Einheit	Gebäude W			Gebäude B		
		Ost	West	Gesamt	Ost	West	Gesamt
<b>Überhitzungsstunden Bestand ATG-NL</b>							
Klasse A	h	322	237		236	256	
Klasse B	h	187	125		139	161	
<b>Überhitzungsstunden nach Sanierung</b>							
Klasse A	h	32	14		37	90	
Klasse B	h	7	0		2	13	
<b>Bestand</b>							
Nutzwärmekennwert Heizen	kWh/m <sup>2</sup> a			174,6			268,3
Nutzkältekennwert Kühlen*	kWh/m <sup>2</sup> a			-			21,2
<b>Nach Sanierung</b>							
Nutzwärmekennwert Heizen	kWh/m <sup>2</sup> a			61,4			50,0
Nutzenergiekennwert Kühlen	kWh/m <sup>2</sup> a			-			6,4

**Tab. 9.16:** Übersicht zu den Gebäudekennwerten vor und nach der Sanierung. Für das Gebäude B sind wegen der besseren Vergleichbarkeit nur die Räume Ost und West dargestellt. Anmerkung zum „Nutzkältekennwert Kühlen Bestand“: der Wert bezieht sich auf die gesamte Energiebezugsfläche des Gebäudes. Der „Nutzenergiekennwert Kühlen“ nach Sanierung bezieht sich zum einen nur auf die gekühlte Fläche, zum anderen beinhaltet er Hilfsenergieverbräuche.

### *Beurteilung des Potentials gemäß Typologie*

Beide Fallbeispiele bieten gemäß der Typologie gute Chancen für eine Verbesserung des sommerlichen Raumklimas ohne aktive Kühlung.

Leitgedanke der Sanierungsstudien war es jeweils ein robustes, vom Nutzerverhalten weitgehend unabhängiges Konzept zu schaffen. Die Studien für beide Gebäude zeigen, dass das Verbesserungspotential des sommerlichen Raumklimas von Gebäude W größer ist, als das von Gebäude B. Die zwei wesentlichsten Gründe sind die folgenden:

- Im Gebäude W kann mit der Abluftanlage ein nächtlicher Luftwechsel von 3,0 1/h erreicht werden. Beim Gebäude B ist aufgrund der Gebäudehöhe eine reine Abluftanlage nicht möglich, daher kann nur mit einem

Luftwechsel von 2,0 1/h nachts gelüftet werden. Damit können die Wärmelasten so nicht in genügend hohem Maß abgeführt werden.

- Im Gebäude B sind die Nutzer an eine aktive Kühlung gewöhnt. Aller Voraussicht nach werden sie dynamische Raumtemperaturen kritischer beurteilen, als dies im Gebäude W – ohne aktive Kühlung im Bestandsgebäude – der Fall sein wird.

#### *Grenzen der Verbesserung des sommerlichen Raumklimas mit Nachtlüftung*

Die Konzepte beinhalten für beide Gebäude eine Reduktion der externen Wärmequellen durch Sonnenschutzverglasung und einem innen, bzw. zwischen den Fensterscheiben laufendem Sonnen- und Blendschutz. Die internen Wärmelasten werden durch eine Präsenzsteuerung des Kunstlichtes reduziert. Eine ventilatorgestützte Nachtlüftung führt die Wärmelasten ab. Im Gebäude B muss aus den oben genannten Gründen zeitweise (über die Zuluft) aktiv gekühlt werden. Nachteilig, aber tolerabel - angesichts des Komfortgewinns im Sommer – am Einsatz des Sonnenschutzglases ist bei beiden Konzepten die Erhöhung des Heizwärmeverbrauchs, den die verminderten solaren Wärmequellen im Winter hervorrufen.

Beim Vergleich der Studien hinsichtlich der erreichten Komfortklasse nach der ATG-NL wird deutlich, dass das Gebäude W einen höheren thermischen Komfort aufweist als das Gebäude B. Dies liegt wie oben ausgeführt am geringeren erreichbaren Luftwechsel über die Zu- und Abluftanlage. Aus diesem Grund wird über die Zu- und Abluftanlage aktiv gekühlt. Die Kühlleistung ist jedoch zum einen durch den möglichen Luftwechsel (< Hilfsenergieaufwand), zum anderen durch die zulässige Temperaturdifferenz zwischen Raumluft und Zuluft begrenzt.

Das Gebäude B zeigt somit exemplarisch die Grenzen einer Verbesserung des sommerlichen Raumklimas über die Nachtlüftung auf. Selbst mit aktiv gekühlter Zuluft treten im kritischsten Raum<sup>16</sup> noch 40 Überschreitungsstunden der Klasse B auf (80 % der Nutzer akzeptieren die Raumtemperaturen). Grundsätzlich - aber in der Fallstudie nicht vorgesehen - ist eine zusätzliche Abfuhr der Wärmelasten über Deckensegel möglich und realistisch nachrüstbar, da die Kälteverteilung im Gebäude bereits existiert. Im Vergleich zum unsanierten Gebäude wäre selbst mit dieser Zusatzmaßnahme die erreichte Energieverbrauchssenkung noch immer beträchtlich.

<sup>16</sup> Der Raum Südost wird bisher zur Aufstellung von Kopierern etc. genutzt.

#### *Erfahrungen mit der Analyse des Ist-Zustands der Gebäude im Sommer und Winter*

Bei beiden Fallstudien wird auch deutlich, dass ein hoher Nutzerkomfort nur auf Basis einer gründlichen Analyse des Ist-Zustandes erreichbar ist. Somit konnten ergänzend zu Erkenntnissen, die das sommerliche Gebäudeverhalten betrafen, Defizite im Zusammenhang mit der Gebäudeheizung identifiziert werden. Bei beiden Gebäuden waren dies die hohen Wärmebezüge im Sommer, beim Gebäude W zusätzlich dazu das mangelhafte winterliche Raumklima bedingt durch die Fußbodenheizung. Dies unterstreicht, dass in der Sanierung ein hoher Nutzerkomfort in Verbindung mit einem geringen Energieverbrauch nur dann erreicht werden kann, wenn das Konzept sowohl das sommerliche als auch das winterliche Gebäudeverhalten umfasst.

## 9.4 Literatur

- [DIN EN 13779:2005-05] *Lüftung von Nichtwohngebäuden - Allgemeine Grundlagen und Anforderungen an Lüftungs- und Klimaanlageanlagen.* Berlin: Beuth Verlag.
- [DIN EN ISO 13791:2005-02] *Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Sommerliche Raumtemperaturen bei Gebäuden ohne Anlagentechnik - Allgemeine Kriterien und Validierungsverfahren (ISO 13791:2004); Deutsche Fassung EN ISO 13791:2004.* Berlin: Beuth Verlag.
- [DIN V 18599-7:2005-07] *Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz- End,- und Primärenergiebedarfs für Beheizung, Kühlung, Belüftung, Beleuchtung und Warmwasserbereitung - Teil 7: Endenergiebedarf von Raumluftechnik und Klimakältesystemen für den Nichtwohnungsbau.* Berlin: Beuth Verlag.
- [DIN V 18599-10:2005-07] *Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz- End,- und Primärenergiebedarfs für Beheizung, Kühlung, Belüftung, Beleuchtung und Warmwasserbereitung - Teil 10: Nutzungsbedingungen, Klimadaten.* Berlin: Beuth Verlag.
- [SWKI 95-3, 2001] *Jährlicher Energiebedarf von Lüftungstechnischen Anlagen.* Schönbühl (CH): Schweizerischer Verein von Wärme- und Klima-Ingenieuren.
- [Deutscher et al., 2000] Deutscher, P.; M. Elsberger; L. Rouvel. 2000. "Sommerlicher Wärmeschutz - Eine einheitliche Methodik für die Anforderungen an den winterlichen und sommerlichen Wärmeschutz, Teil 2". *Bauphysik* 22 (3), 178-184.
- [Feist, 2005] Feist, W. (Hrsg.). 2005. *Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser - Phase III, Protokollband Nr. 31: Energieeffiziente Raumkühlung.* Darmstadt: Passivhaus Institut.
- [Hoffmann et al., 2005] Hoffmann, C.; K. Voss. 2005. "Zur Ermittlung des Energiebedarfs für Kunstlicht in Bürogebäuden – Diskussion von Meßresultaten". *Bauphysik* 27 (4).
- [Orme et al., 1998] Orme, M.; M. Liddament; A. Wilson. 1998. *Numerical data for air infiltration & natural ventilation calculations.* Berichts-Nr.: AIC-TN-44-1994, Coventry (GB): Air Infiltration and Ventilation Centre, University of Warwick Science Park.
- [Recknagel et al., 2001] Recknagel, H.; E. Sprenger; E.-R. Schramek. 2001. *Taschenbuch für Heizungs- und Klimatechnik 01/02.* 70. Auflage. München: Oldenburg Industrie Verlag.
- [Reinhart, 2004] Reinhart, C. F. 2004. "Lightswitch-2002: a model for manual and automated control of electric lighting and blinds". *Solar Energy* 77, 15-28.
- [Reinhart, 2005] Reinhart, C. F. 2005. *Tutorial on the Use of Daysim Simulations for Sustainable Design.* Ottawa (CDN): National Research Council Canada.
- [Ward et al., 1998] Ward, G.; R. Shakespeare. 1998. *Rendering with RADIANCE. The Art and Science of Lighting Visualization.* San Francisco (USA): Morgan Kaufmann Publishers.

## 10 Schlussfolgerung und Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit war es zu untersuchen, inwieweit der thermische Komfort von Bestandsgebäuden im Rahmen einer Sanierung ohne eine aktive Kühlung verbessert werden kann und welches die Ausgangsvoraussetzungen sind, die ein Gebäude dafür bieten muss. Da die Außenluft als Wärmesenke in der Regel leicht erschlossen werden kann und somit eine Übertragbarkeit der Untersuchungen auf viele Bestandsgebäude gewährleistet ist, konzentrierte sich die Arbeit hauptsächlich auf die Nutzung der Außenluft zur nächtlichen Entwärmung.

Die einleitend aufgestellten Arbeitshypothesen kennzeichnen zugleich auch die Schwerpunkte der Arbeit

- Es lassen sich typologische Gebäudeeigenschaften definieren, die für eine Verbesserung des sommerlichen Raumklimas ohne aktive Kühlung Voraussetzung sind.
- Die eingesetzten Instrumente zur Gebäudeanalyse als Grundlage für die Erstellung eines Sanierungskonzeptes sind sinnvoll und der Aufwand gerechtfertigt. Die verwendeten Analyseinstrumente sind: Temperaturmessungen und Nutzerbefragungen in Sommer und Winter, sowie Aufzeichnungen des Energieverbrauchs und Simulationen.
- Das sommerliche Raumklima von Bestandsgebäuden lässt sich im Rahmen einer Sanierung mit Maßnahmen der passiven Kühlung deutlich verbessern, im Idealfall lässt sich der Einbau einer Klimaanlage vermeiden.

Zu Beginn dieses Kapitels werden die Arbeitshypothesen im Sinne der wissenschaftlichen Zielsetzung der Arbeit diskutiert (Kap. 10.1). Darauf folgt die Zusammenfassung der über die Hypothesen hinausgehenden zentralen Erkenntnisse (Kap. 10.2). Den Abschluss bildet die kritische Betrachtung der Hypothesen hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit auf die Praxis (Kap. 10.3).

### 10.1 Diskussion der Arbeitshypothesen

Die eingangs vorgestellten Arbeitshypothesen wurden sowohl mit theoretischen Grundlagen als auch anhand von Fallstudien und realisierten Beispielen überprüft. Sie lassen sich grundsätzlich bestätigen.

Durch die Literaturstudie konnten allgemeine Rahmenbedingungen formuliert, sowie übergeordnete Voraussetzungen identifiziert und auf Sanierungen übertragen werden. Ein geeigneter Kriterienkatalog dazu wurde entwickelt.

Da das Ziel dieser Arbeit die Verbesserung des sommerlichen Raumklimas war, müssen zur Erfassung des Gebäudezustands Analyseinstrumente eingesetzt werden, die über die Diagnose des baulichen Gebäudezustands hinausgehen: Temperaturmessungen, Nutzerbefragungen, Aufzeichnungen des Energieverbrauchs sowie Simulationen sind zweckmäßig und der Zusatzaufwand gerechtfertigt.

Die durchgeführten Sanierungsstudien zeigen, dass unter bestimmten Voraussetzungen mit einer nächtlichen Entwärmung über die Außenluft angenehme sommerliche Temperaturen erreicht werden können. Die Wirksamkeit dieser Strategie ist aber begrenzt, sodaß die Sanierungsstudien auch die Grenzen bei der Nutzung der Außenluft als Wärmesenke aufzeigen.

Im nachfolgenden Text wird zusammenfassend begründet, warum die Hypothesen bestätigt werden können.

### *Typologie*

Es lassen sich gebäudeabhängige Eigenschaften und gebäudeunabhängige Bedingungen formulieren, die für das Gelingen eines Sanierungskonzeptes mit passiver Kühlung entscheidend sind. Zur Klassifizierung der Eigenschaften und Bedingungen wurde eine Typologie erstellt.

Als wichtigste gebäudeunabhängige Eigenschaften können die Nutzerakzeptanz eines dynamischen Raumklimas, das Nichtvorhandensein einer Kleiderordnung und geringe interne Lasten gelten. Vorteilhaft wirken sich Nutzungseinheiten < 400 m<sup>2</sup> und eine Besitzstruktur aus, bei der Nutzer und Besitzer identisch sind.

Als zentrale gebäudeabhängige Eigenschaften gelten die Baukonstruktion (Bauweise), der g-Wert der gesamten Fassadenkonstruktion<sup>1</sup>, der Außenbezug und das Bürokonzept.

Eine Entscheidungsmatrix vereint beide Merkmalsgruppen und ermöglicht es so, in einem frühen Stadium der Entscheidungsfindung festzustellen, ob das sommerliche Raumklima des Gebäudes mit Nutzung der Außenluft als Wärmesenke, verbessert werden kann. Der Einsatz der Typologie hat sich auch im Rahmen der Sanierungsstudien bewährt.

### *Analyseinstrumente*

Die eingesetzten Analyseinstrumente brachten einander ergänzende Erkenntnisse, die zur Entwicklung geeigneter Strategien zur Verbesserung des sommerlichen Raumklimas notwendig waren. Ihr Einsatz war damit gerechtfertigt. Eine Aufwandsreduktion und damit eine Minderung des notwendigen Untersuchungszeitraumes kann durch die Konzentration auf eine Saison erreicht werden. Dabei sollte entweder die Jahreszeit, in der Komforteinschränkungen auftreten, oder eine Saison mit extremen Außentemperaturen (Sommer / Winter) gewählt werden.

- Die Erkenntnisse aus *Messungen* der Raumlufttemperatur und der relativen Feuchte stellen einen wichtigen Bestandteil der Analyse dar, deren Informationsgehalt beim Abgleich mit Daten der Außentemperatur und der Globalstrahlung noch zunimmt. Der Durchführungsaufwand für die Raummessungen ist gering, er steigt jedoch, wenn die Daten der Außentemperatur und Globalstrahlung selber erfasst werden müssen. Die Kosten für eine eigene Wetterstation liegen bei etwa 500 €.
- *Befragungen* liefern – besonders bei gleichbleibenden Nutzern vor und nach der Sanierung - wertvolle Hinweise zur Interaktion von Mensch und Gebäude. Vorteilhaft sind parallel durchgeführte Messungen. Werden anderweitig Bereiche mit Handlungsbedarf identifiziert, so unterstützen die Befragungsergebnisse die Festlegung von Prioritäten. Dem steht ein hoher Aufwand<sup>2</sup> gegenüber, insbesondere bei zwei Befragungszeitpunkten.

<sup>1</sup> In der Typologie wird dieser vereinfacht als Verglasungsanteil der Fassade dargestellt.

<sup>2</sup> einerseits zur Beantwortung der Fragen, andererseits bei der Auswertung

- Wöchentliche *Aufzeichnungen der Energiebezüge* dienen zunächst dazu, das Gebäude in eine Energieverbrauchsklasse einzuordnen. Eine Auswertung zusammen mit der Außentemperatur zeigte unerwartete Wärmebezüge im Sommer und eine Überschneidung von Heizen und Kühlen. Speziell bei größeren Gebäuden sind über die Eliminierung der sommerlichen Wärmebezüge große monetäre Einsparungen mit geringem Aufwand erreichbar. Nachteilig ist hier der organisatorische Zeiteinsatz, wenn keine Ablesung über die Gebäudeleittechnik möglich ist. Die Aufzeichnungen sollten mindestens 6 Monate (beginnend Mitte Winter oder Sommer) dokumentieren.
- Die *Simulationen* dienen zur Überprüfung der Wirksamkeit der Sanierungskonzepte. Voraussetzung dafür ist ein mittels der Messdaten (Innen-, Außentemperatur, Globalstrahlung) kalibriertes Simulationsmodell des Ist-Zustandes.

### *Machbarkeit*

Eine Verbesserung des sommerlichen Raumklimas mit Nachtlüftung ist möglich, wenn die Eignung des Gebäudes gemäß der entwickelten Entscheidungsmatrix festgestellt werden kann.

In sehr günstigen Fällen kann auf eine ergänzende aktive Kühlung völlig verzichtet (Gebäude W) werden. Bei grundsätzlich geeigneten Gebäuden, kann dennoch durch Planungszwänge eine zusätzliche aktive Kühlung erforderlich sein. Gründe können beispielsweise der durch die Gebäudehöhe bedingte Einsatz einer Zu- und Abluftanlage sein – mit der damit einhergehenden Begrenzung der möglichen Wärmeabfuhr sowie die Temperaturentwertung der Nutzer (Gebäude B).

Die vorrangige Nutzung der passiven Systeme erlaubt dennoch eine deutliche Reduktion der Kühlenergie.

## 10.2 Zentrale Erkenntnisse der Arbeit

### 10.2.1 Ergebnisse der theoretischen Auseinandersetzung mit der Verbesserung des Raumklimas ohne aktive Kühlung (Teil A)

#### *Beurteilung des thermischen Komforts und die Erwartungshaltung der Nutzer*

Die Frage warum sich der thermische Komfort in nicht klimatisierten Gebäuden mittels des PMV-Modells nur eingeschränkt vorhersagen lässt, kann mit dem Einfluss der Erwartungshaltung und der Existenz adaptiver Prozesse beantwortet werden. Diese Erkenntnisse führten dazu, dass das PMV-Modell unter Rückgriff auf die adaptive Theorie erweitert wurde.

Von den Richtlinien, die adaptive Komfortmodelle bereits berücksichtigen, erscheint die niederländische Publication 74 „Thermische Behaaglijkheid“ (ATG-NL) zur Beurteilung von passiv gekühlten Gebäuden besonders gut geeignet, da der Bezugswert auf die Außentemperatur der vergangenen drei Tage das thermische Komfortempfinden plausibel an die Außentemperatur koppelt.

Bei der Anwendung dieser Richtlinien gegenüber der DIN EN ISO 7730:2006-05 geht es jedoch nicht darum, ein mangelhaftes sommerliches Raumklima durch Berechnungen zu beschönigen. Ist der thermische Komfort unzulänglich, so bildet sich dies auch bei einer Beurteilung mit den Richtlinien ab, die um das adaptive Komfortmodell erweitert sind. Dies bestätigen Bewertungen auf der Grundlage von einjährigen Temperaturmessungen.

Bei Gebäudesanierungen mit ausschließlich passiver Kühlung ist es wichtig, die Nutzer über das zu erwartende Raumklima und die zu erwartenden „Kühlleistungen“ realistisch zu informieren. Bei bislang nicht gekühlten Bestandsgebäuden umfasst dies die Aussage, dass sich das Raumklima einerseits verbessern wird, andererseits aber auch weiterhin dynamisch bleibt und Temperaturspitzen nicht „gekappt“ sondern nur abgedämpft werden. Eine mögliche Einflussnahme durch die Nutzer auf die Raumtemperatur sollte auch eine Information über ihre Grenzen beinhalten („Temperierung“ statt „Kühlung“).

#### *Die Rechtslage zum Thema Raumtemperaturen – Auswirkungen auf Bestandsgebäude*

Aus der Komplexität der Rechtslage ergibt sich ein hoher Stellenwert der DIN 4108-2:2003-07 als rechtsverbindlich anzuwendende Vorschrift bei Neubauten. Bei Bestandsgebäuden gilt sie dann, wenn ein Großteil des Gebäudes saniert wird. Als Mindeststandard garantiert diese Norm allerdings nicht, dass in allen Teilen des Gebäudes ein unkritisches sommerliches Temperaturverhalten erwartet werden kann. Die Konvergenz der Nutzungsbedingungen mit denen der Norm muss kritisch überprüft werden.

Unabhängig davon kommen bei allen Gebäuden (Neubau, Altbau, technische Systeme etc.) die arbeits- und mietrechtlichen Vorschriften zur Anwendung. Bei Vermietung einer Immobilie zur Nutzung z. B. als Büro muss vom Vermieter ein der Nutzung adäquater Zustand gewährleistet und aufrechterhalten werden. Dies gilt auch für die Innentemperaturen. Das bedeutet, dass unabhängig von der Gültigkeit der DIN 4108-2:2003-07 das sommerliche Raumklima mit geeigneten Maßnahmen „üblichen Erwartungen“ angepasst werden muss. Da die Rechtsurteile bezugnehmend auf das Mietrecht zeigen, dass ein der Nutzung adäquater Zustand gewährleistet und aufrechterhalten werden muss, ist ein Betrieb des Gebäudes mit passiven Kühlungsmaßnahmen gegen „die Erwartungen“ des Mieters nicht möglich.

#### *Klimatische Randbedingungen für die Nachtlüftung und die Klimaerwärmung*

Die Untersuchung der klimatischen Faktoren bestätigt zunächst, dass die Umgebungsbedingungen in Nordeuropa für die Nutzung der Außenluft als Wärmesenke günstig sind. Dass sich dies unter den veränderten Rahmenbedingungen des Klimawandels ändern kann, zeigen die Erfahrungen der Sommer 2003 und 2006. Die hohen Temperaturen während dieser Hitzeperioden minderten die Wirksamkeit der Nachtluft als Wärmesenke beträchtlich. Messungen im Sommer 2003 zeigten, dass Gebäude, die die Nachtluft als Kältesenke nutzten, während dieser langen Hitzeperiode an ihre Grenzen stießen.

Wird die Wirksamkeit passiver Kühlkonzepte mit Hilfe thermischer Simulationen überprüft, so kann die Verwendung von Standard-Wetterdatensätzen dazu führen, dass die Bewertung der Konzepte günstiger ausfällt als die Realität. Dies kann zwei Ursachen haben:

- Lange Hitzeperioden (Sommer 2003 und 2006) und Sommer, deren Monatsmittel über dem der Standard-Wetterdatensätze für thermische Simulationen liegen (z. B: Sommer 2004).
- Auf der Ebene des Mikroklimas können Temperaturabweichungen beispielsweise zwischen dem Stadtzentrum und einer Wetterstation außerhalb der Stadt auftreten.

Aus diesem Grund sollten besonders dann, wenn das sommerliche Raumklima untersucht wird, die Standardwetterdatensätze bezüglich ihrer Realitätsnähe kritisch hinterfragt werden.

#### *Angenehme sommerliche Raumtemperaturen ohne aktive Kühlung – Strategien*

Bei der Betrachtung der Energiebilanz eines Raumes wird auf der Lastenseite deutlich, dass die externen Wärmelasten dominierend sind. Strategien zur Verbesserung des sommerlichen Raumklimas müssen daher bei der Reduktion der externen sowie der internen Lasten ansetzen. Welche natürlichen Wärmesenken bei Bestandsgebäuden zur Wärmeabfuhr genutzt werden können, ist von den örtlichen Gegebenheiten abhängig. In den meisten Fällen ist die Außenluft besonders leicht zu erschließen.

Messungen an bereits sanierten Gebäuden belegen, dass ohne außen liegenden Sonnenschutz ein Luftwechsel von 2,0 1/h zur Entwärmung nicht ausreicht. In diesem Fall ist zeitweise mit hohen sommerlichen Raumtemperaturen zu rechnen. Bei Nutzern mit einer geringen Toleranz gegenüber dem Raumklima sind ergänzende Maßnahmen (z. B. aktive Kühlung) notwendig.

Bei dezentralen Abluftsystemen, die auch unter ungünstigen Bedingungen (hohe Temperaturen) die Luft der Fassadengrenzschicht in den Raum bringen, ist die Beschaffenheit der Fassade von hoher Bedeutung. Exemplarische Messungen des Mikroklimas an Gebäudefassaden bestätigen, dass die Temperatur der Fassadengrenzschicht tagsüber immer über der Außentemperatur liegt und dass die Materialien der Fassade bestimmen, wie hoch diese Temperaturdifferenz ist.

#### *Vergleich der Investitionskosten passiver und aktiver Systeme*

Die Ermittlung der Investitions- und Nutzungskosten passiver (begrenzt auf die Nutzung der Außenluft) und aktiver Systeme zur Verbesserung des sommerlichen Raumklimas zeigt, dass schon bei den Investitionskosten erhebliche Unterschiede zwischen den Systemen auftreten.

Allerdings dienen nicht alle Systeme ausschließlich dazu, die sommerlichen Raumtemperaturen zu senken. Da eine ventilatorgestützte Lüftung auch die Lufthygiene verbessert, werden die aufzuwendenden Kosten exemplarisch nur zu 50 % in Ansatz gebracht. Als Vergleichssystem, das ausschließlich das sommerliche Raumklima verbessert, wird Sonnenschutzglas angeführt.

- Die Ausstattung des Referenzgebäudes mit Sonnenschutzglas erfordert Mehrinvestitionen von 7 €/m<sup>2</sup>.
- Eine Abluftanlage zur nächtlichen Entwärmung führt zu Mehrkosten von 16 €/m<sup>2</sup>.
- Eine Zu- und Abluftanlage mit aktiver Kühlung und Wärmeabfuhr über Ventilator-konvektoren oder eine Deckenkühlung verursacht Mehrkosten zwischen 50 und 60 €/m<sup>2</sup>.

Beispielhaft zeigt sich hier, dass Maßnahmen zur Verringerung der Kühllasten oftmals günstiger sind, als solche zur Erhöhung der Wärmeabfuhr.

Betriebsenergieaufwand und Betriebskosten sind für die Abluftanlage eher gering, bei den Zu- und Abluftsystemen mit aktiver Kühlung steigen der Primärenergiebedarf sowie die Betriebskosten.

## 10.2.2 Ergebnisse der Gebäudeanalyse und Fazit zu den Sanierungsstudien (Teil B)

### *Ergebnisse der Messungen von Raumlufttemperatur und relativer Feuchte*

Im Winter ist in beiden Gebäuden die geringe Luftfeuchtigkeit auffallend. Das durch die trockene Luft starke Befindlichkeitseinschränkungen bei der Belegschaft auftreten, bestätigen die Ergebnisse der Nutzerbefragungen im Gebäude W (Fragenkomplex im Gebäude B gestrichen). Für den Sommer zeigen die Messungen, dass die Einhaltung der Komfortkriterien im Fall einer aktiven Kühlung (Gebäude B) kein Problem darstellt, ohne Kühlung hingegen trotz Sonnenschutz und moderater Fensterflächenanteile keine befriedigenden Ergebnisse erzielt werden können (Gebäude W).

### *Beurteilung der Bestandsgebäude durch die Nutzer*

Insgesamt ist es sehr auffällig, dass die Bewertungen zu beiden Befragungszeitpunkten im Gebäude W weitaus schlechter ausfallen als dies im Gebäude B der Fall ist. Der Vergleich zeigt, dass im Winter und Sommer die größte Differenz im Bereich der Büroausstattung, die den Sanierungsbedarf von Gebäude W unterstreicht, und bei der Bewertung der raumeigenen Geräusche, die die höhere Raumbelastung im Gebäude W spiegelt, auftritt. Die hohe Differenz bei der Zufriedenheit mit der Raumtemperatur im Winter unterstreicht die Unzulänglichkeit der Fußbodenheizung im Gebäude W. Im Sommer lässt die aktive Kühlung die Bewertung der Raumtemperatur im Gebäude B besser ausfallen als im Gebäude W. Auch die Zufriedenheit mit dem Arbeitsplatz ist zu beiden Befragungszeitpunkten im Gebäude W geringer als im Gebäude B, gefolgt vom Bereich der Sauberkeit. Im Sommer treten große Abweichungen bei der Bewertung der Zugluft auf, die im Gebäude W auf eine ungewünschte Querlüftung durch ständig geöffnete Fenster zurückzuführen ist.

### *Wöchentliche Aufzeichnung der Energiebezüge*

In beiden Gebäuden wurden Wärmebezüge im Sommer festgestellt. Zusätzlich konnte beim Gebäude B gezeigt werden, dass sich Heizung und Kühlung in einem erheblichen Maß überschneiden.

### *Simulationen*

Der Vergleich des tatsächlichen Gebäudeverhaltens (Messungen) mit den Simulationen machte bei beiden Gebäuden deutlich, dass sich das reale Gebäude träger verhält als in den Simulationen. Grund dafür ist das Zusammenwirken unterschiedlicher Nutzermodelle und der thermische Austausch innerhalb des Gebäudes (nach oben zunehmende Temperaturschichtung). Extreme Temperaturspitzen werden in der Realität zusätzlich durch das Nutzerverhalten<sup>3</sup> ausgeglichen.

<sup>3</sup> gezieltes Fensteröffnen und -schließen, Bedienung Sonnenschutz

Das dem Simulationsmodell zugrunde liegende Nutzermodell berücksichtigt extreme Wettersituationen nicht.

### Fazit zu den Sanierungsstudien

Die Analyse des Ist-Zustandes zeigt bei beiden Gebäude Defizite sowohl im sommerlichen als auch im winterlichen Gebäudeverhalten auf. Dies unterstreicht, dass in der Sanierung ein hoher Nutzerkomfort in Verbindung mit einem geringen Energieverbrauch nur dann erreicht werden kann, wenn das Konzept sowohl das sommerliche als auch das winterliche Gebäudeverhalten umfasst.

Beide Fallbeispiele bieten gemäß der Typologie gute Chancen für eine Verbesserung des sommerlichen Raumklimas ohne aktive Kühlung. Leitgedanke der Sanierungsstudien war es jeweils ein robustes, vom Nutzerverhalten weitgehend unabhängiges Konzept zu schaffen. Die Studien für beide Gebäude zeigen, dass das Verbesserungspotential des sommerlichen Raumklimas von Gebäude W größer ist, als das von Gebäude B. Die zwei wesentlichsten Gründe sind die folgenden:

- Im Gebäude W kann mit der Abluftanlage ein nächtlicher Luftwechsel von 3,0 1/h erreicht werden. Beim Gebäude B ist aufgrund der Gebäudehöhe eine reine Abluftanlage nicht möglich. Somit kann nachts nur ein Luftwechsel von 2,0 1/h erreicht werden, der die Wärmelasten nicht im genügend hohem Maß abführt: Es muss zusätzlich gekühlt werden.
- Im Gebäude B sind die Nutzer an eine aktive Kühlung gewöhnt und werden dynamische Raumtemperaturen kritischer beurteilen, als dies im Gebäude W – ohne aktive Kühlung im Bestandsgebäude – der Fall sein wird.

Doch selbst mit aktiver Kühlung über die Lüftung bleibt der erreichte thermische Komfort von Gebäude B hinter dem von Gebäude W zurück. Die Kühlleistung ist zum einen durch den möglichen Luftwechsel (< Hilfsenergieaufwand), zum anderen durch die zulässige Temperaturdifferenz zwischen Raumluft und Zuluft begrenzt. Das Gebäude B zeigt somit exemplarisch die Grenzen einer Verbesserung des sommerlichen Raumklimas über die Nachtlüftung auf.

Wie ist mit dem dynamischen Raumklima aber auch mit den Grenzen, die sich bei der Nutzung der Außenluft als Wärmesenke ergeben, umzugehen? Die Nutzererwartung an das Raumklima ist zentral. Ist eine passive Kühlung geplant, so ist es wichtig, die Nutzer über das zu erwartende Raumklima realistisch zu informieren. Bei einer sehr hohen Nutzererwartung an das Raumklima (Bestandsgebäude mit bestehender Kühlung), aber auch während langer Hitzeperioden, in denen unzumutbar hohe Raumtemperaturen auftreten, ist die temporäre Nutzung einer Zusatzkühlung denkbar. Dies hat allerdings den Nachteil von zwei Systemen und den damit verbundenen höheren Kosten.

Die Sanierungsstudie für das Gebäude B zeigt, dass eine Reduktion der internen und externen Wärmelasten und eine primäre Nutzung der Außenluft als Kältesenke den Energieaufwand für eine Zusatzkühlung zumindest deutlich reduziert.

## 10.3 Praktische Bedeutung der Ergebnisse

Im ersten Teil des Kapitels wurden die Hypothesen aus wissenschaftlicher Perspektive betrachtet. Abschließend sollen die Ergebnisse auf ihre Übertragbarkeit in die Praxis hin bewertet werden.

Wie die Untersuchungen im ersten Teil der Arbeit zeigen, gibt es im Gebäudebestand ein deutliches Sanierungspotential. Bei einigen Gebäuden kann das sommerliche Raumklima auch ohne eine aktive Kühlung verbessert werden. Um herauszufinden, bei welchen Gebäuden dies der Fall ist, ist die Gebäudetypologie – wie ihre Eignung bei der Bewertung der Fallbeispiele und der Sanierungsstudien zeigt – auch in der Praxis anwendbar.

Allerdings kann mit Bestandsgebäuden - noch dazu mit solchen, bei denen das Raumklima ohne aktive Kühlung verbessert werden soll - in der Planung nicht genau so umgegangen werden, wie mit Neubauten. Daher wurde im Rahmen der wissenschaftlichen Herangehensweise dem eigentlichen Sanierungskonzept eine gründliche Analyse des Ist-Zustandes vorangestellt. Trotz des hohen Erkenntnisgewinns, scheint es allerdings unwahrscheinlich, dass im praktischen Planungsverlauf im Rahmen der Voranalyse so umfangreiche Untersuchungen angestellt werden. Es stellt sich die Frage, wie die Zusatzinformationen mit reduziertem Zeitaufwand erreicht werden können.

Sowohl bei Messungen als auch bei Nutzerbefragungen ist die Konzentration auf einen Untersuchungszeitraum möglich. Der Aufwand bei den Messungen beschränkt sich auf das Auslesen und Auswerten der Logger. Die Auswertung kann mit vereinheitlichten Auswertungsroutinen (z. B. Makros) erheblich beschleunigt werden, sodass der Hauptaufwand in der Interpretation der Ergebnisse liegt. Deren Dauer ist von der Komplexität des Gebäudes und der Erfahrung des Anwenders abhängig.

Ähnlich verhält es sich bei den Nutzerbefragungen. Erhebliche Zeitersparnisse können über das maschinelle Auslesen der Befragungsbögen und die Auswertung über entsprechende Auswertungsroutinen erreicht werden. Ein bedeutsamerer Faktor ist hier jedoch der Zeitaufwand der Nutzer für die Beantwortung der Fragen, da die untere Grenze für eine statistisch stichhaltige Auswertung der Ergebnisse bei einer Populationsgröße von etwa 30 Personen<sup>4</sup> liegt. Bei weniger Personen erhalten die Aussagen von kleinen Gruppen ein größeres Gewicht und sind bei der Auswertung dementsprechend weniger stark zu werten. Eine Möglichkeit zur Reduktion des Befragungsumfangs kann das Kürzen von Fragenkomplexen zu Bereichen (z. B. „Raumausstattung“), die ohnehin erneuert werden sollen, sein.

Die Erfassung der Energiebezüge diente dem rein akademischen Interesse, das Gebäude in eine Energieverbrauchsklasse einordnen zu können. Dabei zeigte es sich jedoch, dass hier ein realer Nutzen für den Gebäudebetreiber möglich ist: Mit wenig Aufwand<sup>5</sup> können Fehlbezüge (z. B. Heizen im Sommer) festgestellt werden, deren Beseitigung eine sofortige Kostenreduktion bewirkt.

Zusammenfassend wurde gezeigt, dass eine tiefgehende Analyse wichtige Grundlage eines Sanierungskonzeptes ist. Bei der Anwendung der Analyseinstrumente erschließt sich über die Standardisierung ein deutliches Potential zur Aufwandsreduktion, sodaß der Mehraufwand in vertretbaren Grenzen liegt.

<sup>4</sup> Tiede, M; Voss, W.: Schließen mit Statistik – Verstehen. Oldenbourg Verlag, München / Wien, 2000

<sup>5</sup> wenn von einer Ablesung über die Gebäudeleittechnik ausgegangen wird

Die Sanierungsstudien zeigen Möglichkeiten und Grenzen der Verbesserung des sommerlichen Raumklimas mit passiver Kühlung auf. Die vorgestellten Wege zu einem angenehmen sommerlichen Raumklima machen deutlich, dass gerade in der Sanierung Konzepte in der Regel gebäudespezifische Lösungen darstellen. Diese lassen sich nur begrenzt als allgemein gültige Konzeptbaukästen auf andere Gebäude übertragen.

Mit der Beschreibung der theoretischen Grundlagen und dem Aufzeigen exemplarischer Lösungsstrategien soll die Arbeit einen Beitrag dazu leisten, Sanierungen zu einer „zweiten Chance“ werden zu lassen.

## Verzeichnis der Formelzeichen

### Griechische Buchstaben

	Einheit	Erläuterung
$a$	$\text{m}^2/\text{s}$	Temperaturleitfähigkeit
$\alpha_K$	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	Konvektiver Wärmeübergangkoeffizient
$\delta$	$\text{m}$	Eindringtiefe
$\vartheta$	$^\circ\text{C}$	Lufttemperatur
$\lambda$	$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	Wärmeleitfähigkeit
$\rho$	$\text{kg}/\text{m}^3$	Rohdichte
$\rho_{sol}$	-	Reflexionsgrad im solaren Spektralbereich
$\tau$	-	Lichttransmissionsgrad
$\Delta$	variabel	Amplitude

### Lateinische Buchstaben

$b$	$\text{kJ}/(\text{m}^2\cdot\text{s}^{1/2})$	Wärmeeindringkoeffizient
$c$	$\text{kJ}/(\text{m}^3\text{K})$	spezifische Wärmekapazität pro Volumen
$c$	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	spezifische Wärmekapazität pro Gewicht
$\dot{q}$	$\text{W}/\text{m}^2$	Wärmestromdichte

### Indizes

NGF	Nettogrundfläche
NF	Nutzfläche
BGF	Bruttogeschossfläche
max	Maximal
K	konvektiv
$a$	außen
$i$	innen

### Normenspezifische Formelzeichen

#### SIA V382/2:1992

$A_B$	Bodenfläche ( $\text{m}^2$ )
$A_i$	Fläche des Bauteils
$f$	Verhältnis des dynamischen zum stationären U-Wert (-)
$m$	speicherwirksame Masse eines Bauteils ( $\text{kg}/\text{m}^2$ )
$M_i$	Speicherwirksame Masse des Bauteils ( $\text{kg}/\text{m}^2$ Bauteilfläche)

#### DIN 4108-2:2003-07, DIN 4108-6:2003-06, DIN EN 832:2003-06

$A_G$	Nettogrundfläche
$A_i$	Fläche des Bauteils
$c_i$	spezifische Wärmespeicherfähigkeit der Lage im Bauteil
$C_{\text{wirk}}$	wirksame Speicherkapazität ( $\text{Wh} / \text{K}$ )
$d_i$	wirksame Schichtdicke
$\rho_i$	Werkstoffdichte der Lage im Bauteil

#### VDI 2078:1996

$A_{FB}$	Fußbodenfläche
$c$	Wärmekapazität
$m$	Masse der wärmespeichernden Schicht
$R_i$	Wärmedurchlasswiderstand ( $(\text{m}^2\cdot\text{K})/\text{W}$ )

**ATG-NL**

$T_a$	°C	Außentemperatur
$T_{a,ref}$	°C	Referenztemperatur
$T_{oper}$	°C	Operative Raumtemperatur

**ASHRAE-55:04**

$T_{comf}$	°C	Komforttemperatur
$T_{a,out}$	°C	Monatsmittel Außentemperatur

**Formelzeichen aus der Statistik**

$\sigma$	Standardabweichung
$x$	Ausprägung der Untersuchungsvariablen
$\mu$	Arithmetischer Mittelwert
$n$	Zahl der Beobachtungen
$r$	Korrelationskoeffizient
$D_i$	Differenz zwischen je zwei Rangplätzen

## Veröffentlichungen im Rahmen dieser Arbeit

1. Hoffmann, C., „*Neue Chancen für den Gebäudebestand*“, in: Voss, K., Löhnert, G., Herkel, S. *et al.*, *Bürogebäude mit Zukunft*, TÜV-Verlag, Köln, 2005 (2. Aufl. Verlag Solarpraxis, Berlin, 2006).
2. Hoffmann, C., Voss, K., „*Das Potential der passiven Kühlung im Gebäudebestand Bürobauten - Vorschlag einer Typologie*“, *Bauphysik*, 27 (6), S. 346-358, 2005.
3. Hoffmann, C., „*Was wissen wir über den Gebäudebestand an Nichtwohn- und Bürogebäuden in Deutschland und Europa?– eine Literaturrecherche*“, *gi Gesundheits-Ingenieur*, 127 (2), S. 69-75, 2006.
4. Hoffmann, C., Voss, K., „*Passive cooling of existing office buildings - proposal of a building typology*“, *PLEA - The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture*, Geneva, CH, 2006.
5. Voss, K., Pfafferoth, J., *Energieeinsparung contra Behaglichkeit?*, Verlag BBR, Bonn, 2006.  
(Mitarbeit)