



BERGISCHE  
UNIVERSITÄT  
WUPPERTAL

# **Charakterisierung und Zündwirksamkeit von inerten heißen Partikeln für Staubschichten in verfahrenstechnischen Anlagen**

Dissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades  
der Ingenieurwissenschaften  
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

in der  
Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik  
der  
**Bergischen Universität Wuppertal**

Vorgelegt von  
**Jonathan Bechem**  
aus Remscheid

Wuppertal 2020

Die Dissertation kann wie folgt zitiert werden:

urn:nbn:de:hbz:468-20210311-100337-7

[<http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=urn%3Anbn%3Ade%3Ahbz%3A468-20210311-100337-7>]

DOI: 10.25926/s9de-6q09

[<https://doi.org/10.25926/s9de-6q09>]

## **Prüfungskommission**

Vorsitzender:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Manuel Löwer, Bergische Universität Wuppertal
Gutachter	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uli Barth Bergische Universität Wuppertal
Gutachter	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Norbert Kockmann Technische Universität Dortmund
Mitglied	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Fabian Brännström Bergische Universität Wuppertal

Tag der mündlichen Prüfung: 17.12.2020

## **Erklärung**

Hiermit versichere ich, diese Dissertation selbstständig und nur mit den angebenen Hilfsmitteln und Quellen verfasst zu haben.

---

Jonathan Bechem

Zur Ehre Gottes  
und in Dankbarkeit Ihm gegenüber

## **Danksagung**

Zu Beginn möchte ich mich bei meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Uli Barth bedanken. Er ermöglichte mir die Erstellung dieser Dissertation und stand für fachliche Fragen immer bereitwillig zur Verfügung. Darüber hinaus bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Norbert Kockmann, der ebenfalls für fachliche Fragen und als Zweitgutachter zur Verfügung stand. Des Weiteren gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Manuel Löwer als Vorsitzender und Herrn Prof. Dr.-Ing. Fabian Brännström als Mitglied der Prüfungskommission. Bei der gesamten Prüfungskommission möchte ich mich für die gute und harmonische mündliche Prüfung bedanken, die trotz der aktuellen SARS-CoV-2 Pandemie stattfinden konnte.

Ebenso gilt mein Dank dem gesamten Lehrstuhl Methoden der Sicherheitstechnik/Unfallforschung der Bergischen Universität Wuppertal sowie meinen dortigen Kollegen und Kolleginnen, die mich ebenfalls während der Promotionszeit persönlich und fachlich unterstützt haben.

In Kooperation mit der Fagus-GreCon Greten GmbH & Co. KG konnte ich das Grundlagenforschungsvorhaben: „Sicherheitliche Untersuchungen zur Identifizierbarkeit und Beherrschbarkeit hochmobiler zündwirksamer Partikel“ bearbeiten, woraus die Idee zu dieser Dissertation entstand. Daher möchte ich mich an dieser Stelle beim gesamten Projektteam für die sehr gute, kreative und erfolgreiche Zusammenarbeit bedanken.

Zum Schluss gilt mein Dank meiner Verlobten, meiner Familie und meinen Freunden, die mich immer wieder ermutigt haben, das Promotionsvorhaben weiterzuverfolgen und abzuschließen.

## Zusammenfassung

„Heiße Partikel“ werden in den 13 Zündquellenarten der [DIN EN 1127-1] unter dem Punkt „Flammen und heiße Gase (einschließlich heißer Partikel)“ zwar genannt und es werden als Beispiel Schweißperlen angeführt, aber eine genauere Definition dieser Partikeln erfolgt nicht. Dabei müssen diese heißen Partikeln im Zuge einer Gefährdungsbeurteilung gemäß § 5 Arbeitsschutzgesetz [ArbSchG] in Verbindung mit der Technischen Regel für Gefahrstoffe [TRGS 720] als mögliche Zündquelle eines Staubbrandes oder einer Staubexplosion in einer staubverarbeitenden Anlage grundsätzlich berücksichtigt werden. Zu dieser Zündquelle liefert die vorliegende Dissertation grundlegende Informationen, insbesondere in Bezug auf inerte heiße Partikeln.

Basierend auf einer Literaturrecherche erfolgt die Definition des inerten heißen Partikels als neuartige Zündquelle. Bei dieser Zündquelle handelt es sich um erwärmte metallische oder mineralische Partikeln, die selbst nicht brennen.

Für die sicherheitstechnische Zündquellenbewertung der inerten heißen Partikeln wird ein Versuchsaufbau vorgestellt, mit dessen Hilfe die Zündwirksamkeit bewertet werden kann. Hierfür wird als neue Kenngröße die Zündgrenztemperatur beschrieben und angewendet.

Des Weiteren erfolgt die sicherheitstechnische Bewertung mit einer Hot-Spot-Theorie. In diesem Zuge wird analysiert, inwiefern die Zündgrenztemperaturen mit dieser analytischen Gleichung abgeschätzt werden können. Dies erfolgt durch den Vergleich der Zündgrenztemperaturen mit den errechneten Temperaturverläufen der Hot-Spot-Theorie. Da in beiden Methoden eine Korrelation zwischen Partikelgröße und Partikeltemperatur ermittelt wird, die eine Entzündung der Staubschicht initiiert, ist dieser Vergleich sinnvoll. Er zeigt, dass mit einer Hot-Spot-Theorie unter gewissen Umständen die Zündgrenztemperaturen abgeschätzt werden können.

Als weitere und in dieser Dissertation letzte Bewertung inerter heißer Partikeln wird ihre Kritikalität beschrieben. Die Kritikalität beschreibt die Zündwirksamkeit auf einen verfahrenstechnischen Prozess. Hierfür findet eine qualitative Bewertung über einen eigens entwickelten Kritikalitätsgraphen statt.

Zum Schluss (im Anhang B) wird der Demonstrator eines Versuchsaufbaus vorgestellt und diskutiert, der eine reproduzierbare Erwärmung inerter heißer Partikeln mit gleichzeitiger Bestimmung des abgehenden Wärmestroms ermöglicht. Die ersten Versuche (mit diesem Demonstrator) zeigen reproduzierbare Ergebnisse, wobei noch ein großer Optimierungsbedarf am Versuchsaufbau besteht.

## **Abstract**

### **Characterization and ignition efficiency of inert hot particles for dust layers in process plants**

"Hot particles" are mentioned among the 13 ignition sources of [DIN EN 1127-1] in the category "Flames and hot gases (including hot particles)". Welding beads are given as an example, but there is no more detailed definition of these particles. They must be considered in the context of a risk assessment in accordance with § 5 [ArbSchG] in combination with [TRGS 720] as a possible ignition source of a dust fire or dust explosion in a dust processing plant. For this purpose, this dissertation provides important and helpful information on this ignition source, especially for the inert hot particle.

The definition of the inert hot particle as a new ignition source is based on literature research. This ignition source is a heated metallic or mineral particle which does not burn itself.

For the safety-related evaluation of the ignition source of the inert hot particles, a test setup is presented to evaluate the ignition effectiveness. For this purpose, the ignition limit temperature is described and used as a new parameter.

The safety assessment is carried out using a hot spot theory. In this course, it is analysed to what extent the ignition limit temperatures can be estimated with this analytical equation. For this purpose, the ignition limit temperatures are compared with the calculated temperature curves of the hot spot theory. This comparison makes sense, since in both methods a correlation between particle size and particle temperature is determined which initiates an ignition of the dust layer. This shows that under certain circumstances a hot spot theory can be used to estimate the ignition limit temperatures. The criticality of the particles is the last evaluation of inert hot particles in this dissertation. Criticality describes the ignition efficiency of a process. For this purpose, a qualitative evaluation takes place by means of a criticality graph.

Finally (in annex B), a demonstrator of an experimental setup is presented and discussed. It enables a reproducible heating of inert hot particles with simultaneous determination of the outgoing heat flow. The first tests with these demonstrator show reproducible results. However, a large optimization need of the test setup itself can be recognized.

**Abkürzungsverzeichnis**

<b>Abkürzung</b>	<b>Beschreibung</b>
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
DSC	Differential Scanning Calorimetry
Ev	Einzelversuche
F.-K.	D.A. Frank-Kamenetzki
H <sub>2</sub> O	Wasser
Hd	Heizdraht
HdA	Heizdraht-Apparatur
HS	Hot-Spot-Theorie
HZP	Hochmobiles zündwirksames Partikel
iHZP	Inertes hochmobiles zündwirksames Partikel
MUS	Mensch-Umgebungs-System
n.b.	nicht bestimmbar
rHZP	Reaktives hochmobiles zündwirksames Partikel
SET	Selbstentzündungstemperatur
TGA	Thermogravimetrische Analyse
Vr	Versuchsreihen
WL	Warmlagerschrank
ZGT	Zündgrenztemperatur
ZW	Zündwirksamkeit

## Symbolverzeichnis

Symbol	Beschreibung	Einheit
Lateinische Buchstaben		
$A$	Fläche	$m^2$
$A_{Hd}$	Querschnittsfläche des Heizdrahtes	$mm^2$
$b$	Dimensionslose volumenbezogene Wärmekapazität	–
$C$	Umsatzgrad	–
$C_{pyr}$	Gerätespezifische Konstante zur Bestimmung der Temperatur der Wärmebildkamera	Keine Angaben nach Hersteller
$c$	Lichtgeschwindigkeit	$\frac{m}{s}$
$c_{p,B}$	Spezifische Wärmekapazität des Brennstoffes	$\frac{J}{kg \cdot K}$
$c_{p,F}$	Spezifische Wärmekapazität des Fluids	$\frac{J}{kg \cdot K}$
$c_{p,P}$	Spezifische Wärmekapazität des Partikels	$\frac{J}{kg \cdot K}$
$D_Z$	Zylinderdurchmesser	$m$
$d$	Dicke der Schüttung	$m$
$E_a$	Scheinbare Aktivierungsenergie	$\frac{J}{mol}$
$E_p$	Gespeicherte Wärmeenergie des Partikels	$J$
$f(C)$	Funktion des Umsatzgrades	
$g$	Erdbeschleunigung	$\frac{m}{s^2}$
$Gr$	Grashof-Zahl	–
$H_0$	Reaktionsenthalpie	$\frac{kJ}{kg}; \frac{J}{m^3}$
$H_Z$	Zylinderhöhe	$m$
$h$	Planck'sches Wirkungsquant	$J \cdot s$
$I_{Hd}$	Elektrische Spannung am Heizdraht	$V$
$j$	Formbeiwert	–

Symbol	Beschreibung	Einheit
$k$	Boltzmann-Konstante	$\frac{J}{K}$
$k_0$	Präexponentieller Faktor	$\frac{1}{s}$
$k_\lambda$	Dimensionslose Wärmeleitfähigkeiten	–
$L$	Partikellänge	$mm$
$L_C$	Charakteristische Länge	$m$
$L_{Hd}$	Länge des Heizdrahtes	$m$
$M_{e,\lambda}(\lambda, T)$	Spektrale spezifische Ausstrahlung	$\frac{W}{m^2 \cdot \mu m}$
$m_T$	Masse bei entsprechender Temperatur	$mg$
$m_0$	Masse zu Beginn der Messung	$mg$
$n$	Exponent zur Korrektur der Wellenlänge zur Bestimmung der Temperatur der Wärmebildkamera	-
$Nu$	Nusselt-Zahl	–
$O_{Hd}$	Erwärmte Oberfläche des Heizdrahtes	$m^2$
$P$	Elektrische Leistung	$W$
$P''$	Flächenbezogene elektrische Leistung	$\frac{W}{m^2}$
$Pr$	Prandtl-Zahl	–
$\dot{Q}_{Anr}$	Anregungsenergie	$J$
$\dot{Q}_p$	Wärmeproduktion	$W$
$\dot{Q}_{Pho}$	Photonenenergie	$J$
$\dot{Q}_v$	Wärmeverlust	$W$
$Q_0$	Arrheniusrate	$\frac{K}{s}$
$q'''$	Volumenbezogene Wärmefreisetzungsrate	$\frac{W}{m^3}$
$q''$	Wärmestromdichte	$\frac{W}{m^2}$

Symbol	Beschreibung	Einheit
$\dot{q}''_e$	Emittierende Wärmestromdichte	$\frac{W}{m^2}$
$\dot{q}''_G$	Gesamtwärmestromdichte	$\frac{W}{m^2}$
$\dot{q}''_i$	Immittierte Wärmestromdichte	$\frac{W}{m^2}$
$\dot{q}''_{K(T)}$	Wärmestromdichte der Konvektion	$\frac{W}{m^2}$
$\dot{q}''_t$	Transmittierte Wärmestromdichte	$\frac{W}{m^2}$
$\dot{q}''_{s,gk(T)}$	Wärmestromdichte des grauen Strahlers	$\frac{W}{m^2}$
$\dot{q}''_{s,sk(T)}$	Wärmestromdichte des schwarzen Strahlers	$\frac{W}{m^2}$
$\dot{q}''_{\lambda(T)}$	Wärmestromdichte der Wärmeleitung	$\frac{W}{m^2}$
$R$	Allgemeine Gaskonstante	$\frac{J}{mol \cdot K}$
$R_{Hd}$	Elektrischer Widerstand des Heizdrahtes	$\Omega$
$R_{Hd,spe}$	Spezifischer elektrischer Widerstand	$\frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$
$Ra$	Rayleigh-Zahl	–
$r$	Radius des inerten heißen Partikels	$m$
$SET$	Selbstentzündungstemperatur	$^{\circ}C$
$T$	Temperatur	$K$
$T_{amb}$	Temperatur der Hintergrundstrahlung	$^{\circ}C$
$T_B$	Temperatur des Brennstoffes	$K$
$T_F$	Temperatur des Fluids	$K$
$T_{obj}$	Temperatur des zu messenden Objektes	$^{\circ}C$
$T_P$	Temperatur des Partikels	$^{\circ}C$
$T_{Pyr}$	Temperatur der Wärmebildkamera	$^{\circ}C$
$T_S$	Temperatur des Staubes	$K$

Symbol	Beschreibung	Einheit
$T_{S1}$	Temperatur der ersten Seite der Schüttung	$K$
$T_{S2}$	Temperatur der zweiten Seite der Schüttung	$K$
$T_U$	Temperatur der Umgebung	$K$
$TF$	Temperaturfaktor des Heizdrahtes	—
$t$	Zeit	$s$
$U$	Signal am Detektor	$V$
$U_{Hd}$	Stromstärke am Heizdraht	$A$
$V$	Volumen	$m^3$
$x$	Koordinate	$m$
Griechische Buchstaben und Sonstige Symbole		
$\emptyset$	Partikeldurchmesser	$mm$
$\alpha$	Wärmeübergangskoeffizient	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$
$\alpha(\lambda)$	Wellenlängenabhängiger Absorptionskoeffizient	—
$\beta$	Volumenausdehnungskoeffizient	$\frac{1}{K}$
$\Gamma$	Inverse Arrhenius-Zahl	—
$\delta_{FK}$	Frank-Kamenetzki Parameter	—
$\delta_{FK,Krit}$	Kritischer Frank-Kamenetzki Parameter	—
$\delta_{HS}$	Dimensionsloser Radius des inerten heißen Partikels	—
$\delta_{HS,Krit}$	Kritischer dimensionsloser Radius des inerten heißen Partikels	—
$\varepsilon$	Emissionskoeffizient	—
$\varepsilon(\lambda)$	Wellenlängenabhängiger Emissionskoeffizient	—
$\eta_F$	Dynamische Viskosität des Fluids	$\frac{N \cdot s}{m^2}$
$\theta$	Dimensionslose Temperatur	—
$\theta_B$	Dimensionslose Temperatur des Brennstoffes	—
$\theta_P$	Dimensionslose Temperatur des inerten heißen Partikels	—

Symbol	Beschreibung	Einheit
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit	$\frac{W}{m \cdot K}$
$\lambda_B$	Wärmeleitfähigkeit des Brennstoffes	$\frac{W}{m \cdot K}$
$\lambda_F$	Wärmeleitfähigkeit des Fluids	$\frac{W}{m \cdot K}$
$\lambda_{max}(T)$	Wellenlänge der temperaturabhängigen maximalen Ausstrahlung	$\mu m$
$\lambda_{max, Detek}$	Maximale Wellenlänge des Photonendetektors	$\mu m$
$\lambda_W$	Wellenlänge der elektromagnetischen Strahlung	$\mu m$
$\xi$	Dimensionslose Koordinate	–
$\rho$	Dichte	$\frac{kg}{m^3}$
$\rho_B$	Dichte des Brennstoffes	$\frac{kg}{m^3}$
$\rho_P$	Dichte des Partikels	$\frac{kg}{m^3}$
$\rho_S(\lambda)$	Wellenlängenabhängiger Reflektionskoeffizient	–
$\sigma$	Stefan-Boltzmann-Konstante	$\frac{W}{m^2 \cdot K^4}$
$\tau$	Dimensionslose Zeit	–
$\tau(\lambda)$	Wellenlängenabhängiger Transmissionskoeffizient	–
$\varphi$	Thermische Zeitkonstante	$\frac{1}{s}$
$\omega$	Heizrate der TGA	$\frac{K}{s}$

## **Inhaltsübersicht**

Danksagung.....	vi
Zusammenfassung.....	i
Abstract.....	ii
Abkürzungsverzeichnis.....	iii
Symbolverzeichnis .....	iv
Inhaltsübersicht .....	ix
Inhaltsverzeichnis .....	x
1 Einleitung und Aufgabenstellung .....	1
2 Natur- und ingenieurwissenschaftliche Grundlagen.....	5
3 Status quo der wissenschaftlichen Publikationen.....	25
4 Phänomen und Charakterisierung inerter heißer Partikeln.....	33
5 Experimentelle Untersuchungen inerter heißer Partikeln.....	36
6 Sicherheitsbetrachtung inerter heißer Partikeln .....	64
7 Erkenntnisse und Ungenauigkeiten .....	86
8 Résumé/Weiterer wissenschaftlicher Forschungsbedarf.....	100
Literaturverzeichnis.....	105
Bilderverzeichnis.....	113
Tabellenverzeichnis.....	116
Anhang A Bilder.....	I
Anhang B Zündwirksamkeitsversuche mit Heizdraht .....	XLI

## Inhaltsverzeichnis

Danksagung.....	vi
Zusammenfassung.....	i
Abstract.....	ii
Abkürzungsverzeichnis.....	iii
Symbolverzeichnis .....	iv
Inhaltsübersicht .....	ix
Inhaltsverzeichnis .....	x
1 Einleitung und Aufgabenstellung .....	1
1.1 Veranlassung .....	1
1.2 Zielsetzung.....	3
1.3 Herangehensweise .....	3
1.4 Abgrenzung .....	4
2 Natur- und ingenieurwissenschaftliche Grundlagen.....	5
2.1 Feststoffverbrennung .....	5
2.2 Zündquellenarten .....	7
2.3 Wärmetransport .....	8
2.3.1 Wärmestrahlung.....	8
2.3.2 Wärmeleitung .....	11
2.3.3 Freie Konvektion .....	12
2.4 Theorien der Entzündung.....	12
2.4.1 Einführung.....	12
2.4.2 Theorie des Verbrennungsprozesses nach Semenov.....	14
2.4.3 Stationäre Theorie der thermischen Explosion nach Frank-Kamenetzki.....	16
2.5 Bestimmbarkeit der reaktionskinetischen Parameter.....	18
2.5.1 Selbstentzündungstemperatur mit der Warmlageranalyse .....	18
2.5.2 Thermischer Massenverlust mit der Thermogravimetrischen Analyse.....	20
2.6 Detektionstechnik für Wärmestrahlung .....	23
3 Status quo der wissenschaftlichen Publikationen.....	25
3.1 Zündversuche mit inerten heißen Partikeln .....	25
3.2 Zündversuche mit mechanisch erzeugten Funken .....	29
3.3 Untersuchungen zur Entzündung durch Wärmeströme.....	31
3.4 Zwischenfazit.....	32
4 Phänomen und Charakterisierung inerter heißer Partikeln.....	33
5 Experimentelle Untersuchungen inerter heißer Partikeln.....	36
5.1 Zündwirksamkeit inerter heißer Partikeln .....	36

5.1.1	Versuchsbeschreibung.....	36
5.1.2	Versuchsergebnisse.....	46
5.2	Mobilität inerter heißer Partikeln.....	58
5.2.1	Versuchsbeschreibung.....	58
5.2.2	Versuchsergebnisse.....	59
5.3	Detektierbarkeit inerter heißer Partikeln.....	61
5.3.1	Versuchsbeschreibung.....	61
5.3.2	Versuchsergebnisse.....	62
6	Sicherheitsbetrachtung inerter heißer Partikeln.....	64
6.1	Hot-Spot-Theorien.....	65
6.1.1	Beschreibung und mathematische Herleitung der Hot-Spot-Theorien.....	65
6.1.2	Bestimmung der Parameter.....	67
6.1.3	Vergleich mit der Zündgrenztemperatur.....	73
6.2	Kritikalitätsbetrachtung.....	77
6.2.1	Kritikalität im sicherheitstechnischen Umfeld.....	78
6.2.2	Kritikalitätsgraph.....	81
6.2.3	Bewertung der Kritikalität inerter heißer Partikeln.....	83
7	Erkenntnisse und Ungenauigkeiten.....	86
7.1	Erkenntnisse aus den Untersuchungen inerter heißer Partikeln.....	86
7.1.1	Betrachtung der Verläufe der Zündgrenztemperaturen der Kugelversuche ...	86
7.1.2	Betrachtung der ZGT in abgelagerter-durchströmter Staubschicht.....	88
7.1.3	Betrachtung der ZGT von Scheiben und Zylindern.....	89
7.1.4	Vergleich der Ergebnisse der unterschiedlichen Partikelformen.....	90
7.1.5	Betrachtung des Abkühlverhaltens der Kugeln.....	91
7.1.6	Beschreiben des Messfehlers der Wärmebildkamera.....	92
7.2	Erkenntnisse aus der Hot-Spot-Theorie.....	94
7.2.1	Betrachtung des Vergleichs der HS mit Heizwert und Reaktionsenthalpie.....	94
7.2.2	Betrachtung des Vergleichs der kinetischen Parameter.....	95
7.2.3	Betrachtung des Vergleichs der ZGT und HS.....	95
7.3	Erkenntnisse aus der Kritikalitätsbetrachtung.....	97
8	Résumé/Weiterer wissenschaftlicher Forschungsbedarf.....	100
8.1	Beantwortung der Forschungsfragen.....	100
8.2	Résumé.....	101
8.3	Weiterer wissenschaftlicher Forschungsbedarf.....	103
	Literaturverzeichnis.....	105
	Bilderverzeichnis.....	113
	Tabellenverzeichnis.....	116

Anhang A	Bilder.....	I
Anhang B	Zündwirksamkeitsversuche mit Heizdraht .....	XLI
B.1	Versuchsaufbau und Beschreibung des Demonstratorverfahrens .....	XLII
B.2	Kurzbeschreibung des Entwicklungsprozesses.....	XLVI
B.3	Beobachtungen und Ergebnisse der ersten Validierungsversuche .....	XLVII
B.4	Diskussion der Ergebnisse und des Versuchsaufbaus .....	LI
B.5	Fazit der Heizdrahtversuche.....	LII

## 1 Einleitung und Aufgabenstellung

In diesem Kapitel wird die Einleitung in das Thema gegeben. Insbesondere wird auf folgende Punkte eingegangen:

- Veranlassung
- Zielsetzung
- Herangehensweise
- Abgrenzung

### 1.1 Veranlassung

Um den sicheren Betrieb von Industrieanlagen zu gewährleisten, ist der Arbeitgeber nach § 5 Arbeitsschutzgesetz [ArbSchG] dazu verpflichtet, eine Beurteilung aller möglichen Gefährdungen durchzuführen, die beim Betrieb vorkommen und auf Personen einwirken können. Darüber hinaus ist er für das Ableiten und Umsetzen entsprechender Schutzmaßnahmen verantwortlich. Gemäß § 6 (4) Gefahrstoffverordnung [GefStoffV] ist bei der Gefährdungsbeurteilung zu überprüfen, inwiefern durch die verwendeten Stoffe Brand- und Explosionsgefährdungen entstehen können.

Zur Umsetzung dieser Gefährdungsbeurteilung hinsichtlich des Brand- und Explosionsschutzes stellen die Technischen Regeln für Gefahrstoffe [TRGS 720; TRGS 800] konkretisierende technische Regelwerke dar. In der [TRGS 720] wird ein Leitfaden beschrieben, der sog. Duktus, der bei der Erkennung von Explosionsgefährdungen Anwendung findet. Gerade bei Prozessen, in denen mit brennbaren Stäuben gearbeitet wird, sind sowohl die Brandgefährdung als auch die Explosionsgefährdung bei der Gefährdungsbeurteilung zu berücksichtigen. Jedoch beschränkt sich der Duktus auf Explosionsgefährdungen und lässt Brandgefährdungen hinsichtlich möglicher Schutzmaßnahmen außer Betracht. [Lottermann 2012] hat in seiner Dissertation den Duktus um die Brandgefährdungen ergänzt und konzipierte den sog. Doppelduktus. Die [TRGS 800] gibt eine Hilfestellung im Umgang mit brennbaren Gefahrstoffen, wobei in der Regel die Beurteilung der Brandgefährdung bis zur Ableitung entsprechender allgemeiner Brandschutzmaßnahmen berücksichtigt sind.

Im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung gilt es zu überprüfen, ob brennbare Feststoffe vorhanden sind und ob im verfahrenstechnischen Prozess Zündquellen existieren, welche ein Ereignis initiieren können. Bei der Bewertung der Zündquellen werden 13 Zündquellenarten gemäß [DIN EN 1127-1] berücksichtigt, beispielsweise „Heiße Oberflächen“, „Flamme und heiße Gase (einschließlich heiße Partikel)“ oder „Mechanisch erzeugte Funken“.

Jedoch werden nicht alle möglichen Zündquellenarten und Zündphänomene in der [DIN EN 1127-1] umfänglich beschrieben [Liske et al. 2018]. Hier sind heiße Partikel<sup>a</sup> zu nennen. Zwar werden „Flamme und heiße Gase (einschließlich heißer Partikel)“ in der Norm aufgeführt, jedoch wird über

---

<sup>a</sup> In der Verfahrenstechnik gilt die Konvention, dass die Mehrzahl von einem Partikel, als „zwei oder mehrere Partikeln“ bezeichnet werden. Dieser Konvention wird in der Dissertation gefolgt.

„heiße Partikeln“ nur angeführt: *„beim Schweißen und Schneiden entstehende Schweißperlen sind Funken mit sehr großer Oberfläche, und sie gehören deshalb zu den wirksamsten Zündquellen“* [DIN EN 1127-1, S. 13]. Weitere Informationen zu „heißen Partikeln“ sind in den einschlägigen Regeln und der Fachliteratur nur bedingt verfügbar.

Die [TRGS 800] führt unter Punkt 3.2.3 und Anlage 2 ebenfalls Zündquellen an, die für den Brandschutz genutzt werden können. Hier werden unter anderem „Schweißspritzer“ beschrieben. Die Schweißperlen der [DIN EN 1127-1] Norm scheinen vergleichbar zu den Schweißspritzern der [TRGS 800] zu sein, wobei in beiden Regelwerken keine klaren Definitionen dieser Partikeln gegeben werden.

Ebenfalls ist fraglich, inwiefern die Zündmechanismen von Flammen und heißen Gasen mit dem Zündvorgang von heißen Partikeln vergleichbar sind.

Mechanisch erzeugte Funken können als kleine heiße Partikeln angesehen werden. In der [DIN EN 1127-1] werden diese näher als Schlag-, Reib- und Schleiffunken beschrieben, welche entstehen, wenn zwei metallische (oder mineralische) Gegenstände mit hohen Relativgeschwindigkeiten aufeinandertreffen. Ebenfalls werden unterschiedliche Werkstoffpaare genannt, die in Kombination beispielsweise aus Titan oder Zirkonium zündwirksame Funken erzeugen können. Schlagvorgänge zwischen Rost und einem Leichtmetall (Aluminium) können zündfähige Funken erzeugen. Jedoch zeigen Untersuchungen von [Röschenbleck 1960], dass solche Funken nur eine kurze Lebensdauer besitzen. Der Grund dafür ist, dass diese sehr kleinen und somit massearmen Partikeln schnell verbrennen. Zwar entstehen je nach Funkenmaterial sehr hohe Verbrennungstemperaturen von 1.530 °C bis 2.900 °C [vgl. Ritter 1984], jedoch sind die einzelnen Funken durch ihre kurze Lebensdauer nicht zündwirksam. Somit ist auch hier fraglich, inwiefern heiße Partikeln mit mechanisch erzeugten Funken beschrieben und verglichen werden können.

Untersuchungen zur Zündwirksamkeit von heißen metallischen Partikeln erfolgten bis jetzt nur im Zusammenhang mit der Entstehung von Wald- und Vegetationsbränden (vgl. Kapitel 3.1). Im Kontext der staubverarbeitenden verfahrenstechnischen Industrie erfolgten Analysen zur Zündwirksamkeit solcher Partikeln – außer durch den Autor – bislang nur sehr vereinzelt und in geringem Umfang.

Es ergeben sich folgende wissenschaftliche Defizite und Forschungsfragen

### Defizite

- Grundlegendes Wissen zur Zündquellenart „inerte heiße Partikeln“ ist nur im geringen Umfang vorhanden und bekannt.
- Es fehlt eine Definition der Zündquellenart „inertere heißer Partikeln“.

### Forschungsfragen

- Stellen inerte heiße Partikeln für staubverarbeitende verfahrenstechnische Betriebe eine wirksame Zündquelle dar?
- Wie kann die Zündquellenart „inerte heiße Partikeln“ definiert werden?

- Eine sicherheitstechnische Bewertungsmöglichkeit der Zündquellenart „inerte heiße Partikeln“ ist zurzeit nicht vorhanden.
- Wie kann diese Zündquellenart durch sicherheitstechnische Prüfmethode bewertet werden?

## 1.2 Zielsetzung

Die vorliegende Dissertation beschreibt und charakterisiert im ersten Schritt das in der [DIN EN 1127-1] aufgelistete „heiße Partikel“ weitergehend und liefert eine Definition des inerten heißen Partikels als Zündquellenart.

Beispielhaft entstanden mit verschiedenförmigen, heißen, metallischen Partikeln Zündwirksamkeitsversuche, die auf eine Korrelation zwischen Partikelabmessungen und deren Form sowie Temperatur hinweisen, die zur Entzündung abgelagerter Staubschichten führt. Diese Korrelation wird im Weiteren als Zündgrenztemperatur (ZGT) bezeichnet. Diese Versuche wurden in Anlehnung an die Dissertation von [Urban 2017] erstellt.

Ein weiteres Ziel ist die sicherheitstechnische Bewertung dieser Partikeln. Hierbei prüfen einerseits die sogenannten „Hot-Spot-Theorien“, inwiefern Zündvorgänge sicherheitstechnisch abgeschätzt bzw. bewertet werden können. Hot-Spot-Theorien sind analytische Lösungsansätze, die auf der Grundlage der Kinetik einen Zusammenhang zwischen dem Partikeldurchmesser und seiner Temperatur ermitteln, bei dem eine Entzündung der Staubschicht erfolgen könnte [vgl. Gol'dshleger et al. 1973]. Andererseits ist die Kritikalität heißer Partikeln für Staubschichten in verfahrenstechnischen Anlagen bewertet. Dazu definiert die vorliegende Dissertation erstmalig die Kritikalität im verfahrenstechnischen Kontext und beschreibt die Entwicklung eines innovativen und neuartigen Kritikalitätsgraphen. Für die Bewertung der Kritikalität sind neben den Zündwirksamkeitsversuchen Untersuchungen zur Mobilität und Detektierbarkeit durchgeführt und beschrieben.

Anhang B beschreibt einen Demonstrator einer Versuchsapparatur, den entsprechenden Versuchsaufbau und erste Verifizierungsversuche, mit deren Hilfe reproduzierbare heiße Partikeln erzeugt werden könnten. Hierfür wird mittels elektrischer Gleichspannung ein Widerstandsdraht reproduzierbar erwärmt und als Zündquelle genutzt.

## 1.3 Herangehensweise

Zum Einstieg wird ein Überblick über den Status quo der wissenschaftlichen Publikationen des möglichen Zündphänomens erstellt, welche unter dem Begriff „Heiße Partikel“ gemäß [DIN EN 1127-1] zusammengefasst werden können (Kapitel 3). Auf der Basis dieser Übersicht erfolgt im nächsten Schritt die Definition der Zündquelle inerte heißer Partikel (Kapitel 4).

Hierauf aufbauend werden die durchgeführten experimentellen Laborversuche dargestellt. Neben der Partikelformvariation inerter heißer Partikeln als Zündquelle wurden unterschiedliche Materialien als Brennstoffproben genutzt, die für die staubverarbeitende Industrie typisch sind. Des Weiteren wurden die Strömungsbedingungen an der Staubschicht variiert (Kapitel 5).

Bei der Sicherheitsbetrachtung (Kapitel 6) wird die Hot-Spot-Theorie mit den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen der inerten heißen Partikeln validiert und die Kritikalität inerter heißer Partikeln auf verfahrenstechnische Prozesse bestimmt. Diese Bewertung erfolgt mit dem innovativen und neuartigen Kritikalitätsgraphen.

Die Bewertung und Diskussion der Laborversuche sowie der Sicherheitsbetrachtung erfolgt in Kapitel 7.

### **1.4 Abgrenzung**

Der wissenschaftliche Impuls und die Motivation zur vorliegenden Dissertation entstanden durch das Forschungsvorhaben „Sicherheitliche Untersuchungen zur Identifizierbarkeit und Beherrschbarkeit hochmobiler zündwirksamer Partikel – GreCon“, welches an der Bergischen Universität Wuppertal in Kooperation mit der Fargus-GreCon GmbH & Co. KG durchgeführt wurde. In diesem Forschungsvorhaben wurden die hochmobilen zündwirksamen Partikeln (HZP) näher definiert und ihre Zündwirksamkeit in Bezug auf staubverarbeitende verfahrenstechnische Prozesse untersucht. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde ein Erklärungsmodell des HZP entwickelt [vgl. Liske et al. 2018], das HZP in zwei Kategorien unterteilt: „inert“ und „reaktiv“. Unter inerten HZP (iHZP) werden erwärmte metallische oder mineralische Fremdkörper/Partikeln und mechanisch erzeugte Funken verstanden. Die reaktiven HZP (rHZP) sind unterschiedlich große brennende Staubpartikel oder –agglomerationen, die in der Regel aus dem im Prozess vorhandenen Staub bestehen. In der vorliegenden Dissertation werden Erkenntnisse aus dem Forschungsvorhaben, insbesondere zum iHZP aufgegriffen. Die Ergebnisse zum rHZP werden nicht weiter betrachtet.

Obwohl an dieser Stelle der Bezug über die [DIN EN 1127-1] zum Explosionsschutz ersichtlich wird, werden in dieser Untersuchung ausschließlich abgelagerte Staubschichten näher betrachtet. Der Grund hierfür ist, dass, wie [Lottermann 2012] bereits feststellte, der flankierende Brandschutz<sup>b</sup> im Explosionsschutz im Sinne der [TRGS 800] ebenfalls mit berücksichtigt werden sollte. Die aus der TRGS 800 bekannten Schweißspritzer werden im Weiteren als heiße Partikeln im Sinn der [DIN EN 1127-1] verstanden. Daher wird im Weiteren nur von der [DIN EN 1127-1] gesprochen.

Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, dass eine erste Zündquelle (z. B. heiße Oberfläche) als Ursache eines kleinen Staubbrandes fungiert. Dieser könnte aufgrund der höheren Zündwirksamkeit eine Staubexplosion initiieren [vgl. Liske und Barth 2017].

---

<sup>b</sup> Als flankierender Brandschutz wird der Brandschutz von verfahrenstechnischen Anlagen und Prozessen verstanden.

## 2 Natur- und ingenieurwissenschaftliche Grundlagen

In diesem Kapitel werden kursorische Informationen und Sachverhalte beschrieben, die für das Verständnis der vorliegenden Dissertation notwendig sind:

- Feststoffverbrennung
- Zündquelle
- Wärmetransport
- Wärmestrahlungsdetektion
- Entzündungstheorie
- Reaktionskinetik

### 2.1 Feststoffverbrennung

Die Feststoffverbrennung kann wie alle anderen Verbrennungen durch das in Bild 1 dargestellte Branddreieck illustriert werden.

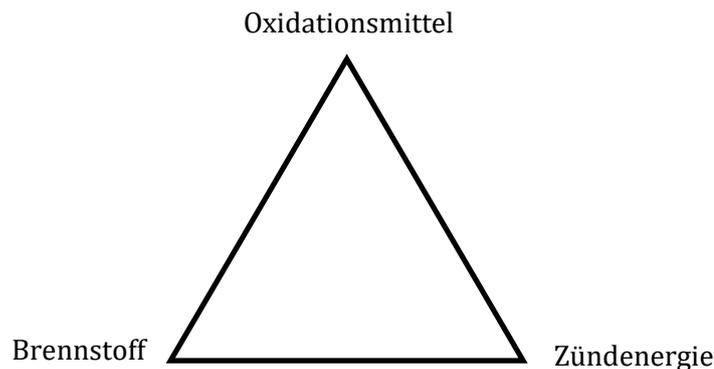


Bild 1: Branddreieck

Zur Auslösung einer Verbrennung sind grundsätzlich ein Brennstoff, ein Oxidationsmittel und eine Zündenergie notwendig. Als Oxidationsmittel dient in der Regel der Luftsauerstoff. Eine Verbrennung entsteht des Weiteren nur, wenn diese drei Komponenten im richtigen quantitativen Verhältnis zueinanderstehen.

Im Brandschutzingenieurwesen werden Verbrennungen in homogene und heterogene Verbrennungen unterteilt. Bei der homogenen Verbrennung besitzen der Brennstoff sowie das Oxidationsmittel denselben Aggregatzustand und sind beide gasförmig. Das Verbrennen des Brennstoffs erfolgt über eine Flamme.

Bei der heterogenen Verbrennung besitzen Brennstoff und Oxidationsmittel verschiedene Aggregatzustände, in der Regel fest und gasförmig. Dementsprechend erfolgt ein großer Teil der Feststoffverbrennung als Schwel- oder Glimmbrand.

Als Schwelbrand wird im Weiteren eine sich selbstständig ausbreitende exotherme Reaktion des Feststoffs ohne sichtbare Lichterscheinungen verstanden. Ein Glimmbrand ist ebenfalls eine selbstausbreitende Verbrennung des Stoffs, welche jedoch mit sichtbarer Lichterscheinung einhergeht. Grundsätzlich erreichen Glimmbrände Temperaturen über 1.000 °C, wohingegen der Temperaturbereich von Schwelbränden zwischen 200 °C und 500 °C liegt.

Phänomenologisch kann der Abbrand eines Feststoffs schematisch mit dem Kohlebrand beschrieben werden. „Die Kohleverbrennung umfasste die Entgasung, sowie die heterogene Verbrennung des Koks sowie die homogene Verbrennung der Gase“ [Joos 2006, S. 696].

Im ersten Schritt pyrolysiert der Feststoff unter Energieeinfluss, wodurch die flüchtigen Bestandteile in die Gasphase übergehen und der Feststoff verkocht. Die flüchtigen Bestandteile brennen bei Vorhandensein eines Oxidationsmittels und ausreichender Energie homogen ab. Unter Zufuhr eines Oxidationsmittels und Energie erfolgt die heterogene Verbrennung des verkokten Feststoffs. Nach der heterogenen Verbrennung entsteht Kohlenstoffmonoxid (CO), welches in einem weiteren Schritt zu Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) verbrennt. Als nicht brennbare Rückstände des Koks bleibt Asche übrig. Die flüchtigen Bestandteile, die während der Pyrolyse entstehen, sind normalerweise verschiedene Kohlenwasserstoffe, die je nach Temperatur direkt zu CO<sub>2</sub>, oder über das Zwischenprodukt CO zu CO<sub>2</sub> und Wasser (H<sub>2</sub>O) oxidieren. Dieser schematische Verbrennungsverlauf findet nur statt, wenn ausreichend Sauerstoff (O<sub>2</sub>) vorhanden ist.

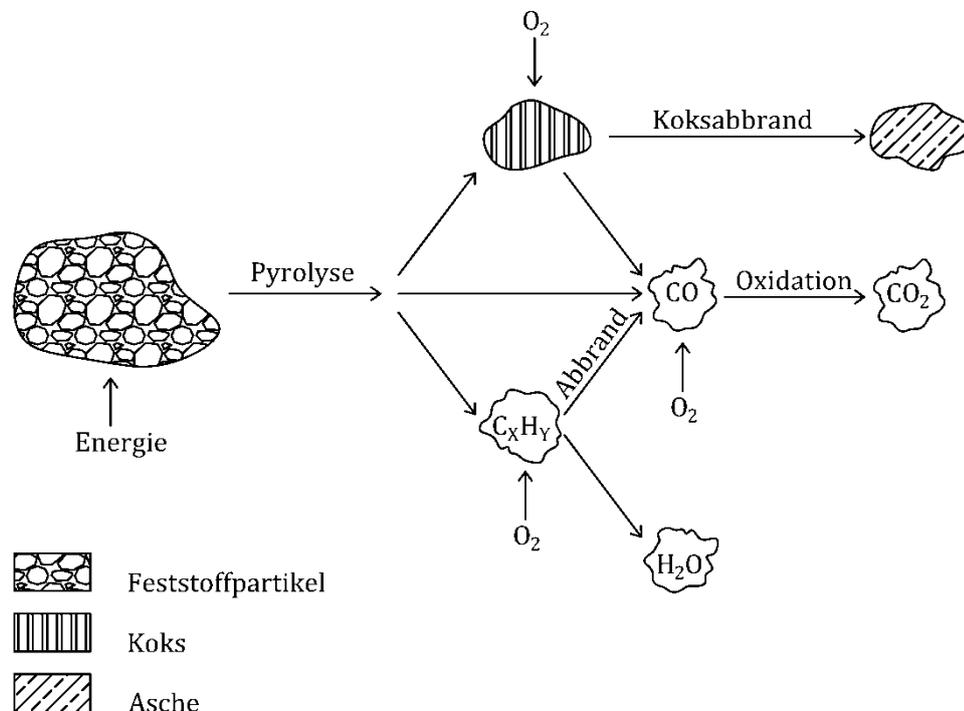


Bild 2: Abbrand eines Feststoffs nach [Görner 1991, S. 180], eigene Darstellung

## 2.2 Zündquellenarten

Die Zündquelle liefert die notwendige Energie, welche für das Ingangsetzen einer Verbrennung notwendig ist.

In der betrieblichen Praxis des Brand- und Explosionsschutzes werden 13 Zündquellenarten gemäß [DIN EN 1127-1] berücksichtigt, wobei diese primär im Kontext brennbarer Stäube für die Zündung einer Explosion, also für aufgewirbelte Gemische, aber nicht für abgelagerte Schaubschichten herangezogen werden. Für den Brandschutz werden unter Punkt 3.2.3 in Verbindung mit Anlage 2 der [TRGS 800] mögliche Zündquellen beschrieben, die mit den 13 möglichen Zündquellen der [DIN EN 1127-1] vergleichbar sind.

Gemäß der [ATEX 1999/92/EG] wird zwischen potentiellen Zündquellen und dem Wirksamwerden von Zündquellen unterschieden. Potentielle Zündquellen sind solche, die vorhanden sind, aber noch keinen Brand bzw. keine Explosion initiieren, da entweder kein Brennstoff, kein Oxidationsmittel oder nicht das entsprechende Mischungsverhältnis dieser Komponenten vorhanden ist. Zum Wirksamwerden einer Zündquelle wird angeführt: „*Wahrscheinlichkeit des Vorhandenseins und der Aktivierung und des Wirksamwerdens von Zündquellen*“ [ATEX 1999/92/EG Artikel 4 (1)]. In der [TRGS 720] wird die wirksame Zündquelle ebenfalls definiert: „*die Wahrscheinlichkeit des Vorhandenseins oder der Entstehung und des Wirksamwerdens von Zündquellen*“ [TRGS 720 Nr. 3 (1) Punkt 6 b)]. Aus beiden Definitionen wird ersichtlich, dass eine Zündquelle als wirksam gilt, wenn sie ein Brand- bzw. Explosionsereignis initiieren kann. Wirksamwerden bedeutet, dass die grundsätzliche Möglichkeit einer Entzündung besteht, und das wiederum heißt, das Maß der Zündenergie der potentiellen Zündquelle ist zu gering, damit diese „effektiv“ (zündwirksam) werden kann.

Die Zündquellenart heiße Partikeln wird bei den 13 Zündquellen im Zusammenhang mit Flammen und heißen Gasen in der [DIN EN 1127-1] genannt. Fraglich ist, inwiefern diese drei Zündphänomene (Flamme, heiße Gase und heiße Partikel) hinsichtlich der Energieübertragung von der Zündquelle auf den Brennstoff vergleichbar sind.

Bei einer ersten Betrachtung scheinen diese Zündquellen die notwendige Energie auf unterschiedliche Art und Weise zu übertragen. Flammen sind heiße strömende Gase, in denen die Verbrennungsreaktion stattfindet. Bei der Feststoffverbrennung sind in der Flamme oft kleine Rußpartikel, welche einen hohen Strahlungsanteil besitzen. Der Energieübertrag von einer Flamme auf einen brennbaren Stoff erfolgt somit hauptsächlich durch Wärmestrahlung und Konvektion. Eine weitere zündbedingende Eigenschaft der Flamme ist das Vorhandensein von chemischen Radikalen, die in der Verbrennungszone vorhanden sind und die Oxidationsreaktion beschleunigen. Die Strahlungsleistung heißer Gase ist im Normalfall gering, da sehr wenige Partikeln in einem heißen Gasstrom vorhanden sind. Daher übertragen heiße Gase die erforderliche Energie für eine Entzündung hauptsächlich über Konvektion.

Heiße Partikeln werden in der [DIN EN 1127-1] als Schweißperlen verstanden. Schweißperlen sind besonders dann zündwirksam, wenn diese in einen brennbaren Stoff fallen und ihn dadurch entzünden. Hieraus folgt, dass heiße Partikeln die notwendige Energie größtenteils über die Wärmeleitung auf den Brennstoff übertragen, wenn diese auf oder in einen Brennstoff gelangen. Zwar wird während des Falls bereits Wärme durch Strahlung übertragen, aber dieser Anteil ist im Verhältnis zur Wärmeleitung gering.

Ein Vergleich der Subsumierung der heißen Partikeln zu der Zündquellenart „Flammen und heiße Gase“ hinsichtlich des Zündverhaltens wurde bislang weder umfassend analysiert noch abschließend durchgeführt und definiert.

## 2.3 Wärmetransport

Für die Verbrennung wird eine gewisse Zündenergie benötigt. Eine Zündquelle muss demnach diese Energie liefern und auf den Brennstoff übertragen. Dieser Wärmetransport erfolgt je nach Zündquelle physikalisch durch Wärmestrahlung, Wärmeleitung oder Konvektion oder aus einer Kombination daraus.

Wärme ist nach [Gerthsen und Vogel 1999, S. 207] „*ungeordnete Molekülbewegung. Wärmeenergie ist kinetische Energie dieser Bewegung.*“ Diese Molekülbewegung wird beim Wärmetransport auf unterschiedliche Weise weitergeben. Je schneller sie ist, desto höher sind die Temperaturen der Moleküle. Da am absoluten Temperaturnullpunkt keine Molekülbewegung stattfindet, besitzen Körper bei 0 K ebenfalls keine Wärmeenergie. Hieraus folgt, dass jedes Material, das wärmer als 0 K<sup>c</sup> ist, in der Lage ist, Wärmeenergie abzugeben.

Grundsätzlich erfolgt der Wärmetransport vom Bereich mit der höheren Temperatur (höhere gespeicherte Wärmeenergie) in den Bereich mit geringerer Temperatur (geringere gespeicherte Wärmeenergie).

Im Folgenden werden die drei Wege des Wärmetransports skizziert. Eine detaillierte Beschreibung kann der entsprechenden Fachliteratur wie beispielsweise [DiNenno 2002; Carslaw und Jaeger 2008; Gerthsen und Vogel 1999] entnommen werden.

### 2.3.1 Wärmestrahlung

Wärmestrahlung zählt physikalisch zu den elektromagnetischen Wellen. Diese treten in unserer Umgebung und Umwelt in den unterschiedlichsten Arten von der Radiowelle über die Mikrowelle bis hin zur Röntgen- oder Höhenstrahlung auf. Anders als Schallwellen breiten sich elektromagnetische Wellen auch ohne das Vorhandensein von Materie aus. Elektromagnetische Wellen breiten sich also selbst im Vakuum aus. Gleiches gilt für die Wärmestrahlung, worunter gemäß [DIN EN ISO 9288] ein Wellenlängenbereich von 0,1 µm bis 100 µm verstanden wird. Der größte Anteil liegt im infraroten

---

<sup>c</sup> Eine Temperatur von 0 K kann real-physikalisch nicht erreicht werden. Sie stellt eine theoretische Annahme dar.

Bereich der optischen Strahlung, die sich weiter in die Ultraviolettstrahlung, die sichtbare Strahlung und die Infrarotstrahlung gliedert.

In Tabelle 1 ist die Unterteilung der optischen Strahlung gemäß [DIN 5030-2] dargestellt.

Tabelle 1: Spektralbereiche der optischen Strahlung nach [DIN 5030-2, Tabelle 1]

<b>Strahlung</b>	<b>Kurzbezeichnung</b>	<b>Wellenlänge [μm]</b>
Optische Strahlung	-	0,1–1.000
Ultraviolettstrahlung	UV	0,1–0,38
Vakuum UV	UV-C VUV	0,1–0,2
Fernes UV	UV-C FUV	0,2–0,28
Mittleres UV	UV-B	0,28–0,315
Nahes UV	UV-A	0,315–0,38
Sichtbare Strahlung	VIS	0,38–0,78
Infrarotstrahlung	IR	0,78–1.000
Nahes IR	IR-A NIR	0,78–1,4
Mittlers IR	IR-B NIR	1,4–3
Fernes IR	IR-C MIR	3–50
Fernes IR	IR-C FIR	50–1.000

Durch die Molekülbewegungen entstehen elektromagnetische Wellen (Strahlung), die sich in alle Richtungen ausbreiten. Trifft diese Strahlung auf einen anderen Körper, werden die Moleküle darin zum Schwingen angeregt.

Mathematisch lässt sich Strahlung für einen idealen schwarzen Körper – auch schwarzer Strahler genannt – über das Planck'sche Strahlungsgesetz beschreiben (vgl. (1)). Mit dieser Gleichung kann die spektrale spezifische Ausstrahlung eines schwarzen Strahlers berechnet werden.

$$M_{e,\lambda_W}(\lambda_W, T) = \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda_W^5 \cdot (e^{(h \cdot c)/(\lambda_W \cdot k \cdot T)} - 1)} \left[ \frac{W}{m^2 \cdot \mu m} \right] \quad (1)$$

In Bild 3 ist die spektrale spezifische Ausstrahlung für verschiedene Temperaturen grafisch angeführt.

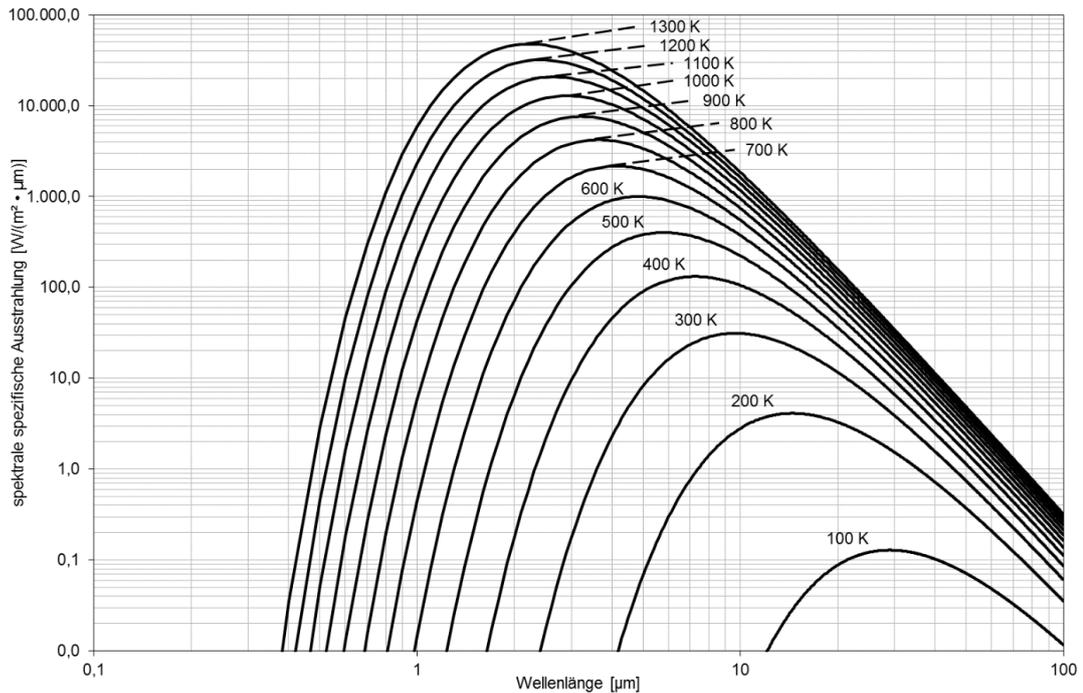


Bild 3: Spektrale spezifische Ausstrahlung nach [Bernhard 2004, S. 987 Bild 13.4], eigene Darstellung

Anhand des Diagramms der spektralen spezifischen Ausstrahlung lässt sich erkennen, dass die Wärmestrahlung mit steigender Temperatur des schwarzen Strahlers in größer werdenden Bereichen emittiert und sich der maximale Wert der Ausstrahlung in den kürzeren Wellenlängenbereich verschiebt. Anhand des Wien'schen Verschiebungsgesetzes (2) lässt sich die Wellenlänge bestimmen, bei der ein schwarzer Strahler mit bekannter Temperatur seine maximale spezifische Ausstrahlung erreicht.

$$\lambda_{max}(T) = \frac{2898 \mu m K}{T} [\mu m] \quad (2)$$

Durch die Integration von (1) über das gesamte Wellenlängenspektrum (0 bis  $\infty$ ) ergibt sich die Wärmestromdichte, welche ein idealer schwarzer Körper emittiert. Sie wird nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz (3) berechnet.

$$\dot{q}''_{s,sk}(T) = \sigma \cdot T^4 \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (3)$$

Jedes Material besitzt wärmestrahlungsspezifische Eigenschaften. Dazu gehören der Absorptionskoeffizient  $\alpha$ , der Transmissionskoeffizient  $\tau$  und der Reflektionskoeffizient  $\rho_S$ . Diese Koeffizienten besitzen einen Wert  $< 1$  und sind wellenlängenabhängig. Die Beziehung dieser Koeffizienten ist in (4) beschrieben. Trifft Wärmestrahlung auf ein beliebiges Material, wird ein Teil dieser Strahlung absorbiert, ein Teil transmittiert und ein Teil reflektiert.

$$\alpha(\lambda) + \tau(\lambda) + \rho_S(\lambda) = 1 [-] \quad (4)$$

Der Emissionskoeffizient  $\varepsilon$ , welcher ebenfalls wellenlängenabhängig sein kann, gehört ebenfalls zu den Strahlungseigenschaften eines Materials. Für zwei schwarze Strahler, die im thermischen Gleichgewicht stehen, gilt das Kirchhoff'sche Strahlungsgesetz. Es besagt, dass der Absorptionskoeffizient für diese zwei schwarzen Strahler dem Emissionskoeffizienten entspricht (5).

$$\alpha(\lambda) = \varepsilon(\lambda) [-] \quad (5)$$

Ein Körper, der einen schwarzen Strahler darstellt, absorbiert per Definition 100 % der immittierten Wärmestrahlung. Nach (5) ist der Emissionskoeffizient für einen solchen Körper  $\varepsilon = 1$ . Das bedeutet, dass ein schwarzer Strahler an seiner Oberfläche 100 % Wärmestrahlung emittiert. Ein beliebiges Material besitzt normalerweise eine Oberfläche mit einem Emissionskoeffizienten  $\varepsilon < 1$ . Ist dieser Emissionskoeffizient über das gesamte Strahlungsspektrum gleich, wird ein schwarzer Strahler zu einem grauen. Variiert der Koeffizient über das Strahlungsspektrum, handelt es sich um einen selektiven Strahler. Bild 4 stellt diese Strahlertypen grafisch anhand der spektralen spezifischen Ausstrahlung dar.

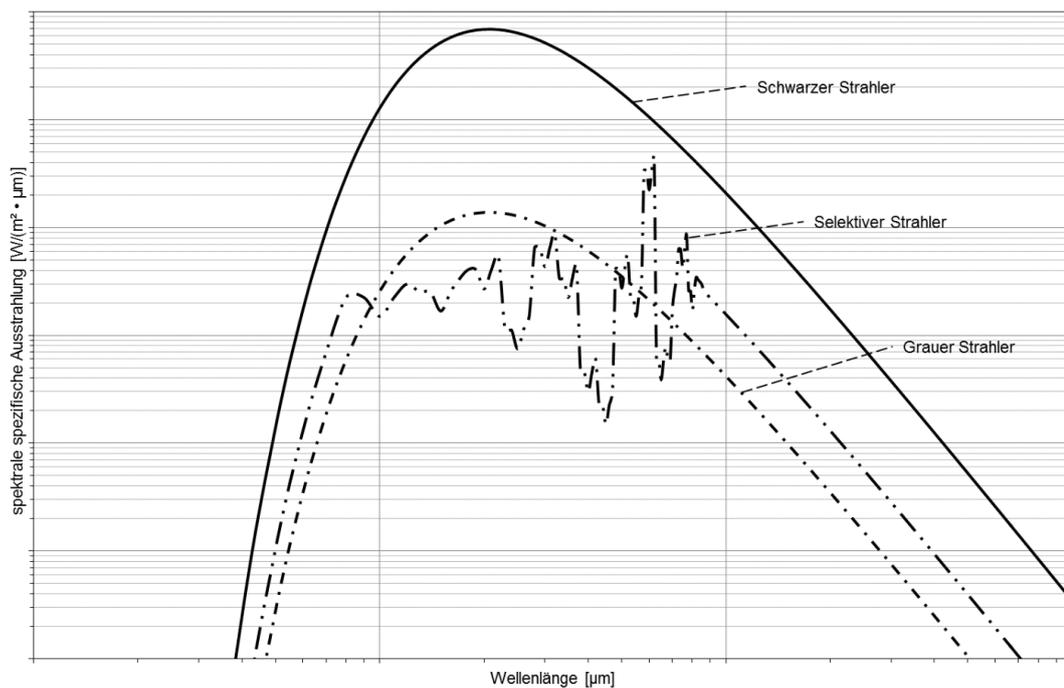


Bild 4: Strahlertypen nach [Bernhard 2004, S. 994 Bild 13.10], eigene Darstellung

Mit der Voraussetzung, dass der Emissionskoeffizient im Strahlungsspektrum gleich ist, kann die reale Wärmestromdichte aus (3) zu folgender Gleichung (6) abgeleitet werden.

$$\dot{q}''_{s,gk}(T) = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (6)$$

### 2.3.2 Wärmeleitung

Bei der Wärmeleitung wird die Molekülschwingung von Molekül zu Molekül weitergegeben. Hierbei wird die Schwingung von den stärker schwingenden Molekülen auf die schwächer schwingenden

Moleküle übertragen, bis beide mit der gleichen Frequenz schwingen. Die hierbei entstehende Wärmestromdichte ist in jeder Raumrichtung proportional zum Temperaturgradienten und lässt sich nach dem Fourier'schen Gesetz (7) beschreiben.

$$\dot{q}''_{\lambda}(T) = -\lambda \cdot \text{grad } T \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (7)$$

Für eine eindimensionale Wärmeleitung innerhalb eines Stoffs vereinfacht sich die Gleichung zu (8).

$$\dot{q}''_{\lambda}(T) = \lambda \cdot \frac{T_{S1} - T_{S2}}{d} \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (8)$$

### 2.3.3 Freie Konvektion

Die einzelnen sich bewegenden Moleküle befinden sich bei der Konvektion noch in einem strömenden Fluid. Strömen diese Moleküle an einem Körper vorbei, stoßen sie beim Schwingen gegen diesen und übertragen damit einen Teil ihrer Schwingung auf die Moleküle des Körpers und umgekehrt. Die Wärmestromdichte lässt sich mit Gleichung (9) bis (15) bestimmen.

$$\dot{q}''_K(T) = \alpha \cdot (T_S - T_F) \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (9)$$

$$\psi = \frac{Nu \cdot \lambda_F}{l} \quad (10)$$

$$Nu(Ra) = 2 + 0,43 \cdot \sqrt{Ra^4} \text{ für } 1 < Ra < 10^5 [-] \quad (11)$$

$$Nu(Ra) = 2 + 0,5 \cdot \sqrt{Ra^4} \text{ für } 3 \cdot 10^5 < Ra < 10^8 [-]$$

$$Ra = Gr \cdot Pr [-] \quad (12)$$

$$Pr = \frac{\eta_F \cdot c_{p,F}}{\lambda_F} [-] \quad (13)$$

$$Gr = \frac{l^3 \cdot g \cdot \beta \cdot (T_S - T_F)}{\nu_F^2} [-] \quad (14)$$

$$\beta = \frac{1}{T_F} \left[ \frac{1}{K} \right] \quad (15)$$

## 2.4 Theorien der Entzündung

### 2.4.1 Einführung

Damit eine Zündquelle einen Brennstoff entzünden kann, muss sie die notwendige Energie auf diesen übertragen, sodass die erforderliche Energie für eine Verbrennung an der Oberfläche bzw. im Brennstoff selbst vorhanden ist. Die Übertragung der Energie auf den Brennstoff kann über die zuvor beschriebenen Wärmestromdichten erfolgen.

Die Summe der Wärmestromdichten der Wärmeleitung  $\dot{q}''_{\lambda}$ , Konvektion  $\dot{q}''_K$  und Strahlung  $\dot{q}''_{s,sk}$  ergibt die Gesamtwärmestromdichte  $\dot{q}''_G$ . Sie ist abhängig von der Lage und Art der Zündquelle. Diese wird im Weiteren als immittierte Wärmestromdichte  $\dot{q}_i$  bezeichnet, wobei  $\dot{q}''_G \geq \dot{q}''_i$  gilt.

Fällt ein heißes Partikel beispielsweise auf eine abgelagerte Staubschicht, erfolgt der Wärmeübergang dieses Partikels größtenteils über die Wärmeleitung an seiner Unterseite. Sinkt es ein, ist die Kontaktfläche zwischen Partikel und Brennstoff und somit der Wärmeübergang durch Wärmeleitung größer. Durch das Einsinken des heißen Partikels bildet sich eine Art Kamin im Brennstoff aus. Auf seine Wände kann somit ebenfalls Wärmeenergie in Form von Wärmestrahlung und Konvektion einwirken. In Bild 5 sind beide Fälle grafisch veranschaulicht.

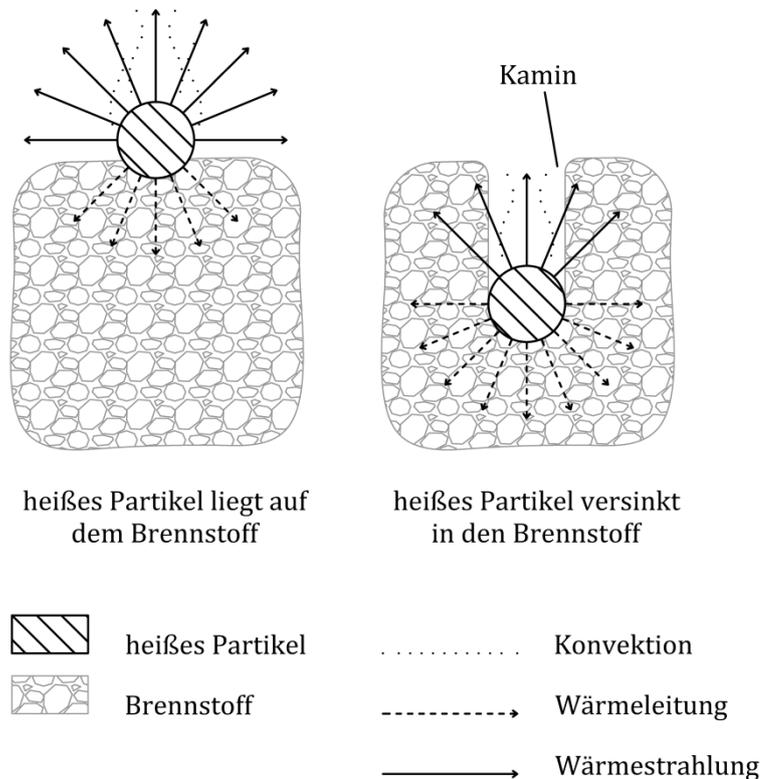


Bild 5: Lage der Zündquelle im Brennstoff

Für die Entzündung des Brennstoffs ist nicht nur die immittierte Wärmestromdichte  $\dot{q}''_i$  bedeutend, sondern ebenfalls die transmittierte Wärmestromdichte  $\dot{q}''_t$  im Brennstoff selbst und die emittierende Wärmestromdichte  $\dot{q}''_e$  auf der anderen Seite. Die transmittierte Wärmestromdichte  $\dot{q}''_t$  innerhalb des Brennstoffs ist gleich der Wärmestromdichte infolge der Wärmeleitung und somit abhängig von der Wärmeleitfähigkeit. Die emittierende Wärmestromdichte  $\dot{q}''_e$  auf der anderen Seite des Brennstoffs kann über die Wärmeleitung, Wärmestrahlung und/oder Konvektion abgegeben werden. Bild 6 stellt diese Wärmestromdichten schematisch für den eindimensionalen Fall dar.

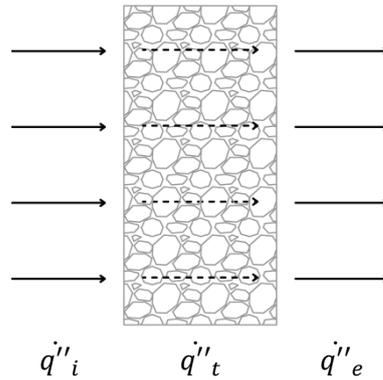


Bild 6: Wärmestromdichten, die eine Entzündung beeinflussen [Bechem und Liske 2019]

Wird die immittierte Wärmestromdichte schneller durch den Brennstoff geleitet und auf der anderen Seite wieder abgegeben ( $\dot{q}''_i = \dot{q}''_t = \dot{q}''_e$ ), sodass die notwendige Zündenergie nicht vorhanden ist, folgt keine Entzündung des Brennstoffs. Erst wenn ein Wärmestau innerhalb des Brennstoffs auftritt ( $\dot{q}''_i > \dot{q}''_t > \dot{q}''_e$ ), kommt es zur Entzündung.

### 2.4.2 Theorie des Verbrennungsprozesses nach Semenov

Semenov entwickelte eine vereinfachte Theorie zur Entzündung von Explosionen für ein homogenes Brennstoffsystem [Semenov 1928], die prinzipiell auch auf die Entzündung von heterogenen Verbrennungen übertragbar ist. Das zuvor beschriebene Phänomen lässt sich mit dem in Bild 7 dargestellten Semenov-Diagramm beschreiben.

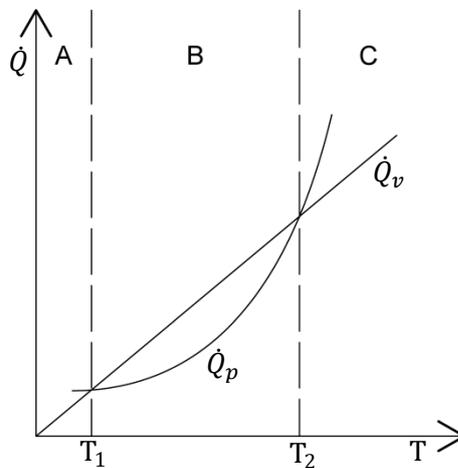


Bild 7: Semenov-Diagramm [Semenov 1928; Darstellung nach Krause 2002]

In diesem Diagramm ist die Wärmestromdichte über der Brennstofftemperatur aufgetragen. Die eingetragene Kurve  $\dot{Q}_p$  entspricht der Wärmestromdichte einer Wärmequelle (Zündquelle), welche als immittierte Wärmestromdichte angesehen werden kann. Die Gerade  $\dot{Q}_v$  zeigt den Wärmeverlust im Brennstoffsystem und entspricht der Summe der transmittierenden und emittierenden Wärmestromdichte. Im ersten Bereich (A) ist die Wärmeproduktion größer als der Wärmeverlust, jedoch reicht die Wärmestromdichte noch nicht aus, um den Brennstoff zu entzünden. Das gesamte energie-

tische Niveau ist für eine Entzündung zu gering. Mit zunehmender Systemtemperatur steigt der Wärmeverlust und im Punkt  $T_1$  ist die Wärmeproduktion gleich dem Wärmeverlust. Bei dieser Temperatur beginnt Bereich B, in welchem der Wärmeverlust größer ist als die Wärmeproduktion. Wenn die Systemtemperatur  $T_2$  erreicht wird, übersteigt die Wärmeproduktion erneut den Wärmeverlust. Dann erst ist das gesamte energetische Niveau hoch genug, sodass ab diesem Punkt  $T_2$  eine Entzündung des Brennstoffs erfolgen kann. Dieser Bereich wird im Wesentlichen durch die höhere Wärmeproduktion nach Arrhenius bei höherer Reaktionsrate und erhöhter Temperatur bestimmt.

Diese Temperatur  $T_2$  wird im Folgenden als  $T_B$  bezeichnet und stellt nach Semenov die gesuchte Temperatur des Brennstoffs dar.

$$\dot{Q}_p = \dot{Q}_v [W] \quad (16)$$

$$\frac{d\dot{Q}_p}{dT} = \frac{d\dot{Q}_v}{dT} \left[ \frac{W}{K} \right] \quad (17)$$

Nach Semenov entspricht die Wärmeproduktion einer Wärmequelle nach Arrhenius und lässt sich wie folgt beschreiben:

$$\dot{Q}_p = H_0 \cdot k_0 \cdot \rho \cdot e^{-\frac{E_a}{R \cdot T_B}} \cdot V [W] \quad (18)$$

Gleichzeitig gilt für den Wärmeverlust das Newton'sche Abkühlungsgesetz.

$$\dot{Q}_v = \alpha \cdot A \cdot (T_B - T_U) [W] \quad (19)$$

Mit der thermischen Zeitkonstante  $\varphi$  und dem kinetischen Parameter der Arrheniusrate  $Q_0$

$$\varphi = \frac{\alpha}{\rho \cdot c_p} \cdot \frac{A}{V} \left[ \frac{1}{s} \right] \quad (20)$$

nach

$$Q_0 = \frac{H_0 \cdot k_0}{c_{p,B}} \left[ \frac{K}{s} \right] \quad (21)$$

ergibt sich aus (16) mit (18) und (19):

$$e^{-\frac{E_a}{R \cdot T_B}} = \frac{\varphi}{Q_0} \cdot (T_B - T_U) [-] \quad (22)$$

Hieraus wird mit der zweiten Bedingung (17) die Semenov-Gleichung aufgestellt und nach  $T_B$  abgeleitet. Es ergibt sich:

$$e^{-\frac{E_a}{R \cdot T_B}} = \frac{\varphi}{Q_0} \cdot \frac{R}{E_a} T_B^2 [-] \quad (23)$$

Gleichsetzen von (22) und (23) ergibt die quadratische Gleichung:

$$0 = T_B^2 - \frac{E_a}{R} \cdot T_B + \frac{E_a}{R} \cdot T_U [K^2] \quad (24)$$

mit der Lösung:

$$T_B = \frac{1}{2} \cdot \frac{E_a}{R} \cdot \left( 1 - \sqrt{1 - 4 \cdot \frac{R}{E_a} \cdot T_U} \right) [K] \quad (25)$$

Semenov geht in seiner Theorie von einer homogenen Temperaturverteilung innerhalb des Brennstoffs aus: „Die Wärmebilanz von Semenov ist geeignet für kleine Volumen, bei denen der Temperaturunterschied zwischen innen und außen nicht ausgeprägt ist [...] Physikalisch gesehen bedeutet die Wärmebilanz von Semenov, daß die innere Wärme unendlich schnell nach außen abgeführt wird“ [Krause 2014, S. 90].

### 2.4.3 Stationäre Theorie der thermischen Explosion nach Frank-Kamenetzki

Aufbauend auf der Theorie von Semenov entwickelte Frank-Kamenetzki (F.-K.) die stationäre Theorie der thermischen Explosion.

„In der stationären Theorie wird die Wärmeleitungsgleichung mit stetig verteilten Wärmequellen betrachtet. Die Lösung dieser Gleichung ergibt die stationäre Temperaturverteilung im Reaktionsgemisch. Bedingungen, bei denen der stationäre Verlauf der Reaktion nicht mehr möglich ist, stellen die gesuchten kritischen Bedingungen der Selbstentflammung dar“ [Frank-Kamenetzki 1959, S. 130]. F.-K. bezeichnet die Entzündung des Reaktionsgemisches, beispielweise einer Staubschicht, als Selbstentflammung.

Für diese Theorie baut F.-K. auf der stationären Fourier'schen Wärmeleitungsgleichung auf:

$$\rho \cdot c_{p,B} \cdot \frac{dT}{dt} = \lambda_B \cdot \left( \frac{d^2T}{dx^2} + \frac{d^2T}{dy^2} + \frac{d^2T}{dz^2} \right) + q''' \left[ \frac{W}{m^3} \right] \quad (26)$$

Für die volumenbezogene Wärmequelle wird ebenfalls der Arrhenius-Ansatz angenommen:

$$q''' = H_0 \cdot k_0 \cdot \rho \cdot e^{-\frac{E_a}{R \cdot T_B}} \left[ \frac{W}{m^3} \right] \quad (27)$$

Da nur der stationäre Fall betrachtet wird, fällt der instationäre Anteil in (26) weg, und mit (27) ergibt sich:

$$\lambda_B \cdot \left( \frac{d^2T}{dx^2} + \frac{d^2T}{dy^2} + \frac{d^2T}{dz^2} \right) = -H_0 \cdot k_0 \cdot \rho \cdot e^{-\frac{E_a}{R \cdot T_B}} \left[ \frac{W}{m^3} \right] \quad (28)$$

Mit dem Laplace-Operator  $\Delta$  ergibt sich:

$$\Delta T = -\frac{H_0 \cdot k_0 \cdot \rho}{\lambda_B} \cdot e^{-\frac{E_a}{R \cdot T_B}} [K] \quad (29)$$

Damit die nichtlineare differenzielle Gleichung (29) gelöst werden kann, führt F.-K. dimensionslose Parameter, die dimensionslose Temperatur  $\Theta$  und die dimensionslose Koordinate  $\xi$  mit der charakteristischen Länge  $L$  ein.

$$\xi = \frac{x}{L} [-] \quad (30)$$

$$\Theta = \frac{E}{R} \cdot \frac{\vartheta}{T_U^2} [-] \quad (31)$$

Dabei ist die Temperaturdifferenz:

$$\vartheta = T_B - T_U [K] \quad (32)$$

Er geht weiter davon aus, dass  $\vartheta \ll T_B$  ist. Dies bedeutet, dass die Umgebungstemperatur nur geringfügig niedriger ist als die Brennstofftemperatur. Mit dieser Annahme und einer Potenzreihenentwicklung nach  $\frac{\vartheta}{T_U}$  kommt F.-K. auf die Näherung:

$$1 - \frac{\vartheta}{T_U} \approx \frac{1}{1 + \frac{\vartheta}{T_U}} [-] \quad (33)$$

Diese Näherung ergibt einen Fehler von  $< 1 \%$ , wenn die Brennstoff- und Umgebungstemperatur um nicht mehr als  $10 \%$  voneinander abweichen.

Die Exponentialfunktion aus (29) kann umgeformt werden zu:

$$e^{-\frac{E_a}{R \cdot T_B}} = e^{-\frac{E_a}{R \cdot (T_U + \vartheta)}} = e^{-\frac{E_a}{R \cdot T_U} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\vartheta}{T_U}}} [-] \quad (34)$$

Mit der Näherung (33) geht die Exponentialfunktion über zu:

$$e^{-\frac{E_a}{R \cdot T_U} \cdot \left(1 - \frac{\vartheta}{T_U}\right)} = e^{-\frac{E_a}{R \cdot T_U}} \cdot e^{\frac{E_a \cdot \vartheta}{R \cdot T_U^2}} [-] \quad (35)$$

Als nächsten Schritt entdimensioniert F.-K. (29) mit (30) und (31):

$$\Delta_\xi \Theta = -\frac{H_0 \cdot k_0 \cdot \rho}{\lambda_B} \cdot \frac{E_a}{R \cdot T_U^2} \cdot L_C^2 \cdot e^{-\frac{E_a}{R \cdot T_U}} \cdot e^\Theta [-] \quad (36)$$

Dabei verwendet er den sogenannten Frank-Kamenetzki Parameter

$$\delta_{FK} = \frac{H_0 \cdot k_0 \cdot \rho}{\lambda_B} \cdot \frac{E_a}{R \cdot T_U^2} \cdot L_C^2 \cdot e^{-\frac{E_a}{R \cdot T_U}} [-] \quad (37)$$

Hier enthält die Differenzialgleichung nur einen dimensionslosen Parameter.

$$\Delta_\xi \Theta = -\delta_{FK} \cdot e^\Theta [-] \quad (38)$$

Nach F.-K. startet die Entzündung des Brennstoffs, wenn der dimensionslose Parameter einen kritischen Wert  $\delta_{FK,krit}$  überschreitet, wobei gilt:

$$\delta_{FK,krit} = \textit{konstant} [-] \quad (39)$$

Für die Entzündung infolge der Selbsterwärmung leitet F.-K. diese  $\delta_{FK,krit}$  aus (38) ab [Kapitel VII in Frank-Kamenetzki 1959]. Auf die Herleitung wird an dieser Stelle verzichtet. Der kritische F.-K.-Parameter wird bei der Bestimmung der reaktionskinetischen Parameter benötigt.

## 2.5 Bestimmbarkeit der reaktionskinetischen Parameter

Für die spätere Anwendung der „Hot-Spot-Theorien“ in Kapitel 6.1 werden die kinetischen Parameter „scheinbare Aktivierungsenergie“  $E_a$  und „präexponentieller Faktor“  $k_0$  benötigt. Diese Parameter können durch unterschiedliche Messverfahren ermittelt werden. Im Folgenden werden zwei Methoden beschrieben, die in der vorliegenden Dissertation Anwendung finden.

### 2.5.1 Selbstentzündungstemperatur mit der Warmlageranalyse

Bei der Bestimmung der Selbstentzündungstemperatur (SET) einer Staubprobe gemäß [VDI 2263 Blatt 1; DIN EN 15188] wird der Warmlagerschrank genutzt. Bei dieser Prüfung wird die Staubprobe in einen Zylinder aus feinem Drahtnetzgewebe gefüllt. Der Zylinder fasst ein Volumen von  $400 \text{ cm}^3$  und besitzt das Höhen/Durchmesser-Verhältnis:

$$\frac{H_Z}{D_Z} = 1 [-] \quad (40)$$

Neben der Proben temperatur wird die Ofentemperatur bestimmt. Hierbei werden Thermoelemente genutzt, wobei die Staubtemperatur mittig in der Probe gemessen wird.

Als SET gilt die „höchste Temperatur, bei der ein gegebenes Staubvolumen gerade noch nicht entzündet wird“ [DIN EN 15188, S. 5, Nr. 2.1]. Als Umgebungstemperatur wird die Ofentemperatur angesetzt.

„Es gibt zwei Methoden, um zu entscheiden, ob eine Entzündung stattgefunden hat oder nicht:

- a) wenn die Temperatur in der Mitte der Probe mindestens um  $60 \text{ K}$  über die Ofentemperatur ansteigt;
- b) wenn der Temperaturverlauf in der Mitte der Probe einen Wendepunkt aufweist und dies über der Ofentemperatur auftritt“ [DIN EN 15188, S. 9].

Es wird jedoch bereits als Entzündung angesehen, wenn eines der beiden Kriterien innerhalb der Prüfdauer von 24 Stunden auftritt.

Die Methode der [DIN EN 15188] wird i. d. R. genutzt, um die SET von großen Staubvolumina, beispielsweise in Silos oder Bunkern, zu bestimmen.

Für die Bestimmung der scheinbaren Aktivierungsenergie muss die SET für mindestens zwei weitere Proben volumina ermittelt werden, wobei die Proben volumina die gleiche Form, beispielsweise Zylinder mit Gleichung (40), besitzen müssen. Die Methode beruht auf der Theorie der stationären Selbstentzündung von F.-K. Der Frank-Kamenetzki Parameter, vgl. (37), wird umgeformt zu:

$$\ln\left(\frac{\delta \cdot T_U^2}{L_C^2}\right) = \ln\left(\frac{H_0 \cdot k_0 \cdot \rho}{\lambda_B} \cdot \frac{E_a}{R}\right) - \frac{E_a}{R \cdot T_U} [-] \quad (41)$$

Hierbei werden für die Temperatur der Umgebung  $T_U$  die SET und die charakteristische Länge  $L_C$  für den Radius des entsprechenden Zylinders eingesetzt. Der Frank-Kamenetzki-Parameter  $\delta$  wird zum kritischen Frank-Kamenetzki-Parameter  $\delta_{krit}$ . Da  $\delta_{krit}$  bei gleichen geometrischen Formen und Verhältnissen konstant ist (vgl. Gleichung (39)), geht Gleichung (41) über zu:

$$\ln\left(\frac{\delta_{krit} \cdot SET^2}{r^2}\right) = \ln\left(\frac{H_0 \cdot k_0 \cdot \rho}{\lambda_B} \cdot \frac{E_a}{R}\right) - \frac{E_a}{R \cdot SET} \quad (42)$$

Der Wert von  $\delta_{krit}$  für einen Zylinder mit einem Höhen/Durchmesser-Verhältnis von 1 beträgt je nach Literatur 2,76 [DIN EN 15188, S. 14 Tabelle A1] oder 2,84 [Krause 2002, S. 105 Tabelle 4.3.1]. Im Ignition Handbook [Babrauskas 2014] werden beide Werte angeführt und beschrieben, dass der Wert 2,76 der exakte Wert sei und sich der Wert 2,84 aus der Boddington's Annäherung ergebe [vgl. Babrauskas 2014, S. 381]. Im Weiteren wird  $\delta_{krit} = 2,76$  entsprechend der [DIN EN 15188] angesetzt.

Es ist ersichtlich, dass die Gleichung (42) der Geradengleichung der Form  $f(X) = m \cdot X + B$  entspricht. Die Selbstentzündungstemperaturen stellen jeweils einen Punkt in dem Arrheniusdiagramm dar. Auf der Abszisse dieses Diagramms ist die reziproke Selbstentzündungstemperatur abgebildet und die Ordinate beschreibt den rechten Term der Gleichung (42). Die Verbindung der Punkte ergibt eine Gerade, deren Steigung der scheinbaren Aktivierungsenergie entspricht. Das nachfolgende Bild 8 zeigt diese Auswertung schematisch.

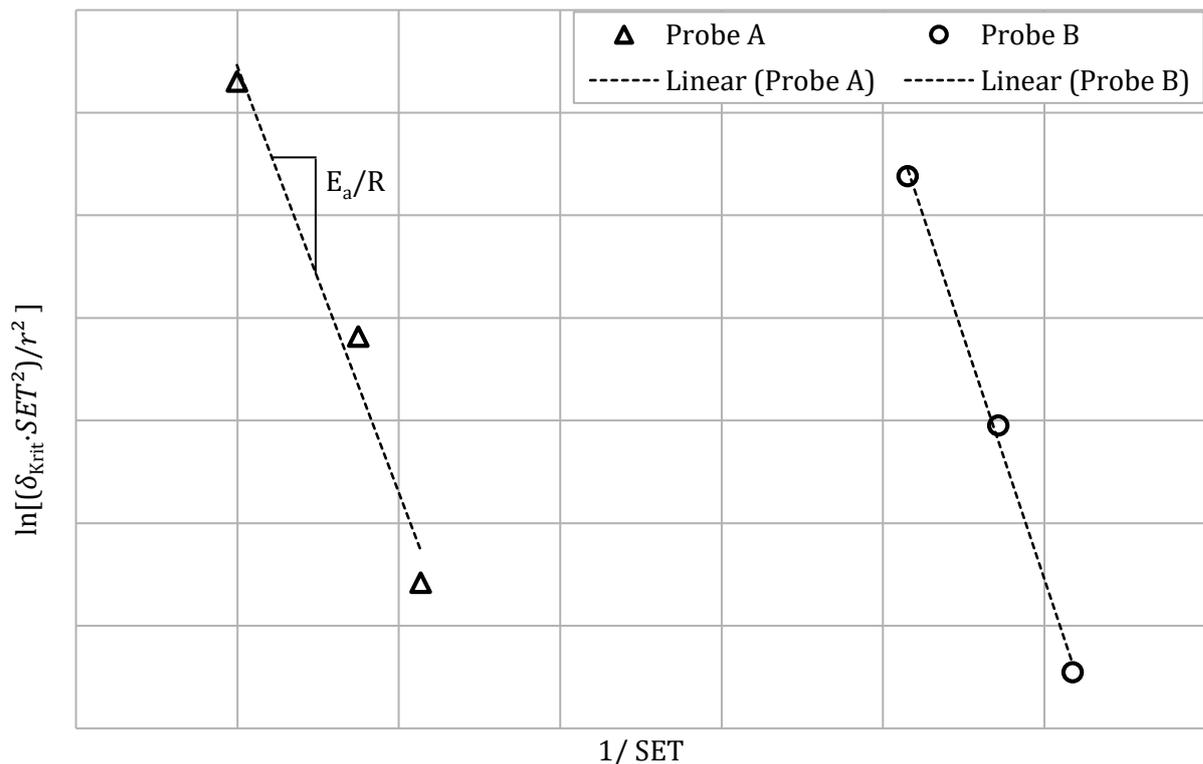


Bild 8: Arrheniusdiagramm zum Bestimmen der kinetischen Parameter

Sind die weiteren Stoffparameter Dichte  $\rho$ , Wärmeleitfähigkeit des Staubs  $\lambda_B$  und Reaktionsenthalpie  $H_0$  bekannt, kann aus dem Ordinatenabschnitt der Geraden der präexponentielle Faktor  $k_0$  bestimmt werden. Alternativ kann das Produkt aus dem präexponentiellen Faktor und der Reaktionsenthalpie ermittelt werden, wofür nur die Dichte und Wärmeleitfähigkeit benötigt wird. Diese Alternative ist

sinnvoll, da in der Hot-Spot-Theorie ebenfalls dieses Produkt benötigt wird (vgl. Kapitel 6.1.1 Beschreibung und mathematische Herleitung der Hot-Spot-Theorie). Diese Methode ist bereits in [DIN EN 15188] beschrieben.

### 2.5.2 Thermischer Massenverlust mit der Thermogravimetrischen Analyse

Neben dem Warmlagerschrank können mittels der Thermogravimetrischen Analyse (TGA) die kinetischen Parameter bestimmt werden. Die TGA ist eine Messmethode aus der analytischen Chemie, mit deren Hilfe der Stoffumsatz über einen Temperaturanstieg gemessen werden kann. Hierfür wird eine geringe Menge Staub (ca. 5 mg) in einem kleinen Tiegel mit einer bestimmten Heizrate erwärmt. Während der Analyse wird die Probenmasse kontinuierlich gemessen und somit kann die Veränderung der Stoffmasse bzw. ein Massenverlust in Abhängigkeit zur Temperatur ermittelt werden.

[Flynn und Wall 1966] stellten eine Methode vor, mit der aus mehreren TGA-Versuchen unterschiedlicher Heizraten, die scheinbare Aktivierungsenergie und der präexponentielle Faktor ermittelt werden können.

Bei dieser Methode wird für die Bestimmung der kinetischen Parameter davon ausgegangen, dass der gemessene Massenverlust durch die Arrhenius-Gleichung beschrieben wird. Des Weiteren wird angenommen, dass der Umsatzgrad bei unterschiedlichen Heizraten konstant ist. Demzufolge gilt:

$$\frac{dC}{dt} = k_0 \cdot e^{-\frac{E_a}{R \cdot T}} \cdot f(C) \left[ \frac{mg}{s \cdot K} \right] \quad (43)$$

Der Faktor  $f(C)$  beschreibt eine Funktion des Umsatzes, die nicht weiter ausgeführt wird. Durch die Beziehung

$$dT = k_0 \cdot dt \quad (44)$$

ergibt sich die thermogravimetrische Rate mit der Heizrate  $\omega$ :

$$\frac{dC}{dT} = \frac{k_0}{\omega} \cdot e^{-\frac{E_a}{R \cdot T}} \cdot f(C) \left[ \frac{mg}{K^2} \right] \quad (45)$$

Im nächsten Schritt werden die Variablen getrennt und integriert:

$$F(C) = \int_0^C \frac{dC}{f(C)} = \frac{k_0}{\omega} \cdot \int_{T_0}^T e^{-\frac{E_a}{R \cdot T}} dT \quad [-] \quad (46)$$

Durch partielle Integration folgt:

$$F(C) = \frac{k_0}{\omega} \cdot \frac{E_a}{R} \left[ \frac{E_a}{R} \cdot T \cdot e^{-\frac{E_a}{R \cdot T}} + \int_{-\infty}^{-\frac{E_a}{R \cdot T}} \frac{e^x}{x} dx \right] \quad [-] \quad (47)$$

$$x = \frac{E_a}{R \cdot T} \quad [-] \quad (48)$$

Mit

$$p\left(\frac{E_a}{R \cdot T}\right) = \left[ \frac{E_a}{R} \cdot T \cdot e^{-\frac{E_a}{R \cdot T}} + \int_{-\infty}^{-\frac{E_a}{R \cdot T}} \frac{e^x}{x} dx \right] [-] \quad (49)$$

wird (47) logarithmiert:

$$\log(F(C)) = \log\left(\frac{k_0 \cdot E_a}{R}\right) - \log(\omega) + \log\left(p\left(\frac{E_a}{R \cdot T}\right)\right) [-] \quad (50)$$

Mit der Approximation von [Doyle 1962]

$$\log\left(p\left(\frac{E_a}{R \cdot T}\right)\right) \cong -2,315 - 0,467 \cdot \frac{E_a}{R \cdot T} [-] \quad (51)$$

$$\frac{E_a}{R \cdot T} \geq 20$$

geht Gleichung (50) über zu

$$\log(F(C)) \cong \log\left(\frac{k_0 \cdot E_a}{R}\right) - \log(\omega) - 2,315 - 0,467 \cdot \frac{E_a}{R \cdot T} [-] \quad (52)$$

Flynn und Wall differenzieren jetzt nach  $\frac{1}{T}$  bei konstanter Umsatzrate C und es folgt

$$\frac{d \log(\omega)}{d \frac{1}{T}} \cong 0,467 \cdot \frac{E_a}{R} [-] \quad (53)$$

$$E_a \cong \frac{R}{0,467} \cdot \frac{d \log(\omega)}{d \frac{1}{T}} \left[ \frac{J}{mol} \right] \quad (54)$$

Aus dieser Gleichung schließen Flynn und Wall, dass der dekadische Logarithmus der jeweiligen Heizrate, über den die reziproke Temperatur in einem Diagramm dargestellt werden muss. Hierdurch ergibt sich für jede Heizrate ein Punkt in diesem Diagramm. Diese Punkte liegen alle auf einer Geraden, aus deren Steigung nun die scheinbare Aktivierungsenergie berechnet werden kann. Aus dem Achsenabschnitt der Ausgleichsgerade lässt sich mit Gleichung (52) ebenfalls der präexponentielle Faktor bestimmen. Wichtig hierbei ist, dass der Umsatzgrad dabei konstant gehalten werden muss. Die folgenden Bilder (Bild 9 und Bild 10) veranschaulichen schematisch diese Methode. Bild 9 zeigt die Ergebnisse einer TGA mit drei verschiedenen Heizraten, wobei der Stoffumsatz über die Temperatur aufgetragen wird. Aus den drei Heizraten ergeben sich jeweils die Temperaturen, die sich bei konstanter Umsatzrate unterscheiden (gestrichelte Linie im Diagramm). Bild 10 stellt die Umsatzraten in einem Diagramm dar, bei dem die Ordinate dem Logarithmus der Heizrate und die Abszisse der entsprechenden reziproken Temperatur entspricht.

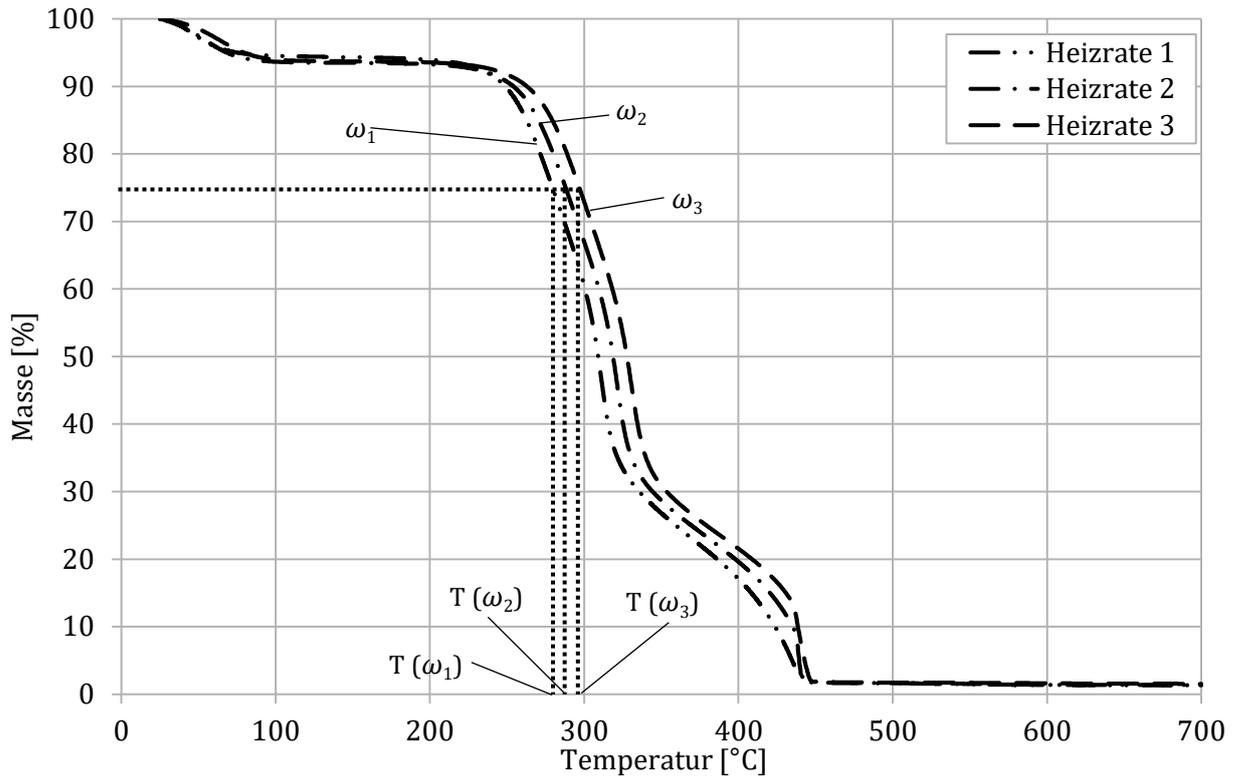


Bild 9: Schematische Darstellung der TGA zur Bestimmung der Umsatzrate C und der entsprechenden Temperatur

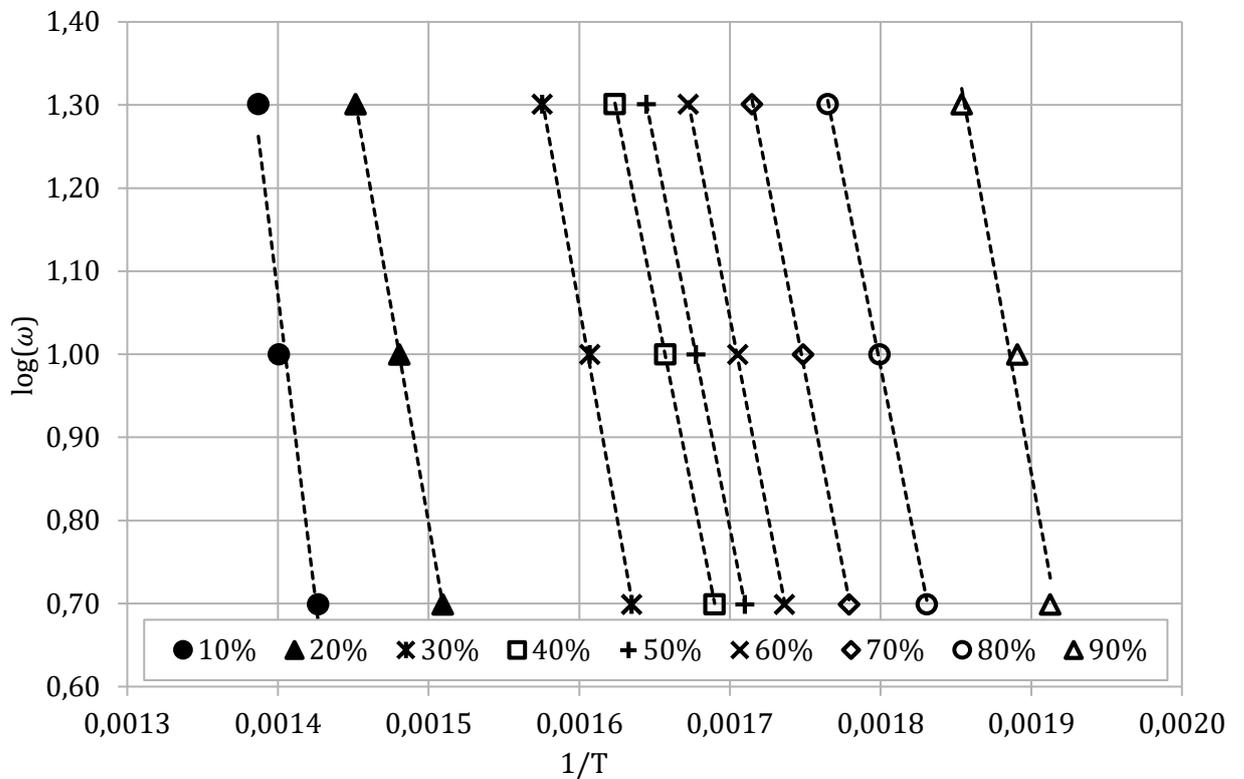


Bild 10: Schematische Darstellung der verschiedenen Umsatzraten (Werte in %) in Abhängigkeit der Heizraten für die Bestimmung der scheinbaren Aktivierungsenergie

## 2.6 Detektionstechnik für Wärmestrahlung

Zur sicherheitstechnischen Bewertung der inerten heißen Partikeln ist deren Detektierbarkeit bedeutsam. Eine umfassende und detaillierte Beschreibung dieser Prinzipien kann der entsprechenden Fachliteratur [Tränkler und Reindl 2014; Schuster und Kolobrodov 2009; Dereniak und Boreman 1996; Stahl und Miosga 1986] entnommen werden.

Grundsätzlich wird bei der Detektion des infraroten Spektrums der Wärmestrahlung zwischen Nicht-Quantendetektoren (thermische Detektoren) und Quantendetektoren (Photonendetektoren) unterschieden. Thermische Detektoren können über den gesamten Bereich der Wellenlängen die immitierende Wärmestromleistung (Strahlungsfluss) messen. Dadurch sind diese von der Wellenlänge unabhängig. Diese Fähigkeit der thermischen Detektoren kann sehr gut genutzt werden, um tiefe Temperaturen zu messen. Grundsätzlich gilt für alle thermischen Detektoren, dass das elektrische Signal am Detektor proportional zum Strahlungsfluss ist. Dieser Strahlungsfluss löst je nach Detektortyp unterschiedliche elektrische Effekte aus. Bei einem Bolometer ändert sich auf Grund der Erwärmung des Detektors der elektrische Widerstand. Thermoelektrische Sensoren nutzen den thermoelektrischen Effekt. Bei diesem entsteht an den Verbindungsstellen zweier unterschiedlicher elektrischer Leiter eine Spannung. Steigt die Temperaturdifferenz innerhalb dieser elektrischen Leiter, so steigt ebenfalls die Spannung zwischen diesen Leitern. Klassische Thermoelemente nutzen ebenfalls diesen Effekt. Als dritte Messmöglichkeit kann der pyroelektrische Effekt genutzt werden. Hier entsteht durch eine Temperaturdifferenz an pyroelektrischen Kristallen eine elektrische Spannung, weshalb diese Sensoren als pyroelektrische Sensoren bezeichnet werden.

Quantendetektoren detektieren nicht die immitierte Wärmeenergie pro Zeiteinheit, sondern die Photonen pro Zeiteinheit. Sie sind damit in gewisser Weise ein Photonen-Zähler. Die Detektoren können die Photonen nur dann „zählen“, wenn die Energie der absorbierten Photonen  $\dot{Q}_{Pho}$  größer ist als die Anregungsenergie  $\dot{Q}_{Anr}$  des entsprechenden Detektors. Aus diesem Grund besitzen Quantendetektoren einen nach oben begrenzten Wellenlängen-Messbereich (maximale Wellenlänge), über den sie nicht detektieren können. Dieses Verhalten wird Photoelektrischer Effekt genannt und ist in (55) bis (57) mathematisch beschrieben.

$$\dot{Q}_{Pho} > \dot{Q}_{Anr} \quad (55)$$

$$\dot{Q}_{Pho} = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (56)$$

$$\lambda_{max, Detek} = \frac{h \cdot c}{\dot{Q}_{Anr}} \quad (57)$$

Infolge weiterer Parameter, wie z. B. der Bauart, der Messempfindlichkeit oder der Rauscheffekte, besitzen die Quantendetektoren auch eine Wellenlängenbegrenzung nach unten (minimale Wellenlänge).

Die Quantendetektoren werden des Weiteren in Photowiderstände (Photoleiter) und Photodioden unterteilt, wobei beide Typen mit einer Betriebsspannung betrieben werden. Photowiderstände ändern beim Absorbieren von Photonen ihren elektrischen Widerstand, wohingegen Photodioden beim Aufnehmen von Photonen den Stromkreis der Betriebsspannung „schalten“. Für dieses „Schalten“ wird der photoelektrische Effekt der Photodiode genutzt. Mit eintreffendem Licht bzw. mit den Photonen nimmt der Sperrstrom zu, der pn-Übergang wird leitend und der Strom fließt gegen die Sperrrichtung [vgl. Stiny 2018, S. 493].

### 3 Status quo der wissenschaftlichen Publikationen

In diesem Kapitel wird ein Überblick über Versuche zur Ermittlung der Zündwirksamkeit von inerten heißen Partikeln gegeben. Die Zündwirksamkeit heißer Partikeln beschreibt, dass diese Partikeln die notwendige Energie für die Entstehung einer Verbrennung liefern. Eine Übersicht über die Hot-Spot-Theorien wird später in Kapitel 6.1.1 beschrieben. Auf folgende Unterpunkte wird eingegangen:

- Zündversuche mit inerten heißen Partikeln
- Zündversuche mit mechanisch erzeugten Funken
- Untersuchungen zur Entzündung durch Wärmeströme

#### 3.1 Zündversuche mit inerten heißen Partikeln

Das Zündverhalten von heißen Partikeln wurde bisher überwiegend im Bereich der Wald- und Vegetationsbrandforschung berücksichtigt. Hier wurden sowohl brennende Materialpartikeln als auch heiße metallische Gegenstände als Zündquellen verwendet. Im Rahmen der vorliegenden Dissertation wird der Fokus auf inerten heißen Partikeln liegen.

Erste Untersuchungen zur Ausbreitung und dem Zündverhalten von Schweißperlen wurden durch [Worpenberg 1989] durchgeführt. Er untersuchte hauptsächlich inerte heiße Partikeln, die beim Schweißen oder anderen thermischen Trennverfahren entstehen. Sein Fokus lag auf der Brandentstehung und Brandverhütung bei Heißenarbeiten an nicht stationären Arbeitsplätzen.

Umfangreiche Untersuchungen zur Entzündung von Waldböden, ähnlichen Brennstoffen wie Nadeln von Nadelbäumen oder Mulch und Zellulose durch heiße metallische Partikeln wurden seit den 1990er Jahren durchgeführt. Das Zündverhalten von heißen Aluminiumpartikeln wurde durch [Rowntree und Stokes 1994] veröffentlicht. Grund der Forschung war, dass sich berührende Hochspannungsleitungen in Australien heiße Aluminiumpartikeln erzeugten, die Waldbrände initiieren können. Ähnliche Untersuchungen wurden 1990 von Stokes publiziert [Stokes 1990 in Rowntree und Stokes 1994, Originalquelle steht nicht zur Verfügung].

2011 veröffentlichten [Hadden et al. 2011] weitere Untersuchungen zum Zündverhalten von metallischen Kugeln in Zellulosestaub. Es wurde ein Zusammenhang zwischen Kugeltemperatur und Kugeldurchmesser bestimmt, bei welchem sich ein Flammen- bzw. Glimmbrand in der Staubschüttung ergab. Im mathematischen ausgedrückt, lässt sich das Zündverhalten bzw. die Zündwirksamkeit (ZW) als Funktion der Partikelgröße ( $\varnothing$ ) und Partikeltemperatur ( $T_p$ ) beschreiben –  $ZW(T_p, \varnothing)$ . In Bild 11 sind die Ergebnisse dargestellt. Die schwarzen Linien im Diagramm entsprechen den analytischen Lösungen auf Basis der „Hot-Spot-Theorien“.

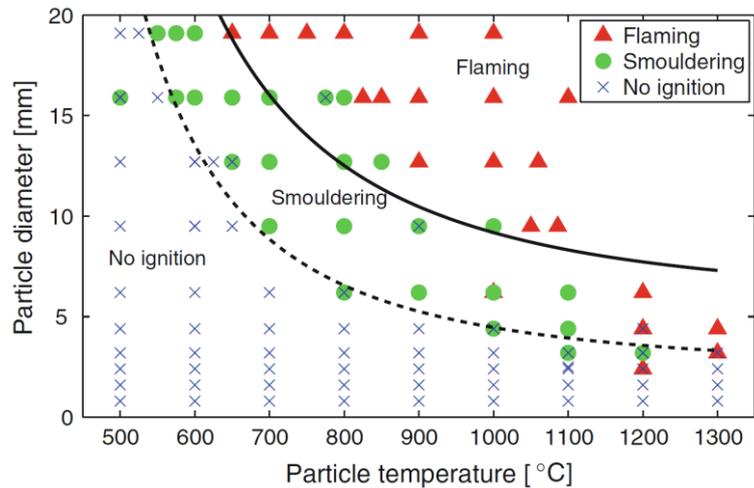


Bild 11: Zündzusammenhang der Partikelgröße und Partikeltemperatur [Hadden et al. 2011, S. 347]

Des Weiteren stellte Hadden einen Zusammenhang zwischen der Kugelgröße und einer gespeicherten Wärmeenergiemenge ( $E_p$ ) dar –  $ZW(\varnothing, E_p)$ . Die Erkenntnisse aus Bild 12 zeigen, dass die Zündwirksamkeit nicht allein von der Kugelgröße abhängt, sondern auch von der Kugeltemperatur und damit von der gespeicherten Wärmeenergiemenge.

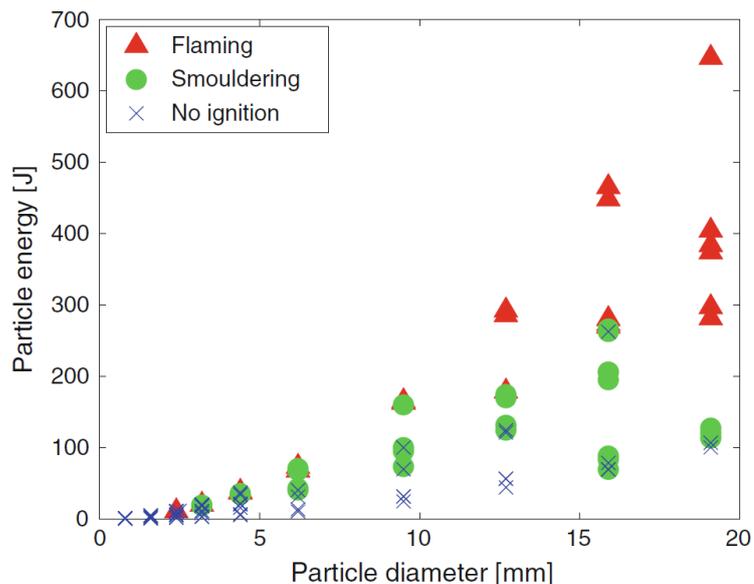


Bild 12: Zündzusammenhang der Partikelgröße und Partikelenergie [Hadden et al. 2011, S. 348]

Ferner wurden an der University of California in Berkely (USA) Untersuchungen durchgeführt. Der Anlass dafür waren ebenfalls Wald- und Vegetationsbrände<sup>d</sup>, die durch Hochspannungsleitungen oder heißen Partikeln von Forstmaschinen entstanden waren.

<sup>d</sup> Wald- und Vegetationsbrände zerstören in den Sommermonaten immer große Waldgebiete und stellen somit auch eine große Gefahr für die Umwelt dar. In den deutschen Medien wird insbesondere von Wald- und Vegetationsbrände in Australien oder der Westküste der Vereinigten Staaten von Amerika berichtet. Durch den Klimawandel steigt auch in Deutschland in den Sommermonaten die Gefahr von Wald- und Vegetationsbränden. Daher werden Wald- und Vegetationsbrände auch in Deutschland wissenschaftlich untersucht. Neben der Brandentstehung steht auch die Bekämpfung solcher Brände im Fokus. In diesem Zusammenhang sind beispielsweise die Dissertationen von [Wüdrich 2012; Cimolino 2014; Schneider 2017] zu nennen.

Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden verschiedene metallische Kugeln unterschiedlicher Temperaturen und Durchmesser überwiegend in Zellulosestaub fallen gelassen. Es wurde anschließend überprüft, bei welchem Kugeldurchmesser sich in Abhängigkeit zur Temperatur eine flammende oder glimmende Entzündung der Staubschicht ergab. Im Rahmen dieser Arbeit entstand die Dissertation von [Urban 2017], die darüber hinaus in einzelnen Teilergebnissen von [vgl. Fernandez-Pello et al. 2014; Zak et al. 2014; Zak et al. 2015; Urban et al. 2014; Zak et al. 2013] und später von [Urban et al. 2018] veröffentlicht wurde. Bild 13 zeigt Ergebnisse der Untersuchungen der Dissertation von Urban, bei denen eine flammende Entzündung initiiert wurde.

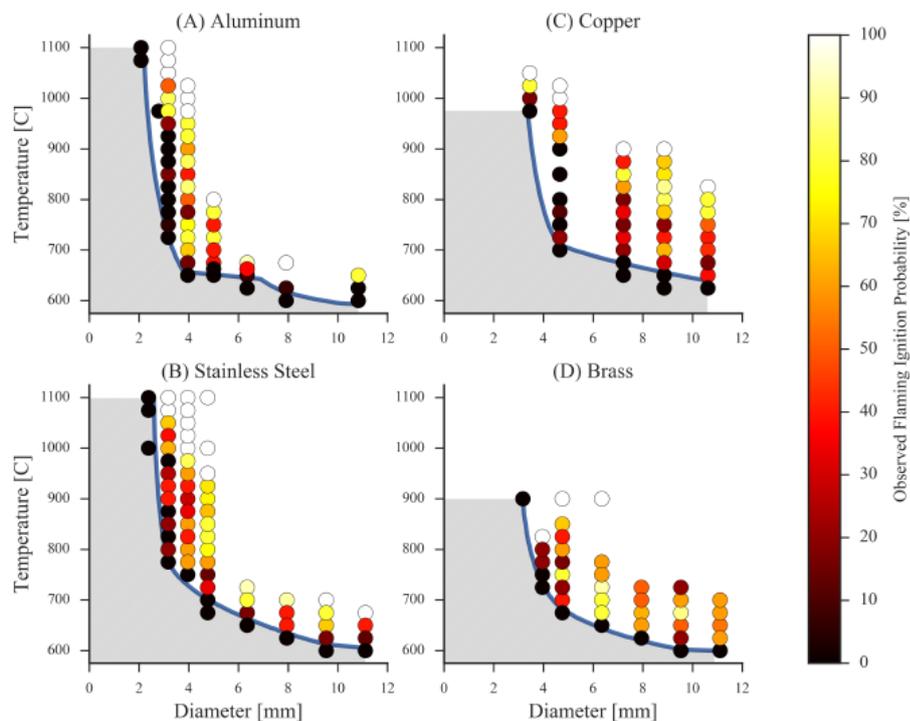


Bild 13: Zündzusammenhang der Partikelgröße und Partikeltemperatur bei unterschiedlichen Partikelwerkstoffen von [Urban 2017, S. 34]

Die von Urban angebenen Zündwahrscheinlichkeiten wurden jeweils aus mindestens fünf einzelnen Versuchen abgeleitet, wobei die Validität der angebenen Wahrscheinlichkeiten aus fünf Einzelversuchen fraglich ist. Bei diesen wurden die Kugeln jeweils in einem Röhrenofen auf die entsprechende Temperatur erwärmt und anschließend auf das Brennstoffbett fallen gelassen. Der gesamte Vorgang wurde seitlich zu Bewertungszwecken mit einer Schlierenkamera gefilmt. Da in den Veröffentlichungen keine genauen Angaben zur Bestimmung der Kugeltemperaturen gegeben wurden, wird an dieser Stelle davon ausgegangen, dass die eingestellte jeweilige Ofentemperatur als Kugeltemperatur angenommen wurde. Diese wird dann auch im Diagramm dargestellt. Dies erklärt die exakten Temperaturangaben von beispielsweise 1.000 °C in den grafischen Ergebnisdarstellungen von Urban oder Hadden.

Grundsätzlich zeigen alle durchgeführten Versuche einen gleichen Trend: Mit steigendem Durchmesser der Kugeln verringert sich die Kugeltemperatur, die zur Entzündung des Brennstoffs notwendig

ist. Des Weiteren ist zu erkennen, dass die verschiedenen untersuchten Metalle einen Einfluss auf die Temperatur besitzen, die zur Entzündung des Staubs führt. Hieraus lässt sich der Schluss ziehen, dass die gespeicherte Wärmeenergie einen Einfluss auf die Zündwirksamkeit besitzt. Da Aluminium eine deutlich größere Wärmekapazität ( $837 \frac{J}{kg \cdot K}$  bei 0 °C und  $984 \frac{J}{kg \cdot K}$  bei 200 °C) besitzt als Kupfer (Copper) ( $381 \frac{J}{kg \cdot K}$  bei 0 °C und  $415 \frac{J}{kg \cdot K}$  bei 200 °C) [vgl. VDI 2006, Dea 4 Tabelle 1], reichen bei gleichem Kugeldurchmesser bereits geringere Kugeltemperaturen aus, um eine Entzündung zu initiieren (vgl. (A) mit (C) in Bild 13).

[Wang et al. 2015] publizierten Ergebnisse von Zündversuchen mit heißen metallischen Partikeln und Polystyrolschaum. Grund dieser Forschungsarbeit war, dass das Wärmedämmmaterial in modernen Gebäuden aus expandierten bzw. extrudierten Polymerschäumen bestehen kann, welches sich durch Heiß- oder Schweißarbeiten schneller entzünden kann als andere Dämmstoffe (wie z. B. beim Brand des Flughafens in Düsseldorf 1996). Hier wurde ebenfalls ein zündfähiger Zusammenhang zwischen Kugeltemperatur und Durchmesser untersucht. Auch in dieser Untersuchung wurden verschieden große Kugeln in einem Röhrenofen erwärmt. In diesem Fall wurde die jeweilige Kugel durch einen langen Keramiklöffel mittig im Ofen gehalten, bis ein Thermoelement die entsprechende Kugeltemperatur angab. Da der Ofen um 5 % geneigt war, konnte anschließend die erwärmte Kugel einfach, schnell und selbstständig auf den Polymerschäum rollen. Die Ergebnisse zeigen die gleiche Tendenz: Mit steigendem Kugeldurchmesser sinkt die Kugeltemperatur, die zur Entzündung notwendig ist.

Durch die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung und die Otto-von-Guericke Universität Magdeburg wurden Versuche zur Zündwirksamkeit von in Staubschüttung eingebetteten Glimmnestern und heißen Partikeln durchgeführt [Krause und Schmidt 2000]. In den Experimenten wurden verschieden große Porzellankugeln für die Simulation der heißen Partikel verwendet. Somit wurden hier anstatt metallischer mineralische Partikeln genutzt. Der Brennstoff in diesen Versuchen war Korkstaub. Die erwärmten Kugeln wurden mittels eines kleinen entfernbaren Rohres mittig in die Staubschüttung eingebracht. Anschließend wurde das Rohr entfernt, sodass die Kugel komplett vom Staub umgeben war. Mit mehreren Thermoelementen wurde die Staub- und Kugeltemperatur aufgezeichnet. Die Ergebnisse zeigen den bisherigen Trend: Kugeln mit einem größeren Durchmesser benötigen eine geringe Temperatur, um die Staubschüttung zu entzünden.

Im Rahmen des in Kapitel 1.4 beschriebenen Forschungsvorhabens an der Bergischen Universität Wuppertal wurden bereits Teilergebnisse veröffentlicht. Auch in diesem Forschungsvorhaben sollte eine Korrelation zwischen Partikeldurchmesser und Temperatur gefunden werden, die eine abgelagerte Staubschicht entzünden kann. Bei diesen Untersuchungen wurde jedoch nicht die Entstehung eines Flammenbrandes als Zündkriterium angesehen, sondern die Initiierung eines Schmelbrandes [vgl. Bechem et al. 2017; Bechem und Barth 2018, 2019]. Die Änderung des Zündkriteriums beruht darauf, dass bereits ein Schmelbrand eine kontinuierliche Verbrennung ist, welche sich zu einem

Flammenbrand entwickeln kann. Eine ausführliche Erläuterung dieser Versuche ist Teil der vorliegenden Dissertation und in Kapitel 4 gegeben.

### 3.2 Zündversuche mit mechanisch erzeugten Funken

Da im Modell des inerten hochmobilen zündwirksamen Partikels (iHZP) die Abgrenzung über die mechanisch erzeugten Funken erfolgt, werden an dieser Stelle Versuche zur Zündwirksamkeit von mechanisch erzeugten Funken beschrieben. Es wurden überwiegend Forschungen zur Zündwirksamkeit von mechanisch erzeugten Funken in Brennstoff/Luft-Gemischen durchgeführt, beispielsweise durch [Bartknecht 1989; Ritter 1984; Pedersen und Eckhoff 1987; Beyer 2017; Müller 1988]. 2006 wurde eine Untersuchung zur Zündwirksamkeit von mechanisch erzeugten Funken in Staub/Luft-Gemischen und abgelagerten Staubschichten durch [Rogers et al. 2006] veröffentlicht. In diesen Experimenten wurden bei langsam drehenden Reibvorgängen einzelne mechanisch erzeugte Funken geschaffen, die auf verschiedene abgelagerte Staubschichten fielen. Bei der Durchführung wurden der Anpressdruck und die Geschwindigkeit im Reibvorgang variiert, wodurch unterschiedlich warme mechanisch erzeugte Funken entstanden. Die Ergebnisse zeigen, dass je nach Kombination aus Anpressdruck und Geschwindigkeit unterschiedliche Verbrennungsarten entstehen. Diese Ergebnisse sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Ergebnisse nach [Rogers et al. 2006], eigene Darstellung

Staubschicht	Geschwindigkeit [m/s]	Anpressdruck [kN]	Verbrennungsart
Sägemehl	5	5	Flammen
Sägemehl	5	1	kurzlebiger Schwelbrand
Mais	5	5	keine anhaltende Verbrennung
Kohle	5	5	kurzzeitige Flamme
Calciumstearat	5	5	anhaltende Flamme

Grundlegend zeigen diese Ergebnisse, dass die Zündwirksamkeit materialabhängig ist. Ebenfalls ist zu sehen, dass diese bei steigendem Anpressdruck ebenfalls zunimmt, vermutlich, weil durch höheren Anpressdruck mehr mechanisch erzeugte Funken generiert werden und somit mehr Wärmeenergie in das untersuchte Material eingebracht wird.

2011 veröffentlichten [Wingerden et al. 2011] Ergebnisse einer umfangreichen Studie zum Zündverhalten von mechanisch erzeugten Funken in Staubschichten. Der inhaltliche Kern wurde bereits im Jahr 2000 im Rahmen einer Master-Thesis [Hesby 2000 in Wingerden et al. 2011,- Originalquelle

steht nicht zur Verfügung] erarbeitet, jedoch nicht veröffentlicht. Im Rahmen dieser Untersuchung wurden verschiedene Versuchsparameter variiert. Hierzu zählten die Staubproben (Material, Partikelgröße und Feuchtigkeit), die Abstände zwischen der Funkenerzeugung und dem Staub, die Metalle, die zur Funkenerzeugung dienten, sowie die Funkengröße. Für die Bewertung wurde in Analogie zur Brennzahl gemäß [VDI 2263 Blatt 1] eine Einstellung in sieben Klassen des Brenn- bzw. Zündverhaltens von Staubschichten von Klasse 0 „keine Entzündung“ bis Klasse 7 „offene Flamme“ entwickelt. Die mechanisch erzeugten Funken wurden durch einen Schleifvorgang zwischen einem sich drehenden Schleifrad und einem feststehenden Metallstift erzeugt und auf eine darunter platzierte Staubprobe gesprüht.

Die Hauptaussagen der Ergebnisse waren:

- „A relatively high spark density is needed to establish smoldering combustion in dust layers for the dusts investigated. Ignition of a dust layer by a single impact spark therefore seems to have a very low probability.
- The results showed no clear correlation with regard to the ignition probability of a dust layer by mechanical sparks and especially the dust layer combustion properties.
- A relatively large median particle size dust is easier ignited by mechanical sparks than fine dust.“

[Wingerden et al. 2011, S. 2]

Des Weiteren wurde festgestellt, dass die Zündwirksamkeit vom Stiftmaterial und somit vom Material der mechanisch erzeugten Funken abhängig ist. Dieses war bei den Versuchen mit kleinen heißen Oberflächen von Bartknecht nicht der Fall [vgl. Bartknecht 1989]. Dass das Funkenmaterial bei mechanisch erzeugten Funken einen Einfluss besitzt, lässt sich damit erklären, dass mechanisch erzeugte Funken verbrennendes Metall sind. Bild 14 stellt diesen Verbrennungsprozess schematisch dar. Bei der Verbrennung können die Funken eine Temperatur erreichen, die der Verdampfungstemperatur des jeweiligen Metalls entspricht [vgl. Ritter 1984, S. 133]. Dies erklärt die unterschiedliche Zündwirksamkeit der verschiedenen Metallstifte.

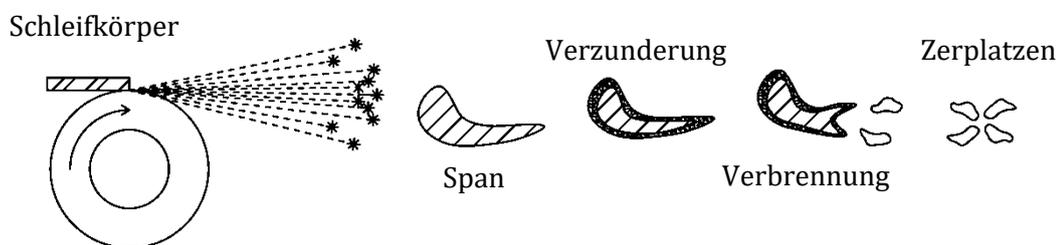


Bild 14: Verbrennung eines Schleiffunkens nach [Ritter 1984, S. 134], eigene Darstellung

### 3.3 Untersuchungen zur Entzündung durch Wärmeströme

In den Versuchen von [Hadden et al. 2011] wurde festgestellt, dass neben der Temperatur eines inerten heißen Partikels ebenfalls der emittierende Wärmestrom dieses Partikel ( $\dot{Q}$ ) für die Zündwirksamkeit relevant ist –  $ZW(\dot{Q}, \varnothing)$ . Zum Abschluss des Literaturüberblicks werden Untersuchungen und Studien kursorisch beschrieben, in denen ausschließlich oder neben einer Partikeltemperatur auch der Wärmestrom von der Zündquelle auf den Brennstoff betrachtet und bewertet wurde.

In der Mitte des 20. Jahrhunderts wurden verschiedene Zündwirksamkeitsversuche mit elektrisch erwärmten Drähten in Sprengstoffen durchgeführt [Baer und Ryan 1970; Zarko und Khlevnoi 1971, 1974]. Darin wurden Widerstandsdrähte mit kleinen Durchmessern von 25,6  $\mu\text{m}$  bis 1.024  $\mu\text{m}$  verwendet, wobei Zarko und Khlevnoi nur zwei Drähte mit  $\varnothing = 100 \mu\text{m}$  und  $200 \mu\text{m}$  nutzten. Bei der Ergebnisdarstellung wurde die Entzündungszeit der Drahttemperatur (Zarko und Khlevnoi) oder dem elektrischen Wärmestrom (Baer und Ryan) aufgetragen und grafisch dargestellt. Der Vollständigkeit halber soll hier erwähnt werden, dass beide Autorenpaare mathematische Modelle verwenden, um die Versuchsergebnisse analytisch zu beschreiben bzw. vorherzusagen.

Die Zündwirksamkeit von eingeschütteten Gegenständen mit konstantem Wärmestrom an der Oberfläche wurde von [Hensel 1988] untersucht. Hierfür wurden elektrisch erwärmte Kugeln in unterschiedlich große kugelförmige Staubschüttungen eingebracht. Durch die elektrische Erwärmung konnte an der Kugeloberfläche ein konstanter Wärmestrom angesetzt werden. „Hensel [...] untersuchte dabei das Glimmverhalten für Aluminiumkugeln acht verschiedener Durchmesser, wobei der Durchmesser der umgebenden Staubschüttung fünffach variiert wurde“ [Krause 2002, S. 38]. Des Weiteren nutzte Hensel Glühlampen als Zündquelle und untersuchte verschiedene Umgebungstemperaturen. Als Ergebnis dieser Versuche wurde die kritische Leistung ermittelt. Hierbei ist die kritische Leistung der Mittelwert aus der Leistung, die gerade noch eine Entzündung initiiert, und der, die gerade keine Entzündung mehr initiiert. Als Fazit stellt Hensel fest, „daß bei konstant gehaltenen äußeren Abmessungen der Staubschüttung mit steigender Größe der Erhitzerkugel die kritische Leistung ansteigt. Das bedeutet, daß eine Staubschüttung durch einen kleinen erhitzten Körper (z. B. Leistungstransistor oder erhitztes Metallteilchen) schon bei relativ kleinen Leistungsbeträgen gezündet wird, während für die Zündung durch große Körper (z. B. Elektromotoren) deutlich höhere Leistungsbeträge nötig sind. Bemerkenswert und wesentlich ist, daß die Wärmestromdichte an der Oberfläche der Erhitzerkugel  $\dot{q} [W \cdot m^{-2}]$  im Falle der Zündung über einen weiten Bereich der Volumenverhältnisse von Staubkugel zur Erhitzerkugel, innerhalb der Meßgenauigkeit, konstant bleibt“ [Hensel 1988, S. 158].

In der bereits erwähnten Veröffentlichung von [Rogers et al. 2006] sind ebenfalls Zündwirksamkeitsversuche von abgelagertem Staub durch elektrisch erwärmte Gegenstände enthalten. Bei diesen Versuchen wurde eine Heizpatrone mit einem Durchmesser von 10 mm und einer Länge von 40 mm [vgl. Bild 7 in Rogers et al. 2006, S. 9] für die Simulation eines heißen Partikels genutzt, welche vier verschiedene Staubproben entzündete. Der Staub wurde in einen würfelförmigen Drahtnetzkorb mit

einer Kantenlänge von 10 cm gegeben. Als Ergebnis wurde ein Zusammenhang zwischen der Temperatur und der Leistung der Heizpatrone ermittelt, bei dem eine Entzündung gerade noch möglich war, sowie ein Zweiter, bei dem keine Entzündung mehr beobachtet wurde. Diese Ergebnisse stellt Tabelle 3 dar.

Tabelle 3: Ergebnisse der Versuche mit einer Heizpatrone nach [Rogers et al. 2006, S. 7], eigene Darstellung

<b>Staub</b>	<b>Temperatur ohne Entzündung</b>	<b>Leistung ohne Entzündung</b>	<b>Temperatur mit Entzündung</b>	<b>Leistung mit Entzündung</b>
Sägemehl	173 °C	5,42 W	203 °C	5,85 W
Kohlenstaub	170 °C	4,30 W	211 °C	4,90 W
Bio-Abfall	181 °C	5,34 W	238 °C	5,75 W
Maisstärke	171 °C	4,66 W	207 °C	5,80 W

Des Weiteren wurden diese Versuche mit erwärmter Staubprobe durchgeführt. Hier zeigte sich, dass mit steigender Temperatur des Staubs die zur Zündung benötigte Leistung sinkt.

### 3.4 Zwischenfazit

Zusammenfassend zeigen die ausgewerteten wissenschaftlichen Publikationen folgendes:

- Einzelne heiße inerte Partikeln aus unterschiedlichen Metallen können abgelagerte Staubschichten entzünden. Die Zündwirksamkeit dieser Partikeln ist neben dem Material von seiner Größe und Temperatur abhängig.
- Der zündwirksame Zusammenhang zwischen der Größe und der Temperatur von inerten heißen Partikeln zeigt, dass im Allgemeinen größere Partikeln geringere Temperaturen besitzen, um zündwirksam zu sein, als kleinere.
- Mechanisch erzeugte Funken können ebenfalls abgelagerte Staubschichten entzünden, jedoch sind einzelne Funken nicht zündwirksam. Erst eine größere Anzahl an Funken besitzt genug thermische Energie für einen Staubbrand.

## 4 Phänomen und Charakterisierung inerter heißer Partikeln

Basierend auf den Erkenntnissen des Status quo der wissenschaftlichen Publikationen zu inerten heißen Partikeln wird in diesem Kapitel dieses Partikel phänomenologisch veranschaulicht und erstmals als neue Zündquellenart definiert.

Heiße Partikeln werden in der [DIN EN 1127-1] als mögliche Zündquellen für eine Staubexplosion genannt. Allerdings fehlt eine weitere Konkretisierung dieser Zündquelle.

Ausgehend von der sehr kurzen Beschreibung in der Norm, dass heiße Partikeln beispielweise Schweißperlen sind, liegt es nahe, dass ausschließlich metallische Partikel als heiße Partikel verstanden werden können. Ebenfalls könnte der in Bild 15 und im Standardwerk des Explosionsschutzes [vgl. Bartknecht und Zwahlen 1993] dargestellte Fremdkörper diese Vermutung bestätigen. Dieser wurde nach einer Staubexplosion in einem Mühlenbunker gefunden und soll die wirksame Zündquelle der Staubexplosion gewesen sein. Bartknecht stellt weiter fest, dass dieses Partikel eine Oberflächentemperatur von  $> 1.000\text{ °C}$  besessen haben muss, da die Oberfläche verzündert war.



Bild 15: Fremdkörper, der nach einer Staubexplosion in einem Mühlenbunker gefunden wurde [Bartknecht und Zwahlen 1993, S. 389]

Bartknecht und Müller führten Versuche zur Zündwirksamkeit von mechanisch erzeugten Funken in Gas/Luft- und Staub/Luft-Gemischen durch [Bartknecht 1989; Müller 1988], wobei die Funken durch Schlag- und Reibvorgänge erzeugt wurden. Insbesondere bei Reibfunken wurde festgestellt, dass sich das Brennstoff/Luft-Gemisch beim Vorbeiströmen an der Oberfläche der Versuchsaapparatur erwärmt. Dabei wird dem Gemisch eine erheblich größere Wärmeenergiemenge zugeführt als durch die mechanisch erzeugten Funken. Die gleiche Erkenntnis konnte auch aus einem ähnlichen Versuchsaufbau gewonnen werden, der an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig durchgeführt wurde [vgl. Beyer 2017].

Aufgrund dieser Beobachtung wurden von Bartknecht und Müller Untersuchungen der Zündwirksamkeit von brennbaren Stäuben an kleineren heißen Oberflächen durchgeführt [Bartknecht 1989, S. 160–197; Bartknecht und Zwahlen 1993, S. 379–389; Müller 1988]. Sie nutzten verschiedene Metallstifte mit Durchmesser von 4 mm bis 8 mm. Diese wurden in einem Infrarotofen erwärmt und anschließend mit Staub berieselt. Anschließend wurde beobachtet, bei welcher Stiftemperatur eine Entzündung des Staubes erfolgte. Die Zündwirksamkeit ( $ZW$ ) stellt somit einen Zusammenhang zwischen Partikelgröße ( $\emptyset$ ) und Partikeltemperatur ( $T_p$ ) dar –  $ZW(\emptyset, T_p)$ .

Die Ergebnisse zeigten, dass ein Zusammenhang zwischen der Temperatur und dem Durchmesser der Stifte besteht, der zur Entzündung des Staubes führt: Kleine Durchmesser benötigen höhere Temperaturen, um einen Staubbrand zu initiieren. Das Material der Stifte hatte in diesem Fall keinen wesentlichen Einfluss auf die Entzündung.

Aus den Versuchen von Bartknecht lässt sich ableiten, dass inerte heiße Partikeln als kleine heiße Oberflächen angesehen werden können.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens GreCon wurde der Begriff des hochmobilen zündwirksamen Partikels (HZP) eingeführt, eine Modellvorstellung abstrahiert und diese beschrieben [Liske et al. 2018]. Ein HZP ist ein Partikel, das in einem verfahrenstechnischen Prozess erzeugt und transportiert wird sowie innerhalb dieses Prozesses eine abgelagerte Staubschicht entzünden kann. Grundsätzlich unterscheidet dieses neue Modell zwischen reaktiven hochmobilen zündwirksamen Partikeln (rHZP) und inerten hochmobilen zündwirksamen Partikeln (iHZP). Welche HZP-Typen in einer verfahrenstechnischen Anlage entstehen können, ist im Einzelfall abhängig von der Grundoperation (verfahrenstechnischer Apparat) innerhalb der gesamten Anlage. Grundsätzlich gilt, dass in Grundoperationen mit einer hohen Energie (thermisch oder mechanisch) HZP erzeugt werden können. In einem Trommeltrockner eines Spanplattenwerks ist beispielsweise die Entstehung von rHZP wesentlich wahrscheinlicher als von iHZP, da sich das Trockengut hier durch eine Überdrehung oder zu hohe Temperaturen im Trocknungsprozess entzünden kann. Dagegen können in Zerkleinerungsmaschinen, wie in einer Hammermühle, durch das Eindringen von metallischen Fremdkörpern iHZP entstehen. Im Recyclingbereich eines Spanplattenwerks, in dem alte Möbel zerkleinert werden, wurde im Bereich eines Sichterausgangs nach der Grobzerkleinerung die in Bild 16 dargestellte magnetische, metallische Agglomeration (Länge ca. 60 mm) gefunden. Wäre diese in die Feinzerkleinerung eingedrungen, wäre in dieser Grundoperation mit der Entstehung von iHZP zu rechnen gewesen.

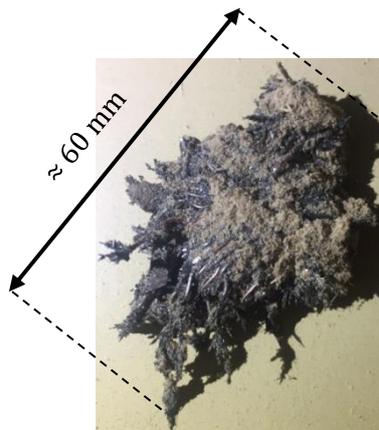


Bild 16: Magnetische, metallische Agglomeration in einem Sichter [Bechem und Liske 2019]

Das rHZP stellt verschieden große und brennende Staubagglomerationen dar. Die Beschreibung „inert“ des iHZP hat in diesem Zusammenhang nicht die Bedeutung, dass dieses weniger gefährlich ist, sondern dass es nicht aus brennbarem Staub besteht und daher in der Regel keine Verbrennungsreaktion aufweist. iHZP sind verschieden große, erwärmte, metallische oder mineralische Partikeln.

Somit kann ein inertes heißes Partikel als iHWP angesehen werden. Die mechanisch erzeugten Funken stellen hierbei die Grenze zwischen beiden HWP-Typen dar. Diese Funken sind in der Regel kleine brennende metallische Partikeln. Da diese jedoch metallischen Ursprungs sind, werden sie den iHWP im Sinne des Forschungsvorhabens zugeordnet.

Im Weiteren wird der Begriff iHWP als Synonym und Abkürzung für inerte heiße Partikeln verwendet. Bild 17 zeigt die Modellvorstellung des iHWP. Ein iHWP, und somit ein inertes heißes Partikel, kann so erklärt werden. Es kombiniert zündwirksame Eigenschaften der beiden konventionellen Zündquellen der [DIN EN 1127-1] „Mechanisch erzeugter Funke“ und „Heiße Oberfläche“. Dieses Partikel kann als neuartige und demzufolge unkonventionelle Zündquelle beschrieben werden [vgl. Bechem und Barth 2018] und konkretisiert den bekannten „heißen Partikel“.

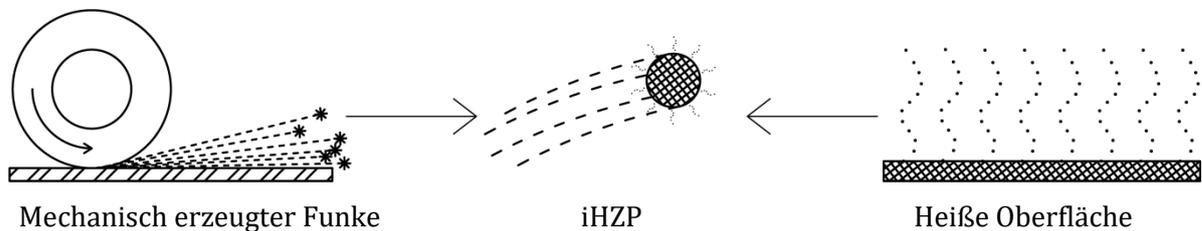


Bild 17: Modellvorstellung inerter HWP nach [Bechem und Barth 2018]

Im Vergleich zum mechanisch erzeugten quasi masselosen Funken ist ein iHWP größer und langlebiger und besitzt eine geringere gespeicherte volumenbezogene thermische Energie. Es ist jedoch ebenfalls mobil. Ein iHWP besitzt eine kleine Oberfläche und kann möglicherweise wärmer als eine heiße Oberfläche sein. Wie ein mechanisch erzeugter Funke kühlt ein iHWP mit der Zeit ab. Eine heiße Oberfläche tut dies in der Regel jedoch nicht, sondern gibt einen konstanten Wärmestrom ab. Im Grunde ist ein iHWP ein größerer und mit massebehafteter nicht verbrennender (somit kälterer) mechanisch erzeugter Funke oder eine kleine mobile heiße Oberfläche, die keine eigene aktive Wärmequelle besitzt.

*Ein iHWP konkretisiert den aus der [DIN EN 1127-1] bekannten „Heißen Partikel“ und wird somit als neue und unkonventionelle Zündquelle bezeichnet. Es ist ein metallischer oder mineralischer Fremdkörper, welcher eine entsprechende Temperatur besitzt, die eine externe Entzündung einer Staubschicht initiiert. In Abhängigkeit der prozessbedingten Einflüsse entsteht dieses iHWP und wird mobilisiert. Die Größe<sup>e</sup> eines solchen iHWP beträgt hierbei zwischen 0,5 mm<sup>3</sup> und 4.200 mm<sup>3</sup>. Kleine Partikeln können als mechanisch erzeugte Funken angesehen werden. Bei größeren ist die prozessbedingte Entstehung oder Mobilität nicht gegeben.*

<sup>e</sup> Die Größe wird im Volumen angegeben, um alle Partikelformen zu berücksichtigen. Die beschriebenen Werte entsprechen Kugeln mit  $\varnothing \approx 1$  mm und  $\varnothing \approx 20$  mm.

## 5 Experimentelle Untersuchungen inerter heißer Partikeln

In diesem Kapitel werden die im Rahmen dieser Promotion durchgeführten Experimente vorgestellt.

Im Einzelnen wurde Folgendes untersucht:

- Zündwirksamkeit inerter heißer Partikeln
- Mobilität inerter heißer Partikeln
- Detektierbarkeit inerter heißer Partikeln

Diese Versuche liefern relevante experimentelle Daten für die sicherheitstechnische Betrachtung inerter heißer Partikeln, welche in Kapitel 6 angeführt ist. Des Weiteren untermauern die Ergebnisse die Definition aus Kapitel 4.

Grundsätzlich werden in diesem Kapitel die Ergebnisse der Experimente dargestellt. Die Diskussion und Bewertung erfolgen anschließend in Kapitel 7.

### 5.1 Zündwirksamkeit inerter heißer Partikeln

#### 5.1.1 Versuchsbeschreibung

##### 5.1.1.1 Versuchsmethodik

Die Zündwirksamkeitsversuche wurden in Anlehnung an die in Kapitel 3.1 beschriebenen Versuche nach [Urban 2017] durchgeführt, aber nicht als Wiederholung, sondern um ein tieferes Verständnis der Zündwirksamkeit inerter heißer Partikeln zu erhalten. Auch in den Zündwirksamkeitsversuchen, die in der vorliegenden Dissertation beschrieben werden, war das Ziel, eine Korrelation zwischen der Größe und der Temperatur eines inerten heißen Partikels zu erhalten, bei der gerade noch eine Entzündung der Staubschicht beobachtet werden kann. Die Zündwirksamkeit (ZW) stellt eine Funktion der Partikelgröße und der Partikeltemperatur dar –  $ZW(\varnothing, T_p)$ . In den bisherigen Versuchen wurde meistens die Entstehung eines Flammenbrandes als Entscheidungskriterium genutzt. Im vorliegenden Fall wurde jedoch die Entzündung eines sich selbst ausbreitenden Schwelbrandes untersucht. Dies stellt eine wesentliche Neuerung gegenüber den in Kapitel 3.1 beschriebenen Versuchen dar. Der Grund dieser Änderung des Zündkriteriums ist, dass ein kleiner, sich selbst ausbreitender Schwelbrand, beispielsweise in einem Mühlenbunker, sich im weiteren zeitlichen Verlauf zu einem Glimmbrand oder sogar Flammenbrand entwickeln kann. Dieses kleine Primärereignis kann unter Umständen als Zündquelle für ein weiteres Sekundärereignis fungieren, das ein größeres Schadensmaß besitzen kann [vgl. Liske et al. 2018]. Bei der Bestimmung der Brennzahl (BZ) gemäß [VDI 2263 Blatt 1] wird von einer Brandausbreitung ausgegangen, sobald in der Staubprobe ein Schwelbrand initiiert wird ( $BZ \geq 4$ ). Tabelle 4 vergleicht die Zündkriterien der bisher veröffentlichten und der in der vorliegenden Dissertation beschriebenen Zündwirksamkeitsversuche.

Tabelle 4: Vergleich der Zündkriterien der bisher veröffentlichten und der in der vorliegenden Dissertation beschriebenen Zündwirksamkeitsversuche

<b>Bisherige Veröffentlichungen</b>	<b>Vorliegende Dissertation</b>
Entstehung eines Flammenbrands (BZ = 5)	Entstehung eines Schwelbrandes (BZ = 4)

Zur Bestimmung der Temperatur des iHWP wurde der gesamte Versuch mit einer Wärmebildkamera von oben gefilmt. Hierfür wurde das Modell PI 400 der Optris GmbH verwendet. Im Anhang (Bild-A 1 bis Bild-A 4) sind entsprechende Kalibrierzertifikate angeführt. Mit Hilfe der Software PIConnect V. 2.12.2202.0 bzw. der neueren Version PIXConnect V. 3.5.3037.0, welche vom Hersteller mitgeliefert wird, konnte der Versuch gefilmt, dokumentiert und anschließend analysiert werden. Dadurch wurden notwendige Maßnahmen zur Bestimmung der Temperatur getroffen, wie beispielweise die Definition des Emissionskoeffizienten  $\varepsilon$  der Messfelder. Hierbei wurde davon ausgegangen, dass die Temperaturverteilung innerhalb dieser Partikel aufgrund der geringen Größe, der geringen Wärmekapazität und der großen Wärmeleitfähigkeit als annähernd konstant bleibt, dass also die Oberflächentemperatur des Partikels ungefähr identisch mit der Kerntemperatur ist. Mit dieser Annahme konnte die mit der Wärmebildkamera ermittelte Oberflächentemperatur als Partikeltemperatur bestimmt werden.

Die Zündwirksamkeitsversuche mit iHWP wurden in mehreren Schritten erarbeitet und durchgeführt:

1. Durchführung von Zündwirksamkeitsversuchen von abgelagerten Staubschichten mit Kugeln im Rahmen des Forschungsvorhabens GreCon mit Staub aus Buche und Yellow Pine
2. Durchführung von Zündwirksamkeitsversuchen von abgelagerten, durchströmten Staubschichten mit Kugeln im Rahmen des Forschungsvorhabens GreCon mit Staub aus Buche und Yellow Pine durch die Bachelor-Thesis von Tessendorf [vgl. Tessendorf 2017]
3. Durchführung von Zündwirksamkeitsversuchen von abgelagerten Staubschichten mit Kugeln im Rahmen des Forschungsvorhabens GreCon mit Kakao- und Milchpulver sowie Gummiabrieb
4. Durchführung von Zündwirksamkeitsversuchen von abgelagerten Staubschichten mit Scheiben und Zylindern mit Buchenstaub, Yellow Pine Staub sowie Kakaopulver im Rahmen der Master-Thesis von Xiong [vgl. Xiong 2018]

Diese vier Schritte stellen den zeitlichen Verlauf der Versuche dar. Es lassen sich jedoch Unterschiede in den einzelnen Versuchen erkennen, insbesondere bezüglich der verwendeten Staubproben (die Beschreibung der Materialprobe erfolgt in Kapitel 5.1.1.2). Im Forschungsvorhaben GreCon wurden zunächst nur die beiden Stäube aus Buche und Yellow Pine untersucht. Zu dieser Zeit entstanden ebenfalls die Versuche der Zündwirksamkeit von iHWP an durchströmten Staubschichten, wie sie auf einem Filtervlies vorkommen. Hierbei wurde am Filtervlies ein Unterdruck erzeugt, sodass der Staub

an das Vlies gesaugt wurde. Das Vlies war ein Polyester-Nadelfilz. Als Staubproben wurden die Holzstäube verwendet. Die Untersuchungen an einer durchströmten Staubschicht stellen mit Blick auf bekannte sicherheitstechnische Kenngrößen, die in der Regel nur mit einer abgelagerten Staubschicht ermittelt werden, eine Modifizierung dar.

Diese Experimente wurden im Rahmen einer Bachelor-Thesis von Tessedorf bearbeitet. In Absprache mit dem Projektpartner im Forschungsvorhaben wurden anschließend die drei weiteren Stäube (Kakaopulver, Milchpulver und Gummiabrieb) aufgenommen. Es sollten zudem weitere Zündwirksamkeitsversuche für abgelagerte Staubschichten erfolgen. Der vierte Schritt erfolgte ausschließlich als Bearbeitung der Master-Thesis von Xiong. Ziel war es, zu überprüfen, wie sich unterschiedlich geformte iHZZP in ihrer Zündwirksamkeit verhalten, und ob die Partikelform einen Einfluss auf die Zündwirksamkeit besitzt. Es wurden Zylinder und Scheiben untersucht, da diese in den „Hot-Spot-Theorien“ neben Kugeln ebenfalls berechnet werden können.

### 5.1.1.2 Materielauswahl

Die fünf Stäube (Buchenstaub, Yellow Pine Staub, Gummiabrieb, Kakaopulver und Milchpulver) als Brennstoff stellen typische Vertreter aus verschiedenen verfahrenstechnischen und staubverarbeitenden Industriezweigen dar. Um den großen Bereich der Holzindustrie (beispielsweise die Herstellung von Spanplatten) abzudecken, wurden Stäube aus Buche und Yellow Pine verwendet. Des Weiteren wurde Gummiabrieb (klein gemahlene Altreifen) als Vertreter der Recyclingbranche berücksichtigt. Aus der Lebensmittelbranche wurden Kakao- und Milchpulver untersucht. Bei dem Kakaopulver handelt es sich um handelsüblichen schwach entölten Backkakao. Die Zusammensetzung des Milchpulvers entspricht der von Kindernahrung. Die Stäube wurden für alle Versuche direkt aus den Originalverpackungen der Hersteller entnommen, wobei keine weitere Probenvorbehandlung erfolgte. In Bild 18 sind die untersuchten Stäube in einer Übersicht erkennbar.



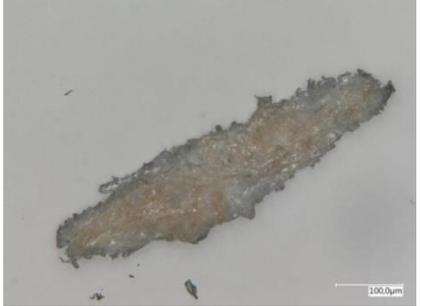
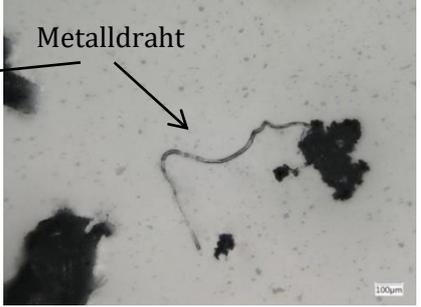
Bild 18: Ausgewählte Staubproben [Bechem und Liske 2019]

Des Weiteren wurden von den Stäuben Aufnahmen mit einem Mikroskop erstellt. Diese Bilder sind in Tabelle 5 dargestellt. Hierfür wurden die Digital-Lichtmikroskope VHX-600 und -5000 der Firma Keyence genutzt. Innerhalb der Tabelle nimmt die Vergrößerung von Spalte A bis Spalte C zu.

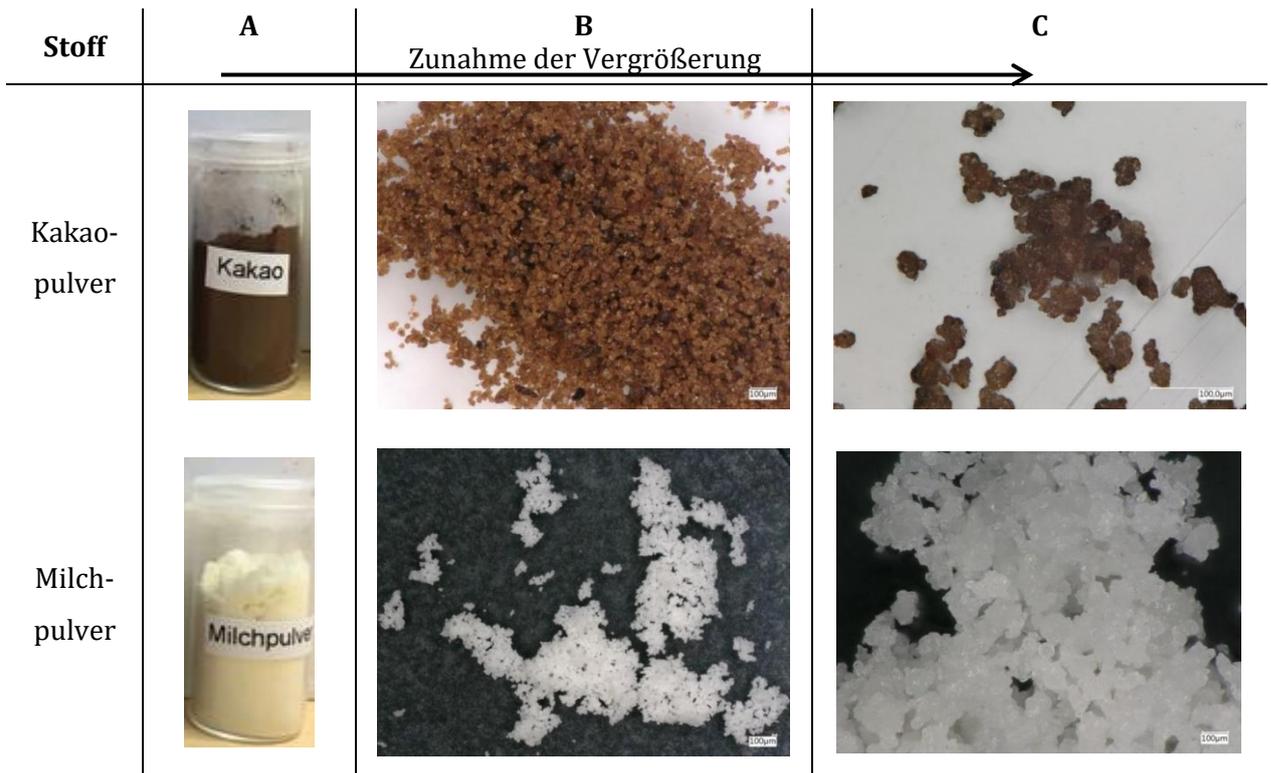
Die Holzstäube bestehen überwiegend aus verschiedenen großen Holzfasern, die eine längliche Staubpartikelform aufweisen, wobei der Yellow Pine Staub deutlich faseriger ist. Die Partikelform des

Gummiabriebs zeigt die größte Größen- und Formenvariation, und es sind sogar vereinzelt kleine Metalldrähte erkennbar. Die Drähte stammen aus den metallischen Geweben von Reifen. Sowohl das Kakaopulver als auch der Milchpulverstaub besteht aus kleinen, eher rundlichen Staubpartikeln. Vom Yellow Pine Staub war nur eine begrenzte Menge Probe vorhanden, da dieser direkt bei einem Planstop<sup>f</sup> aus der Produktionslinie einer Kalifornischen (USA) Holzwerkstoffherstellung entnommen wurde. Daher konnten nicht alle notwendigen Untersuchungen und Prüfungen mit diesem Staub durchgeführt werden.

Tabelle 5: Mikroskopaufnahmen der Stäube [Bechem und Liske 2019]

Stoff	A	B	C
		Zunahme der Vergrößerung	→
Buchenstaub			
Yellow Pine Staub			
Gummiabrieb			

<sup>f</sup> Ein Planstop ist der Produktionsstillstand einer ganzen Produktionslinie für die Revision und Instandsetzung.



Zur besseren Charakterisierung wurden neben den optischen Aufnahmen Siebanalysen durchgeführt, welche in Tabelle 6 mit Angabe des Siebdurchgangs zusammengefasst sind. Diese Analyse wurde mit dem Vibrationssieb Retsch AS 200 erstellt. Mit dem Yellow Pine Staub war keine Siebanalyse möglich, weil seine Struktur zum Sieben zu faserig war. Grundsätzlich neigte der Yellow Pine Staub zur Bildung von Staubagglomerationen. Diese vergrößerten sich beim Siebvorgang und führten dazu, dass ein Siebdurchgang verhindert wurde. Die Analyse zeigt, dass der Gummiabrieb die größte Spannweite in der Korngrößenverteilung bezieht und das Milchpulver die geringste. Des Weiteren ist zu erkennen, dass der Hauptteil der Staubpartikeln beim Buchenstaub, Kakao- und Milchpulver zwischen der Korngröße 63 µm bis 250 µm liegt. Beim Gummiabrieb besitzen die meisten Partikeln eine Größe von 250 µm bis 1.000 µm.

Tabelle 6: Siebanalyse (Siebdurchgang) der Staubproben [Bechem und Liske 2019]

Staub- probe	1.000 µm	500 µm	250 µm	125 µm	63 µm	45 µm	< 45 µm
Buchen- staub	100 %	98 %	95 %	60 %	19 %	0 %	0 %
Yellow Pine Staub	Siebanalyse nicht möglich aufgrund der faserigen Struktur des Staubes						
Gummi- abrieb	100 %	66 %	13%	4 %	3 %	3 %	3 %

<b>Staubprobe</b>	<b>1.000 µm</b>	<b>500 µm</b>	<b>250 µm</b>	<b>125 µm</b>	<b>63 µm</b>	<b>45 µm</b>	<b>&lt; 45 µm</b>
Kakaopulver	99 %	88 %	68 %	4 %	3 %	2 %	0 %
Milchpulver	100 %	100 %	79 %	23 %	0 %	0 %	0 %

Zudem wurde von allen Stäuben die BZ gemäß [VDI 2263 Blatt 1] bestimmt. Die entsprechenden Brennzahlen sind in Tabelle 7 angeführt. Es zeigt sich, dass im Milchpulver keine selbstausbreitende Verbrennung entsteht ( $BZ \leq 3$ ). Hingegen zeigen die anderen vier Stäube, dass die Entstehung eines Staubbrands möglich ist ( $BZ > 3$ ). Das Kakaopulver schwelt bzw. glimmt dabei nur ( $BZ = 4$ ). Dies trifft teilweise ebenfalls auf die Holzstäube zu, wobei diese auch unter Flammenerscheinung verbrennen ( $BZ = 5$ ). Dieser Unterschied im Holz ist von der Restfeuchte abhängig. Der Gummiabrieb verbrennt mit der Flammenerscheinung.

Tabelle 7: Ermittelte Brennzahl der Staubproben nach [VDI 2263 Blatt 1]

<b>Staubprobe</b>	<b>Brennzahl</b>
Buchenstaub	4–5
Yellow Pine Staub	4–5
Gummiabrieb	5
Kakaopulver	4
Milchpulver	2–3

### 5.1.1.3 Versuchsaufbau

Die Simulation der inerten heißen Partikeln erfolgte durch unterschiedlich große metallische Kugeln, Zylinder und Scheiben. Hierbei wurden im Sinne der Reproduzierbarkeit der Versuche gleich große Kugeln und Zylinder verwendet. Die Kugeln und Zylinder stammen aus der Kugel- und Wälzlagerproduktion und weisen eine sehr hohe Gleichheit sowie geringe Toleranzmaße auf. Die Kugeln entsprechen der [DIN 5401] und die Zylinder je nach Größe der [DIN 5402-1; DIN 5402-3]. Beide sind aus 100Cr6-Stahl (Werkstoffnummer: 1.3505). Bei den Zylindern wurden verschiedene Durchmesser/Höhen-Verhältnisse untersucht. Die Scheiben wurden aus Flachstahl DC 04 (Werkstoffnummer: 1.0338) mit einer Stärke von 2,3 mm in der fakultätsinternen Werkstatt gestanzt. Alle Stähle sind typische Vertreter der Stähle, die in verfahrenstechnischen Anlagen vorkommen und aus denen somit iHWP entstehen können. In Tabelle 8 sind die Größen der metallischen Partikeln zusammengefasst angegeben, die für die Simulation der iHWP genutzt wurden.

Tabelle 8: Größen der verschiedenen iHZP

Art	Größe
Kugel	Durchmesser [mm] 2; 3; 4; 5; 7; 10; 15
Zylinder	Durchmesser [mm]/Länge [mm] 3,5/23,8; 5/9; 6/8; 8/12
Scheibe	Durchmesser [mm]/Dicke [mm] 8/2,3; 10/2,3; 12/2,3; 15/2,3

In Bild 19 und Bild 20 sind die Versuchsaufbauten der Zündwirksamkeitsversuche schematisch dargestellt.

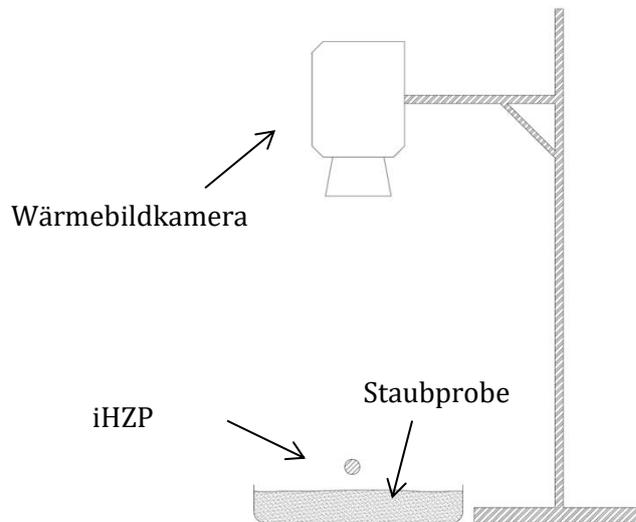


Bild 19: Schematischer Versuchsaufbau der Zündwirksamkeitsversuche mit abgelagerter Staubschicht [Bechem et al. 2017]

Die Staubschichtstärke in beiden Versuchsaufbauten variierte. Bei den Versuchen mit abgelagerter Staubschicht betrug sie 15 mm. Bei den Versuchen mit abgelagerter, durchströmter Staubschicht dagegen waren es nur 5 mm. Die 5 mm starke Staubschicht entspricht einer realistischen Staubschichtstärke an einem Filtervlies, bevor dieses abgereinigt wird [Martini 2017].

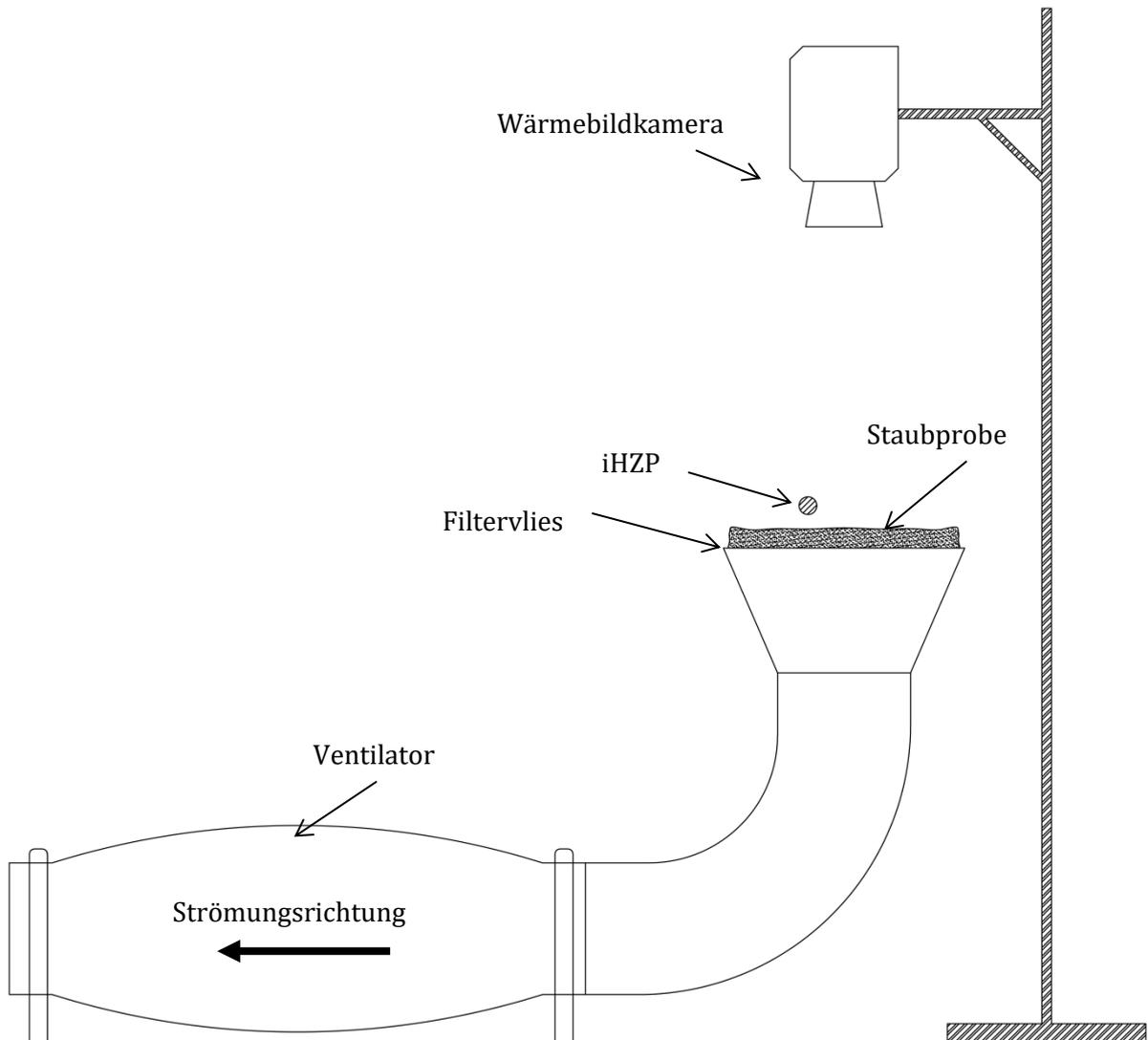


Bild 20: Schematischer Versuchsaufbau der Zündwirksamkeitsversuche mit abgelagerter, durchströmter Staubschicht [Bechem et al. 2017]

#### 5.1.1.4 Versuchsdurchführung

Die Erwärmung der iHZP erfolgte in einem Muffelofen, sodass die Partikeln auf die jeweils gewünschte Temperatur zwischen 300 °C und 1.100 °C gebracht werden konnten. Bei den Versuchen wurde die Temperatur jeweils in 50 K-Schritten verändert. Um eine Abkühlung der Partikeln zwischen Ofen und Ablage auf der Staubschicht zu minimieren, wurden diese in kleinen Tiegeln erwärmt und aus den Tiegeln auf die Staubprobe fallen gelassen. Die Kugeln mit 15 mm Durchmesser waren für die Tiegel zu groß, daher wurden diese direkt mit einer Tiegelzange aus dem Ofen genommen und auf die Staubprobe fallen gelassen. Der Wärmeverlust durch die Tiegelzange war bei dieser Kugelgröße im Verhältnis vernachlässigbar. Eine bildliche Darstellung der Versuchsdurchführung zeigt Bild 21.



Erwärmung der iHZZP  
inkl. Tiegel im Ofen



Entnahme des Tiegels  
aus dem Ofen



Ablage der iHZZP  
auf der Staubschicht

Bild 21: Bildliche Darstellung der Versuchsdurchführung

Die Zündwirksamkeitsversuche wurden in mehreren Versuchsreihen durchgeführt, von denen jede aus neun Einzelversuchen bestand, die parallel ausgeführt wurden. Die neun Einzelversuche gründen sich auf den Versuchsaufbau selbst. Jeder Versuch wurde in einer kleinen Schale durchgeführt, die in einem Raster von 3 x 3 Schalen angeordnet war. Diese quadratische Anordnung wurde durch die Auflösung der Wärmebildkamera (382 x 288 Pixel) bestimmt. Des Weiteren konnte somit der Abstand zwischen Wärmebildkamera und Staubschicht möglichst geringgehalten werden, wodurch auch kleinere Kugeln besser erfasst werden konnten. Bild-A 5 stellt diesen Sachverhalt im Bild des Rasters der Schalen und als Bildausschnitt der Software der Wärmebildkamera dar. In Tabelle 9 sind die Anzahl der Versuchsreihen (Vr) und der Einzelversuche (Ev) für die Bestimmung der ZGT in der abgelagerten Staubschicht zusammengefasst. In der abgelagerten, durchströmten Staubschicht wurden im Buchenstaub 24 Vr mit 216 Ev und im Yellow Pine Staub 24 Vr mit 216 Ev umgesetzt.

Tabelle 9: Versuchsreihen und Einzelversuche zur Bestimmung der ZGT in abgelagerter Staubschicht

Partikel	Buchenstaub	Yellow Pine Staub	Kakaopulver	Milchpulver	Gummiabrieb
Kugel	103 Vr	59 Vr	62 Vr	2 Vr	15 Vr
	927 Ev	523 Ev	558 Ev	18 Ev	135 Ev
Scheibe	21 Vr	15 Vr	22 Vr	n.b.	n.b.
	189 Ev	135 Ec	198 Ev	n.b.	n.b.
Zylinder	35 Vr	17 Vr	14 Vr	n.b.	n.b.
	315 Ev	153 Ev	144 Ev	n.b.	n.b.

Bei den Versuchen mit Milchpulver wurden auch bei hoher Temperatur ( $T_{\text{Ofen}} = 1.000 \text{ } ^\circ\text{C}$ ) und großem Kugeldurchmesser ( $\varnothing = 15 \text{ mm}$ ) keine Entzündungen festgestellt. Daher wurden keine weiteren Untersuchungen mit kleineren Kugeln und den anderen Partikelformen (Scheiben und Zylinder) durchgeführt.

Die unterschiedliche Anzahl der Versuchsreihen ist einerseits dadurch begründet, dass die Versuche mit abgelagertem Buchenstaub die ersten waren und hierbei das Vorgehen erarbeitet wurde. Andererseits wurde die geringste Temperatur gesucht, bei der der Staub sich noch entzündete. Wurde diese Temperatur schnell gefunden, waren dementsprechend auch weniger Versuchsreihen notwendig.

Die hier genutzte Wärmebildkamera ist nach Angaben des Herstellers ein Focal-Plane-Array(FPA)-Bolometer, welches im Wellenlängenbereich von 8  $\mu\text{m}$  bis 14  $\mu\text{m}$  misst [Optris GmbH 2018]. Aufgrund der Tatsache, dass diese Kamera ein Bolometer ist, ist die Spannung ( $U$ ) im Gerät proportional zum eintreffenden Strahlungsfluss am Detektorelement. In der technischen Dokumentation von Optris wird beschrieben, wie die Oberflächentemperatur ( $T_{obj}$ ) bestimmt wird [Optris GmbH 2016, S. 8]. Die hierzu verwendete Rechnung wird an dieser Stelle zum weiteren Verständnis angeführt.

$$U \sim \varepsilon T_{obj}^4 [V] \quad (58)$$

$$U = C_{Pyr} [\varepsilon T_{obj}^4 + (1 - \varepsilon) T_{amb}^4 - T_{Pyr}^4] [V] \quad (59)$$

$$U = C_{Pyr} [\varepsilon T_{obj}^n + (1 - \varepsilon) T_{amb}^n - T_{Pyr}^n] [V] \quad (60)$$

$$T_{obj} = \sqrt[n]{\frac{U - C_{Pyr} T_{amb}^n + C_{Pyr} \varepsilon T_{amb}^n + C_{Pyr} T_{Pyr}^n}{C_{Pyr} \varepsilon}} [^{\circ}\text{C}] \quad (61)$$

In Gleichung (60) muss der Exponent  $n$  eingeführt werden, da die Wärmebildkamera nicht über das gesamte Strahlungsspektrum arbeitet. Er liegt für Wellenlängen von 1  $\mu\text{m}$  bis 14  $\mu\text{m}$  zwischen 17 und 2. Da die Temperatur mittels der Software Pi-Connect ermittelt wird, erfolgt die Darstellung der Gleichungen lediglich zur Orientierung und ohne Einheiten. Des Weiteren werden für verschiedene Oberflächen Emissionskoeffizienten angegeben [Optris GmbH 2016, S. 27–30]. Aufgrund des Erwärmens der Partikel oxidierte die Partikeloberfläche, sodass der Emissionskoeffizient gemäß Angaben von Optris zwischen  $\varepsilon = 0,8$  und  $\varepsilon = 0,9$  liegt.

Aus Gleichung (61) wird ersichtlich, dass ein größerer Emissionskoeffizient zu geringeren angezeigten Temperaturen führt. Daher wurde für die Messung auf der sicheren Seite der Emissionskoeffizient  $\varepsilon = 0,9$  gewählt.

Bei den Versuchen mit Kugeln und abgelagerter Staubschicht versanken die Kugeln teilweise sehr tief in die Staubprobe, sodass die Oberflächentemperaturen nicht eindeutig mit der Wärmebildkamera gemessen wurden. Um diesen Systemfehler bei der Auswertung der Ergebnisse zu berücksichtigen, wurden diese Messwerte nicht ausgewertet. Um zu beurteilen, welcher Messwert aussortiert werden musste, wurde der Mittelwert der Oberflächentemperaturen einer Versuchsreihe ermittelt. Wich ein Einzelwert um mehr als 75 K nach unten von diesem Mittelwert ab, wurde er aussortiert. Die 75 K wurden gewählt, da sie den 1,5-fachen Wert der durchschnittlichen Schwankung der Oberflächentemperatur von 50 K einer Versuchsreihe beträgt.

### 5.1.2 Versuchsergebnisse

Ziel der Zündwirksamkeitsversuche war es, die niedrigste Temperatur eines inerten heißen Partikels zu bestimmen, die eine Staubschicht noch entzünden kann.

In Bild 22 sind exemplarisch alle Einzelversuche von Buchenstaub mit Kugeln in der abgelagerten Staubschicht dargestellt. Einzelversuche, die eine Entzündung zur Folge hatten, sind mit grünen Kreuzen dargestellt, während rote Kreuze Versuche ohne Entzündung symbolisieren. Die schwarzen Kreuze stellen die niedrigste Temperatur der entsprechenden Kugel dar, die noch zündwirksam war. Diese Temperatur wird als Zündgrenztemperatur (ZGT) bezeichnet [vgl. Bechem und Barth 2019]. Die Definition der ZGT lautet:

*Die Zündgrenztemperatur ist eine staubspezifische Temperatur. Sie beschreibt die niedrigste Temperatur eines inerten heißen Partikels, bei der eine Entzündung eines Schwelbrandes innerhalb einer Staubschicht gerade noch erfolgt (möglich ist).*

Für eine bessere Orientierung sind diese jeweils diskreten Einzelwerte der ZGT durch eine gestrichelte Linie verbunden. Die Bedeutung der Zündgrenztemperatur wird hierdurch deutlich. Unterhalb der ZGT wurde keine Entzündung beobachtet, weshalb davon ausgegangen werden kann, dass eine Entzündung unter den gewählten Versuchsbedingungen nicht möglich ist. Erst oberhalb der ZGT ist mit der Entzündung der Staubschicht zu rechnen. Somit stellt die ZGT die Temperatur dar, ab welcher ein inertes heißes Partikel als wirksame Zündquelle im Sinne der [TRGS 720] angesehen werden kann.

Ebenfalls ist zu erkennen, dass es einen Temperaturbereich gibt, in dem sowohl grüne als auch rote Kreuze existieren. In diesem Bereich besitzt das entsprechende iHZP eine gewisse Zündwahrscheinlichkeit. Auf eine Auswertung und Darstellung der Zündwahrscheinlichkeiten, wie sie in den Ergebnissen in Kapitel 3.1 beschrieben sind, wird an dieser Stelle bewusst verzichtet, da in den durchgeführten Zündwirksamkeitsversuchen die ZGT bestimmt werden sollte.

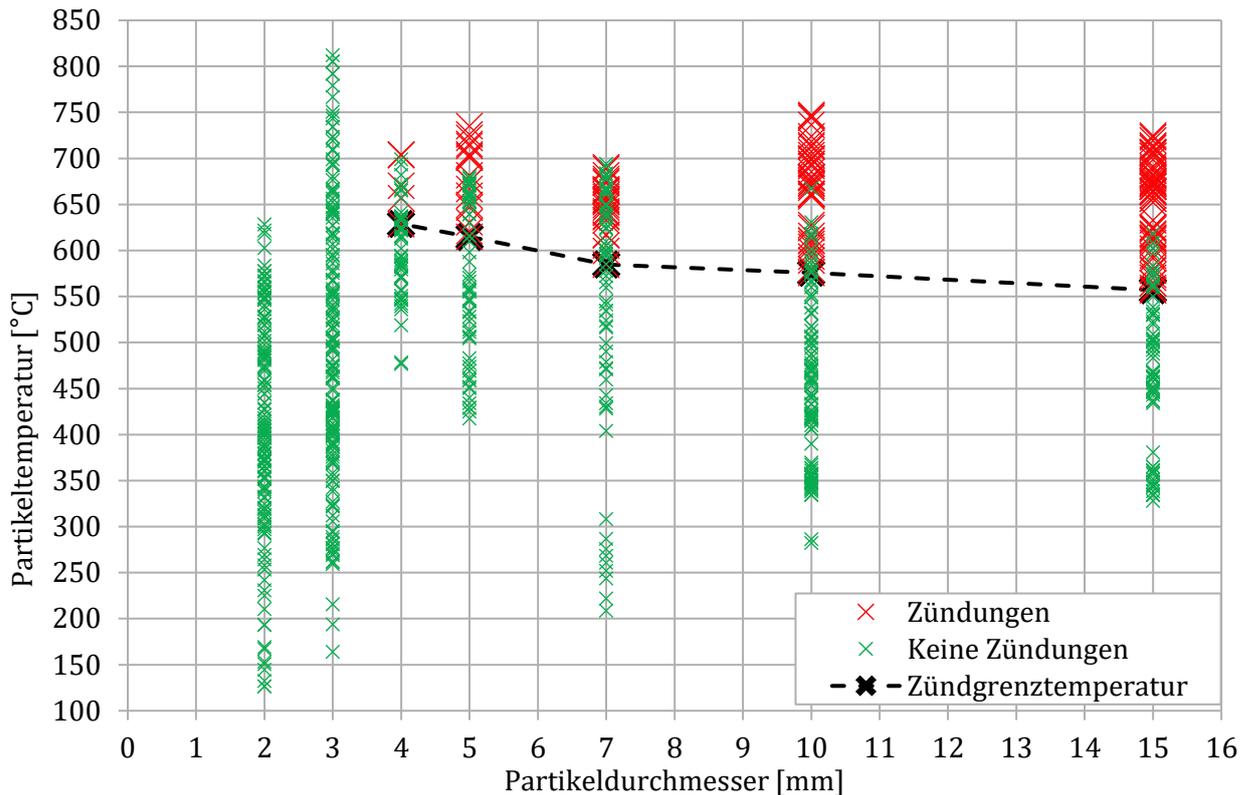


Bild 22: Ergebnisse der Versuche mit Kugeln in abgelagerter Staubschicht – Buchenstaub nach [Bechem und Barth 2019]

### 5.1.2.1 Zündgrenztemperatur für Kugeln in abgelagerter Staubschicht

Die ZGT der Zündwirksamkeitsversuche mit Kugeln in abgelagerter Staubschicht sind in Bild 23 dargestellt. Auch hier und bei allen weiteren Darstellungen der ZGT sind die diskreten Einzelmesswerte durch gestrichelte Linien zwecks der besseren Orientierung verbunden. Diese Linie erhebt keinen Anspruch auf richtigen Verlauf, da die Zwischenwerte nicht ermittelt wurden. Es ist zu erkennen, dass die ZGT vom Gummiabrieb (Raute  $\diamond$ ) am höchsten sind und hier nur die Kugeln mit  $\varnothing = 10$  mm und 15 mm zündwirksam waren, wobei die ZGT von der Kugel mit  $\varnothing = 10$  mm höher ist. Bei der Entzündung des Gummiabriebs entstand immer ein Flammenbrand. Die Entstehung eines Glimm- oder Schwelbrandes wurde nicht beobachtet. Jedoch wurde festgestellt, dass der Gummiabrieb leicht aufschmolz und agglomerierte. Diese Agglomeration konnte jedoch durch geringe mechanische Einwirkung wieder zerstört werden. Der Verlauf der ZGT im Buchenstaub (Dreieck  $\triangle$ ) verläuft wie in den Versuchen von beispielsweise [Urban 2017]. Mit steigendem Partikeldurchmesser sinkt die ZGT. Die ZGT des Yellow Pine Staubs (Kreis  $\circ$ ) und Kakaopulvers (Kreuz  $\times$ ) verlaufen hingegen völlig anders. Im Yellow Pine Staub ergibt sich dieser Trend für Partikel mit  $\varnothing = 7$  mm bis  $\varnothing = 15$  mm. Bei Partikeln mit  $\varnothing = 3$  mm bis  $\varnothing = 5$  mm verläuft der Trend umgekehrt. Hier steigt die ZGT mit steigendem Durchmesser. Im Kakaopulver ist kein eindeutiger Trend zu erkennen. Die niedrigste ZGT wurde bei dem Partikel mit  $\varnothing = 2$  mm festgestellt und die höchste bei dem mit  $\varnothing = 7$  mm. Hier wurde ein teilweises Glimmen bei der Verbrennung beobachtet. In dem Diagramm ist keine ZGT des Milchpulvers dargestellt, weil bei den Zündwirksamkeitsversuchen mit Milchpulver keine Entzündung erfolgte. Hier

zeigte sich lediglich eine Agglomeration des Milchpulvers um die Kugeln. In Bild-A 6 im Anhang ist eine solche Agglomeration abgebildet. Tabelle 10 fasst die jeweiligen ZGT dieser Versuche zusammen.

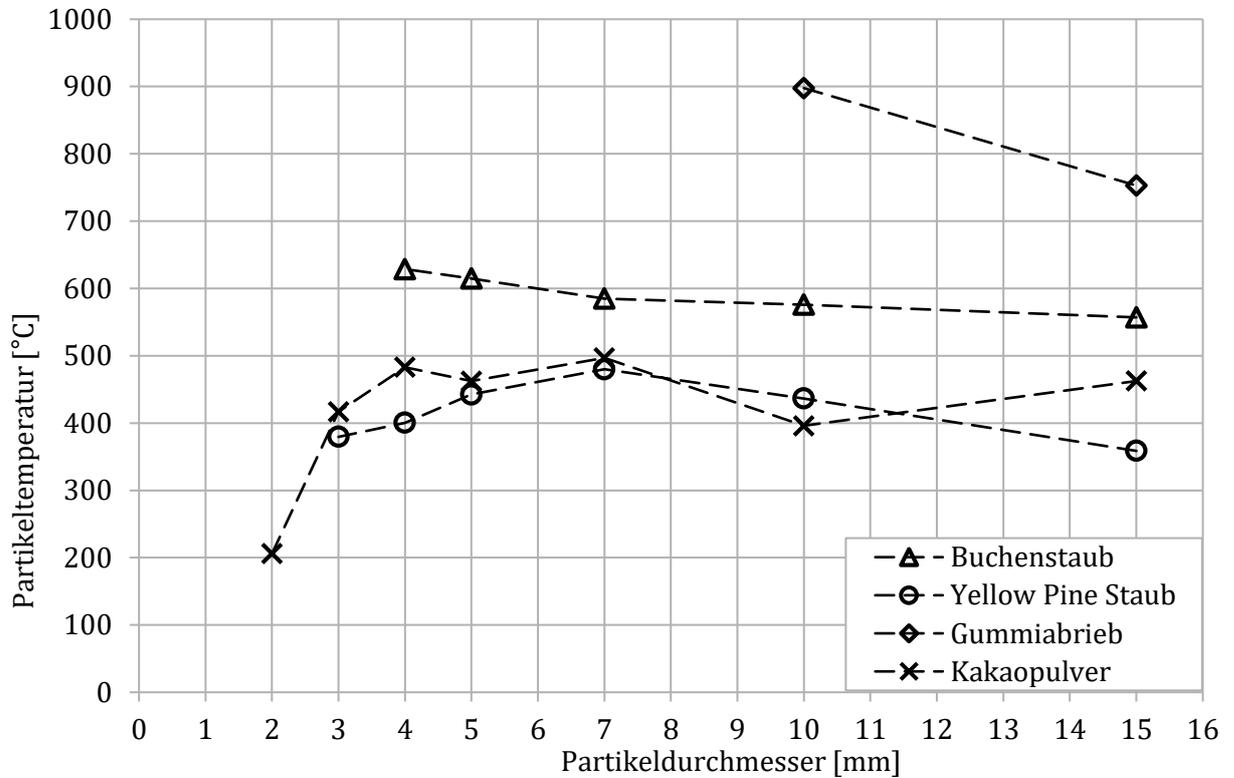


Bild 23: Zündgrenztemperaturen von Kugeln in abgelagerter Staubschicht [Bechem und Barth 2019]

Tabelle 10: Zündgrenztemperaturen von Kugeln in abgelagerter Staubschicht [Bechem und Barth 2019]

Stoff \ Ø	15 mm	10 mm	7 mm	5 mm	4 mm	3 mm	2 mm
Buchenstaub	557 °C	576 °C	600 °C	615 °C	629 °C	n.b.	n.b.
Yellow Pine Staub	359 °C	437 °C	480 °C	443 °C	400 °C	380 °C	n.b.
Gummiabrieb	753 °C	898 °C	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Kakaopulver	463 °C	396 °C	467 °C	463 °C	483 °C	417 °C	206 °C
Milchpulver	n.b.						

### 5.1.2.2 Zündgrenztemperatur für Kugeln in abgelagerter-durchströmter Staubschicht

In Bild 24 sind die ZGT für die Zündwirksamkeitsversuche mit Kugeln in abgelagerter, durchströmter Staubschicht dargestellt. Diese sind der Bachelor-Thesis von [Tessendorf 2017] entnommen. Im Buchenstaub (Dreieck) wird der gleiche Trend festgestellt: Mit steigendem Durchmesser der Partikeln

sinkt die ZGT. Für den Yellow Pine Staub (Kreis) kann dieser Trend im groben ebenfalls erkannt werden, wobei die Partikeln mit  $\varnothing = 4 \text{ mm}$  und  $\varnothing = 10 \text{ mm}$  davon abweichen. Die entsprechenden ZGT sind in Tabelle 11 angeführt. Bei allen Versuchen, die eine Entzündungen der Staubschicht sowohl im Buchenstaub als auch im Yellow Pine Staub zur Folge hatten, wurde ein Glimmbrand ausgelöst.

Tabelle 11: Zündgrenztemperaturen von Kugeln in abgelagerter, durchströmter Staubschicht

Stoff \ $\varnothing$	15 mm	10 mm	7 mm	5 mm	4 mm	3 mm	2 mm
Buchenstaub	440 °C	450 °C	490 °C	528 °C	541 °C	564 °C	n.b.
Yellow Pine Staub	361 °C	391 °C	389 °C	434 °C	393 °C	486 °C	n.b.

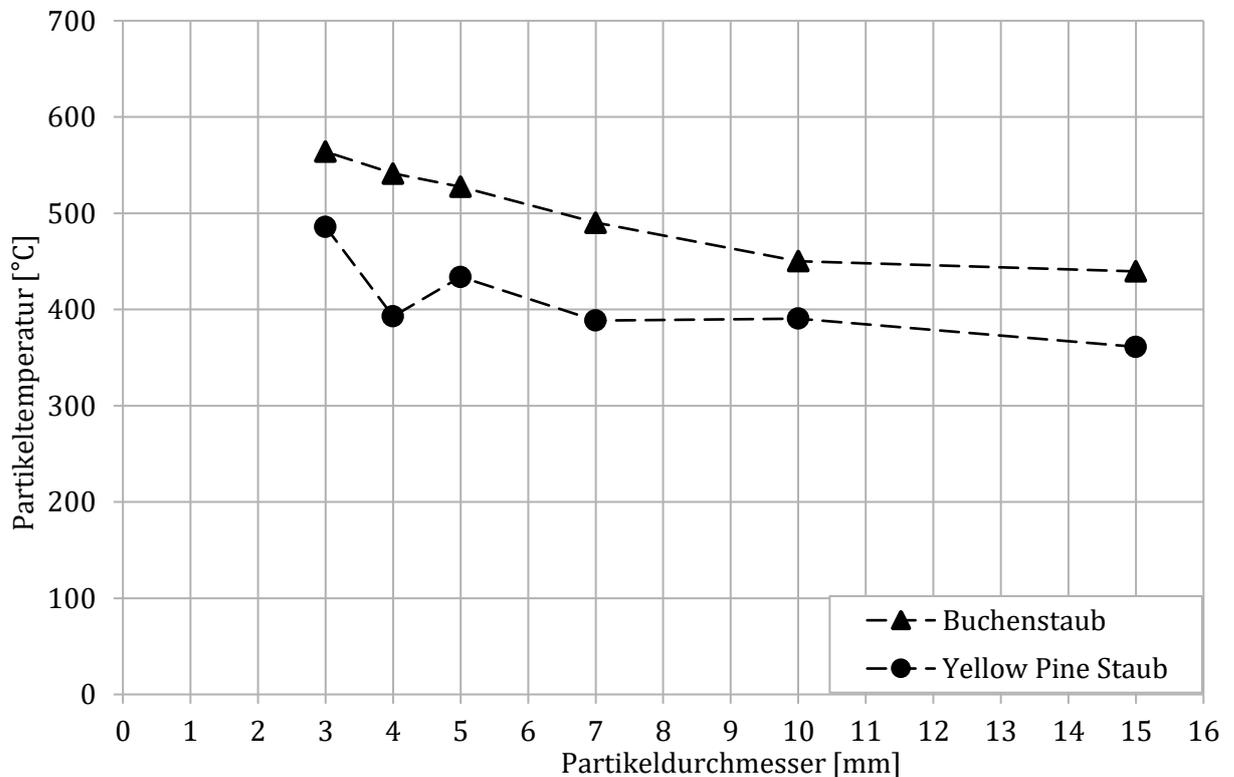


Bild 24: ZGT für die Versuche von Kugeln in abgelagerter, durchströmter Staubschicht nach [Tessendorf 2017]

Der direkte Vergleich der ZGT zwischen abgelagerter und abgelagerter, durchströmter Staubschicht ist in Bild 25 dargestellt. Der Verlauf der ZGT in abgelagerter, durchströmter Staubschicht des Buchenstaubs liegt um ca. 100 K unterhalb des Verlaufs der nicht durchströmten Schicht. Beim Yellow Pine Staub ergibt sich dieser einheitliche Unterschied zwischen den ZGT-Verläufen nicht. Die Kugeln mit dem  $\varnothing = 4 \text{ mm}$ ,  $\varnothing = 5 \text{ mm}$  und  $\varnothing = 15 \text{ mm}$  besitzen bei beiden Staubschichten annähernd die gleiche ZGT. Beim  $\varnothing = 3 \text{ mm}$  liegt die ZGT der durchströmten Staubschicht sogar oberhalb der ZGT der nicht durchströmten Staubschicht.

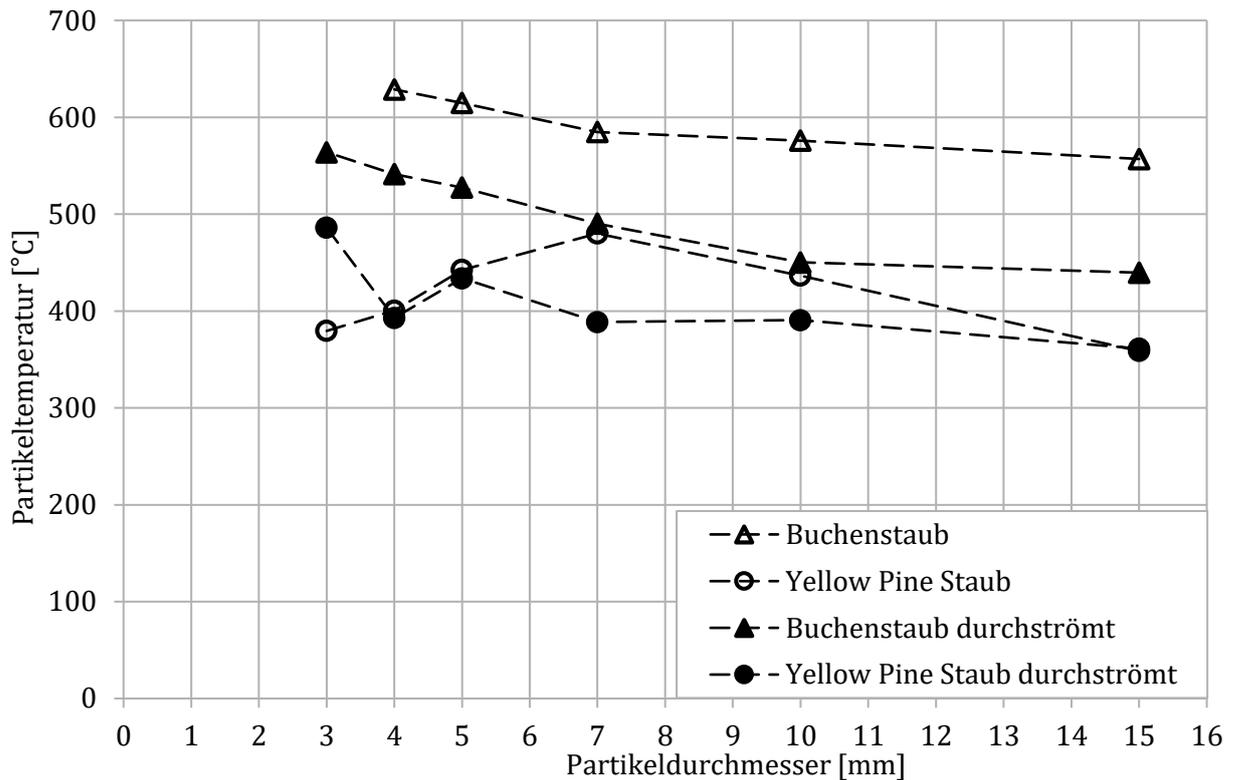


Bild 25: Vergleich der ZGT zwischen abgelagerter und abgelagerter, durchströmter Staubschicht nach [Tessendorf 2017]

### 5.1.2.3 Zündgrenztemperatur für Scheiben und Zylinder in abgelagerter Staubschicht

Die ZGT aus den Zündwirksamkeitsversuchen in abgelagerter Staubschicht mit Scheiben sind in Bild 26 dargestellt. Anders als bei den Versuchen mit Kugeln ist hier die ZGT im Kakao am höchsten. Auch zeigen hier das Kakaopulver (Kreuz) und der Yellow Pine Staub (Kreis) den Verlauf, dass die ZGT mit steigendem Partikeldurchmesser sinkt, wohingegen sich beim Buchenstaub (Dreieck) dieser Trend nicht einstellt. Hier wird die niedrigste ZGT bei einer Scheibe mit  $\varnothing = 10$  mm festgestellt. Dieses Verhalten war angesichts der Ergebnisse der Kugelversuche überraschend. In Tabelle 12 sind die jeweiligen ZGT der Versuche mit Scheiben angegeben.

Tabelle 12: Zündgrenztemperaturen von Scheiben in abgelagerter Staubschicht

Stoff \ $\varnothing/D$	15 mm / 2,3 mm	12 mm / 2,3 m	10 mm / 2,3 mm	8 mm / 2,3 mm
Buchenstaub	425 °C	430 °C	399 °C	473 °C
Yellow Pine Staub	300 °C	344 °C	350 °C	388 °C
Kakaopulver	424 °C	419 °C	492 °C	556 °C

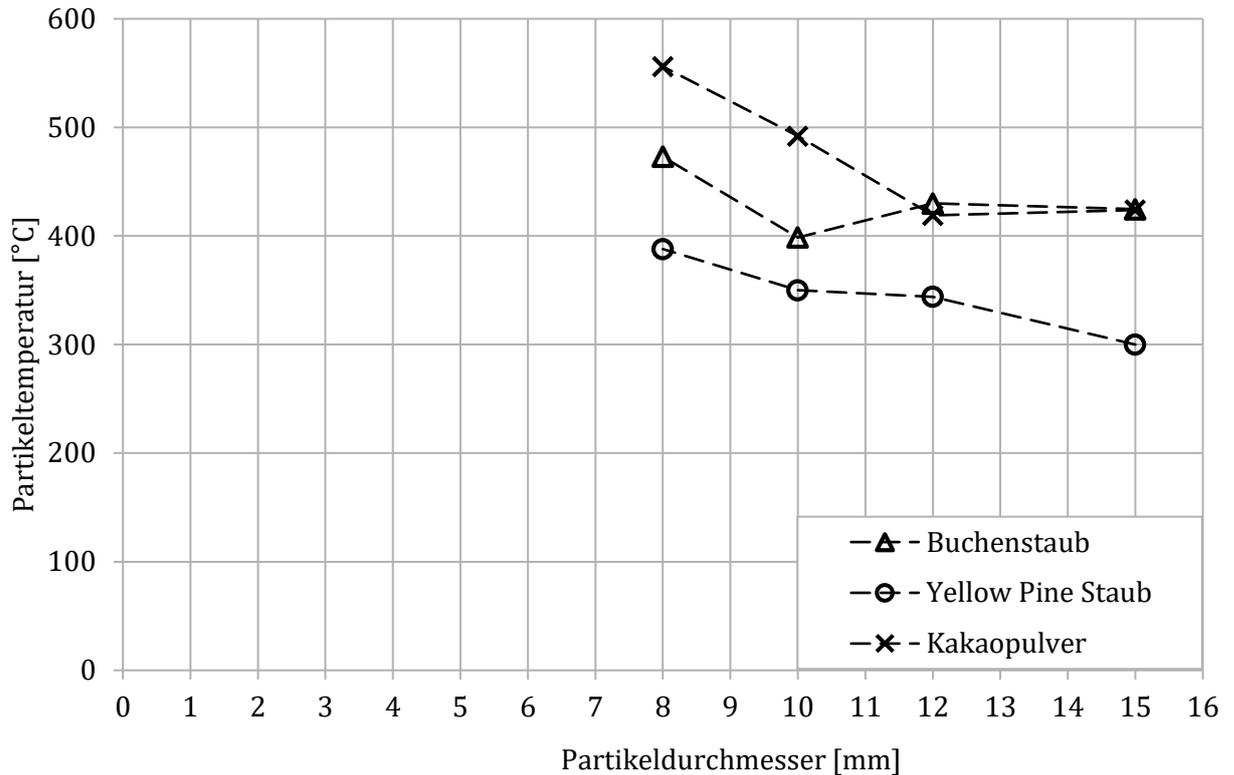


Bild 26: Zündgrenztemperaturen von Scheiben in abgelagerter Staubschicht nach [Xiong 2018]

Die Ergebnisse der Zündwirksamkeitsversuche mit Zylindern in abgelagerter Schicht sind in Bild 27 enthalten. Hier ist die Partikeltemperatur über dem Partikeldurchmesser aufgetragen, wie bei allen anderen Diagrammen auch. Anders als bei den Kugeln oder Scheiben sind die Längen und das Durchmesser/Längen-Verhältnis der Zylinder jeweils unterschiedlich. Die bestimmten ZGT sind beim Yellow Pine Staub (Kreis) am niedrigsten. In dieser Darstellung ergibt sich der erwartete Verlauf einer sinkenden ZGT bei steigendem Partikeldurchmesser. Im Buchenstaub (Dreieck) ist der Trend mit einer Ausnahme ( $\varnothing = 5$  mm) ebenfalls zu erkennen. Lediglich im Kakaopulver (Kreuz) wird kein eindeutiger Verlauf der ZGT festgestellt. Die entsprechenden ZGT der Zylinder sind in Tabelle 13 angeführt.

Tabelle 13: Zündgrenztemperaturen von Zylindern in abgelagerter Staubschicht

Stoff \ $\varnothing/L$	8 mm / 12 mm	6 mm / 8 mm	5 mm / 9 mm	3,5 mm / 23,8 mm
Buchenstaub	425 °C	430 °C	399 °C	473 °C
Yellow Pine Staub	283 °C	284 °C	305 °C	312 °C
Kakaopulver	393 °C	347 °C	417 °C	397 °C

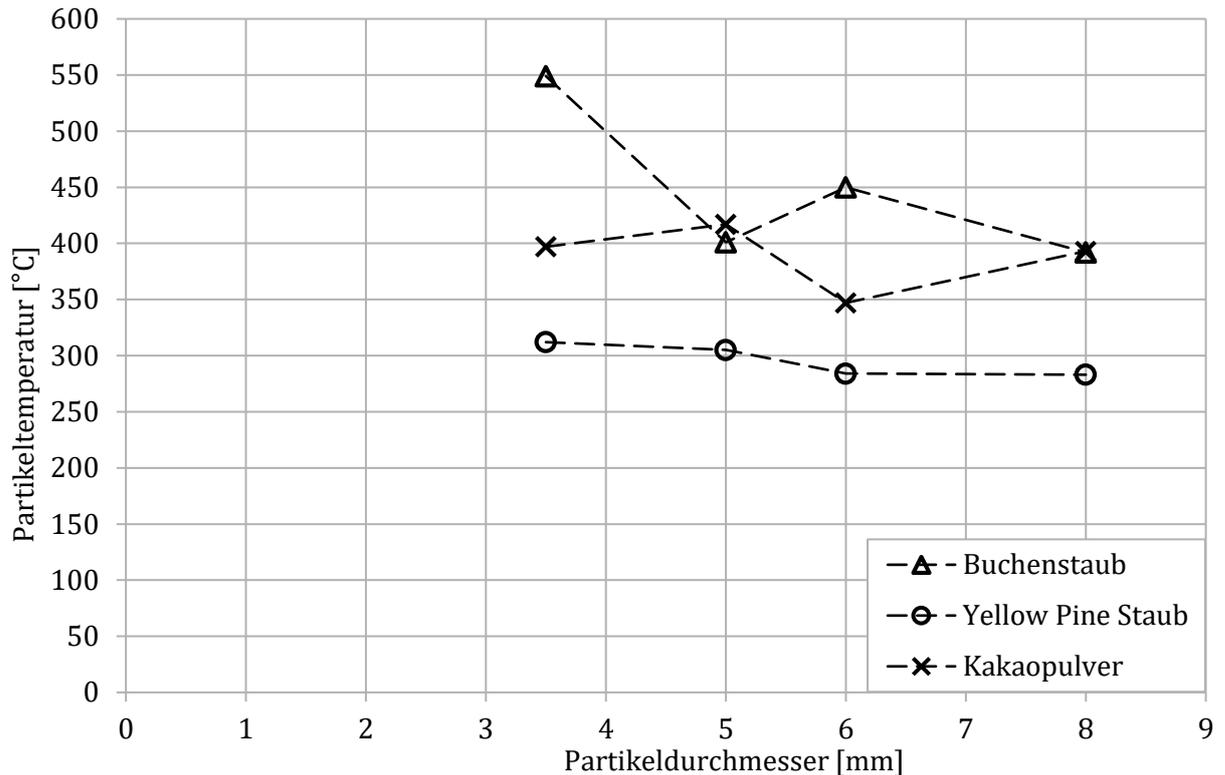


Bild 27: Zündgrenztemperaturen von Zylindern in abgelagerter Staubschicht nach [Xiong 2018]

#### 5.1.2.4 Vergleich der unterschiedlichen Formen inerter heißer Partikeln

Werden die Zündwirksamkeitsversuche der unterschiedlich geformten heißen Partikel vergleichend in einem Diagramm dargestellt, ergeben sich die in Bild 28 visualisierten Verläufe. Hier sind die Verläufe der jeweiligen partikelformabhängigen ZGT für Buchenstaub schwarz, für Yellow Pine Staub grün und für Kakaopulver blau eingefärbt. Die ZGT der entsprechenden Partikelformen sind in den jeweiligen Stäuben durch denselben Marker zu erkennen. Hierbei stehen Dreiecke für Kugeln, Kreise für Scheiben und Rauten für Zylinder.

Im Vergleich wird deutlich, dass der Yellow Pine Staub bei allen drei Partikelformen die geringsten ZGT aufweist, während die ZGT der Kugeln im Buchenstaub eindeutig am höchsten sind. Bei den Zylindern sind die ZGT beim Buchenstaub und Kakaopulver teilweise ähnlich, wobei die ZGT im Buchenstaub im Allgemeinen höher sind als im Kakaopulver. Abweichend zu den ZGT der Kugeln und Zylinder liegt die ZGT der Scheiben im Kakaopulver am höchsten. Vereinzelt besitzen unterschiedlich geformte Partikeln in unterschiedlichen Stäuben die gleiche ZGT. Dies ist der Fall bei Scheiben-Buchenstaub und Kugel-Kakaopulver. Eine ZGT  $\approx 400$  °C wird bei Scheiben im Yellow Pine Staub und bei Zylindern im Buchenstaub und Kakaopulver deutlich erkennbar.

Um den Vergleich zwischen den ZGT der einzelnen Partikelformen besser darstellen zu können, wurden die ZGT auf die entsprechende Partikeloberfläche bezogen (Bild 28).

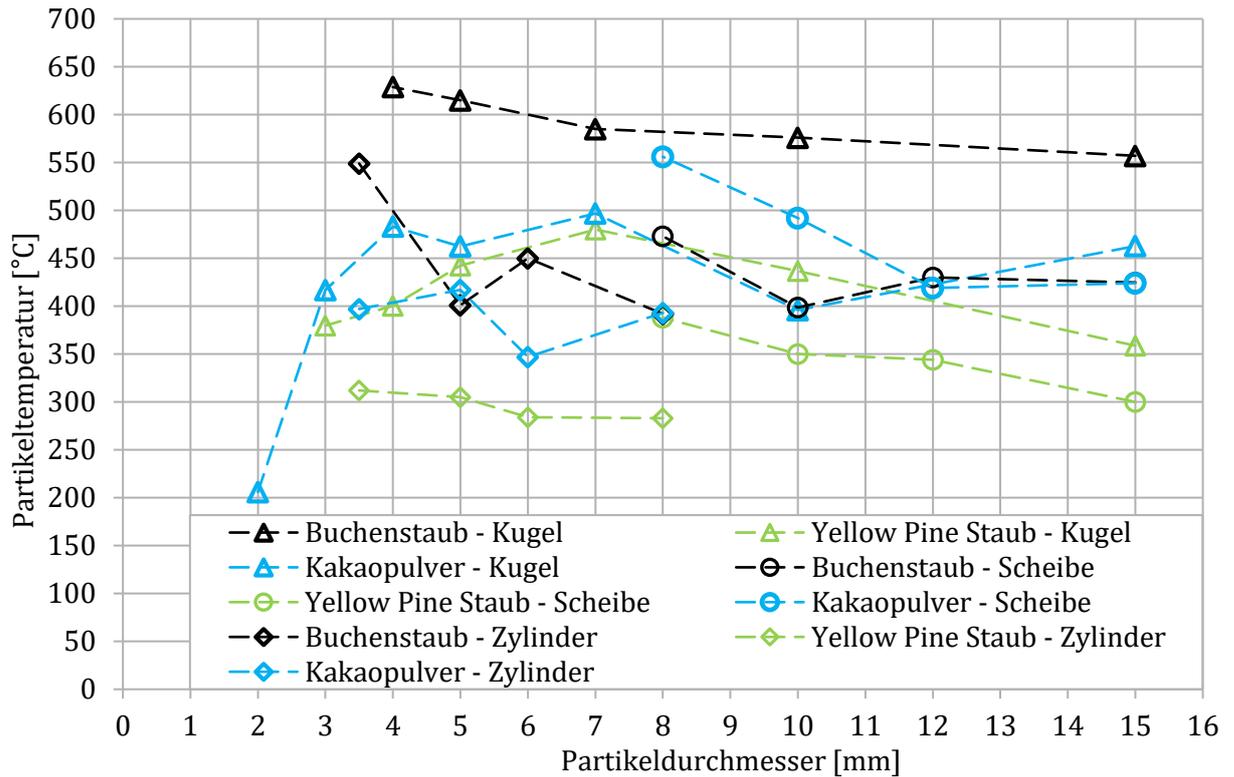


Bild 28: Vergleich der ZGT der unterschiedlichen Partikelformen

Um einen Vergleich der ZGT der einzelnen Partikelformen besser darstellen zu können, muss ein Weg gefunden werden, durch den die Werte vereinheitlicht werden können. Im vorliegenden Fall wurden die ZGT auf die entsprechende Partikeloberfläche bezogen. In Bild 29 sind die Verläufe der entsprechenden flächenbezogenen ZGT über die Partikeloberfläche zusammengefasst. Die Darstellung der entsprechenden Werte ist in Analogie zum Vergleich der ZGT (vgl. Bild 28). Im Anhang sind die flächenbezogenen ZGT für die jeweiligen Partikelformen separat in Bild-A 7 bis Bild-A visualisiert. Bei allen Stäuben wird ein einheitlicher Verlauf ersichtlich, wobei mit steigender Partikeloberfläche die flächenbezogene ZGT sinkt. Des Weiteren ist zu erkennen, dass die flächenbezogene ZGT der unterschiedlich geformten iHZP bei gleicher Partikeloberfläche annähernd identisch ist.

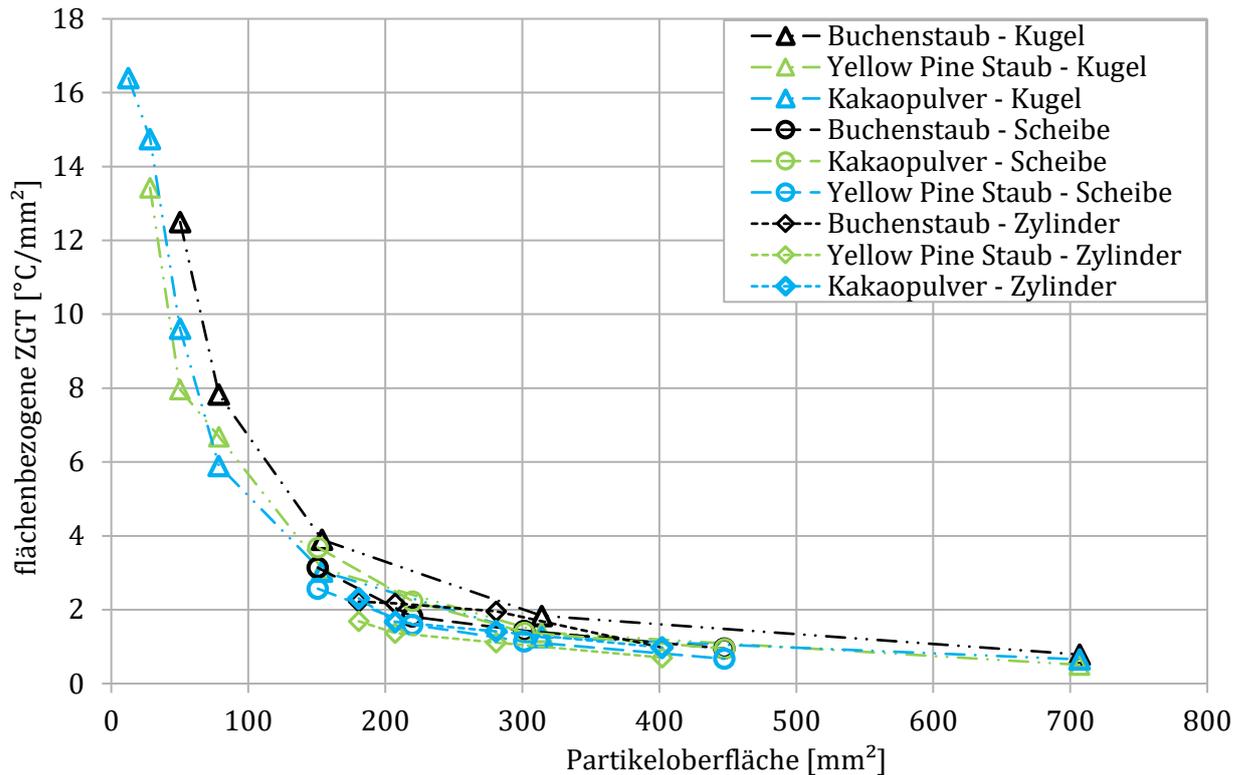


Bild 29: Vergleich der flächenbezogenen ZGT über der Partikeloberfläche der Versuche

Als Nächstes stellt sich die Frage, inwiefern sich die Zündwirksamkeit der unterschiedlichen iHZZ auf der Energieebene vergleichen lässt. Daher wird als weiterer Vergleich der drei verschiedenen Partikelformen die Partikelenergie betrachtet, welche sich aus der jeweiligen ZGT ergibt. Mittels der temperaturabhängigen spezifischen Wärmekapazität ( $c_{p,P}$ ) und der Masse der Partikeln kann auf gespeicherte Energie geschlossen werden. Die spezifischen Wärmekapazitäten wurden für die Kugeln und Zylinder aus 100Cr6-Stahl (Werkstoffnummer: 1.3505) einem Forschungsbericht entnommen [Dalgic et al. 2003]. Für die Scheiben aus Flachstahl DC 04 (Werkstoffnummer: 1.0338) stammen diese Werte aus der Software StahlWissen [Sommer et al. 2019]. Die temperaturabhängigen Verläufe sind in Bild 30 angeführt. Da es sich bei Kugeln und Zylindern um normgerechte Walzlagerelemente handelt, wurden die Massen den entsprechenden Normen entnommen. Die Scheiben wurden in der fakultätsinternen Werkstatt hergestellt und die Massen anschließend durch Wiegen ermittelt. In Tabelle 14 sind die Massen der jeweiligen Partikeln angeführt.

Tabelle 14: Massen der verschiedenen Partikeln

Partikelform	Größe [mm]	Masse [g]	Quelle
Kugel Ø	2	0,03	[DIN 5401]
	3	0,09	
	4	0,25	
	5	0,50	
	7	1,40	
	10	4,08	
	15	13,75	
Scheibe Ø/D	8/2,3	0,81	Messung
	10/2,3	1,34	
	12/2,3	1,89	
	15/2,3	2,80	
Zylinder Ø/L	3,5/23,8	1,85	[DIN 5402-1; DIN 5402-3]
	5/9	1,33	
	6/8	1,78	
	8/12	4,65	

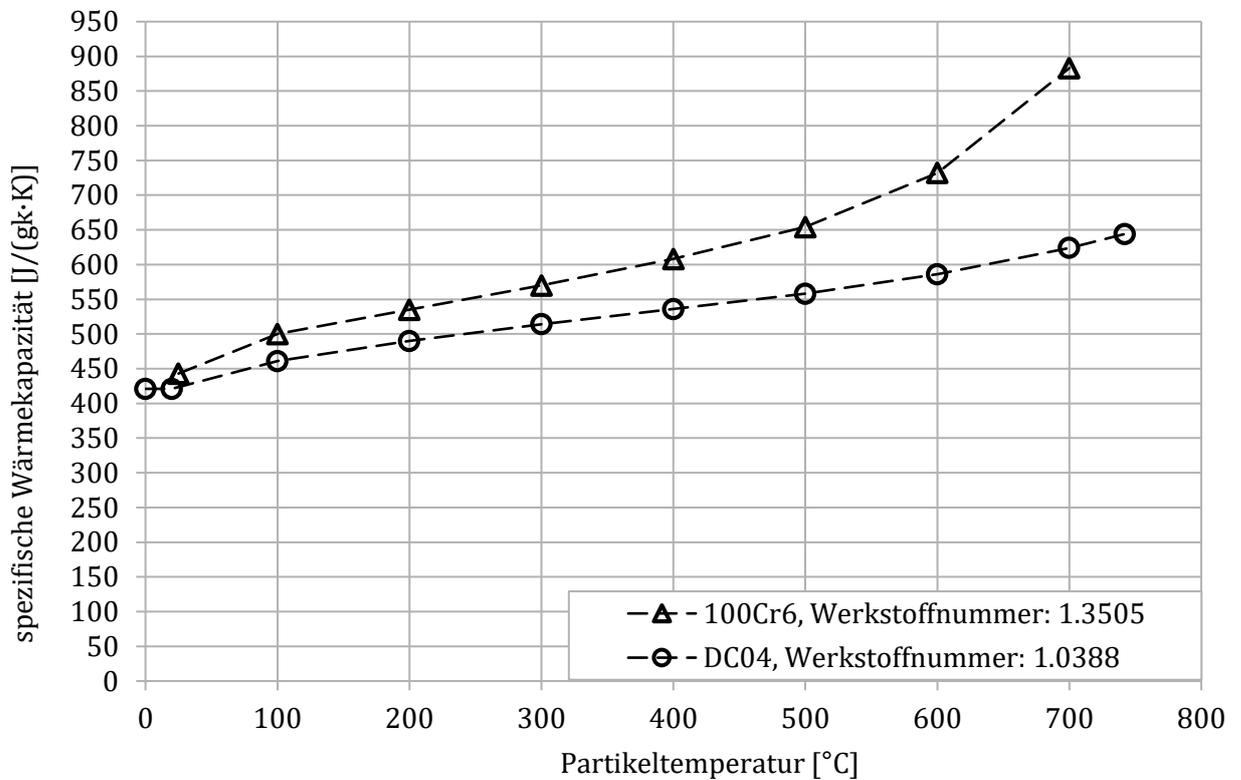


Bild 30: Temperaturabhängige spezifische Wärmekapazität der Partikelwerkstoffe nach [Dalgic et al. 2003; Sommer et al. 2019]

Der Verlauf der entsprechenden gespeicherten Energie ist in Bild 31 visualisiert. Die Daten werden analog zum Vergleich der ZGT (vgl. Bild 28) dargestellt. Bei den Kugeln und Scheiben ist zu erkennen, dass sich die gespeicherte Energie mit steigendem Partikeldurchmesser ebenfalls erhöht. Gerade bei den Kugeln unterscheidet sich dieses Verhalten also vom Verlauf der ZGT. Bei den Zylindern ist der Verlauf nicht monoton steigend. Stattdessen besitzt der Zylinder mit  $\varnothing = 3,5$  mm jeweils eine größere Energie als die Zylinder mit  $\varnothing = 5$  mm und  $\varnothing = 6$  mm. Ebenfalls ist zu erkennen, dass sich jeweilige Partikelformen deutlich voneinander unterscheiden, wohingegen dies beim Vergleich der ZGT nicht der Fall ist.

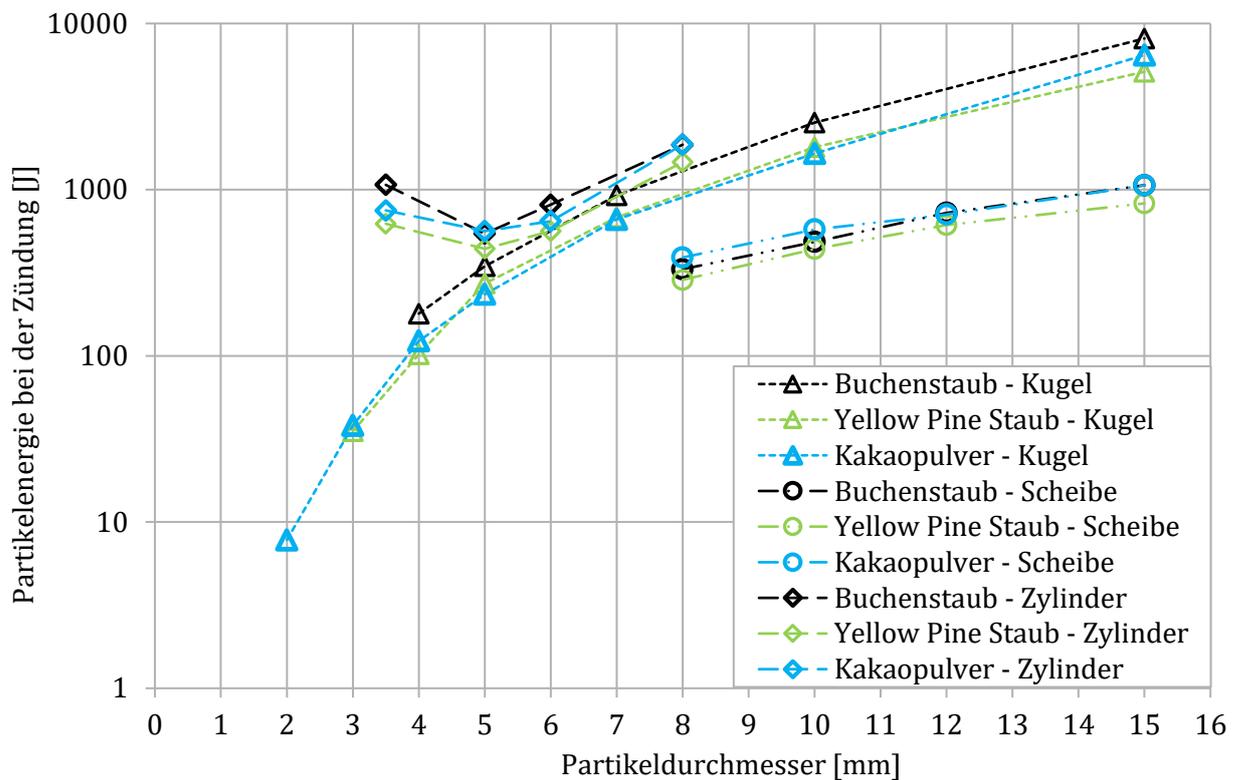


Bild 31: Vergleich der Partikelenergie über den Partikeldurchmesser, die der ZGT entsprechen

Da die volumenbezogene Oberfläche ( $A/V$ ) der Partikeln einen Einfluss auf die instationäre Wärmeabfuhr besitzt, wird im nächsten Schritt die Partikelenergie über die volumenbezogene Oberfläche aufgetragen und verglichen. Bild 32 zeigt diesen Vergleich. Im Diagramm sind beide Achsen logarithmisch skaliert. Die Darstellung erfolgt wieder in Analogie zu Bild 28. Es ist zu erkennen, dass sowohl die Scheiben als auch die Zylinder in dieser Darstellung einen geraden Verlauf zeigen. Für die Zylinder ergibt sich ebenfalls eine Gerade, jedoch mit einem Ausreißer (Zylinder mit  $\varnothing = 3,5$  mm). Die Verläufe der Kugeln und Zylinder sind parallel. Hieraus ergibt sich, dass die Steigungen dieser Geraden ungefähr gleich sind. Bei den Scheiben hingegen ist die Steigung der Geraden deutlich steiler und somit nicht parallel zu den Kugeln und Zylindern.

Weiter wird festgestellt, dass in dieser Darstellung die Werte für die Scheiben und Zylinder näher beisammen liegen als bei der Darstellung über den Partikeldurchmesser (vgl. Bild 31).

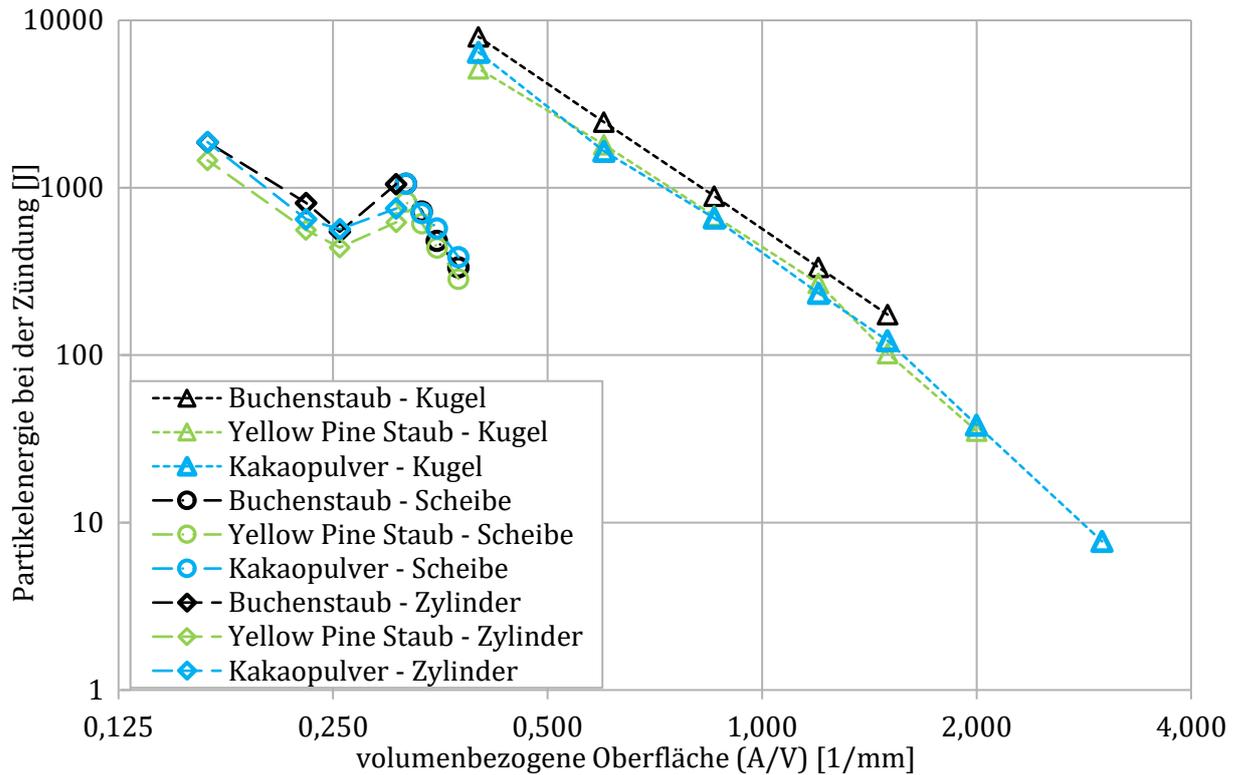


Bild 32: Vergleich der Partikelenergie, die der ZGT entspricht, über die volumenbezogene Oberfläche (A/V) – beide Achsen sind logarithmisch skaliert

Als Letztes werden die Partikelenergien auf deren Oberfläche bezogen und über die Partikeloberfläche in einem Diagramm dargestellt. Die entsprechenden Verläufe sind in Bild 33 abgebildet. Die Darstellung erfolgt wieder in Analogie zu Bild 28. Bei den Ergebnissen der Kugelversuche zeigt sich, dass die flächenbezogene Partikelenergie mit zunehmender Partikeloberfläche ebenfalls steigt. Die flächenbezogene Partikelenergie der Zylinder lässt keinen eindeutigen Trend erkennen, wohingegen die flächenbezogene Partikelenergie der Scheiben einen annähernd gleichbleibenden Wert zeigt.

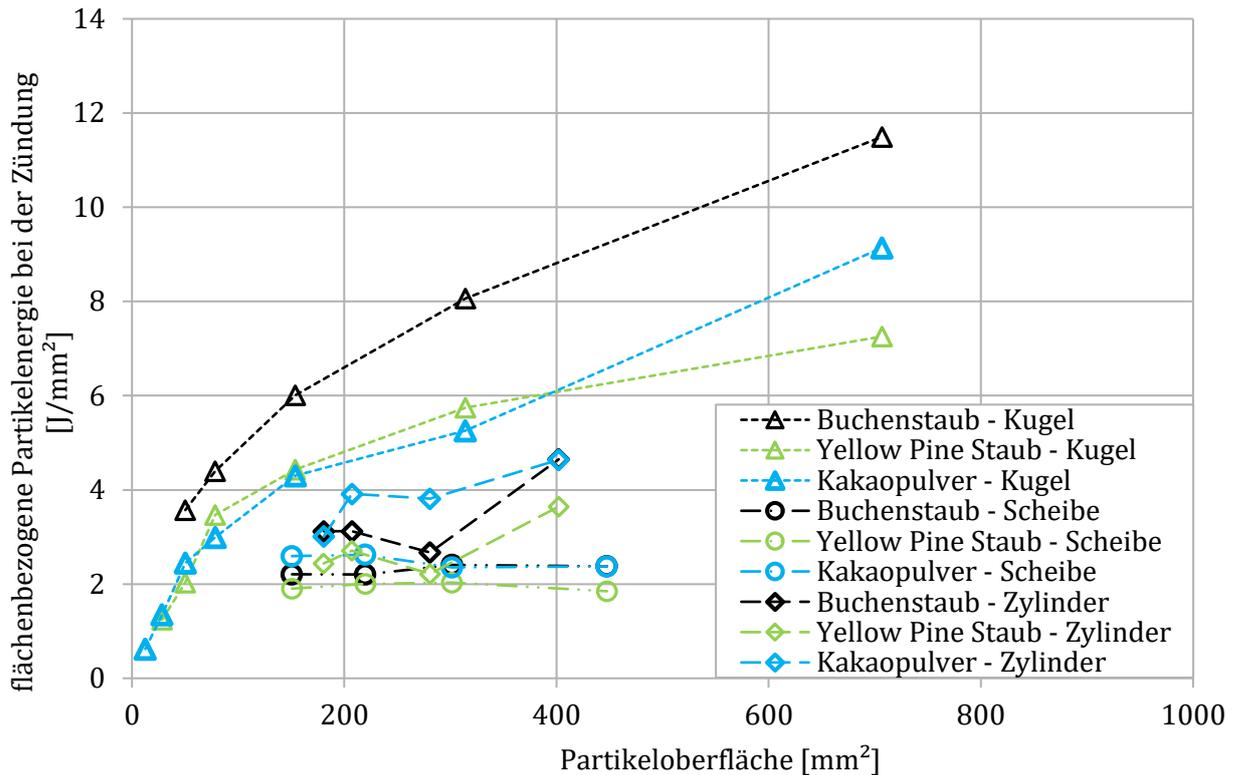


Bild 33: Vergleich der flächenbezogenen Partikelenergie, die der ZGT entspricht

## 5.2 Mobilität inerte heißer Partikeln

### 5.2.1 Versuchsbeschreibung

Für die sicherheitstechnische Bewertung verfahrenstechnischer Anlagen ist neben der Zündwirksamkeit eines inerten heißen Partikels seine Mobilität von Bedeutung. Oftmals wird ein solches Partikel in einem anderen Prozessschritt erzeugt, als es später zündwirksam ist. Das in Bild 15 (S. 33) dargestellte Partikel, welches eine Explosion in einem Mühlenbunker initiiert haben soll, wurde vermutlich innerhalb der Mühle selbst erzeugt und erst im nachgelagerten Prozessschritt (Zwischenlagern des Mahlgutes) zündwirksam. Dies zeigen auch entsprechende Statistiken über Staubexplosionen: Bis zu 42 % aller Staubexplosionen wurden in Staubabscheidern initiiert, wohingegen nur bis zu 17 % in Zerkleinerungsmaschinen erfolgten [Jeske und Beck 1997; Zalosh et al. 2005; Cloney 2018]. Für die Entstehung von Staubbränden liegen keine statistischen Daten vor, es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass sich die Verteilung mit den Daten der Staubexplosionen vergleichen lässt. In Staubabscheidern ist nicht mit einer Entstehung eines inerten heißen Partikels zu rechnen. Die Statistiken zeigen auch, dass ca. 37 % der Staubexplosionen auf mechanisch erzeugte Funken/mechanische Erwärmung und Schweißarbeiten zurückzuführen sind [Jeske und Beck 1997, S. 29 Tabelle 9], wobei diese Zündquellen in gewissem Maß als inerte heiße Partikeln verstanden werden können. Für die Erzeugung dieser Zündquellen ist eine hohe thermische oder mechanische Energie nötig, welchen in einem Staubabscheider normalerweise nicht auftritt, dafür jedoch in Zerkleiner-

runungsmaschinen. Es ist ersichtlich, dass die Schadensereignisse in einem nachfolgenden Prozessschritt auftreten und nicht in dem Prozessschritt in dem inerte heiße Partikeln erzeugt werden. Sollte ein inertes heißes Partikel in einem nachgelagerten Prozess als Zündquelle fungieren, muss dieses erst einmal dorthin transportiert werden.

Die Bewertung der Mobilität inerter heißer Partikeln wurde durch einen Versuchsaufbau im Technikums-Maßstab durchgeführt, welcher in Bild 34 dargestellt ist. Die Mobilitätsversuche wurden mit allen Partikeln durchgeführt, die bereits in den Zündwirksamkeitsversuchen Anwendung fanden (vgl. Kapitel 5.1.1, Tabelle 8, S. 42).

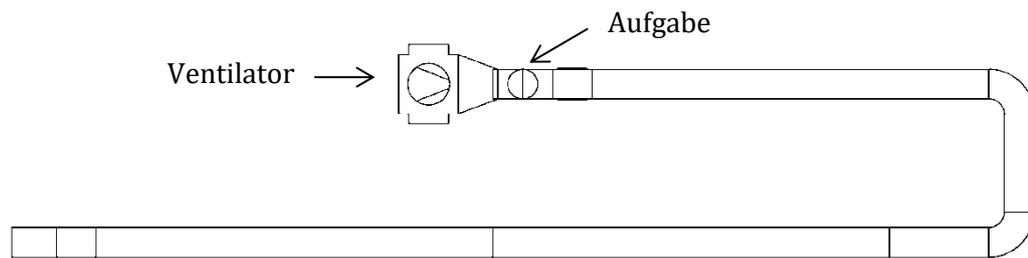


Bild 34: Versuchsaufbau der pneumatischen Transportleitung

Die Rohrleitung (DN 150) besitzt eine Länge von ca. 8,5 m und wurde im Druckbetrieb gefahren. Die mittlere Luftgeschwindigkeit bei den Versuchen betrug innerhalb der Transportleitung ca. 14 m/s.

### 5.2.2 Versuchsergebnisse

Die Ergebnisse der Mobilitätsversuche sind in Tabelle 15 zu sehen. Es wurde festgestellt, dass sich nur die Kugeln in den Rohrleitungen pneumatisch transportieren ließen, wobei die Transportgeschwindigkeit nicht die Luftgeschwindigkeit erreichte. Die scheibenartigen und zylindrischen Partikel konnten im Luftstrom überhaupt nicht transportiert werden.

Tabelle 15: Ergebnisse der Transportversuche

Partikelform	Größe [mm]	Transportfähigkeit	mittlere Geschwindigkeit [m/s]
Kugel Ø	2	Rollen	1,53
	3	Rollen	1,32
	4	Rollen	1,25
	5	Rollen	1,12
	7	Rollen	1,07
	10	Rollen	0,91
	15	Rollen	0,79

Partikelform	Größe [mm]	Transportfähigkeit	mittlere Geschwindigkeit [m/s]
Scheibe Ø/D	8/2,3	nicht transportierbar	n.b.
	10/2,3	nicht transportierbar	n.b.
	12/2,3	nicht transportierbar	n.b.
	15/2,3	nicht transportierbar	n.b.
Zylinder Ø/L	3,5/23,8	nicht transportierbar	n.b.
	5/9	nicht transportierbar	n.b.
	6/8	nicht transportierbar	n.b.
	8/12	nicht transportierbar	n.b.

Testweise wurden an einer pneumatischen Förderleitung im Originalmaßstab auf dem Firmengelände der Fagus-GreCon Greten GmbH & Co. KG Alfeld, Deutschland Versuche zur Transportierbarkeit der kleineren Kugeln ( $\varnothing = 2 \text{ mm}$  bis  $\varnothing = 5 \text{ mm}$ ) durchgeführt. Nach der Aufgabe verläuft der Strömungskanal bei dieser erst einmal ca. 1 m abwärts, um im weiteren Verlauf über zwei Steigungen in ein Filtergehäuse zu münden. Bild 35 zeigt die Versuchsanlage. Das Ergebnis der Testversuche war, dass alle kleinen Kugeln die 1. Steigung nicht überwinden konnten. Unter realen Förderbedingungen gelangten die Kugeln also nicht in das Filtergehäuse. Deshalb wurden die Versuche mit den Scheiben und Zylindern nicht weitergeführt.

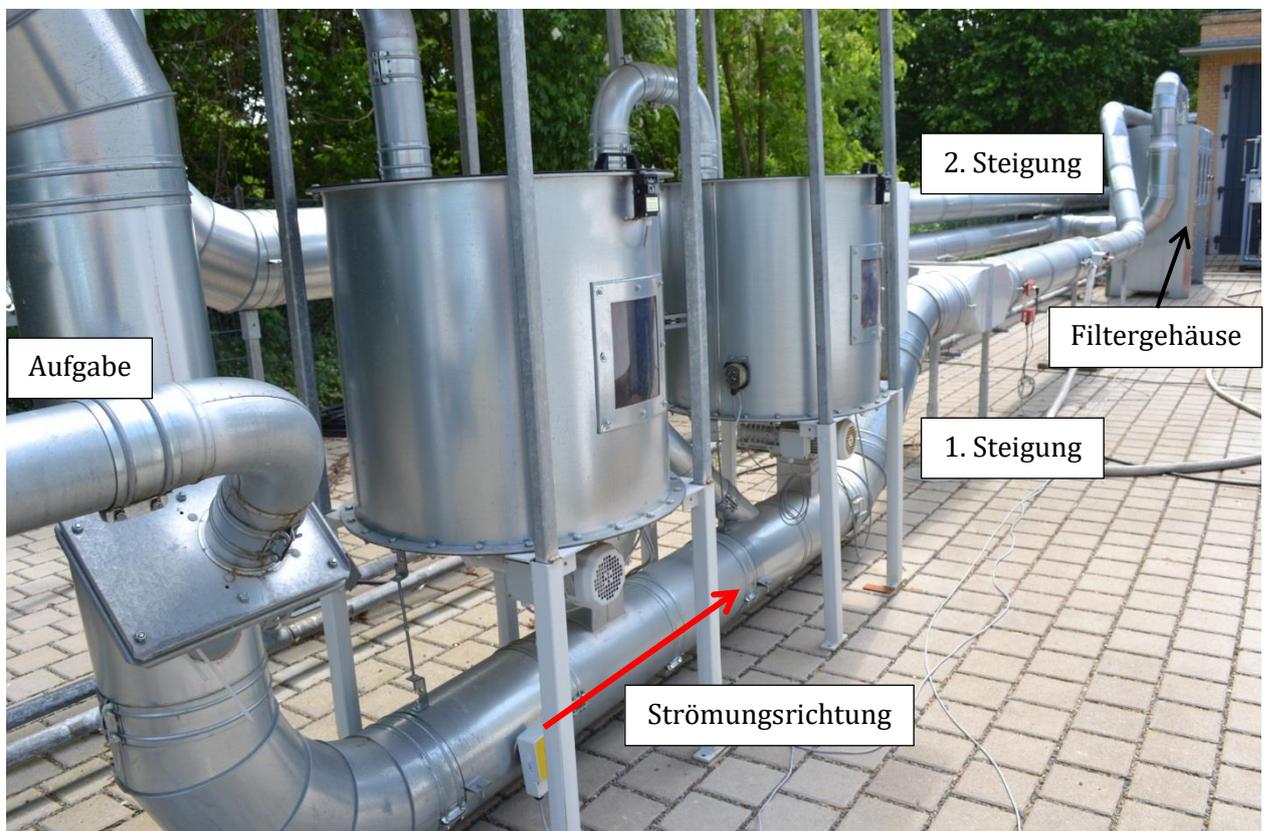


Bild 35: pneumatische Förderanlage auf dem Firmengelände der Fagus-GreCon Greten GmbH & Co. KG

Neben dem pneumatischen Transport finden mechanische Transportwege oder Fallprozesse in verfahrenstechnischen Anlagen Anwendung. Hier können alle Partikelformen und -größen entsprechend transportiert werden.

## 5.3 Detektierbarkeit inerter heißer Partikeln

### 5.3.1 Versuchsbeschreibung

Die Detektierbarkeit inerter heißer Partikeln wird bis heute mittels sogenannten „Funkenmelder“ überprüft. Funkenmelder werden in der verfahrenstechnischen und staubverarbeitenden Industrie an Transportleitungen aller Art, meist jedoch an pneumatischen Fördersystemen installiert, um im Produktstrom hochmobile zündwirksame Partikeln zu detektieren und entsprechende Löschkaktionen zu initiieren. Das Detektionsprinzip beruht darauf, dass ein Funkenmelder die Änderung der elektromagnetischen Wärmestrahlung im Infrarotbereich erkennt. Funkenmelder werden gemäß [VdS 2518] in zwei Klassen eingeteilt:

- Klasse A: Detektionsbereich unterhalb einer Wellenlänge von 1,3  $\mu\text{m}$ , tageslichtempfindlich
- Klasse B: Detektionsbereich oberhalb einer Wellenlänge von 1,3  $\mu\text{m}$ , tageslichtunempfindlich

Die Tageslichtempfindlichkeit der Klasse A Melder bedeutet, dass diese Melder Wellenlängen detektieren können, die im sichtbaren Bereich liegen und somit hier auf die Änderungen der Lichtverhältnisse reagieren. Grundsätzlich sind Funkenmelder vom Detektionsprinzip Photonendetektoren, die je nach verbautem Material unterschiedliche maximale Wellenlängen detektieren können. Dieses Verhalten begründet die Klassifizierung der Melder. Ebenfalls gilt der Grundsatz, dass heiße Partikeln besser detektiert werden können als kältere [vgl. Bechem und Liske 2019]. Dies ergaben ebenfalls Untersuchungen, die im Rahmen einer Bachelorthesis durchgeführt wurden [vgl. Hussels 2016]. Die hier beschriebenen Versuche der Detektierbarkeit inerter heißer Partikeln wurden mit beiden Melderklassen durchgeführt. Für die Bewertung, ob ein inertes heißes Partikel mit einer Temperatur, die der ZGT entspricht, von einem Funkenmelder detektiert werden kann, wurde neben dem Funkenmelder ebenfalls die Wärmebildkamera genutzt.

Der Aufbau dieser Detektierbarkeitsversuche bestand aus einem ca. 50 cm langen DN 150 Rohr, welches sich am unteren Ende weitet. Der gesamte Aufbau stand in einem Wasserbad, damit die erwärmten Partikeln direkt abkühlen und nicht zu erneutem Detektieren führen. An dem Rohr waren die beiden Funkenmelder seitlich montiert. Der Versuch wurde von oben durch die Wärmebildkamera gefilmt und mit der Software entsprechend ausgewertet. Hierbei wurde der Emissionskoeffizient  $\epsilon$  wieder auf den Wert 0,9 eingestellt. Bild 36 stellt den Versuchsaufbau dar.

Für diese Versuche wurden die gleichen Kugeln, Scheiben und Zylinder verwendet, die bereits zur Bestimmung der ZGT genutzt wurden (vgl. Kapitel 5.1.1 Versuchsbeschreibung, Tabelle 8, S. 42). Die Erwärmung dieser Partikeln erfolgte analog zu den Zündwirksamkeitsversuchen, in dem diese in

kleinen Tiegeln in einem Ofen auf unterschiedliche Temperaturen erwärmt wurden. Jede Kombination aus Partikelform/-größe und Ofentemperatur wurde in mehreren Einzelversuchen untersucht.

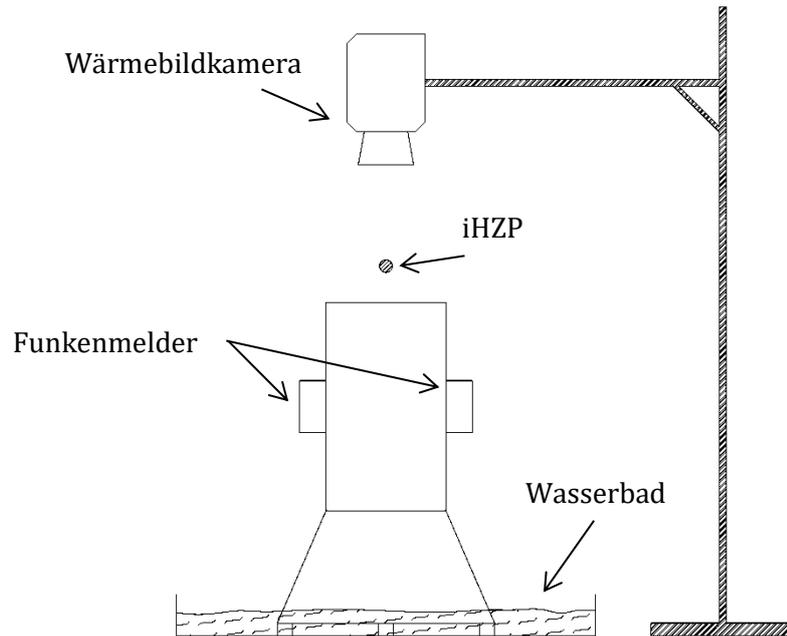


Bild 36: Versuchsaufbau für die Detektierbarkeit inerte heißer Partikeln

### 5.3.2 Versuchsergebnisse

Aus dem Grundsatz, dass inerte heiße Partikeln mit einer höheren Temperatur besser detektiert werden als solche, die eine geringere Temperatur aufweisen, ist in den Ergebnissen nur die jeweils niedrigste ZGT des entsprechenden Partikels (Form und Größe) angegeben. Partikeltemperaturen mit höheren ZGT werden detektiert, wenn auch Partikeltemperaturen niedrigerer ZGT wahrgenommen werden. Tabelle 16 stellt die Ergebnisse der Detektierbarkeitsversuche dar. Es wurde festgestellt, dass alle inerten heißen Partikeln (Kugeln, Scheiben und Zylinder) mit Temperaturen, die mit den niedrigsten ZGT übereinstimmen, von beiden Melderklassen detektiert wurden.

Tabelle 16: Detektierbarkeit inerte heißer Partikeln

Partikelform	Größe [mm]	kleinste ZGT [°C]	Klasse A	Klasse B
Kugel Ø	2	206	detektierbar	detektierbar
	3	417	detektierbar	detektierbar
	4	393	detektierbar	detektierbar
	5	434	detektierbar	detektierbar
	7	389	detektierbar	detektierbar
	10	391	detektierbar	detektierbar
	15	359	detektierbar	detektierbar

<b>Partikelform</b>	<b>Größe [mm]</b>	<b>kleinste ZGT [°C]</b>	<b>Klasse A</b>	<b>Klasse B</b>
Scheibe Ø/D	8/2,3	388	detektierbar	detektierbar
	10/2,3	350	detektierbar	detektierbar
	12/2,3	344	detektierbar	detektierbar
	15/2,3	300	detektierbar	detektierbar
Zylinder Ø/L	3,5/23,8	312	detektierbar	detektierbar
	5/9	305	detektierbar	detektierbar
	6/8	284	detektierbar	detektierbar
	8/12	283	detektierbar	detektierbar

## 6 Sicherheitsbetrachtung inerter heißer Partikeln

Zur Zeit erfolgt die Bewertung der Zündwirksamkeit inerter heißer Partikeln über die Glimmtemperatur [Bechem et al. 2017] (In Kapitel 8.2 wird dieser Punkt ausführlicher betrachtet). Dieses Vorgehen wird der Zündquellenart inerter heißer Partikeln nicht gerecht. Daher ist es notwendig, diese Zündquellenart für eine Sicherheitsbetrachtung bewertbar zu machen. In diesem Kapitel werden Möglichkeiten für diese Sicherheitsbetrachtung aufgezeigt.

Die Sicherheitsbewertung inerter heißer Partikeln erfolgt auf zwei Ebenen. Erstens werden die Ergebnisse der Zündwirksamkeitsversuche zur Bestimmung der Zündgrenztemperatur (ZGT) inerter heißer Partikeln mit den Hot-Spot-Theorien verglichen. Hierbei wird geklärt, ob eine Bewertung der Zündwirksamkeit inerter heißer Partikeln durch diese Theorie abgeschätzt werden kann. Als Zweites findet eine Betrachtung der Kritikalität der iHZP auf einem verfahrenstechnischen Prozess statt. Diese Bewertung wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens GreCon entwickelt und ist im dortigen Abschlussbericht [Bechem und Liske 2019] angeführt, wobei diese Methode in der vorliegenden Dissertation weiterentwickelt wird. Tabelle 17 stellt das bisherige Vorgehen und die neuen Vorgehensmöglichkeiten der Sicherheitsbetrachtung inerter heißer Partikeln gegenüber.

Tabelle 17: Gegenüberstellung des bisherigen Vorgehens der Sicherheitsbetrachtung inerter heißer Partikeln und der neuen Vorgehensmöglichkeiten der vorliegenden Dissertation

Bisherige Vorgehen	Neues Vorgehen
Bewertung der Zündwirksamkeit inerter heißer Partikeln durch die sicherheitstechnische Kenngröße Glimmtemperatur	Bewertung der Zündwirksamkeit inerter heißer Partikel über die ZGT. Bewertung Zündwirksamkeit inerter heißer Partikeln mittels einer Hot-Spot-Theorie. Bewertung verfahrenstechnischer Prozess mittels dem Kritikalitätsansatz.

In der Sicherheitsbetrachtung finden nur die Versuchsergebnisse der abgelagerten Staubschicht Anwendung. Somit ist der Vergleich mit allen Partikeln möglich. Die Versuche mit abgelagerter, durchströmter Staubschicht wurden nur für die Kugeln durchgeführt, daher finden sie an dieser Stelle keine Berücksichtigung.

Wie auch in Kapitel 5 werden in diesem Kapitel die Erkenntnisse dargestellt und anschließend in Kapitel 7 diskutiert und bewertet.

## 6.1 Hot-Spot-Theorien

Die Hot-Spot-Theorien sind mathematische Berechnungsverfahren, mit deren Hilfe eine Korrelation zwischen dem Partikeldurchmesser und seiner Temperatur ermittelt werden kann, die eine Entzündung eines Brennstoffs zur Folge hat.

### 6.1.1 Beschreibung und mathematische Herleitung der Hot-Spot-Theorien

Im Laufe des 20. Jahrhunderts wurden von verschiedenen Autoren verschiedene Hot-Spot-Theorien entwickelt und veröffentlicht. Aus der Bezeichnung lässt sich ableiten, dass diese Theorien den Zündvorgang eines heißen Punkts (Hot Spot) beschreiben. Hierbei wird zwischen inerten und reaktiven Hot Spots unterschieden. Die gleiche Terminologie wurde bei der Definition der reaktiven und inerten hochmobilen zündwirksamen Partikeln (vgl. Kapitel 1.4) genutzt, wobei dies unabhängig von der Hot-Spot-Theorie entstand. Als inerter Hot Spot wird beispielsweise ein heißer metallischer Partikel verstanden, wohingegen der reaktive Hot Spot ein Glimmnest ist [Babrauskas 2014, S. 390; Bowes 1984 Kapitel 4.6.1 und 4.6.3]. In der vorliegenden Dissertation wird im Weiteren nur die inerte Hot-Spot-Theorie betrachtet.

1966 veröffentlichte Friedman eine Hot-Spot-Theorie, die nur für lineare Hot Spots (Zylinder) Gültigkeit besitzt [Friedman 1969]. In den frühen 1970er Jahren wurde in der damaligen UdSSR eine Hot-Spot-Theorie entwickelt, mit deren Hilfe die Entzündung von Explosivstoffen durch kleine inerte heiße Partikeln beschrieben werden kann [Gol'dshleger et al. 1973]. Diese Theorie ermöglicht die Modellierung von Scheiben, Zylindern und Kugeln. Ferner entwickelten [Linan und Kindelan 1981] eine Theorie, die für Kugeln und Zylinder anwendbar ist.

Damit alle ZGT der unterschiedlichen Formen durch eine Hot-Spot-Theorie (HS) verglichen werden können, wird im Weiteren nur mit der Theorie nach [Gol'dshleger et al. 1973] gearbeitet, da diese es ermöglicht, alle drei Partikelformen abzubilden. Auch [Hadden et al. 2011] nutzten diese Theorie bereits in ihrer Untersuchung. Die Herleitung dieser mathematischen Theorie wird in den nachfolgenden Gleichungen dargestellt.

Die Wärmeleitungsgleichung (vgl. (26)) im eindimensionalen Fall kann für rotationssymmetrische Geometrien inkl. Selbsterwärmungsvorgängen nach Arrhenius wie folgt angegeben werden [Bowes 1984, S. 127 Gleichung (4.1)]:

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{dT}{dt} = \lambda \cdot \left( \frac{d^2T}{dx^2} + \frac{j}{x} \cdot \frac{dT}{dx} \right) + H_0 \cdot k_0 \cdot \rho \cdot e^{-\frac{E_a}{RT}} \left[ \frac{W}{m^3} \right] \quad (62)$$

Für den Bereich innerhalb inerter heißer Partikeln fällt die Arrhenius-Wärmequelle weg und die Gleichung folgt in der dimensionslosen Variante:

$$\frac{d\theta_P}{d\tau} = \frac{k_\lambda \cdot b}{\delta_{HS}^2} \cdot \left( \frac{d^2\theta_P}{d\xi^2} + \frac{j}{\xi} \cdot \frac{d\theta_P}{d\xi} \right) [-] \quad (63)$$

Für den Bereich im Brennstoff geht die Gleichung (62) in die dimensionslose Form über:

$$\frac{d\theta_B}{d\tau} = \frac{1}{\delta_{HS}^2} \cdot \left( \frac{d^2\theta_B}{d\xi^2} + \frac{j}{\xi} \cdot \frac{d\theta_B}{d\xi} \right) + e^{\frac{\theta_B}{1+\Gamma \cdot \theta_B}} [-] \quad (64)$$

Mit den folgenden Randbedingungen können diese Gleichungen numerisch gelöst werden.

$$\tau = 0: \theta_P = 1, \theta = -\theta_B \quad (65)$$

$$\xi = 0, \xi \rightarrow \infty: \frac{d\theta_B}{d\xi} = 0, \theta = -\theta_B \quad (66)$$

$$\xi = 1: \theta_P = \theta_B, \quad k_\lambda \cdot \frac{d\theta_P}{d\xi} = \frac{d\theta_B}{d\xi} \quad (67)$$

Für den Fall, dass  $k_\lambda \rightarrow \infty$  läuft, folgt für die Randbedingung

$$\xi = 1: \theta_P = 0, \quad \frac{d\theta}{d\tau} = \frac{(j+1)}{\delta_{HS}^2} \cdot b \cdot \frac{d\theta}{d\xi} [-] \quad (68)$$

Hierbei ist  $\xi$  dimensionsloser Abstand,  $\Gamma$  inverse Arrhenius-Zahl,  $\theta$  allgemeine dimensionslose Temperatur,  $\tau$  dimensionslose Zeit,  $k_\lambda$  dimensionslose Wärmeleitfähigkeit,  $b$  dimensionslose volumenbezogene Wärmekapazität,  $\theta_B$  dimensionslose Temperatur des Brennstoffes.

$$\xi = \frac{x}{r}; \quad \Gamma = \frac{R \cdot T_P}{E_a}; \quad \theta = \frac{E_a}{R \cdot T_P^2} \cdot (T - T_P) [-] \quad (69) - (71)$$

$$\tau = t \cdot \frac{H_0 \cdot k_0}{c_{p,B} \cdot \rho_B} \cdot \frac{E_a}{R \cdot T_P^2} \cdot e^{-\frac{E_a}{R \cdot T_P}} [-] \quad (72)$$

$$\delta_{HS} = r \cdot \sqrt{\frac{H_0 \cdot k_0}{\lambda_B} \cdot \frac{E_a}{R \cdot T_P^2} \cdot e^{-\frac{E_a}{R \cdot T_P}} [-]} \quad (73)$$

$$k_\lambda = \frac{\lambda_P}{\lambda_B}; \quad b = \frac{c_{p,B} \cdot \rho_B}{c_{p,P} \cdot \rho_P}; \quad \theta_B = \frac{E_a}{R \cdot T_P^2} \cdot (T_P - T_B) [-] \quad (74) - (76)$$

Der Parameter  $\delta_{HS}$  (73) scheint dem Frank-Kamenetzki-Parameter  $\delta_{FK}$  (vgl. (37)) ähnlich zu sein. Diese beiden Parameter stellen jedoch einen anderen dimensionslosen Wert dar.  $\delta_{HS}$  wird zweckmäßig als dimensionsloser Radius des inerten heißen Partikels verstanden [vgl. Bowes 1984, S. 169], wohingegen  $\delta_{FK}$  einer dimensionslosen Wärmefreisetzung der Selbsterwärmung entspricht. Dabei ist mathematisch gesehen  $\delta_{HS} = \sqrt{\delta_{FK}}$ . Diese Annahme ist daher zweckmäßig, da mittels der HS der Zusammenhang zwischen dem Partikeldurchmesser und seiner Temperatur gefunden werden soll, der für eine Entzündung erforderlich ist.

Die Gleichungen (71) bis (76) besitzen ihre Gültigkeit für  $7,5 \leq \theta_B \leq 25$ ,  $0,01 < \Gamma < 0,9$ ,  $0,1 \leq k_\lambda \leq \infty$ ,  $0,05 \leq b \leq 100$ ,  $\delta_{HS,Krit} \leq \delta_{HS} \leq \infty$  und  $j = 0, 1, 2$  für die geometrischen Formen Scheibe, unendlicher Zylinder und Kugel.

Nach [Gol'dshleger et al. 1973] erfolgt keine Entzündung der Brennstoffe bei dem Kriterium  $\delta_{HS} < \delta_{HS,Krit}$ . Des Weiteren geben sie eine Näherungsgleichung für  $\delta_{HS,Krit}$  an:

$$\delta_{HS,Krit} = \delta_{HS,Krit}^* \left[ 1 + \frac{(\theta_B - 3)^2 \cdot b \cdot (j + 1)}{30 \cdot k_\lambda^{2/3} \cdot (1 + 3 \cdot b^{2/3})} \right] [-] \quad (77)$$

mit

$$\delta_{HS,Krit}^* = 0,4 \cdot \sqrt{b^2 + 0,25 \cdot j \cdot (j + 1) \cdot (b + 0,1 \cdot b^3)} \cdot [\theta_B + 2,25 \cdot (j - 1)]^2 \cdot [1 + 0,5 \cdot \Gamma \cdot \theta_B] [-] \quad (78)$$

Mit den Parametern für  $7,5 \leq \theta_B \leq 25$ ;  $0,01 < \Gamma < \frac{0,9}{\theta_B}$ ;  $1 \leq k_\lambda \leq \infty$ ;  $0,05 \leq b \leq 10$  und  $j = 0, 1, 2$  besitzen diese Gleichungen eine Genauigkeit von 10 % und für die Parameter  $0,1 \leq k_\lambda \leq 1$ ;  $10 \leq b \leq 100$  sind es 20 %. Ferner gilt für den Bereich  $k_\lambda \rightarrow \infty$  ab  $k_\lambda > 100$ , dass  $\delta_{HS,Krit}$  unabhängig von  $k_\lambda$  wird, woraus folgt, dass  $\delta_{HS,Krit} = \delta_{HS,Krit}^*$  ist.

## 6.1.2 Bestimmung der Parameter

### 6.1.2.1 Staubproben

Im Folgenden werden die Staubproben Buchenstaub, Yellow Pine Staub, Kakaopulver und Gummiabrieb betrachtet, da in diesen Stäuben eine Zündgrenztemperatur (ZGT) bestimmt werden konnte. Das Milchpulver wird mit einer HS nicht weiter betrachtet, da hier keine ZGT festgestellt wurde. Somit ist ein Vergleich mit einer HS nicht sinnvoll.

Die Bestimmung der benötigten kinetischen Parameter der scheinbaren Aktivierungsenergie und des präexponentiellen Faktors erfolgte mit den in Kapitel 2.5 beschriebenen Methoden. Alle Staubproben wurden thermogravimetrisch analysiert (TGA). Beim Buchenstaub und Kakaopulver wurden des Weiteren Warmlagerschrankversuche für die Bestimmung der kinetischen Parameter durchgeführt. Beim Yellow Pine Staub waren diese Untersuchungen aufgrund seiner geringen Menge nicht möglich. Vom Gummiabrieb war zwar eine ausreichende Menge Probe vorhanden, jedoch wurden hier keine Warmlagerschrankversuche durchgeführt, da diese Versuche in Laborräumlichkeiten eines anderen Lehrstuhls hätten erfolgen müssen. Die Geruchsbelästigung des zu verbrennenden Gummiabriebs wäre in den örtlichen Räumlichkeiten zu groß gewesen. Aus den TGA ergeben sich die in Tabelle 18 angeführten kinetischen Parameter. Die jeweiligen TGA sind im Anhang in Bild-A 10 bis Bild-A 13 dargestellt.

Tabelle 18: Zusammenfassung der kinetische Parameter aus den TGA

<b>Staubprobe</b>	<b>Scheinbare Aktivierungsenergie</b> $\left[ \frac{J}{mol} \right]$	<b>Präexponentieller Faktor</b> $\left[ \frac{1}{s} \right]$
<b>Buchenstaub</b>	<b>180.595,22</b>	<b><math>1,20172 \cdot 10^{18}</math></b>
<b>Yellow Pine Staub</b>	<b>231.520,05</b>	<b><math>1,34324 \cdot 10^{22}</math></b>
<b>Kakaopulver</b>	<b>235.431,46</b>	<b><math>1,48857 \cdot 10^{32}</math></b>
<b>Gummiabrieb</b>	<b>240.801,69</b>	<b><math>3,09435 \cdot 10^{33}</math></b>

Durch Analysen mit einer Differential Scanning Calorimetry (DSC) kann die Reaktionsenthalpie direkt bestimmt werden. Ebenso besteht die Möglichkeit, mit der DSC die spezifische Wärmekapazität der Stäube zu ermitteln. Für die vier Staubproben wurden jeweils DSC-Analysen erstellt. Bei der Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität wurde die 3-Kurven-Methode genutzt, welche in die Software des DSC-Herstellers integriert ist. Das Prinzip beruht darauf, dass drei DSC-Analysen einander gegenübergestellt werden. Die erste Kurve wird mit einem leeren Tiegel, die zweite mit einem Referenzstoff und die dritte Kurve mit der Staubprobe bestimmt. Das Programm der Messungen beginnt mit einer Isotherme, worauf die Erwärmung und abschließend wieder eine Isotherme folgt. Für die Bestimmung der spezifischen Wärmekapazitäten wurden jeweils fünf DSC-Analysen im Temperaturbereich von 15 °C bis 75 °C durchgeführt. Die angegebenen Werte entsprechen dem arithmetischen Mittel dieser fünf Einzelversuche. Aus dem Berechnungstool ergeben sich Wärmekapazitäten im Temperaturbereich von 15 °C bis 71 °C. Die entsprechenden Verläufe der DSC-Messungen und der hieraus resultierenden spezifischen Wärmekapazitäten sind im Anhang in Bild-A 14 bis Bild-A 17 abgebildet. In Tabelle 19 sind die spezifischen Wärmekapazitäten für eine Temperatur von 20 °C aufgelistet.

[Hadden et al. 2011] haben in ihrer Berechnung der HS für die Reaktionsenthalpie den Heizwert des untersuchten Zellulosestaubs genutzt. Dies stellt für eine sicherheitsingenieurmäßige Nutzung der HS eine sinnvolle Annahme dar, da Heizwerte der unterschiedlichen Staubproben in den verschiedensten Literaturquellen, beispielweise [DIN 18230-3; DiNenno 2002; Beilicke 2010], zu finden sind. Daher wird im Weiteren die HS sowohl für die Reaktionsenthalpie aus der DSC-Analyse als auch mit literaturbasierten Heizwerten bestimmt und verglichen. Die Reaktionsenthalpien und Heizwerte der Staubproben sind in Tabelle 20 zusammengefasst. Die hier angegebenen Reaktionswärmen sind der Mittelwert aus fünf DSC-Messungen. Es ist festzustellen, dass die Reaktionswärmen nur ca. 20 %

bis 55 % der Heizwerte ergeben. Die entsprechenden Verläufe der DSC-Analysen sind im Anhang in Bild-A 18 bis Bild-A 37 abgebildet.

Tabelle 19: Spezifische Wärmekapazitäten aus DSC-Analysen für eine Temperatur von 20 °C

<b>Staubprobe</b>	<b>Spezifische Wärmekapazitäten <math>\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]</math></b>	<b>Varianz <math>\left[\left(\frac{J}{kg \cdot K}\right)^2\right]</math></b>
Buchenstaub	1.803	64.551
Yellow-Pine- Staub	1.887	34.836
Kakaopulver	2.446	319.572
Gummiabrieb	1.789	3.552

Tabelle 20: Werte der Reaktionsenthalpie aus der DSC-Analyse und den Heizwerten aus der Literatur

<b>Staubprobe</b>	<b>Reaktionsenthalpie <math>\left[\frac{J}{kg}\right]</math></b>	<b>Heizwert <math>\left[\frac{J}{kg}\right]</math></b>	<b>Quelle</b>
Buchenstaub	5.992.692	18.700.000	[DiNenno 2002 Table C.4 Wert für Wood beech]
Yellow Pine Staub	6.964.366	19.400.000	[DiNenno 2002 Table 1-5.3 Wert für Ponderosa Pine]
Kakaopulver	11.057.186	19.800.000	[Beilicke 2010 Tabelle 31 Wert für Kakao, normal]
Gummiabrieb	6.610.736	32.600.000	[DiNenno 2002 Table C.4 Wert für Rubber tire, auto]

Des Weiteren sind die Wärmeleitfähigkeiten notwendig. Diese wurden im Rahmen einer Master-Thesis bestimmt [Müller 2019]. Die entsprechenden Werte sind in Tabelle 21 aufgeführt. Vom Yellow Pine Staub konnte aufgrund fehlender Probenmenge keine Wärmeleitfähigkeit bestimmt werden. In [DiNenno 2002] wird zwar eine Wärmeleitfähigkeit von Yellow Pine mit  $\lambda = 0,147 \frac{W}{m \cdot K}$  angegeben, jedoch bezieht sich dieser Wert auf ein Stück des Holzes und nicht auf den Staub. Daher wird für den Yellow Pine Staub die Wärmeleitfähigkeit des Buchenstaubs herangezogen.

Tabelle 21: Wärmeleitfähigkeiten der Staubproben [Müller 2019]

<b>Staubprobe</b>	<b>Wärmeleitfähigkeit <math>\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]</math></b>
Buchenstaub	0,096
Yellow Pine Staub	wie Buchenstaub
Kakaopulver	0,104
Gummiabrieb	0,092

Als letzter Staubparameter werden die Dichten benötigt. Da mittels der HS die Entzündung einer Staubschicht bewertet werden soll, wird für die Dichte die entsprechende Schüttdichte<sup>§</sup> angesetzt. Diese wurde experimentell aus je fünf Einzelversuchen bestimmt und arithmetisch gemittelt. Die Schüttdichten der untersuchten Stäube und die Varianz der Werte sind in Tabelle 22 beschrieben.

Tabelle 22: Schüttdichten der Staubproben [Bechem und Liske 2019] und Varianz der Werte

<b>Stoff</b>	<b>Schüttdichte <math>\left[\frac{kg}{m^3}\right]</math></b>	<b>Varianz <math>\left[\left(\frac{kg}{m^3}\right)^2\right]</math></b>
Buchenstaub	212,76	8,93
Yellow Pine Staub	111,49	15,58
Kakaopulver	399,99	241,06
Gummiabrieb	343,39	12,79

Mit Hilfe der Dichte und der Wärmeleitfähigkeit können die kinetischen Parameter aus den Versuchen im Warmlagerschrank (WL) bestimmt werden. Diese sind in Tabelle 23 angeführt. Da für die HS das Produkt aus Reaktionsenthalpie  $H_0$  und präexponentiellem Faktor  $k_0$  benötigt wird, wurden diese direkt bestimmt.

<sup>§</sup> Die Schüttdichte bezeichnet die Dichte (Masse pro Volumen) einer Staubschüttung.

Tabelle 23: Kinetische Parameter aus Warmlagerversuchen

Staubprobe	Scheinbare Aktivierungsenergie $\left[\frac{J}{mol}\right]$	$k_0 \cdot H_0 \left[\frac{kJ}{kg \cdot s}\right]$
Buchenstaub	138.103,85	$8,55387 \cdot 10^{14}$
Kakaopulver	156.810,35	$2,24998 \cdot 10^{18}$

### 6.1.2.2 Inerte heiße Partikeln

Die Parameter, die für die HS vom inerten heißen Partikel erforderlich sind, sind die Dichte, spezifische Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit.

Ziel der HS ist es, einen Zusammenhang zwischen der Partikeltemperatur und dem Durchmesser analytisch zu bestimmen. Aus diesem Grund werden für die Wärmeleitfähigkeit und die spezifische Wärmekapazität temperaturabhängige Werte genutzt. Für den Vergleich der HS mit den ZGT der experimentellen Versuche werden die thermo-physikalischen Parameter der Werkstoffe genutzt, aus dem die Kugeln bzw. Zylinder (100Cr6) und die Scheiben (DC04) bestehen. Temperaturabhängige Werte der spezifischen Wärmekapazität der Werkstoffe wurden bereits in Kapitel 5.1.2.4 in Bild 30 beschrieben. Aufgrund der Vollständigkeit werden diese erneut in Bild 37 angegeben. Die temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeiten für den Werkstoff 100Cr6 (Werkstoffnummer 1.3505) sind [Dalgic et al. 2003] für DC04 (Werkstoffnummer 1.0388) [Sommer et al. 2019] entnommen. Die entsprechenden Verläufe sind in Bild 38 enthalten.

Für die Dichten der Werkstoffe werden keine temperaturabhängigen Werte genutzt. Stattdessen wird der Wert für eine Temperatur von 20 °C zu Grunde gelegt, da vom 100Cr6-Stahl keine temperaturabhängigen Werte vorliegen und somit ein Vergleich nicht möglich ist. Die entsprechenden Dichten sind in Tabelle 24 angeführt.

Tabelle 24: Dichten der Partikelwerkstoffe [Sommer et al. 2019]

Werkstoff	Dichte $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
100Cr6 (1.3505)	7.800
DC04 (1.0388)	7.850

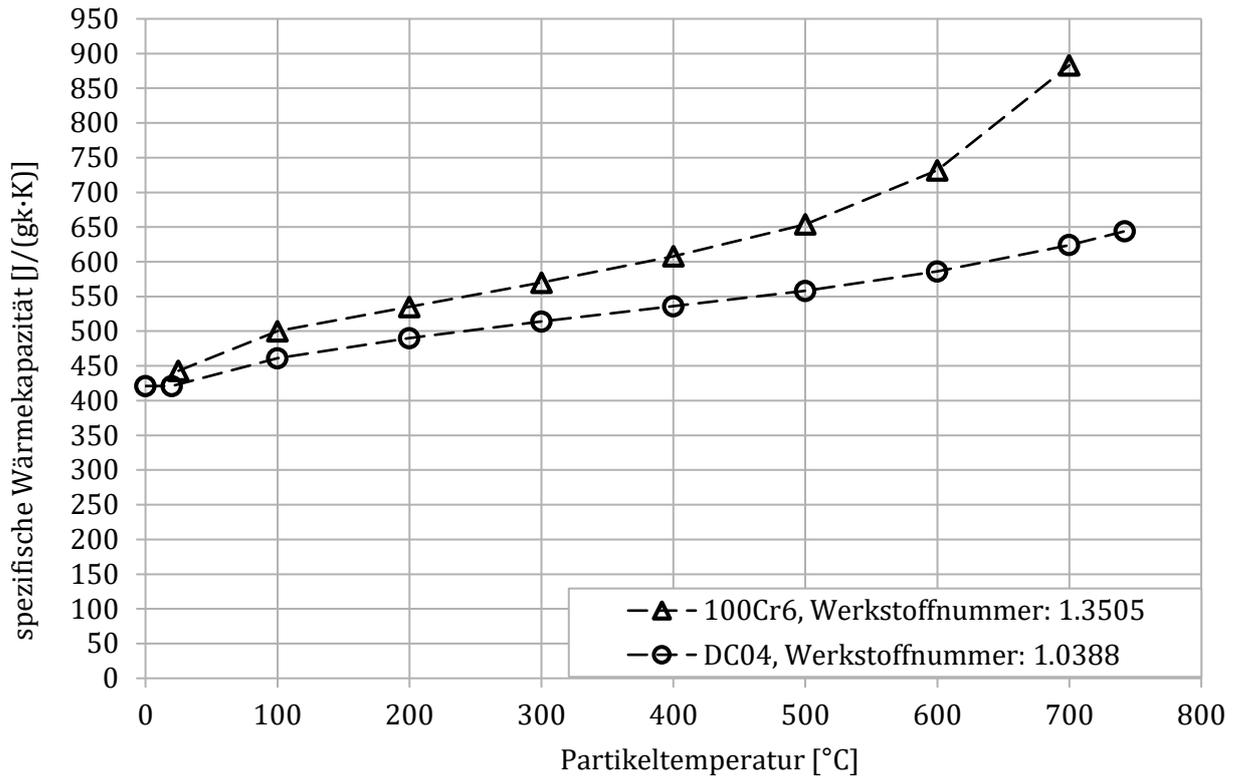


Bild 37: Temperaturabhängige spezifische Wärmekapazität der Partikelwerkstoffe nach [Dalgic et al. 2003; Sommer et al. 2019]

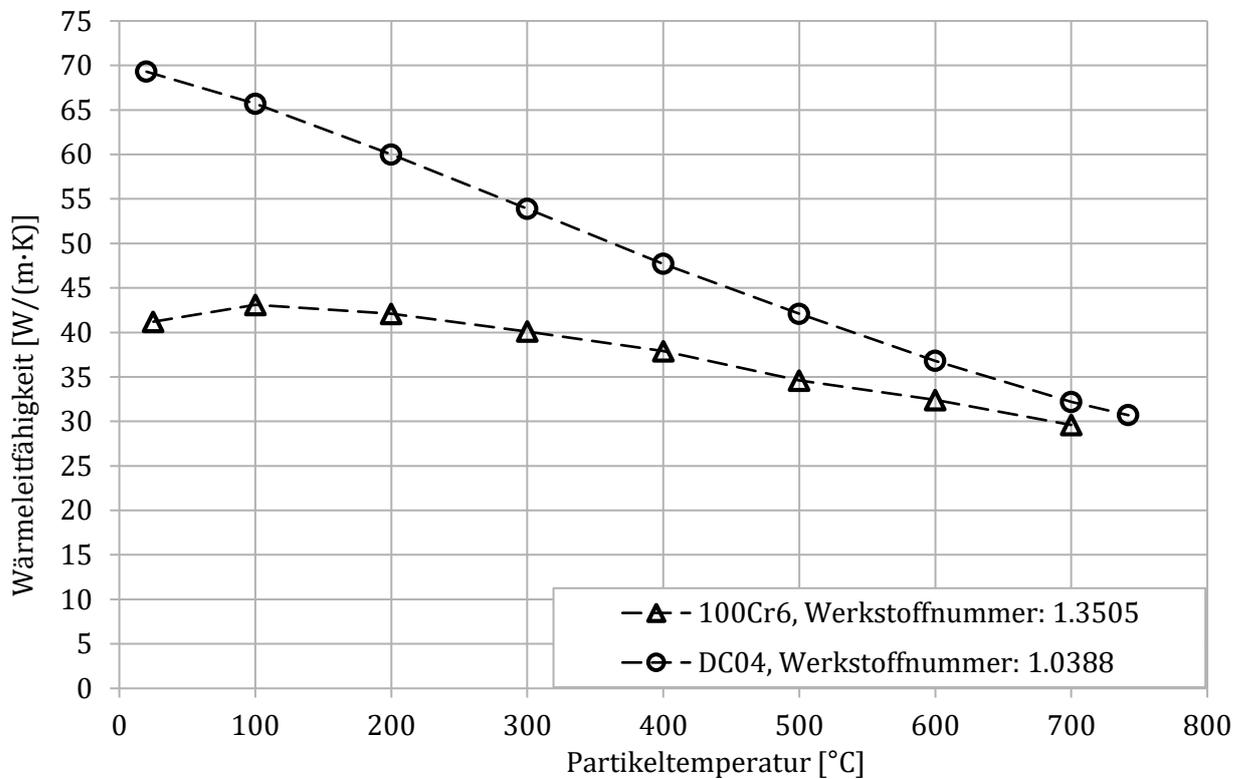


Bild 38: Temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit der Partikelwerkstoffe nach [Dalgic et al. 2003; Sommer et al. 2019]

### 6.1.3 Vergleich mit der Zündgrenztemperatur

Aus Gleichung (73) wird ersichtlich, dass die Temperatur des Partikels nicht direkt berechnet werden kann, da die gesuchte Größe  $T_p$  sowohl im Exponenten einer e-Funktion als auch in deren Vorfaktor steht. Daher wurden die Gleichungen (73) und (77) gleichgesetzt und zur Variablen „ $r$ “ umgestellt. Anschließend konnte der Radius des Partikels bei bekannter Temperatur berechnet werden. Die Berechnung der HS erfolgte mit dem Programm Microsoft EXCEL. Als Umgebungstemperatur und somit Temperatur der Staubschicht  $T_B$  wurden 20 °C (293,15 K) angesetzt. Die Wärmeleitfähigkeit (vgl. Tabelle 21) und spezifische Wärmekapazität (vgl. Tabelle 19) der Staubprobe wurden für diese Temperatur bestimmt. Der Parameter  $k_\lambda$  liegt für alle Partikelformen  $> 100$ , woraus folgt, dass  $\delta_{HS,Krit}$  unabhängig von  $k_\lambda$  wird und  $\delta_{HS,Krit} = \delta_{HS,Krit}^*$  ist. Die Parameter  $b$ ,  $\Gamma$  und  $\theta_B$  liegen im Wertebereich für eine Genauigkeit der HS von 10 %. Als Erstes werden die Verläufe der HS zwischen dem literaturbasierten Heizwert und der Reaktionsenthalpie aus der DSC für die vier Staubproben verglichen (vgl. Tabelle 20). Für die Berechnungen der HS werden hier die scheinbare Aktivierungsenergie und der präexponentielle Faktor aus den TGA genutzt (vgl. Tabelle 18). Welchen Einfluss die unterschiedlichen Werte (Heizwert und Reaktionsenthalpie) besitzen, soll an den Verläufen der HS für die Kugel betrachtet werden, die in Bild 39 dargestellt sind. In den Diagrammen steht die Farbe Schwarz für Buchenstaub, Grün für Yellow Pine Staub, Blau für Kakaopulver und Orange für Gummiabrieb, wobei die Volllinien für die HS mit dem Heizwert aus der Literatur und die gestrichelten Linien für die HS mit der Reaktionsenthalpie aus den DSC-Messungen stehen.

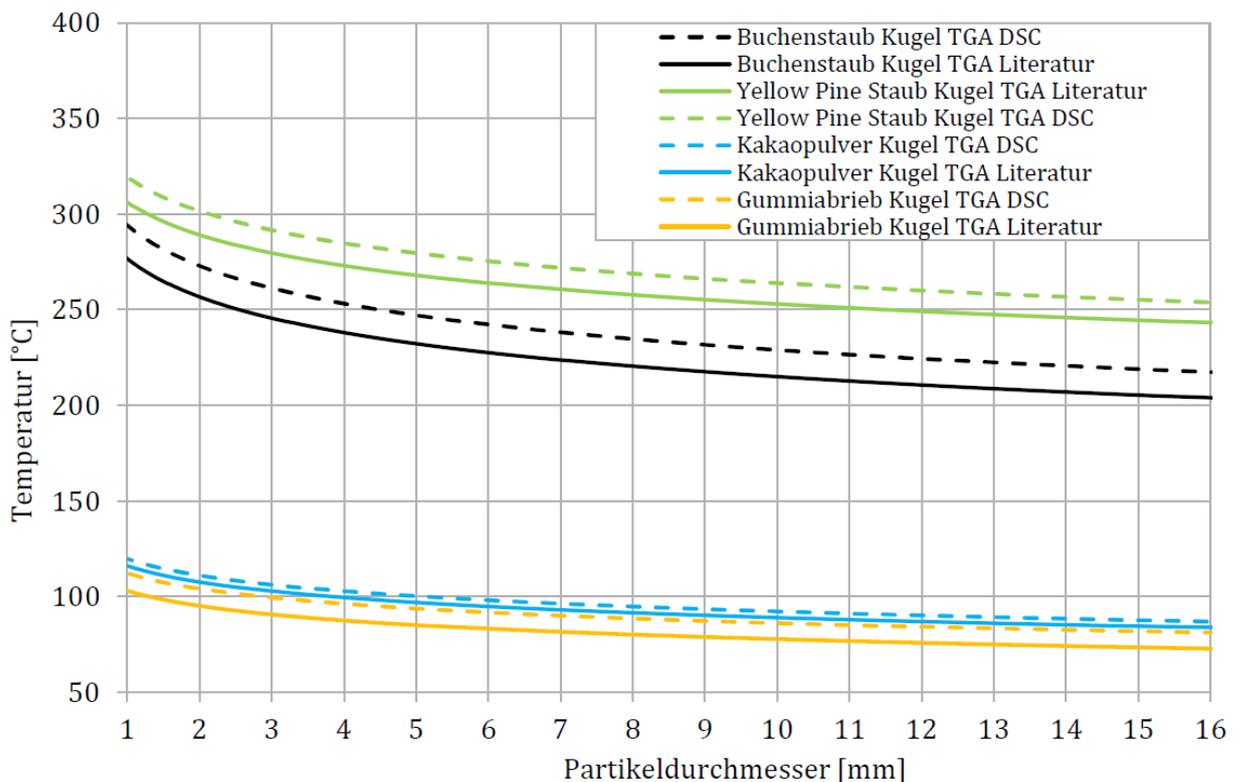


Bild 39: Vergleich des Einflusses des Heizwerts oder der Reaktionsenthalpie auf die HS

Grundsätzlich ist zu erkennen, dass die für eine Entzündung notwendige Temperatur mit steigendem Partikeldurchmesser sinkt. Die HS des Gummiabriebs liefert die geringsten Temperaturen, die des Yellow Pine Staubs die höchsten. Hierbei liegen beide Holzstäube nahe beisammen. Die Verläufe des Gummiabriebs und Kakaopulvers liegen sogar noch näher beieinander. Der Vergleich der Heizwerte und der Reaktionsenthalpie zeigt, dass diese Unterschiede einen geringen Einfluss besitzen. Hier führen die Verläufe mit den Heizwerten immer zu geringen Temperaturen. Der Temperaturunterschied beträgt beim Buchenstaub ca. 15 K, beim Yellow Pine Staub sowie Gummiabrieb ca. 10 K und beim Kakaopulver ca. 5 K. Hieraus folgt, dass im Weiteren bei dem Vergleich der HS mit den ZGT der Heizwert genutzt wird, da es einerseits für eine erste Abschätzung in der Praxis zweckmäßiger ist, mit Literaturwerten zu arbeiten, und geringere Temperaturen andererseits auf der sicheren Seite liegen. Im zweiten Schritt werden die HS für die verschiedenen Bestimmungen der scheinbaren Aktivierungsenergie und des präexponentiellen Faktors mit den ZGT verglichen und in den nächsten Diagrammen Bild 40 bis Bild 43 angegeben. In den Diagrammen sind die Werte für die Kugeln schwarz, für die Scheiben grün und für die Zylinder blau dargestellt. Die ZGT sind wieder durch gestrichelte Linien miteinander verbunden. Die Strich-Doppelpunkt-Linie stellt die HS mit den Werten der TGA und Literatur dar und die Punktlinie die HS mit den Werten aus dem WL, wobei diese nur für den Buchenstaub (Bild 40) und das Kakaopulver (Bild 42) abgebildet sind. Für den Yellow Pine Staub (Bild 41) und Gummiabrieb (Bild 43) wurden aus o.g. Gründen keine Versuche mit dem WL durchgeführt, weshalb hier ebenfalls keine Temperaturen aus der HS visualisiert sind. Darüber hinaus wurden die ZGT vom Gummiabrieb nur mit Kugeln bestimmt. Daher wurde die HS nicht für Scheiben und Zylinder berechnet und dargestellt.

Bei allen Proben ist grundlegend zu erkennen, dass die HS für Kugeln die höchsten Temperaturen liefert und die für Scheiben die niedrigsten.

Für Buchenstaub, Kakaopulver und Gummiabrieb zeigen die Verläufe der HS für alle Partikelformen mit Werten aus der TGA, dass sie deutlich unterhalb der ZGT liegen. Dies fällt besonders beim Gummiabrieb auf, bei dem die geringsten Temperaturen nach der HS errechnet, aber die höchsten ZGT festgestellt wurden. Hingegen zeigte sich beim Yellow Pine Staub, dass die HS deutlicher näher an den jeweiligen ZGT liegen und für Zylinder durchaus eine gute Abschätzung möglich ist. Hier liegen die Temperaturen der HS um ca. 50 K niedriger und auf der sicheren Seite.

Die HS mit den Werten aus den Versuchen im WL zeigen beim Buchenstaub eine deutlich höhere Übereinstimmung mit den ZGT. Die Kugel mit  $\varnothing = 4$  mm und die Scheibe mit  $\varnothing = 10$  mm liegen im Rahmen der Messgenauigkeit der ZGT sogar auf der HS. Für die beiden Formen liegen die ZGT und HS nah beieinander. Hingegen liegen die ZGT der Zylinder signifikant unterhalb der HS und für eine mögliche Abschätzung auf der unsicheren Seite. Die Zylinder und Scheiben liegen innerhalb der von [Gol'dshleger et al. 1973] beschriebenen Genauigkeit von 10 %. Für die Kugeln liegen die ZGT ebenfalls in diesem 10 %-Rahmen um die entsprechende HS.

Für das Kakaopulver liegen die Werte der HS mit den Parametern der Versuche im WL zwar näher an den ZGT, eine Übereinstimmung wie beim Buchenstaub ergibt sich jedoch nicht. Für die Zylinder ergibt sich die beste Annäherung: Alle HS liegen unterhalb der ZGT und somit auf der sicheren Seite. Die einzige Ausnahme stellt die Kugel mit  $\varnothing = 2$  mm dar, die wesentlich unterhalb der HS liegt.

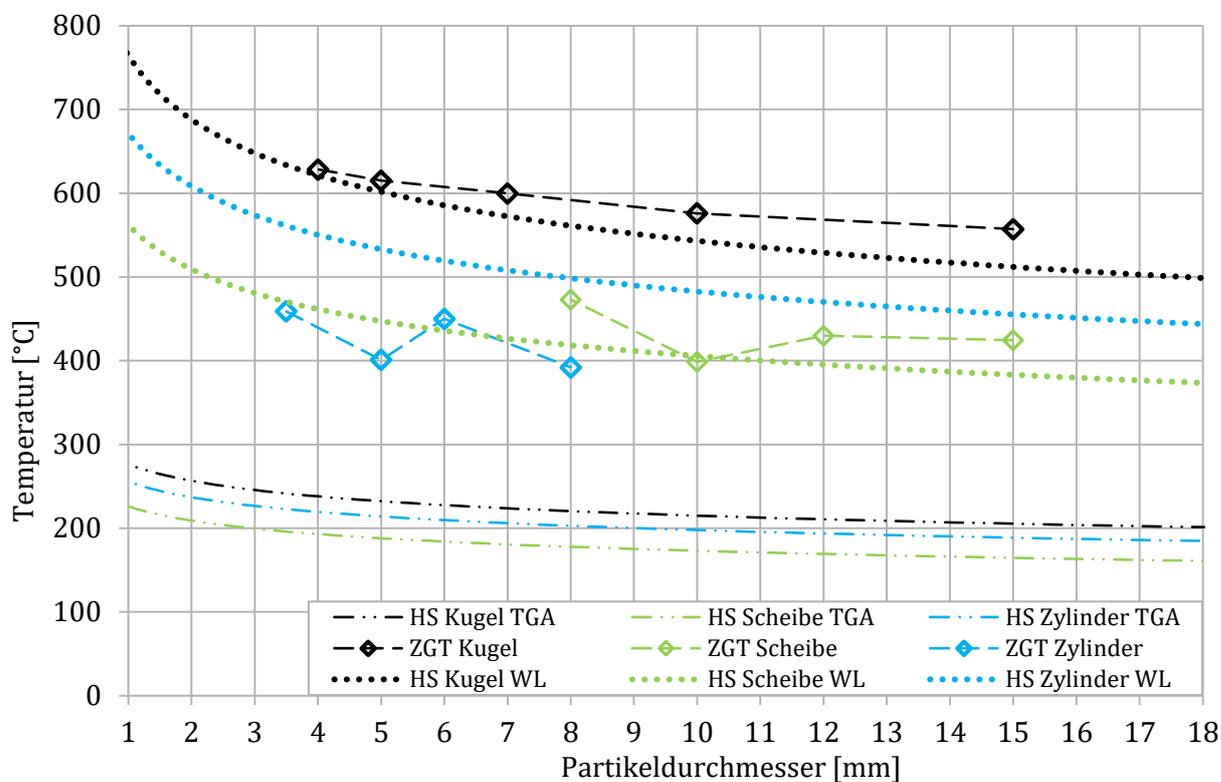


Bild 40: Vergleich der ZGT mit den verschiedenen HS von Buchenstaub und allen Partikelformen

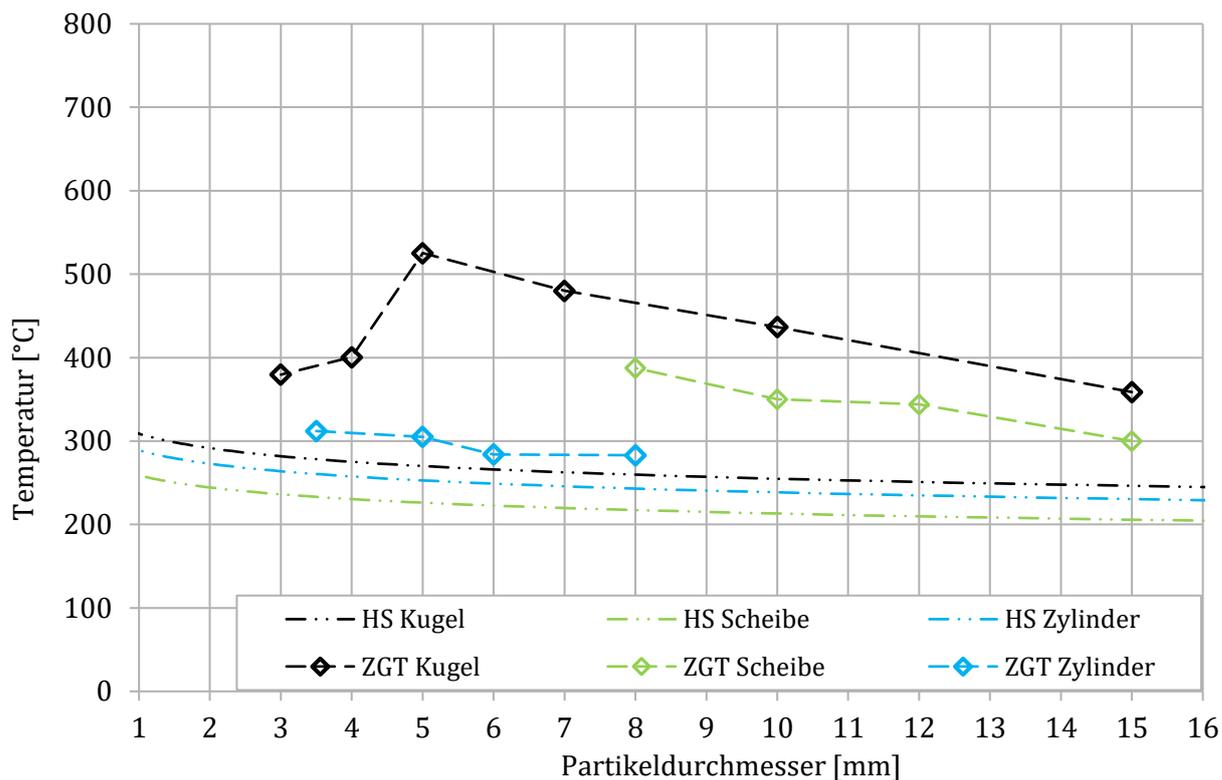


Bild 41: Vergleich der ZGT mit den verschiedenen HS von Yellow Pine Staub und allen Partikelformen

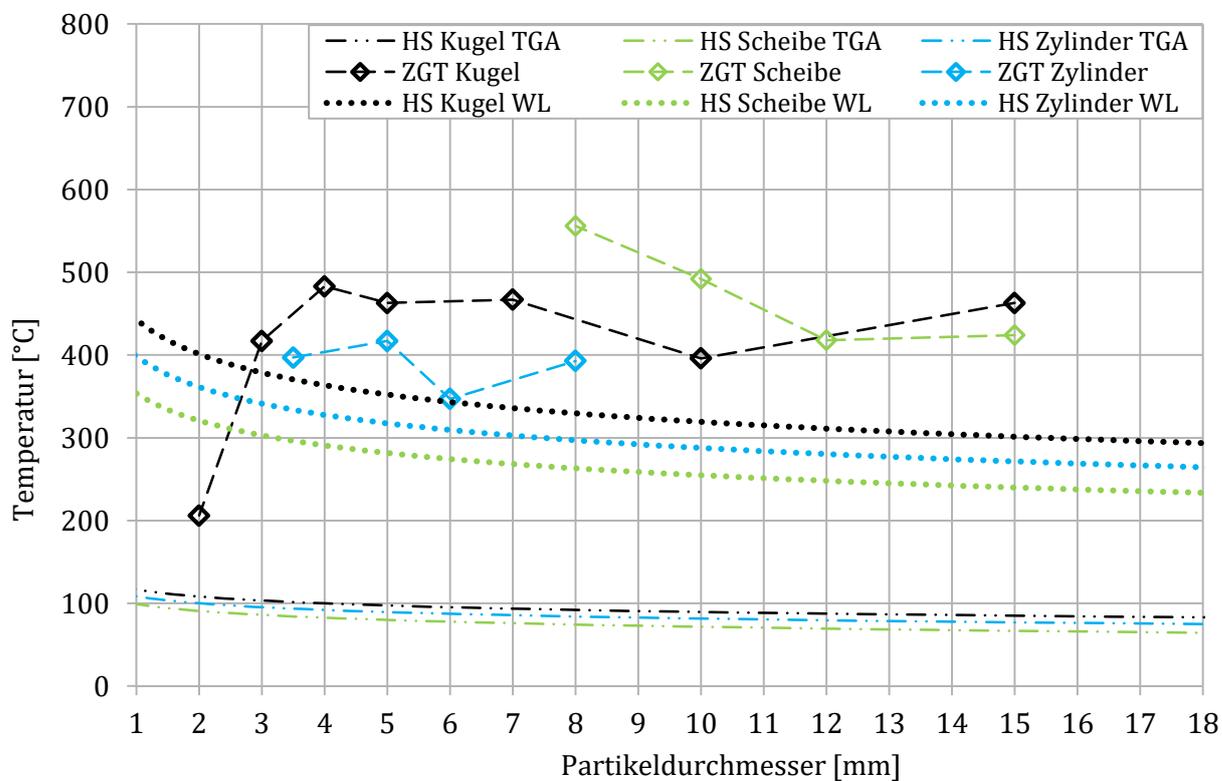


Bild 42: Vergleich der ZGT mit den verschiedenen HS von Kakaopulver und allen Partikelformen

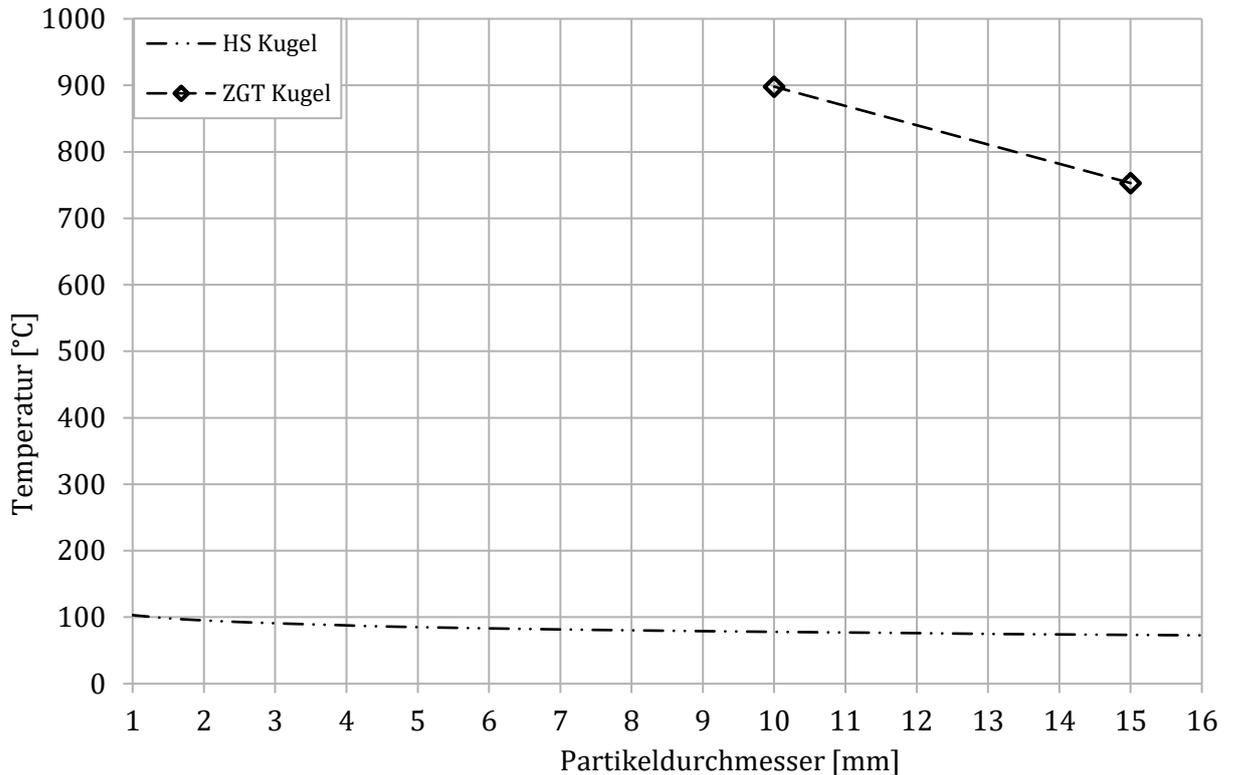


Bild 43: Vergleich der ZGT mit den verschiedenen HS von Gummiabrieb und allen Partikelformen

## 6.2 Kritikalitätsbetrachtung

Bei der zweiten Methode der sicherheitstechnischen Bewertung inerter heißer Partikeln wird deren Kritikalität betrachtet. Diese Betrachtung erfolgt im Kontext einer gesamten verfahrenstechnischen Anlage. Hierfür wird das aus dem Forschungsvorhaben GreCon genutzte Systemmodell der „Funkenlöschanlage“ angenommen, das in Bild 44 schematisch skizziert ist. Dieses Modell beschreibt das System bzw. den verfahrenstechnischen Prozess, in das bzw. den eine Funkenlöschanlage integriert ist. Folgende acht Komponenten beschreiben das System:

- 1 Der erzeugende Prozess
- 2 Das transportierte Material
- 3 Das hochmobile zündwirksame Partikel (HZP)
- 4 Die Erkennung
- 5 Die Löschung
- 6 Der gefährdete Prozess
- 7 Der Transport
- 8 Die Umgebung

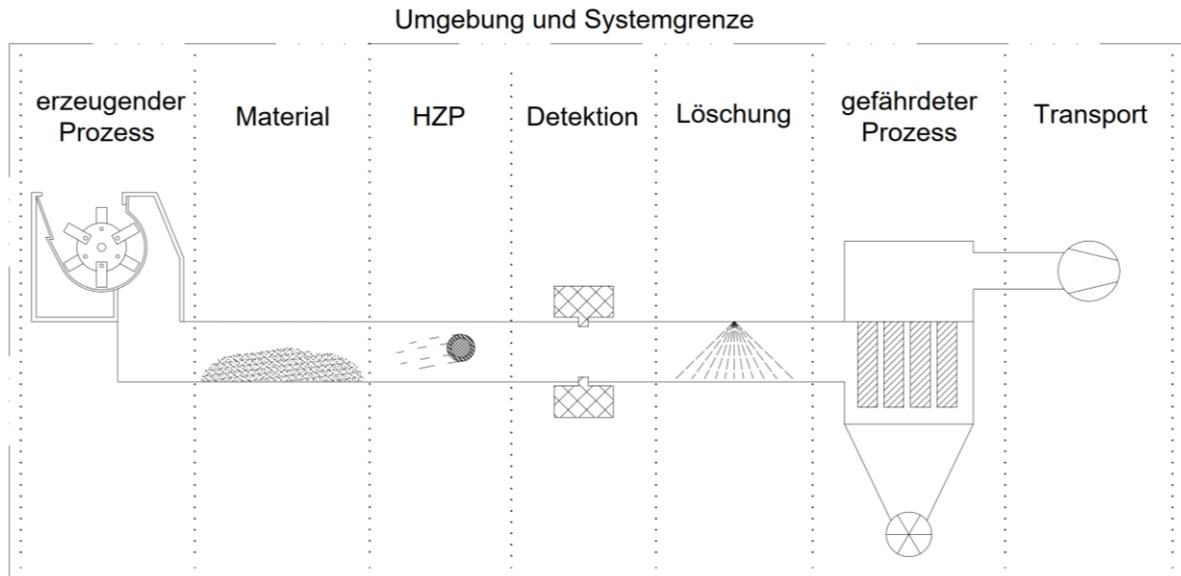


Bild 44: Schematische Abbildung des Systems „Funkenlöschung“ nach [Bechem und Liske 2019]

Wie bereits in Kapitel 5.2.1 beschrieben, werden inerte heiße Partikeln – inerte hochmobile zündwirksame Partikeln (iHZP) – in einem Prozessschritt wie beispielsweise einer Mühle erzeugt. Über das Transportsystem gelangen diese Partikeln in einen gefährdeten Prozess, beispielweise eine Filteranlage. In der Regel befindet sich an dem Transportsystem eine Funkenlöschanlage mit ihrer Detektion und Löschung. Diese Elemente stellen ebenfalls Systemkomponenten dar. Genauso haben das HZP selbst und das im Transportsystem vorhandene Material einen Einfluss auf das Funkenlöschsystem. Darüber hinaus bestehen auch Einflüsse aus der Umgebung. Somit stellt dieses Systemmodell einen verfahrenstechnischen Prozess dar.

Für die Kritikalität inerter heißer Partikeln sind die Komponenten

- HZP, insbesondere iHZP,
- Material (Detektierbarkeit) und
- Transport

von Bedeutung.

### 6.2.1 Kritikalität im sicherheitstechnischen Umfeld

Peter C. Compes führte 1970 das Modell zur Unfallkausalität ein, das einen Zusammenhang im „Mensch-Umgebungs-System“ näher beschreibt [Bundesinstitut für Arbeitsschutz 1971, S. 151–190]. Mit Hilfe dieses Modells soll an dieser Stelle eine erste Definitionsmöglichkeit der Kritikalität gegeben werden.

Das Modell von Compes ist in Bild 45 visualisiert. Darin beschreibt er den Zusammenhang zwischen Gefahr (Ursache), über die Gefährdung und die Schädigung (Wirkung) bis hin zum Schaden (Ergebnis). Hierbei geht er von dem Modellansatz aus, dass eine Gefahr ( $G$ ) auf eine Person ( $P$ ) oder Sache ( $S$ ) einwirkt  $G \rightarrow P(S)$  [vgl. Bundesinstitut für Arbeitsschutz 1971, S. 159].

Im Folgenden werden drei Situationen aufgezeigt, die diese Kausalkette beschreiben. Die erste Situation beschreibt einen unsicheren Materialzustand, die zweite ein unsicheres Personenverhalten und die dritte eine Kombination aus den ersten beiden. Auf Ergebnisseite bzw. Schadenseite unterscheidet Compes zwischen Körper- und Sachschaden.

Unfall-Kausalnexus			
Ursache	Wirkung		Ergebnis
<b>Gefahr</b> absolut, objektiv	<b>Gefährdung</b> → <b>Schädigung</b> relative, subjektive		<b>Schaden</b> absolut, objektiv, subjektiv
Mensch und höhere Gewalt	I Sicherheitswidriger materieller Zustand/ Vorgang	4 einfachste Möglichkeiten (einsträngige Unfallursachenkette)  <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">Materie</div> <div style="text-align: center;">→</div> <div style="text-align: center;">Person</div> </div>	<b>Körperschaden</b>
	II Sicherheitswidriges individuelles Verhalten/ Handeln	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">Person</div> <div style="text-align: center;">→</div> <div style="text-align: center;">Materie</div> </div>	<b>Sachschaden</b>
	III Kombination von I+II (Mischsituation)	praktisch üblich: mehrsträngige verwickelte Unfallursachenkette, unterschiedliche Glieder längs und quer verbunden  <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">Materie</div> <div style="text-align: center;">→</div> <div style="text-align: center;">Materie</div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center; margin-top: 5px;"> <div style="text-align: center;">Person</div> <div style="text-align: center;">→</div> <div style="text-align: center;">Person</div> </div>	<b>Körper- und/oder Sachschaden</b>

Bild 45: Mensch-Umgebungs-System (MUS) von Compes

nach [Bundesinstitut für Arbeitsschutz 1971, S. 152] eigene Darstellung

Bild 46 zeigt dieses Modell übertragen auf das Mensch-Umgebungs-System (MUS). Die Gefährlichkeit ist immer systemfunktionsinhärent, es ist also innerhalb des MUS gegeben. Die Schädlichkeit ist hingegen systemfunktionskonträr und steht somit der Funktionsweise des MUS entgegen. Das MUS liefert demnach die Voraussetzung für die Gefahr. Dies können Energien, Materialeigenschaften oder menschliche Einflüsse sein. Die Wirkung (Übergang von Gefährdung zu Schädigung) des Ereignisses tritt ein, sobald eine räumliche und zeitliche Koinzidenz der Gefahr (G) und des Schutzguts (P(S)) existieren, wobei dies im Normalfall plötzlich und unplanmäßig eintritt. Das Ausmaß, der Umfang und die Folgen des Schadens sind abhängig vom betrachteten MUS.

Ursache	Wirkung		Ergebnis
Gefährlichkeit		Schädlichkeit	
Gefahr	Gefährdung	Schädigung	Schaden
<b>system-funktions-</b>			
inhärent		konträr	
Voraussetzung	plötzliche Koinzidenz		Auswirkung
verschiedene Systemeigenschaften	Raum-Zeit-Gleichheit		partieller/totaler
	unplanmäßige Interaktion		temporär/permanent
			Funktions-/Materialverlust
Möglichkeit	Wahrscheinlichkeit		Tatsächlichkeit
inaktiv, latent	aktiv	relativ, passiv	inaktiv (aktiv)
objektiv	objektiv	subjektiv	objektiv, subjektiv
absolut		relativ	absolut
quantitativ		quantitativ	quantitativ
qualitativ		qualitativ	qualitativ

Bild 46: Beispiel für die Anwendung des Mensch-Umgebungs-Systems (MUS) von Compes nach [Bundesinstitut für Arbeitsschutz 1971, S. 154], eigene Darstellung

Die Gefahr bzw. Ursache eines Unfalls kann durch die Möglichkeit beschrieben werden. Im Bereich der Wirkung und somit im Übergang von der Gefährdung zur Schädigung setzt Compes die Wahrscheinlichkeit an, aus der die Tatsächlichkeit eines Schadens resultiert. Hierbei ist die Möglichkeit inaktiv und die Wahrscheinlichkeit aktiv. Grundsätzlich kann dieses Mensch-Umgebungs-System auf ein Maschinen-Umgebungs-System übertragen werden.

Im Sinne der vorliegenden Dissertation erfolgt der Schaden aus dem sicherheitswidrigen materiellen Vorgang (I in Bild 45), dass ein inertes heißes Partikel eine abgelagerte Staubschicht entzündet. Das inerte heiße Partikel stellt somit die objektive Gefahr dar. Fällt dieses Partikel als Ursache in eine Staubschicht, ist die räumliche und zeitliche Koinzidenz vorhanden und die Wirkung tritt ein. Als Ergebnis folgt der Staubbrand (primär Sachschaden). Bei der Zündquellenbetrachtung im Sinne der [TRGS 720; TRGS 800] müssen mögliche Zündquellen betrachtet werden. Gleiches gilt somit ebenfalls für die Kritikalität, die ebenfalls eine Art der „Möglichkeit“ beschreiben muss. Aus dem Modell vom Compes (insbesondere Bild 46) folgt nun, dass die Kritikalität zwischen der Gefahr und der Gefährdung zu verorten ist, wobei sie im Bereich der Gefährlichkeit im Übergang von der Möglichkeit zur Wahrscheinlichkeit – Gefahr zur Gefährdung – liegt. Die Kritikalität kann im Sinne des MUS-Modells als „aktive“ Möglichkeit verstanden werden.

Ähnliches kann aus der Definition der Gefährdung abgeleitet werden: „*Gefährdung: Möglichkeit eines Schadens ohne bestimmte Anforderung an deren Ausmaß oder Eintrittswahrscheinlichkeit*“ [Lehder

und Skiba 2007, S. 16, Abb. 1.1]. Hiernach ist Gefährdung eine Möglichkeit, dass ein Schadensereignis eintritt. Es wird lediglich die Möglichkeit betrachtet, ohne Aussagen über eine Eintrittswahrscheinlichkeit zu treffen.

Das Bundesamt Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe liefert für den Katastrophen- und Bevölkerungsschutz eine eigene Kritikalitätsdefinition: „Die Kritikalität bezeichnet ein Maß für die Bedeutsamkeit eines Prozesses in Bezug auf die Konsequenzen, die eine Beeinträchtigung oder ein Ausfall des Prozesses für die Funktionsfähigkeit einer Kritischen Infrastruktur hat“ [Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe 2018 Anmerkung unter Kritikalitätsanalyse].

Aus diesen Erkenntnissen des MUS von Compes und der Definition der Gefährdung nach [Lehder und Skiba 2007] folgt für die Definition der Kritikalität im Sinne der vorliegenden Dissertation:

*Die Kritikalität ist eine qualitative Bewertung der Gefährdung. Hierbei ist die Gefährdung die Möglichkeit, dass ein Schaden entsteht.*

Beide Kritikalitätsdefinitionen sagen dasselbe aus, obwohl sie sich auf andere Bereiche und Systeme beziehen. Der gemeinsame Nenner ist, dass die Kritikalität ein Maß zur Beurteilung ist, das in Bezug zu einem möglichen Schaden steht.

### 6.2.2 Kritikalitätsgraph

Grundlegend erfolgt die Bewertung der Kritikalität inerter heißer Partikeln durch einen Kritikalitätsgraphen, der die Kritikalität in sechs Klassen unterteilt. Dieser wird nun vorgestellt und beschrieben. Aus den in Kapitel 5 beschriebenen Versuchen kann die Kritikalität für inerte heiße Partikel bewertet werden. Im Einzelnen werden

- die Brennzahl (BZ),
- die Mobilität,
- die Zündgrenztemperatur (ZGT) und
- die Detektierbarkeit

berücksichtigt.

Ein inertes heißes Partikel stellt eine externe Zündquelle einer Staubschicht dar und wird als kritisch angesehen, wenn es einen sich selbst ausbreitenden Staubbrand einer Staubschicht initiieren kann. Inwieweit ein Schwel-, Glimm- oder Flammenbrand entsteht, ist hierbei unerheblich. Hieraus folgt, dass der erste Bewertungsschritt das Brandverhalten der Staubschicht betrachtet. Dazu kann die BZ des Staubs genutzt werden. Besitzt der Staub eine  $BZ \leq 3$ , entsteht in der Staubschicht kein sich selbst ausbreitender Staubbrand und die Kritikalität kann mit „unkritisch – K 0“ bewertet werden. Bei einer  $BZ \geq 4$  entsteht innerhalb der Staubschicht ein Staubbrand, der durch ein inertes heißes Partikel entzündet werden kann.

An zweiter Stelle der Kritikalitätsbewertung wird die Mobilität eines inerten heißen Partikels betrachtet. Da die Kritikalität auf einen verfahrenstechnischen Prozess bezogen wird, ist die Mobilität

eines inerten heißen Partikels zu beachten. Wird ein inertes heißes Partikel nicht in den nachgelagerten Prozessschritt transportiert, ist es als „unkritisch – K 0“ zu bewerten. Kann ein solches Partikel mobilisiert werden, beispielsweise in einer pneumatischen Transportleitung oder durch einen Fallprozess, erfolgt der dritte Bewertungsschritt.

In diesem dritten Schritt wird die Temperatur des inerten heißen Partikels mit dem ZGT verglichen. Liegt die Partikeltemperatur unterhalb der ZGT, ist das inerte heiße Partikel als „unkritisch – K 0“ zu bewerten, da keine Entzündung der Staubschicht erfolgt. Besitzt das Partikel eine größere Temperatur oder ist diese gleich der ZGT, erfolgt die Einstufung in den kritischen Bereich. Dieser Bereich teilt sich in drei Teilbereiche auf: „weniger kritisch – K 1.X“, „kritisch – K 2.X“ und „sehr kritisch – K 3“. Sobald die Bewertung den kritischen Bereich erreicht, müssen wirksame Schutzmaßnahmen zur Beherrschung eines inerten heißen Partikels ausgeführt werden. Ziel dieser Maßnahme muss es sein, dass die Partikeltemperatur unter die ZGT sinkt.

Kann ein inertes heißes Partikel in diesem Bereich detektiert werden, wird im weiteren Schritt zwischen einer niedrigen und einer hohen ZGT differenziert. Die Kritikalität wird bei hohen ZGT als „weniger kritisch – K 1.X“ eingestuft und bei niedrigen ZGT als „kritisch – K 1.X“. Diese Einteilung beruht auf der Annahme, dass ein Partikel weniger oft die Temperatur besitzt, welche einer hohen ZGT entspricht. Als letzter Bewertungsschritt wird die Größe des iHWP betrachtet. Grundsätzlich sind größere Partikel kritischer als kleinere, da letztere schnell abkühlen und somit auch die Partikeltemperatur unterhalb der ZGT schneller sinkt. Hieraus folgt, dass sich der weniger kritische Bereich in die Kritikalitätsklassen K 1.1 (kleinere Partikel) und K 1.2 (größere Partikel) und der kritische Bereich in die Klassen K 2.1 (kleinere Partikel) und K 2.2 (größere Partikel) gliedert. Die Einstufung der Kritikalität in „sehr kritisch – K 3“ erfolgt, sobald die ZGT kleiner/gleich der Partikeltemperatur ist und dieses Partikel nicht detektiert werden kann. Der Grund hierfür ist, dass ohne Detektieren keine wirksame Maßnahme getroffen werden kann. Erfolgt eine Kritikalitätsbewertung als „sehr kritisch“, müssen weitere Maßnahmen zur besseren Detektion getroffen werden, damit eine wirksame Maßnahme zur Beherrschung eingeleitet werden kann.

Im Graphen wird die Partikelgröße durch das Durchmessersymbol ( $\emptyset$ ) dargestellt. Die Kritikalität kann nun entsprechend dem Kritikalitätsgraphen, welcher in Bild 47 visualisiert ist, bestimmt werden. Der Graph wurde [Bechem und Liske 2019] entnommen, jedoch modifiziert. An dieser Stelle wird dieser Graph verkleinert exemplarisch dargestellt. Der Anhang enthält den Kritikalitätsgraphen in originaler Größe, siehe Bild-A 38.

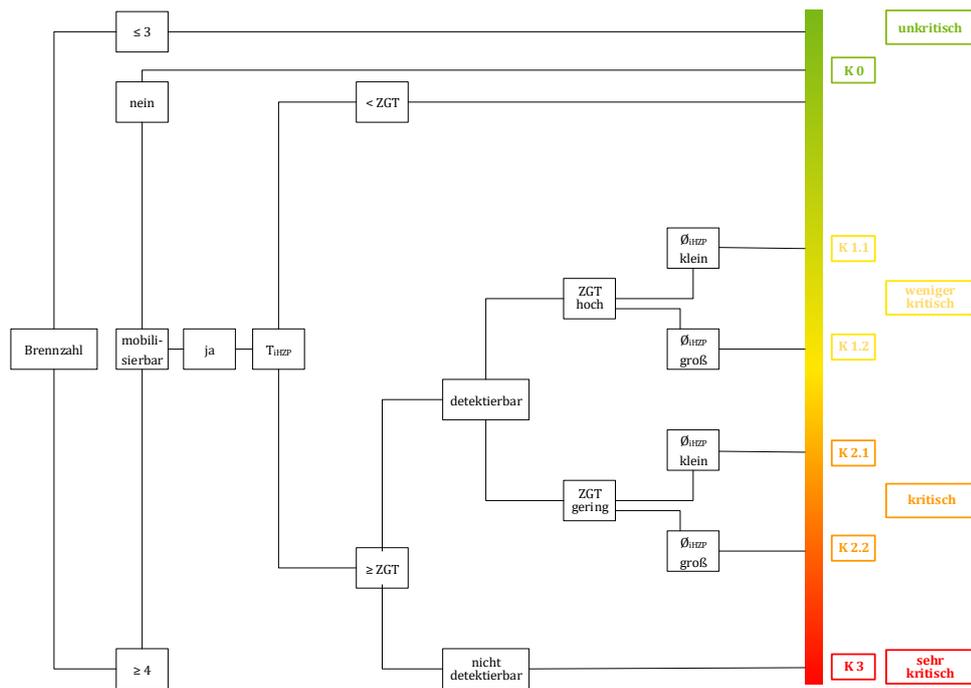


Bild 47: Kritikalitätsgraph für inerte heiße Partikeln

### 6.2.3 Bewertung der Kritikalität inerter heißer Partikeln

Mit Hilfe des Kritikalitätsgraphen kann die Kritikalität der einzelnen inerten heißen Partikeln für das in Bild 44 dargestellte Modell aus dem Forschungsvorhaben und für die untersuchten Staubproben bestimmt werden. Die grundsätzliche Unterscheidung zwischen hohen und geringen ZGT erfolgt auf Basis der im Explosionsschutz bekannten Temperaturklassen. Als Grenztemperatur wird eine ZGT von 450 °C festgelegt, die der Temperaturklasse T1 entspricht [vgl. TRBS 2152-3 Tabelle 2]. Diese Temperaturklasse entspricht der höchsten Temperatur einer heißen Oberfläche, die als Zündquelle betrachtet werden muss. Somit ist die Abgrenzung der iHWP zur heißen Oberfläche gegeben. Aus dem Argument, dass kleinere Partikeln schneller abkühlen als größere, folgt, dass für die Größe des iHWP der Volumenvergleich zweckmäßig ist. Würde der Durchmesser genutzt werden, würden die unterschiedlichen Längen der Zylinder keinen Einfluss auf die Bewertung besitzen. Für die Definition der Grenze zwischen großen und kleinen Partikeln wurde von allen genutzten Partikeln (Kugeln, Scheiben, Zylindern) das Volumen bestimmt und anschließend der Median errechnet. Alle Partikeln, die ein Volumen kleiner als der Median besitzen, werden als klein eingestuft, und alle mit einem Volumen größer oder gleich dem Median sind groß. Das Partikelvolumen variiert von 4,19 mm<sup>3</sup> bis 1.767,15 mm<sup>3</sup>, wobei sich ein Median von 179,59 mm<sup>3</sup> ergibt.

Als Erstes wird die Kritikalität der inerten heißen Partikeln als Kugeln in abgelagerter Staubschicht bewertet. Aus der Bestimmung der Brennzahl (vgl. Tabelle 7) ergibt sich für das Milchpulver eine BZ = 2 – 3. Demnach ist die Kritikalität für alle iHWP im Milchpulver K 0. Ebenfalls mit K 0 bewertet werden die Kugeln, bei denen keine ZGT bestimmt werden konnte.

Im nächsten Schritt wird die Mobilisierbarkeit der Kugeln im pneumatischen Transportsystem betrachtet. Alle Kugeln wurden durch die pneumatische Förderleitung im Technikums-Maßstab (vgl.

Bild 34) transportiert. Aus der Mobilitätsbetrachtung der Scheiben und Zylinder folgt, dass die Kritikalität für beide Partikelformen mit K 0 bewertet wird, da diese in der pneumatischen Förderleitung nicht mobilisiert werden konnten. Um dennoch einen Kritikalitätsvergleich zwischen den Partikelformen zu ermöglichen, wird im Weiteren angenommen, dass die untersuchten Partikeln durch einen mechanischen Transportweg, beispielsweise ein Förderband oder einen Fallprozess, mobilisiert werden. Daher wird im Folgenden die Kritikalität für einen solchen Transportweg untersucht.

Alle Partikeln mit einer Temperatur, die der ZGT entspricht, konnten durch beide Funkenmelder (Klasse A und Klasse B) detektiert werden. Daraus folgt keine Einteilung in die Kritikalitätsklasse K 3. In Tabelle 25 ist die Kritikalität der jeweiligen inerten heißen Partikeln für den Fallprozess oder mechanischen Transport in abgelagerter Staubschicht zusammengefasst. Zur besseren Übersicht über die kleinen und großen iHZP sind sie durch eine gepunktete Linie abgegrenzt. Es ist zu erkennen, dass im Yellow Pine Staub am häufigsten die Kritikalitätsbewertung mit „kritisch – K 2.X“ erfolgte. Da vom Gummiabrieb keine ZGT für Scheiben und Zylinder bestimmt wurden, kann hierfür auch keine Kritikalität angegeben werden. Es wird jedoch vermutet, dass diese entweder K 0 oder K 1.X ergeben würde.

Des Weiteren wird ersichtlich, dass die Zylinder im direkten Vergleich grundsätzlich am kritischsten bewertet werden. Die Scheiben ergeben das zweitkritischste und die Kugeln das unkritischere Verhalten. Es wird zudem deutlich, dass Zylinder und Scheiben bei gleicher Größe (K X.1 oder K X.2) geringere ZGT besitzen als Kugeln und somit kritischer eingestuft werden.

Tabelle 25: Kritikalität der jeweiligen inerten heißen Partikeln für den Fallprozess oder mechanischen Transport in abgelagerter Staubschicht

Partikelform	Größe [mm]	Buchenstaub	Yellow-Pine-Staub	Gummiabrieb	Kakaopulver	Milchpulver
Kugel Ø	2	K 0	K 0	K 0	(K 2.1)	K 0
	3	K 0	K 2.1	K 0	K 2.1	K 0
	4	K 1.1	K 2.1	K 0	K 1.1	K 0
	5	K 1.1	K 2.1	K 0	K 1.1	K 0
	7	K 1.2	K 1.2	K 0	K 1.2	K 0
	10	K 1.2	K 2.2	K 1.2	K 2.2	K 0
	15	K 1.2	K 2.2	K 1.2	K 1.2	K 0
Scheibe Ø/D	8/2,3	K 1.1	K 2.1	n.b.	K 1.1	K 0
	10/2,3	K 2.1	K 2.1	n.b.	K 1.1	K 0
	12/2,3	K 2.1	K 2.1	n.b.	K 2.1	K 0
	15/2,3	K 2.2	K 2.2	n.b.	K 2.2	K 0

<b>Partikelform</b>	<b>Größe [mm]</b>	<b>Buchen- staub</b>	<b>Yellow- Pine- Staub</b>	<b>Gummi- abrieb</b>	<b>Kakao- pulver</b>	<b>Milch- pulver</b>
Zylinder Ø/L	3,5/23,8	K 1.2	K 2.2	n.b.	K 2.2	K 0
	5/9	K 2.1	K 2.1	n.b.	K 2.1	K 0
	6/8	K 2.2	K 2.2	n.b.	K 2.2	K 0
	8/12	K 2.2	K 2.2	n.b.	K 2.2	K 0

## 7 Erkenntnisse und Ungenauigkeiten

Im Folgenden werden die erarbeiteten Erkenntnisse diskutiert und bewertet. Anschließend werden mögliche Ungenauigkeiten und Fehler betrachtet. Die experimentellen Untersuchungen mit inerten heißen Partikeln (iHZP), deren sicherheitstechnische Bewertung mit der Hot-Spot-Theorie (HS) und die Kritikalitätsbewertung werden in einzelnen Unterkapiteln betrachtet.

### 7.1 Erkenntnisse aus den Untersuchungen inerter heißer Partikeln

#### 7.1.1 Betrachtung der Verläufe der Zündgrenztemperaturen der Kugelversuche

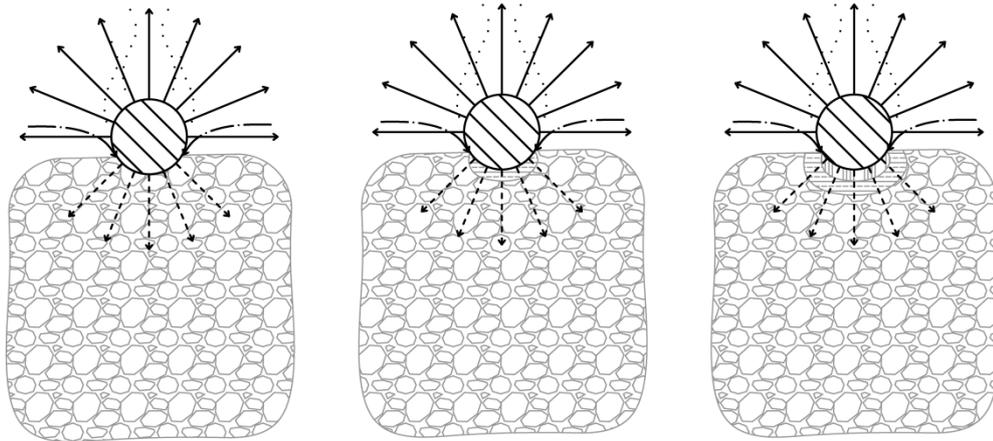
Bei den Zündwirksamkeitsversuchen mit Kugeln in abgelagerter Staubschicht wurde festgestellt, dass der Verlauf der Zündgrenztemperaturen (ZGT) bei den untersuchten Stäuben stark variierte. Dies beruht einerseits auf der unterschiedlichen chemischen Zusammensetzung der einzelnen Stäube und andererseits auf deren Partikelform (vgl. Tabelle 5, S. 39).

Die unterschiedlich großen und eher kantigen Partikeln des Gummiabriebs bildeten wie die Holzstäube eine tragende Struktur, auf der die Kugeln liegen konnten. Die hier beobachteten Flammenbrände entstehen dadurch, dass aufgrund der hohen Partikeltemperatur die flüchtigen Bestandteile des Gummiabriebs schnell pyrolysierten und sich dann an dem Partikel entzündeten. Anscheinend neigt der Gummiabrieb nicht zum Glimmen oder Schwelen. Das gleiche Verhalten wurde auch bei der Bestimmung der Brennzahl gemäß [VDI 2263 Blatt 1] beobachtet.

Die Brennzahl des Milchpulvers wurde mit 2-3 bewertet. Hieraus folgt, dass eine externe Zündquelle das Milchpulver nicht entzünden kann. Somit ist die Beobachtung, dass für Milchpulver keine ZGT bestimmt werden konnte, nicht verwunderlich, da ein inertes heißes Partikel als externe Zündquelle betrachtet wird. Dieses Verhalten entsprach der Erwartung, dass mit einer Brandentstehung nicht zu rechnen sei. Der Grund für die Nichtentzündung könnte in der Zusammensetzung des Milchpulvers liegen. Die im Pulver vorhandenen Zucker (knapp 60 %) scheinen zu schmelzen und zu karamellisieren, wodurch sich eine feste Hülle ausbildet. Diese Hülle erschwert bzw. verhindert das Eindringen des notwendigen Sauerstoffs in die Reaktionszone.

Die Holzstaubpartikeln verhaken sich aufgrund des länglichen und faserigen Aufbaus und bilden somit eine Struktur aus, auf der die Kugeln liegen bleiben konnten. Jedoch unterscheiden sich die Stauboberflächen stark voneinander. Der Buchenstaub bildete eine homogene und ebene Oberfläche, auf der alle Kugeln auflagen. Da der Yellow Pine Staub stark agglomeriert, entstanden auf der Staubschichtoberfläche unterschiedlich großen Mulden und Löcher. Dort konnten die kleineren Kugeln hineinfallen, wodurch sie teilweise vom Staub verdeckt wurden. Somit konnten diese kleineren Kugeln mehr Energie an den Staub abgeben und geringere Partikeltemperaturen reichten aus, um diesen zu entzünden. Beim Kakaopulver wurde der Effekt der besseren Energieabgaben von der Kugel auf den Staub noch deutlicher: Aufgrund der runden Form der Kakaopulverpartikeln bildete sich keine tragende Staubstruktur aus und alle Kugeln versanken tief im Staub.

inertes heißes Partikel liegt auf dem Brennstoff



inertes heißes Partikel versinkt in den Brennstoff

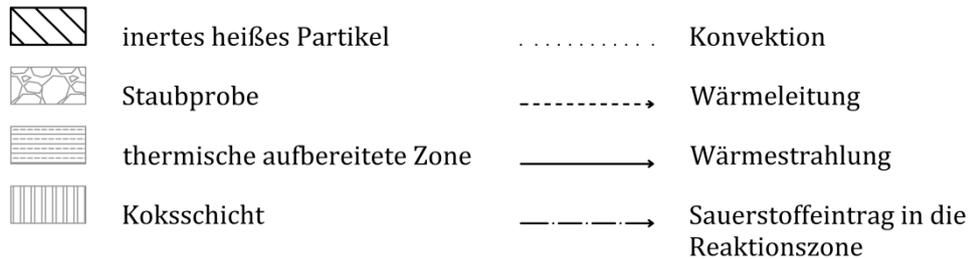
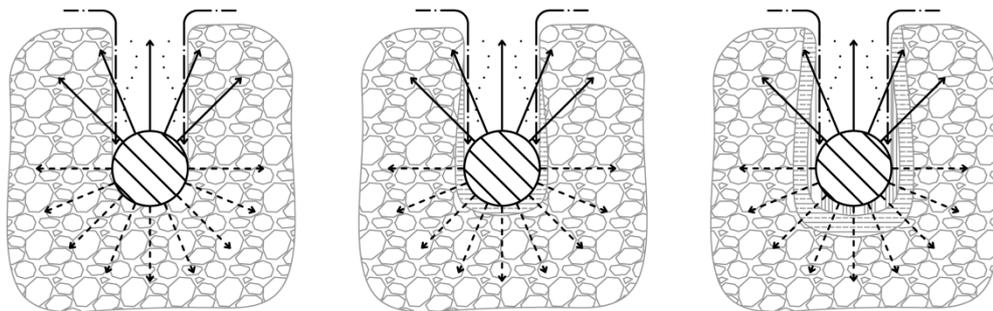


Bild 48: Energieübergabe zwischen inertem heißem Partikel und Staubschicht nach [Bechem und Liske 2019; Bechem 2018]

Liegt die Kugel nur auf der Staubschicht auf (Buchenstaub und Gummiabrieb), findet der Energieaustausch fast ausschließlich durch die Wärmeleitung an der Kontaktfläche zwischen Staubschicht und Kugelunterseite statt. Durch das Versinken in die Staubschicht (Kakaopulver oder Yellow Pine Staub) vergrößert sich die Kontaktfläche zwischen Staubschicht und Kugeloberfläche. Hierdurch erhöht sich der Wärmestrom infolge der Wärmeleitung. Des Weiteren steht nun auch mehr Energie in Form von Wärmestrahlung und Konvektion zum Entzünden der Stäube zur Verfügung und sie kann effektiver wirken. Letztlich steht hierdurch nicht nur mehr Energie zur Entzündung zur Verfügung, sondern es bildet sich auch ein größerer Reaktionsbereich aus. Dieser Effekt erklärt, warum kleinere Kugeln eine geringere ZGT besitzen. In Bild 48 ist dies grafisch dargestellt.

Ein weiterer Faktor für die geringe ZGT der kleineren Kugeln ist, dass die Staubschicht im Verhältnis zu diesen Partikeln größer ist. Hieraus folgt, dass sich bei kleineren Kugeln ein größerer Wärmestau ergibt.

Die geringeren ZGT von Yellow Pine Staub und Kakaopulver im Vergleich zum Buchenstaub können neben dem tiefen Einsinken der Partikeln auch mit der Staubzusammensetzung selbst begründet werden. In beiden Stäuben sind verschiedene Harze und/oder Öle bzw. Fette vorhanden, die möglicherweise eine Entzündung begünstigen.

Die ZGT der Kugel mit  $\varnothing = 15$  mm im Kakaopulver ist wahrscheinlich etwas zu hoch. Der Grund hierfür ist, dass die Kugel sowie die Staubschicht die gleiche Dicke bzw. den gleichen Durchmesser (15 mm) besaßen. Da die Kugeln gerade im Kakaopulver tief in die Staubschicht bzw. bis auf den Boden der Schale sanken, wurde bei diesen großen Kugeln nicht nur Energie durch Strahlung und Konvektion über ihre Oberseite abgegeben, sondern auch durch Wärmeleitung an der Kontaktfläche zwischen Kugelunterseite und Umgebung. Vermutlich wäre die ZGT einer Kugel mit  $\varnothing = 15$  mm in einer größeren Staubschichthöhe geringer, da weniger Energie an die Umgebung verloren gehen würde.

### **7.1.2 Betrachtung der ZGT in abgelagerter-durchströmter Staubschicht**

In den Versuchen mit abgelagerter, durchströmter Staubschicht wurde im Allgemeinen eine geringe ZGT festgestellt. Dieses Verhalten wurde erwartet, da aufgrund des Saugbetriebs immer ausreichend Luftsauerstoff in die Verbrennungszone strömte. Ebenfalls sind die konvektiven Wärmeströme der Kugel und der Verbrennungszone in die Staubschicht geströmt, wodurch mehr thermische Energie in der Reaktionszone vorhanden war. Die sehr gute Sauerstoffzufuhr in die Verbrennungszone erklärt die ausschließlich entstandenen Glimmbrände.

Im Vergleich zwischen der abgelagerten, durchströmten und der abgelagerten Staubschicht des Yellow Pine Staubs liegen die ZGT der Kugel mit  $\varnothing = 15$  mm nah beieinander, wobei die ZGT in abgelagerter, durchströmter Staubschicht sogar etwas höher sind. Dieses Verhalten wird darauf zurückgeführt, dass die Kugel das Filtervlies (Polyester-Nadelfilz) wahrscheinlich früher entzündet hat als die Staubschicht selbst. Der beobachtete Glimmbrand wurde daher nicht durch die Kugel selbst initiiert, sondern durch das Abbrennen des Vlieses. Dieses Phänomen lässt sich damit erklären, dass eine Kugel mit  $\varnothing = 15$  mm deutlich größer ist als die Staubschicht von 5 mm bei diesen Versuchen. Hierdurch erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, dass diese Kugel durch die Staubschicht fällt und auf dem Filtervlies aufliegt, wodurch dieses sich früher entzündet als der Yellow Pine Staub.

In den Versuchen mit abgelagerter, durchströmter Staubschicht weicht nur die Kugel mit  $\varnothing = 4$  mm vom erwarteten Verlauf (die ZGT würde mit steigendem Kugeldurchmesser sinken) nach unten ab. Dies folgt daraus, dass sich durch das Ansaugen des Staubs auf dem Filtervlies eine ebenere und ho-

mogenere Staubschichtoberfläche ausgebildet hat als bei den Versuchen mit nur abgelagerter Staubschicht. Hierdurch waren weniger Mulden auf der Statoberfläche vorhanden und der in Bild 48 dargestellte Effekt trat bei der abgelagerten, durchströmten Staubschicht weniger stark auf.

Grundsätzlich ist eine Übertragung auf reale Filteranlagen fraglich. In den Versuchen wurde das Filtermaterial waagrecht mit einer Staubschicht beladen und die Kugeln von oben auf die durchströmte Staubschicht fallen gelassen, sodass sie aufgrund der Schwerkraft auf der Staubschicht liegen blieben. In realen Filteranlagen hängt das Filtermaterial normalerweise jedoch senkrecht, sodass mögliche iHZZ durch den vorherrschenden Unterdruck angesaugt werden müssen. Da jedoch die Kugeln in einer realitätsnahen Anlage (vgl. Bild 35, S. 60) nicht transportfähig waren, ist deren Ansaugen an ein Filtermaterial unwahrscheinlich.

### **7.1.3 Betrachtung der ZGT von Scheiben und Zylindern**

Die ZGT der Scheiben verlaufen für alle Stäube nach dem erwarteten Trend: Mit steigendem Partikeldurchmesser sinkt die ZGT (vgl. Bild 26, S. 51). Die Scheibe mit  $\varnothing = 10$  mm besitzt im Buchenstaub die geringste ZGT. Da bei den Kugelversuchen im Buchenstaub keine Abweichung des Trends beobachtet wurde, wurde diese Abweichung hier nicht erwartet und wird als versuchsbedingter „statistischer Ausreißer“ bewertet. Ein zweites nicht erwartetes Verhalten ist, dass die ZGT vom Kakaopulver bei den Scheibenversuchen am höchsten waren. Vermutlich hat die Lage der Scheiben einen Einfluss auf die Zündwirksamkeit. Vorstellbar sind zwei Effekte, die einen Einfluss auf die Zündwirksamkeit haben könnten: Im ersten Fall sind die Scheiben senkrecht in der Staubschicht bis auf den Boden der Schüttung versunken. Bei einem solchen Vorgang bildet sich gerade bei kleineren Scheiben nur ein schmaler „Kamin“ aus, durch den wenig Sauerstoff in die Verbrennungszone gelangen kann. Als Folge sind höhere Temperaturen erforderlich, um eine Entzündung zu initiieren. Im zweiten Fall sinkt die Scheibe waagrecht bis auf den Boden der Schüttung. Hier wären zwar der „Kamin“ und die dadurch zugeführte Sauerstoffmenge groß genug, jedoch wird der Hauptteil der Energie nicht an die Staubprobe, sondern an die Umgebung abgegeben. Beide Fälle sind in Bild 49 veranschaulicht.

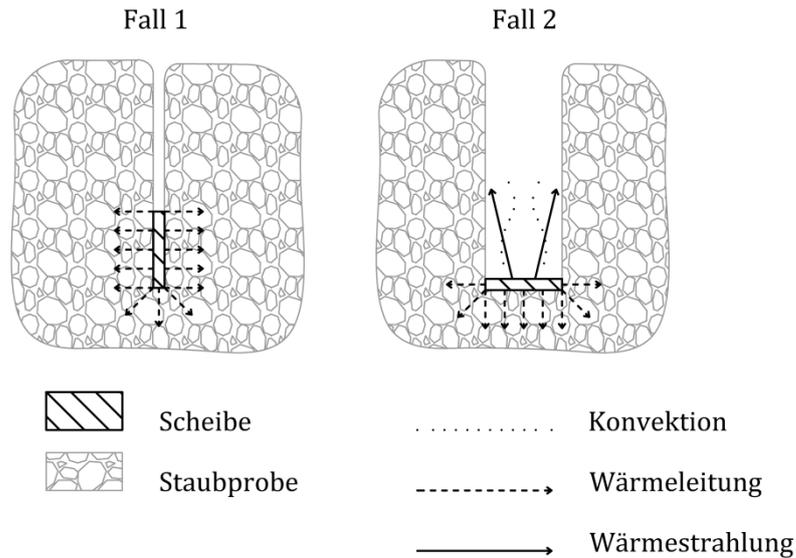


Bild 49: Erklärungsmöglichkeit der höheren ZGT der Scheiben im Kakaopulver

Wie bereits beschrieben, entsprechen die ZGT der Holzstäube in den Zylinderversuchen dem bekannten Trend. Nur beim Verlauf im Kakaopulver scheint eine konstante ZGT vorzuliegen. Wird jedoch eine Ausgleichsgerade in die ZGT des Kakaopulvers gelegt, ergibt sich ein negativer Verlauf. Mit steigendem Partikeldurchmesser sinkt die ZGT also. Die Ergebnisse der Versuche mit Zylindern scheinen zunächst dem erwarteten Verlauf, dass die ZGT mit steigendem Partikeldurchmesser sinkt, zu entsprechen, jedoch basieren sie auf einer ungünstigen Zylinderauswahl: Bei jedem Zylinder ändert sich sowohl der Durchmesser als auch die Länge. Sinnvoller wäre es gewesen, nur einen geometrischen Parameter zu variieren, beispielsweise lediglich den Durchmesser des Zylinders, und die Länge konstant zu halten, wodurch eine Korrelation zwischen Zylinderdurchmesser und ZGT eindeutiger zu beschreiben gewesen und der Vergleich des Durchmessers mit den anderen Formen leichter gewesen wäre. Da es sich bei den verwendeten Zylindern jedoch um genormte Walzlager- teile handelte, waren deren geometrischen Parameter nicht frei wählbar, sondern entsprachen den [DIN 5402-1; DIN 5402-3]. In weiteren Versuchen sollte dies berücksichtigt werden.

#### 7.1.4 Vergleich der Ergebnisse der unterschiedlichen Partikelformen

Dass sowohl der Durchmesser als auch die Länge der Zylinder bei allen vier Zylindern unterschiedlich war, führte zur Bewertung der flächenbezogenen ZGT. Diese zeigen, dass hierdurch ein guter Vergleich der unterschiedlich geformten Partikel möglich ist. Die flächenbezogenen ZGT der unterschiedlichen Partikelformen liegen für die gleiche Staubprobe ebenfalls nah beieinander (vgl. Bild 29, S.54), wenn sie in einem Diagramm über die Partikeloberfläche aufgetragen werden. Hieraus folgt, dass die Partikelform anscheinend eine eher untergeordnete Rolle für den Zündvorgang spielt, wohingegen die Partikeltemperatur einen deutlicheren Einfluss hat.

Die Verläufe der Partikelenergien (vgl. Bild 31, S. 56) über die Partikeldurchmesser der Zylinder und Kugeln hinweg liegen nah beieinander, mit Ausnahme des Zylinders mit  $\varnothing = 3,5$  mm. Würde die Partikelenergie über die Masse aufgetragen, würde dieser Zylinder zwischen die Zylinder mit  $\varnothing = 6$  mm und  $\varnothing = 8$  mm rutschen und läge somit wieder in der Nähe eines gleich schweren anders geformten Partikels.

Der Verlauf der Scheiben weicht deutlich von den Verläufen der Kugeln und Zylinder ab. Diese Abweichung folgt aus dem anderen Werkstoff und somit der abweichenden spezifischen Wärmekapazität. Diese ist für den Flachstahl DC 04 geringer als für den 100Cr6-Stahl (vgl. Bild 30, S. 55), woraus folgt, dass die gespeicherte Energie bei ähnlicher Temperatur geringer ist.

Die unterschiedlichen Steigungen in der Darstellung der Partikelenergie über die volumenbezogene Partikeloberfläche (vgl. Bild 32, S. 57) lässt ebenfalls auf die unterschiedlichen Werkstoffe schließen. Bei dieser Darstellung der Partikelenergien liegen die Werte der Scheiben und Zylinder näher beisammen, was aus der Darstellung der Partikelenergien nicht zu erwarten war. Dieses Verhalten ist damit zu erklären, dass Scheiben grundsätzlich ebenfalls Zylinder mit einer geringen Länge sind. Hieraus folgt, dass die volumenbezogenen Oberflächen im Vergleich zu Kugeln ähnliche Werte ergeben. Bei der flächenbezogenen Partikelenergie liegen die Werte der Kugeln und Zylinder weiter auseinander als bei den reinen Partikelenergien und der flächenbezogenen ZGT. Dagegen liegen die flächenbezogenen Partikelenergien der Scheiben und Zylinder teilweise nah beisammen. Die annähernd gleiche flächenbezogene Partikelenergie (vgl. Bild 33, S. 58) der Scheiben zeigt das erwartete Verhalten, dass diese Energie einen konstanten Wert besitzt. Annäherungsweise trifft dieses Verhalten auch auf die Zylinder zu. Dass dieses Verhalten hier nicht so ausgeprägt ist, wird darauf zurückgeführt, dass bei den Zylindern sowohl der Durchmesser als auch die Länge variieren. Grundsätzlich handelt es sich bei den Scheiben ebenfalls um Zylinder, bei denen jedoch nur der Durchmesser variiert und die Länge gleichbleibt. Hierdurch lässt sich das ähnliche Verhalten ebenfalls erklären. Die konstante flächenbezogene Partikelenergie lässt auf einen partikelformunabhängigen Wärmestrom schließen, der für eine Entzündung notwendig ist. Aus dieser Vermutung entstand die Idee für die experimentellen Versuche mit dem Heizdraht und die Entwicklung des Demonstrators (vgl. Anhang B).

### **7.1.5 Betrachtung des Abkühlverhaltens der Kugeln**

Bei den Versuchen mit Kugeln und abgelegter Staubschicht wurde festgestellt, dass trotz der Tiegel ein relativ großer Temperaturverlust auftrat. Dieser lag im Mittel bei ca. 153 K, wobei kleinere und heißere Partikeln eine größere Temperaturabnahme zeigten als größere und kältere. Dieses Verhalten macht deutlich, dass die direkte Temperaturbestimmung der inerten heißen Partikeln für die Bestimmung der ZGT eine hohe Wichtigkeit besitzt. Werden anstatt der Partikeltemperatur die Ofentemperaturen für die Bestimmung der ZGT genutzt, folgen deutlich höhere Temperaturen. Werden höhere Temperaturen für die ZGT angegeben als für eine mögliche Zündung erforderlich, weicht dies

auf die unsichere Seite ab. Dies bedeutet, dass mögliche Schutzmaßnahmen wie beispielsweise Funkenlöschanlagen falsch dimensioniert werden, wodurch unter Umständen ein Staubbrand entstehen kann.

Für die anderen Partikelformen und die abgelagerte, durchströmte Staubschicht wurde dieser Vergleich nicht erstellt, jedoch wird dieses Abkühlverhalten hier ebenfalls erwartet und entsprechend angenommen. Dieses könnte durch die schlechtere volumenbezogene Oberfläche der Scheiben und Zylinder zu stärkerem Abkühlen führen.

### 7.1.6 Beschreiben des Messfehlers der Wärmebildkamera

Prinzipiell sind alle Messungen fehlerbehaftet. Für die Wärmebildkamera ergeben sich zwei Arten von Messfehlern: Einerseits entstehen Messfehler aufgrund der Messtechnik und andererseits kann der Emissionskoeffizient falsch eingestellt sein.

Ein technischer Messfehler ist, dass das zu messende Objekt zu klein ist. Dieser Messfehler scheint bei der ZGT der Kugel  $\varnothing = 2$  mm im Kakaopulver aufgetreten zu sein, da die ermittelte Temperatur von 206 °C im Vergleich zu niedrig ist.

Damit eine exakte Temperaturmessung eines inerten heißen Partikels erfolgen kann, muss die projizierte Kugelfläche mindestens so groß sein wie die Fläche des Messflecks der Wärmebildkamera. Dieser Messfleck ist gemäß Herstellerangaben 3 Pixel breit und 3 Pixel hoch [Optris GmbH 2017]. Bei dem Versuchsaufbau betrug der Abstand zwischen Staubschicht und Wärmebildkamera 300 mm bis 350 mm. Mithilfe des Optikkalkulators des Herstellers [Optris GmbH 2017] kann die Messfleckgröße bestimmt werden. Für den Versuchsaufbau ergibt die Kantenlänge des quadratischen Messflecks bei einem Abstand von 300 mm zu 1,54 mm und im Abstand von 350 mm zu 1,81 mm. Ein Vergleich zwischen diesen Messflecken und der projizierten Kugelfläche der Kugel mit  $\varnothing = 2$  mm ist in Bild 50 dargestellt.

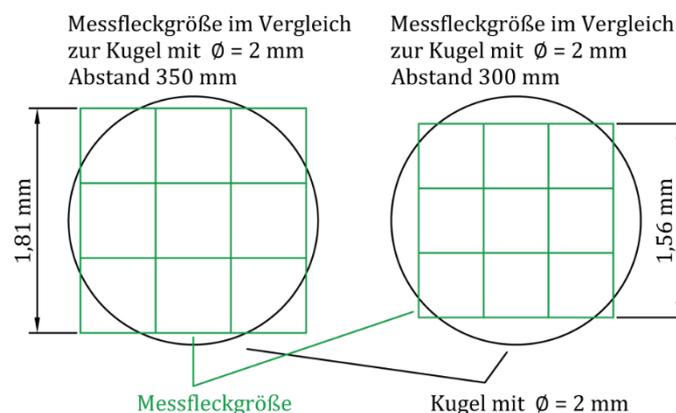


Bild 50: Projizierte Kugelfläche im Vergleich zum Messfleck nach [Bechem und Liske 2019]

Es ist zu erkennen, dass der Messfleck die Kugelfläche bei einem Abstand von 300 mm gut abdeckt und die Abdeckung bei einem Abstand von 350 mm grenzwertig ist. Hier wird in der Summe ca. 1 Pixel nicht von der Kugelfläche abgedeckt. Ist der Messfleck größer als das zu messende Objekt, gibt

der Hersteller an: „Nimmt das Messobjekt nur einen Teil des Messflecks ein, werden Temperaturerhöhungen nur als Mittelwert zwischen dem heißen Flächenanteil und dem, diese Fläche umgebenden, kalten Anteil dargestellt“ [Optris GmbH 2016, S. 13]. Hieraus folgt, dass die Temperatur der Kugeln mit  $\varnothing = 2$  mm für einen Abstand von 350 mm etwas zu gering angezeigt wurde. Da in den Versuchen der messbare Temperaturbereich der Wärmebildkamera von 150 °C bis 900 °C eingestellt wurde, ergibt sich, dass auch alle Temperaturen unter 150 °C von der Software als 150 °C angenommen wurden. Mit der Aussage des Herstellers folgt, dass die ZGT der Kugel mit  $\varnothing = 2$  mm im Kakaopulver eigentlich bei 213 °C lag, wenn für das eine Pixel, welches nicht die Kugel abdeckt, eine Temperatur von 150 °C angenommen wird. Wird stattdessen mit der Umgebungstemperatur gerechnet, ergibt sich eine ZGT von 230 °C. Diese wäre somit immer noch deutlich geringer als die ZGT der Kugel mit  $\varnothing = 3$  mm. Die ZGT von 206 °C weicht also nach unten um maximal 10 % ab. Grundsätzlich sind jedoch geringe ZGT kritischer als größere. Daher führt diese Abweichung zu höheren Schutzmaßnahmen und somit auf die sichere Seite.

Ungeachtet dieses Messfehlers bei der Temperatur von 206 °C stellt die Kugel mit  $\varnothing = 2$  mm für das Kakaopulver eine mögliche Zündquelle im Sinne der [TRGS 720] dar.

Neben dem zuvor beschriebenen Messfleckfehler besteht die Möglichkeit, dass der Emissionskoeffizient bei der Bestimmung der Oberflächentemperatur falsch eingestellt wurde. Wie bereits in Kapitel 5.1.1 beschrieben und in Gleichung (61) ersichtlich, führt ein zu großer Emissionskoeffizient zu geringeren Temperaturen, wodurch die ZGT ebenfalls geringer wird und somit der Fehler zu einem sichereren Ergebnis führt. Würde hingegen der Emissionskoeffizient zu niedrig angesetzt, würden die ZGT auf die unsichere Seite abweichen. Nach Angaben des Herstellers führt ein um 10 % falsch eingestellter Emissionskoeffizient bei der verwendeten Wärmebildkamera zu Messfehlern zwischen 0,5 % und 7,5 %. Der Messfehler ist neben dem Kameratyp insbesondere von dem spektralen Messbereich der Kamera und von der Temperatur des Messobjekts abhängig. Die verwendete PI 450 misst in einem Wellenbereich von 8  $\mu\text{m}$  bis 14  $\mu\text{m}$  [Optris GmbH 2018]. Nach dem Messfehlerdiagramm des Herstellers [Optris GmbH 2017, S. 9] ergibt sich, dass die PI 450 dem Typ LT entspricht. Im Temperaturbereich zwischen 250 °C und 750 °C – in diesem Bereich liegen fast alle ZGT – besitzt die Kamera einen Messfehler zwischen 6 % und 7 %, wobei der Fehler bei geringen Temperaturen ebenfalls geringer ist. Auf die beschriebenen Messungen übertragen bedeutet dies, dass die beschriebenen Messfehler hier auftreten können, wenn der Emissionskoeffizient zwischen  $\varepsilon = 0,8$  und  $\varepsilon = 0,9$  liegt und somit um ca. 10 % schwankt. Da der Emissionskoeffizient tendenziell eher nach oben abweicht, führt der Messfehler somit zu um 6 % bis 7 % geringeren Temperaturen. Auf die gemessene ZGT übertragen folgt aus dieser Abweichung, dass der Fehler zwischen ca. 15 K für ZGT um ca. 250 °C und ca. 50 K für ZGT um ca. 700 °C liegt. Die ZGT könnten somit um 15 K bis 50 K höher sein. Da aber geringere ZGT auf der sicheren Seite liegen, wird der Messfehler als sicher bewertet und die ZGT müssen nicht korrigiert werden.

## 7.2 Erkenntnisse aus der Hot-Spot-Theorie

### 7.2.1 Betrachtung des Vergleichs der HS mit Heizwert und Reaktionsenthalpie

Grundsätzlich weichen die Heizwerte von den Reaktionsenthalpien ab, wobei diese nur 55 % bis 20 % des Heizwerts entsprechen. Zwar wird in beiden Verfahren die spezifische Energie bestimmt, die bei der Verbrennung bzw. dem Stoffumsatz frei wird, jedoch ist diese Bestimmung bei den Verfahren unterschiedlich. In der vorliegenden Dissertation wurde eine Differential Scanning Calorimetry (DSC) mit der dynamischen Wärmestrom-Differenz-Kalorimetrie genutzt. Hierbei wird aus dem Temperaturunterschied zwischen der Probe und einer Referenz die Reaktionsenthalpie ermittelt [vgl. DIN EN ISO 11357-1]. Der Heizwert wird in der Regel in einer kalorimetrischen Bombe bestimmt. Nach [DIN 51900-1] berechnet sich der Heizwert aus dem Brennwert und dem Elementargehalt der Probe. Hierbei wird der *„Brennwert [...] aus folgenden Parametern errechnet:*

- *der Temperaturerhöhung des Kalorimeters;*
- *der Wärmekapazität des Kalorimeters;*
- *der Einwaage der Brennstoffprobe;*
- *der beim Verbrennen der Zündmittel und Verbrennungshilfsmittel freigesetzten Wärmemenge;*
- *der Bildungswärme der verdünnten Schwefelsäure aus Schwefeldioxid;*
- *der Bildungswärme der verdünnten Salpetersäure aus Stickstoff“* [DIN 51900-1, S. 6].

Daher ist ein Unterschied zwischen Heizwert und Reaktionsenthalpie zu erwarten. Der große Unterschied lässt sich auch damit erklären, dass bei der DSC-Messung die kleinen Tiegel offen waren und somit Wärme durch Konvektion und bei einer glimmenden Verbrennung auch durch Strahlung nach oben verloren ging. Die DCS ermittelt die Temperatur auf der Tiegelseite, die Wärmeabgabe nach oben wird daher nicht berücksichtigt [Möps 2019]. Bei der Heizwertbestimmung verbleibt die gesamte Wärmeenergie innerhalb der kalorimetrischen Bombe und es tritt kein Wärmeverlust auf. Jedoch wird die Reaktionsenthalpie des Gummiabriebs als kritisch betrachtet. Aufgrund der Bauart der DSC konnte diese nur bis zu einer Temperatur von 445 °C erwärmt werden. Gerade beim Gummiabrieb werden oberhalb dieser Temperatur wieder Reaktionen (Zersetzen bzw. Schmelzen der Gummibestandteile) erwartet. Um dies zu überprüfen, müsste eine DSC mit höheren Temperaturen gefahren werden.

Der Vergleich der unterschiedlichen Verläufe der Hot-Spot-Theorie (HS) zwischen den literaturbasierten Heizwerten und der Reaktionsenthalpie (vgl. Bild 39, S. 73) zeigt, dass hier geringe Temperaturunterschiede vorhanden sind. Aus diesem Vergleich wird bereits ersichtlich, dass die Verläufe für das Kakaopulver und für den Gummiabrieb zu unplausiblen Werten führen. In einer ersten Abschätzung sind diese Werte nicht auf den Heizwert bzw. die Reaktionsenthalpie zurückzuführen, sondern auf die scheinbare Aktivierungsenergie und/oder den präexponentiellen Faktor. Im Rahmen der Ein-

arbeitung in die HS erfolgte eine kurze Parameterstudie hinsichtlich der Dichte, spezifischen Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit. Diese drei Parameter zeigten vernachlässigbare Einflüsse auf den Verlauf der HS und sind daher in der vorliegenden Dissertation nicht näher angeführt.

Zusammenfassend ergibt der Vergleich, dass es für eine sicherheitstechnische Ingenieuranwendung der HS zweckmäßiger ist, den Heizwert zu nutzen. Dieser führt zu geringeren Temperaturen, welche auf der sicheren Seite liegen. Des Weiteren ist die Bestimmung der Heizwerte anhand von Literaturquellen wesentlich einfacher als die Bestimmung der Reaktionsenthalpie mittels der DSC.

### 7.2.2 Betrachtung des Vergleichs der kinetischen Parameter

Der Vergleich zwischen den kinetischen Parametern aus der Thermogravimetrischen Analyse (TGA) (vgl. Tabelle 18, S. 68) und den Versuchen im Warmlagerschank (WL) (vgl. Tabelle 23, S. 71) zeigt, dass sich die Werte für scheinbare Aktivierungsenergie unterscheiden. Für den Buchenstaub ist der Wert aus dem WL um ca. 24 % geringer als nach der TGA, für das Kakaopulver um ca. 34 %. Für den präexponentiellen Faktor sind die Werte nach dem WL ebenfalls geringer: Beim Buchenstaub etwa um den Faktor  $10^{11}$  und bei Kakaopulver etwa um den Faktor  $10^{22}$ . Der Heizwert wurde genutzt, um bei dem WL den präexponentiellen Faktor zu bestimmen. Ein reiner Vergleich der unterschiedlichen scheinbaren Aktivierungsenergien oder der präexponentiellen Faktoren wurde nicht durchgeführt, da das Zusammenspiel beider Parameter in HS wichtig ist. Aus den entsprechenden Verläufen (vgl. Bild 40, S. 75 für Buchenstaub und Bild 42, S. 76 für Kakaopulver) ist ersichtlich, dass die Temperaturen mit den Werten der TGA wesentlich geringer sind als die Temperaturen mit den Parametern, die im WL bestimmt wurden. Grundlegend zeigt sich, dass das Produkt aus Heizwert/Reaktionsenthalpie und präexponentiellem Faktor ( $k_0 \cdot H_0$ ) wesentlichen Einfluss auf die HS hat. Aus dem Produkt wird deutlich, dass der präexponentielle Faktor einen deutlich größeren Einfluss ausübt als der Heizwert bzw. die Reaktionsenthalpie.

### 7.2.3 Betrachtung des Vergleichs der ZGT und HS

In dem Artikel von [Hadden et al. 2011] wird bereits ein Vergleich der realen Versuche mit einer HS gezogen, welcher in Bild 51 abgebildet ist. Die Autoren ziehen im Fazit den Schluss:

*„Hot spot ignition theory provides qualitative agreement with experimental results but is not quantitatively predictive for the present experiments“* [Hadden et al. 2011, S. 353].

Gemäß den Autoren ist der Grund hierfür beispielsweise, dass in der HS angenommen wird, der inerte heiße Partikel sei komplett in die Staubschüttung eingebettet und liege nicht nur oben auf, wodurch die gesamte Energie an den Staub abgegeben werde und keine Verluste an die Umgebung erfolgten [vgl. Hadden et al. 2011, S. 351–353].

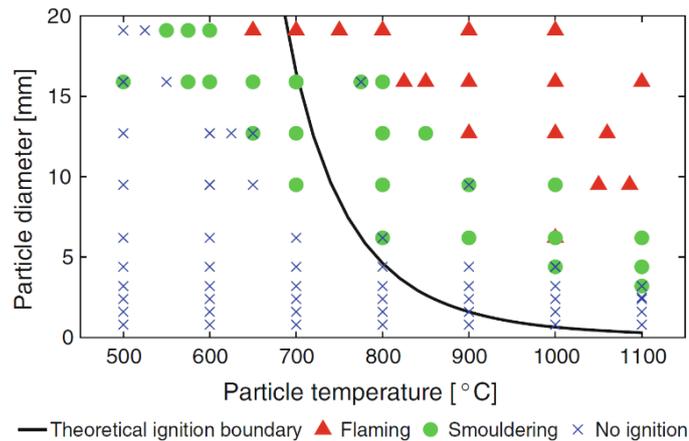


Bild 51: Vergleich der realen Zündversuche und der HS aus [Hadden et al. 2011, S. 352]

Diese Aussagen können für den in der vorliegenden Dissertation gezogenen Vergleich teilweise bestätigt werden. Für den Gummiabrieb (vgl. Bild 43, S. 77) liefert die HS unplausible und viel zu geringe Temperaturen. Gleiches gilt für den Buchenstaub und das Kakaopulver, wenn die kinetischen Parameter aus der TGA und der Literatur herangezogen werden. Beim Yellow Pine Staub (vgl. Bild 41, S. 76) zeigen die HS auch bei der Verwendung der Parameter nach TGA und der Literatur eine gute Abschätzbarkeit. Bei den Untersuchungen von [Hadden et al. 2011] wurden die kinetischen Parameter ebenfalls mittels TGA und aus der Literatur bestimmt.

Jedoch führt der hier durchgeführte Vergleich zu dem Ergebnis, dass eine gute Übereinstimmung zwischen der HS und ZGT besteht, wenn die kinetischen Parameter aus den Versuchen im WL genutzt werden, insbesondere für die Scheiben und Kugeln im Buchenstaub, auch wenn bei der ZGT-Bestimmung die Kugeln eher auf dem Staub lagen und somit Energie an die Umgebung abgeben konnte, was in der HS nicht berücksichtigt wird. Nur die ZGT der Kugeln und Scheiben im Buchenstaub liegt innerhalb der von [Gol'dshleger et al. 1973] beschriebenen Genauigkeit von 10 %. Welcher Effekt diese hohe Übereinstimmung ergibt, lässt sich anhand eines Referenzstoffs (Buchenstaub) schlecht abschätzen. Beim Kakaopulver zeigt die HS mit den Werten aus dem WL ebenfalls eine gute Vergleichbarkeit. Zwar sanken die heißen Partikeln im Kakaopulver immer komplett ein, wodurch diese der Annahme der HS näher kommen, jedoch haben scheinbar weitere Vorgänge einen Einfluss auf die Entzündung des Kakaopulvers gehabt, beispielweise endotherme Prozesse wie das Schmelzen der Fette im Kakaopulver. Diese Vorgänge werden durch den Arrheniusansatz der Ordnung 0 in der HS nicht berücksichtigt.

Grundsätzlich zeigen die Vergleiche, dass die HS immer unterhalb der ZGT liegen, mit Ausnahme der Zylinder im Buchenstaub und der Kugel mit  $\varnothing = 2$  mm im Kakaopulver, bei der die ZGT, wie beschrieben, fraglich ist. Dieses Verhalten ist nicht zwingend verwunderlich. Die HS wurden entwickelt, um abzuschätzen, ob sich ein Explosivstoff durch ein kleines heißes Partikel entzünden lassen kann. Somit stellt die HS die Grenze dar, oberhalb der eine durchgehende Reaktion des Explosivstoffs erfolgt, wobei Explosivstoffe zu schnellen durchgehenden Reaktionen neigen. Die untersuchten Stoffe neigen

hingegen nicht zu schnellablaufenden Reaktionen. In den untersuchten Stoffen, gerade bei den Holzstäuben, wurden bei Temperaturen, die deutlich unterhalb der ZGT liegen, erste Verkohlungen an den Rändern der iHVP festgestellt, die jedoch nicht zu einer durchgehenden Reaktion (einem selbstständigen Schwelbrand) führten. Bild 52 stellt diese Verkohlung beispielhaft dar.



Bild 52: Verkohlung im Randbereich eines iHVP ohne Entstehung eines selbstständigen Schwelbrands im Yellow Pine Staub

[Hadden et al. 2011] führt diese Vermutung ebenfalls in Ansätzen an. Hieraus ergibt sich die Frage, wie die HS die ZGT von Stoffen mit einer Brennzahl von 6 (verpuffungsartiges Abbrennen, beispielsweise bei Schwarzpulver [VDI 2263 Blatt 1, Tabelle 1]) wiedergeben kann.

Im Weiteren ist zu erkennen, dass die HS der Scheiben immer die niedrigsten Temperaturen liefert. Dies lässt sich bereits aus den Faktoren  $\delta_{HS,Krit}$  und  $\delta_{HS,Krit}^*$  (Gleichung (77) und Gleichung (78)) schließen, da hier der Formbeiwert „j“ mehrfach in eine Multiplikation eingeht. Somit ergeben sich höhere Temperaturen für  $j = 2$  (Kugel) als für  $j = 0$  (Scheibe).

Der grundlegende Verlauf, dass ein steigender Partikeldurchmesser zu sinkenden Temperaturen führt, wird vom Formbeiwert nicht beeinflusst. Dieser bewirkt ausschließlich eine Temperaturverschiebung. Dass Kugeln immer höhere Zündtemperaturen besitzen als Zylinder und Scheiben, zeigen die Versuche zur Bestimmung der ZGT nicht. In den Versuchen besaßen die Zylinder im Allgemeinen die geringsten ZGT, während die Scheiben teilweise sogar höhere ZGT als die Kugeln hatten.

Welche Methode zur Bestimmung der kinetischen Parameter besser geeignet ist, um mit der HS die ZGT abzubilden, lässt sich abschließend nicht vollends bewerten. Zwar zeigt die Methode mit dem WL im Buchenstaub und Kakaopulver höhere Übereinstimmungen als die Parameter nach der TGA, jedoch zeigen die Werte nach TGA im Yellow Pine Staub ebenfalls eine gute Abschätzbarkeit.

### 7.3 Erkenntnisse aus der Kritikalitätsbetrachtung

In der Bewertung der Kritikalität (vgl. Tabelle 25, S. 84) steht die Kritikalität der Kugel mit  $\varnothing = 2$  mm für Kakaopulver in Klammern. Wie bereits beschrieben, ist die Bestimmung der ZGT für diese kleine Kugel mit der verwendeten Messtechnik fraglich. Läge die Kugeltemperatur deutlich höher, könnte die Kritikalität statt mit K 2.1 – kritisch als auch als K 1.1 – weniger kritisch zu bewerten sein. Die

Bewertung mit K 0 – unkritisch würde jedoch nicht erfolgen, da diese Kugel das Kakaopulver entzündet hat.

Ein Vorteil der Kritikalitätsbetrachtung ergibt sich aus dem ersten Schritt der Kritikalität, der Bewertung der Brennzahl. Ist die Brennzahl des in der Anlage vorhandenen Staubs  $\leq 3$ , ist nicht mit einer Entzündung durch eine iHZP zu rechnen und weitere umfangreiche Untersuchungen und Laborversuche mit iHZP sind nicht erforderlich. Aus dem Prüfschritt des Vergleichs der Temperatur eines iHZP und der ZGT folgt, dass die Partikeltemperatur bei langen Transportwegen zwischen einem iHZP-erzeugenden Prozess und der gefährdenden Grundoperation immer unter die ZGT sinkt und die Kritikalität mit K 0 bewertet werden kann. Gerade für kleine heiße Partikel sind diese Abkühlzeiten sehr gering. Im Rahmen des Forschungsvorhabens GreCon wurden Abkühlversuche mit allen Kugeln durchgeführt. Dabei wurden jeweils 5 Kugeln in ruhender Luft mit der Wärmebildkamera beobachtet und die mittlere Abkühlzeit bestimmt. Im zweiten Schritt wurde festgestellt, wie lang die Kugeln eine Temperatur oberhalb der ZGT besaßen, wobei diese Zeit als Aktivitätsdauer bezeichnet wurde. Für eine Kugel mit  $\varnothing = 15 \text{ mm}$  ist die Aktivitätsdauer beispielhaft in Bild 53 dargestellt.

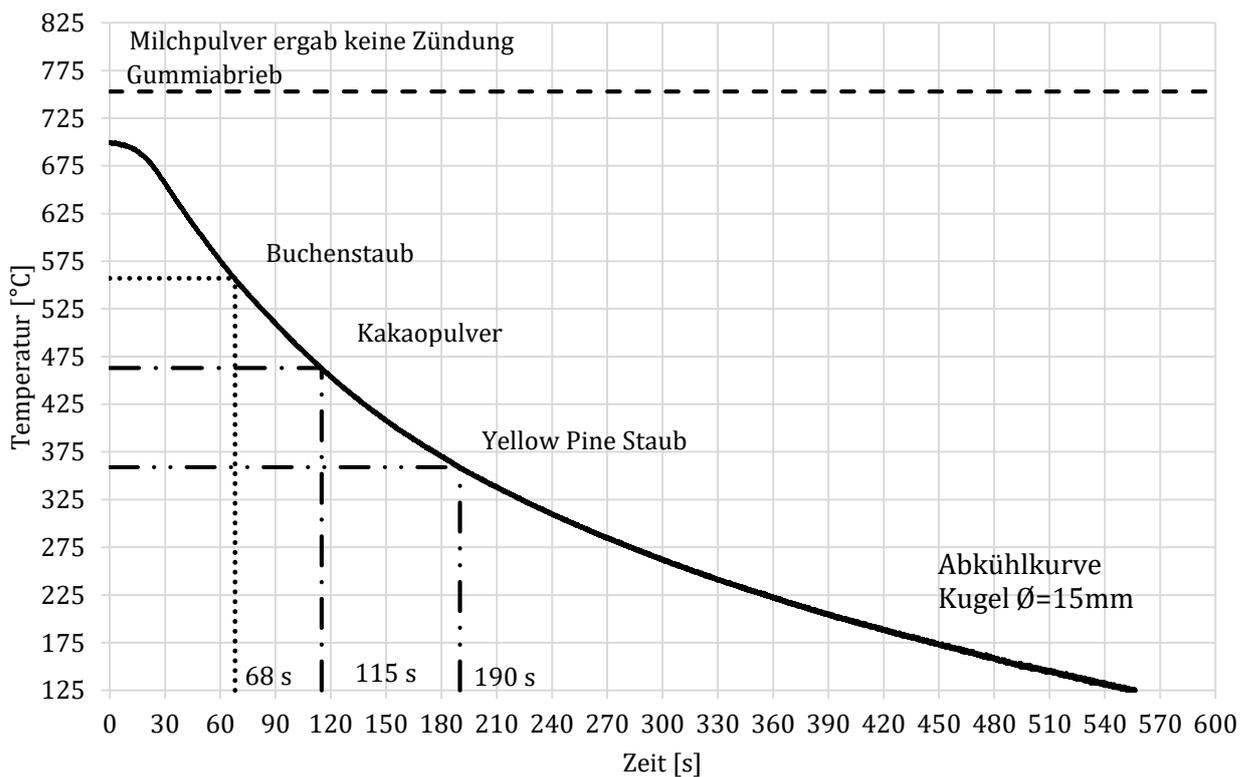


Bild 53: Aktivitätsdauer der Kugel mit  $\varnothing = 15 \text{ mm}$  nach [Bechem und Liske 2019, S. 56]

Kühlen iHZP nicht in ruhender Luft ab, sondern in einem Transportsystem, sind die Abkühlzeiten und die Aktivitätsdauer kürzer. Der Grund hierfür ist, dass an den Partikeln im Transport immer Luft vorbeiströmt, wodurch sich der konvektive Wärmeverlust erhöht.

Für Scheiben und Zylinder wurde die Aktivitätsdauer nicht bestimmt, da die Abkühlzeiten und die Aktivitätsdauer für diese auf Grund der größeren Oberfläche bezogen auf das Volumen ebenfalls geringer sind als bei Kugeln.

Neben diesen Vorteilen besitzt die Kritikalitätsbewertung allerdings auch Nachteile: Beispielsweise ist in realen Prozessen der Vergleich zwischen Partikeltemperatur und ZGT technisch anspruchsvoll. Ein zweiter Nachteil ist die zeitaufwändige Bestimmung der Zündgrenztemperatur.

Einen wesentlichen Vorteil und der Hauptnutzen der Kritikalitätsbetrachtung liegt jedoch darin, dass sie die sicherheitstechnische Bewertung ganzer verfahrenstechnischer Prozesse ermöglicht. Sie stellt nicht nur die Zündwirksamkeit einer iHWP dar, wie es bei der ZGT und der HS der Fall ist, sondern noch weitere Prozessparameter, wie das Transportsystem oder den verwendeten Staub. Sollte die Bestimmung der ZGT zu zeitaufwändig sein, ist es vorstellbar und unter gewissen Umständen zweckmäßig, die Temperaturverläufe der HS für die Kritikalitätsbewertung zu nutzen. Hierbei ist dann darauf zu achten, dass die ZGT durch die HS dargestellt werden können.

## 8 Résumé/Weiterer wissenschaftlicher Forschungsbedarf

### 8.1 Beantwortung der Forschungsfragen

#### **Stellen inerte heiße Partikeln für staubverarbeitende verfahrenstechnische Betriebe eine wirksame Zündquelle dar?**

Prinzipiell scheint diese Frage trivial und einfach mit einem „Ja“ zu beantworten zu sein, da bereits in der aktuellen Normung von „heißen Partikeln“ gesprochen wird.

Dem wird mit dem aus dieser Dissertation erlangten und vorliegenden Wissen grundsätzlich zugestimmt. Hierbei muss jedoch beachtet werden, dass die Zündquelle „inertter heißer Partikel“ meist nicht an dem Ort erzeugt wird, an dem diese zündwirksam werden. Dennoch können diese im Nahbereich der Erzeugung vorhandenen Staub entzünden und dieser primäre Staubbrand kann als Zündquelle zu einem weiteren, mitunter größeren, sekundären Schadenereignis führen.

Ebenfalls sind inerte heiße Partikeln nur eine gewisse Zeit zündwirksam, nämlich nur so lange, wie die Partikeltemperatur oberhalb der Zündgrenztemperatur des Staubs liegt. Diese Aktivierungsdauer wird von der iHWP-Größe und der Distanz zwischen der Erzeugung und dem Wirksamwerden dieser Zündquelle bestimmt. Hieraus folgt, dass die Zündquelle „inertes heißes Partikel“ durch eine lange Zeitspanne seltener (im Sinne der Wahrscheinlichkeit) wird, beispielsweise beim Transport zwischen Entstehung und Zündwirksamwerden.

Rückschlüsse darüber, inwiefern diese inerten heißen Partikeln in verfahrenstechnischen Anlagen entstehen oder welche Größe und Temperatur sie besitzen, können aus den vorliegenden Daten nicht gesichert abgeleitet werden. Über diese Daten wird oft spekuliert, wenn Fremdkörper in Zerkleinerungsmaschinen gelangen. Begründet wird dies damit, dass nach der Zerkleinerung immer Funken durch eine Funkenlöschanlage detektiert werden [vgl. Schäckel 2015; Eberli 2017]. Diese Hypothese müsste jedoch erst noch durch weitere Forschungsarbeiten bestätigt werden.

#### **Wie kann die Zündquellenart „inerte heiße Partikeln“ definiert werden?**

Ein inertes heißes Partikel ist ein metallischer oder mineralischer Fremdkörper, welcher eine entsprechende Temperatur besitzt, die eine externe Entzündung einer Staubschicht initiiert. Die Größe eines solchen Partikels beträgt zwischen  $0,5 \text{ mm}^3$  und  $4.200 \text{ mm}^3$  (vgl. Kapitel 4). Kleine Partikeln können als mechanisch erzeugte Funken angesehen werden, bei größeren ist die prozessbedingte Entstehung oder Mobilität nicht gegeben.

#### **Wie kann diese Zündquellenart durch sicherheitstechnische Prüfmethode bewertet werden?**

Die Sicherheitsbetrachtung der Zündquelle „inerte heiße Partikeln“ kann durch die Zündgrenztemperatur und die Hot-Spot-Theorie erfolgen, wobei beide Verfahren Vor- und Nachteile besitzen.

Im Sinne der [TRGS 720] werden die möglichen Zündquellen ermittelt und mit der Zündgrenztemperatur bewertbar gemacht. Ein weiterer Vorteil liegt in der labortechnischen Prüfung, bei der die unterschiedlichen Formen und Größen der inerten heißen Partikeln betrachtet werden und deren Einfluss auf das Zündverhalten bewertet werden kann. Jedoch ist dieses Verfahren zeitaufwändig und sollte hinsichtlich einer etablierbaren sicherheitstechnischen Kenngröße optimiert werden.

Der Kritikalitätsgraph ermöglicht die sicherheitstechnische Bewertung inerter heißer Partikeln in Bezug auf einen gesamten verfahrenstechnischen Prozess. Der wesentliche Kern des Kritikalitätsgraphen ist die Zündgrenztemperatur: Hierbei wird auch die Transportfähigkeit betrachtet. Zudem finden mögliche Schutzsysteme wie beispielsweise Funkenlöschanlagen Berücksichtigung.

Mit der Hot-Spot-Theorie lässt sich schnell eine entsprechende Temperatur abschätzen, bei der ein inertes heißes Partikel zündwirksam ist. Hierbei verlaufen die Temperaturen immer nach dem Trend, dass die Partikeltemperatur, die zur Entzündung notwendig ist, mit steigendem Partikeldurchmesser sinkt. Wenn die Hot-Spot-Theorie für eine Sicherheitsbetrachtung genutzt werden soll, wird aus sicherheitstechnischer Sicht empfohlen, immer den Formbeiwert  $j = 0$  (Scheibe) zu verwenden. Zwar sind reale inerte heiße Partikeln nicht zwangsläufig scheibenartig, jedoch führt der Formbeiwert der Scheiben zu den geringsten Temperaturen bei der Berechnung, welche somit auf der sicheren Seite liegen. Wichtig bei der Anwendung der Hot-Spot-Theorie sind die kinetischen Parameter. Es wird empfohlen, für die Bestimmung dieser Parameter das Verfahren mit dem Warmlagerschrank anzuwenden (vgl. Kapitel 2.5.1).

## 8.2 Résumé

Mit den gewonnenen Erkenntnissen über inerte heiße Partikeln (iHZP) als Zündquellenart wurde das Ziel der Dissertation, die Konkretisierung des aus den einschlägigen Regelwerken [vgl. DIN EN 1127-1; TRGS 800] bekannten heißen Partikeln bzw. Schweißspritzer, erreicht. Dieses Wissen über ein iHZP ist bei der Zündquellenbewertung gemäß [TRGS 720] im Rahmen der Bewertung für die sichere Handhabung brennbarer Stäube sehr nützlich.

Die Zündquellenbewertung stellt einen wesentlichen Teil insbesondere der Gefährdungsbeurteilung dar, die der Betreiber durchführen muss. Neben dem Auffinden und Bewerten der Gefahren und Gefährdungen müssen wirksame Maßnahmen zu deren Minimierung getroffen werden. Werden in der verfahrenstechnischen Anlage brennbare Stäube verarbeitet bzw. hergestellt, muss an diesen Anlagen gemäß [VdS 2106] eine Funkenlöschanlage installiert werden. Diese Funkenlöschanlage detektiert i. d. R. an Transportleitungen mögliche Funken (hochmobile zündwirksame Partikeln (HZP)) und löscht diese im weiteren Verlauf der Transportleitung ab oder schleust sie aus. Werden HZP nicht wirksam beherrscht, können Staubbrände und/oder Staubexplosionen entstehen. Für die Bewertung dieser Zündquelle wird in der industriellen Praxis oft die Glimmtemperatur (GT) angenommen. Hieraus folgt dann die Anforderung an die Funkenlöschanlage, HZP mit einer Temperatur, die

der GT entspricht, zu detektieren. Dieses Vorgehen erscheint in einem ersten Schritt plausibel. Jedoch zeigt sich bereits bei einer ersten Betrachtung der Glimmtemperatur, dass dies nicht sinnvoll ist. Bei der sicherheitstechnischen Kenngröße der Glimmtemperatur wird eine dünne Staubschicht bis zu 2 Stunden auf einer heißen Platte geprüft. Die Glimmtemperatur „ist als die niedrigste Temperatur einer erhitzten freiliegenden Oberfläche definiert, bei der abgelagerter Staub in 5 mm dicker Schicht zur Entzündung gelangt“ [VDI 2263 Blatt 1, S. 5, Nr. 1.3]. Sie ist somit die niedrigste Temperatur, mit der eine Staubschicht für 2 h beansprucht wird und bei der eine Entzündung erfolgt. Die Übertragung auf ein HZP ist daher zweifelhaft [vgl. Bechem und Barth 2018; Bechem et al. 2017]. Die hier beschriebene Zündgrenztemperatur stellt für die Zündquellenbewertung von HZP, insbesondere der iHZP, die vergleichsweise bessere Kenngröße dar. Dies soll mit dem Vergleich der ZGT und der GT veranschaulicht werden. In Tabelle 26 ist die niedrigste ZGT aller Partikelformen der GT gegenübergestellt. Aufgrund der nicht verfügbaren Probe konnte vom Yellow Pine Staub keine GT bestimmt werden. Die Angabe > 450 °C beim Gummiabrieb zeigt, dass die GT oberhalb der oberen Prüfgrenzen des Aufbaus liegt. Bei allen Stäuben ist zu erkennen, dass die GT immer deutlich unterhalb der ZGT liegen. Beim Milchpulver wurde sogar eine GT ermittelt, während keine ZGT festgestellt wurde. Zwar liegt die ZGT einer Kugel mit  $\varnothing = 2$  mm und 206 °C geringfügig unterhalb der GT des Kakaopulvers, da diese ZGT jedoch messfehlerbehaftet ist, wird an dieser Stelle die zweitniedrigste ZGT genutzt.

Tabelle 26: Vergleich der ZGT mit der GT

Stoff	Niedrigste ZGT [°C]	GT [°C]
Buchenstaub	399	310 °C
Yellow Pine Staub	283	n.b.
Gummiabrieb	753	>450 °C
Kakaopulver	347	250 °C
Milchpulver	n.b.	350 °C

Die hier vorgestellte Kritikalitätsbewertung stellt eine erste qualitative Gefährdungseinschätzung für inerte heiße Partikeln in verfahrenstechnischen Grundoperationen dar. Zwar werden die spezifischen Parameter Detektierbarkeit und ZGT benötigt, jedoch erlaubt der Kritikalitätsgraph die Berücksichtigung einer Funkenlöschanlage. Einerseits wird die Löschanlage durch die Detektierbarkeit und andererseits durch den Löscheffekt und die damit einhergehende Abkühlung der Partikeltemperatur unterhalb der ZGT berücksichtigt. Ebenfalls wird aus dem Kritikalitätsgraphen ersichtlich, dass mit einer Entzündung durch iHZP nicht zu rechnen ist, wenn Stäube mit einer Brennzahl  $\leq 3$  in der Anlage vorkommen und diese hinsichtlich des flankierenden Brandschutzes in einer Zündquellenbewertung nicht weiter betrachtet werden müssen.

Für die Zündquellenbewertung kann alternativ die Hot-Spot-Theorie (HS) genutzt werden. Hierbei ist darauf zu achten, dass die kinetischen Parameter, wie die scheinbare Aktivierungsenergie und der präexponentielle Faktor, entsprechend gesichert bestimmt werden. Aus den hier gesammelten Erkenntnissen über die HS sollten die kinetischen Parameter mit der in [DIN EN 15188] beschriebenen Methode und dem Warmlagerschrank bestimmt werden, wobei sich diese Aussage nur auf zwei Staubproben bezieht und daher eher als ein Trend angesehen werden sollte.

Die Methode nach [DIN EN 15188] wird i. d. R. bei betrieblichen Sicherheitsbetrachtungen genutzt, um die Selbstentzündungstemperatur (SET) von großen Staubvolumina zu bestimmen. Demnach ist das vorab beschriebene Vorgehen zweckmäßig, da für große Staubvolumina (beispielsweise bei der Lagerung von Staub in Silos und Bunkern) die Gefährdung der Selbstentzündung besteht. Somit ist die Ermittlung der kinetischen Parameter gegeben und die HS kann für eine Abschätzung genutzt werden.

Wenn mit der HS die Entzündung durch iHWP untersucht werden soll, muss nicht nur die SET bestimmt werden, sondern ebenfalls die Brennzahl. Ansonsten würde die HS Temperaturen liefern, obwohl dieser Staub gar nicht durch ein iHWP entzündbar ist. In diesem Zusammenhang kann das untersuchte Milchpulver genannt werden. Dieses besitzt eine SET, ist aber nicht durch iHWP entzündbar.

### **8.3 Weiterer wissenschaftlicher Forschungsbedarf**

Aufbauend auf dem erbrachten Mehrwert dieser Dissertation ergibt sich weiterer Forschungsbedarf. Hinsichtlich des Versuchsaufbaus zur Bestimmung der Zündgrenztemperatur werden Möglichkeiten gesehen, diesen weiterzuentwickeln, insbesondere bei der Reproduzierbarkeit des Erwärmungsprozesses der inerten Partikeln. In diesem Rahmen könnte der in der Dissertation entwickelte Heizdrahtversuchsaufbau ebenfalls verbessert werden. Möglicherweise lässt sich eine Verbindung beider Aufbauten erstellen, um exaktere Aussagen über den vom inerten heißen Partikel abgegebenen Wärmestrom zu erhalten. Ebenfalls sollte das Material der inerten heißen Partikeln variiert werden. Des Weiteren ist die Untersuchung weiterer Staubproben zu empfehlen. Ziel dieser Forschung wäre es, die Zündgrenztemperatur als sicherheitstechnische Kenngröße zur Bewertung der Zündquelle heißer Partikel zu etablieren und in die entsprechenden Regelwerke aufzunehmen. In diesem Zuge bietet es sich an, den Vergleich zur Hot-Spot-Theorie mitzuverfolgen. Für diesen Vergleich ist es ratsam, neben der Zündgrenztemperatur die Position des Partikels in der Schaubschicht zu betrachten, um weitergehende Kenntnisse über die Wärmeübertragung vom Partikel auf die Staubschicht zu erhalten. Der Umfang der Weiterentwicklung des normungsfähigen Versuchsaufbaus inkl. Bestimmungsverfahren wird auf die Größenordnung eines weiteren Promotionsvorhabens geschätzt. Die Variation der Staubproben und des Materials inerten heißer Partikeln kann in Studien- und Abschlussar-

beiten erfolgen. Hierbei können die Versuche unter nicht atmosphärischen Bedingungen, beispielsweise einer erhöhten Staub- und/oder Umgebungstemperatur, mit untersucht werden. Mit den Daten aller Versuche wäre eine Stoffdatenbank aufzubauen.

Im Zuge einer weiteren Forschungsarbeit sollte festgestellt werden, welche Methode zur Bestimmung der kinetischen Parameter für die Hot-Spot-Theorie am besten geeignet ist. Neben diesem Wissen kann die Erkenntnis über die Wärmeabgabe inerter heißer Partikeln dazu dienen, die Hot-Spot-Theorien hinsichtlich der Zündabschätzung von Staubschichten weiterzuentwickeln. Bei der Bestimmung der kinetischen Parameter wird die Forschungsfrage, inwiefern die Warmlagerschrankprüfung mittels einer DSC nachgebildet werden kann, erneut beantwortet werden. Der Vorteil der Prüfung in der DSC ist, dass hier deutlich geringere Probemengen benötigt werden. Hiermit könnte die Selbstentzündungstemperatur auch für Proben bestimmt werden, die nur in geringen Mengen produziert werden oder nur als Zwischenprodukt in komplexen Anlagen vorkommen. Es wäre denkbar, diese beiden Forschungsfragen in einem weiteren Promotionsvorhaben zu bearbeiten.

Im Zuge der Recherche sind die beiden Begriffe „Schweißperle“ [vgl. DIN EN 1127-1] und „Schweißspritzer“ [vgl. TRGS 800] aufgetaucht. Die anerkannten Normen und Regeln sollten entsprechend angepasst werden, um eine einheitliche Terminologie zu nutzen. Im Zuge dieser Novellierungen können die in der vorliegenden Ausarbeitung beschriebenen Erkenntnisse zum inerten heißen Partikel beitragen.

## Literaturverzeichnis

ArbSchG, vom 07.08.1996 (07.08.1996): Gesetz über die Durchführung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit (Arbeitsschutzgesetz - ArbSchG), Bundesrepublik Deutschland.

ATEX 1999/92/EG, vom 16.12.1999 (16.12.1999): RICHTLINIE 1999/92/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über Mindestvorschriften zur Verbesserung des Gesundheitsschutzes und der Sicherheit der Arbeitnehmer, die durch explosionsfähige Atmosphären gefährdet werden können, Europäische Union.

Babrauskas, Vytenis (2014): Ignition Handbook Principles and applications to fire safety engineering, fire investigation, risk management and forensic science: Fire Science Publishers.

Baer, A. D.; Ryan, N. W. (1970): Evaluation of thermal-ignition models from hot-wire ignition tests. In: Combustion and Flame 15 (1), S. 9–21. DOI: 10.1016/S0010-2180(70)80060-8.

Bartknecht, Wolfgang (1989): Zündwirksamkeit von mechanischen erzeugten Funken und heißen Oberflächen. Bonn: Wirtschaftsverlag.

Bartknecht, Wolfgang; Zwahlen, Günther (1993): Explosionsschutz Grundlagen und Anwendung. Berlin: Springer.

Bechem, Jonathan (2018): Inert Hot Particle – Unconventional Ignition Source. Vortrag. Hazards 28. Institution of Chemical Engineers. Edinburg, UK, 16.05.2018.

Bechem, Jonathan; Barth, Uli (2018): Inert Hot Particle - Unconventional Ignition Source. In: Institution of Chemical Engineers (Hg.): Hazards 28, 15-17 May 2018, Edinburgh, UK. Rugby, Warwickshire, UK: Institution of Chemical Engineers (Institution of Chemical Engineers symposium series, Nr. 163).

Bechem, Jonathan; Barth, Uli (2019): Ermittlung der Zündgrenztemperatur - Eine innovative Sicherheitskenngröße zur Bewertung der Zündwirksamkeit von inerten heißen Partikeln in Staubschichten. In: Technische Sicherheit (07/08), 10-15.

Bechem, Jonathan; Liske, Bastian (2019): Abschlussbericht „Sicherheitliche Untersuchungen zur Identifizierbarkeit und Beherrschbarkeit hochmobiler zündwirksamer Partikel“ Unveröffentlicht, Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal. Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik Lehrstuhl für Methoden der Sicherheitstechnik/Unfallforschung.

Bechem, Jonathan; Liske, Bastian; Vespermann, Nils; Barth, Uli (2017): Ignition Source: Hot Particle (5th Magdeburg Fire and Explosion). Online verfügbar unter [http://www.isbn-a.de/cgi-bin/isbn\\_2010.exe/showresolution?isbn13=978-3-00-056201-3](http://www.isbn-a.de/cgi-bin/isbn_2010.exe/showresolution?isbn13=978-3-00-056201-3).

- Beilicke, Gert (2010): Bautechnischer Brandschutz Brandlastberechnung. 1. Aufl., erw. Reprint. Leipzig: BBV Beilicke Brandschutz Verl.
- Bernhard, Frank (Hg.) (2004): Technische Temperaturmessung Physikalische und meßtechnische Grundlagen, Sensoren und Meßverfahren, Meßfehler und Kalibrierung ; Handbuch für Forschung und Entwicklung. Berlin: Springer (VDI-Buch).
- Beyer, Michael (2017): Mechanisch erzeugte Zündquellen Entstehung und Zündwirksamkeit. In: VDI Wissensforum GmbH (Hg.): Sichere Handhabung Brennbarer Stäube 2017. VDI Fachtagung mit begleitender Fachausstellung, Bd. 2314. Sichere Handhabung brennbarer Stäube. Nürnberg, 24. - 25.10.2017. VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH (VDI-Berichte, 2314), S. 119–129.
- Bohlen Elektrowärme (2018): Physikalische und Mechanische Eigenschaften CrFeAl-Legierungen. Unter Mitarbeit von Stefan Urbanek.
- Bowes, P. C. (1984): Self-heating Evaluating and controlling the hazards. Amsterdam: Elsevier.
- Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (2018): BBK-Glossar Ausgewählte zentrale Begriffe des Bevölkerungsschutzes. Stand/Auflage 09/2018. Bonn (Praxis im Bevölkerungsschutz, 8).
- Bundesinstitut für Arbeitsschutz (Hg.) (1971): Symposion für Unfallforschung Vorträge und Diskussionsbeiträge anlässlich einer Veranstaltung des Bundesministers für Arbeit und Sozialordnung in Verbindung mit dem Bundesinstitut für Arbeitsschutz. Forschungsbericht/Bundesinstitut für Arbeitsschutz. E. Koblenz. heb0753887821971vortrge.
- Carslaw, Horatio S.; Jaeger, John C. (2008): Conduction of heat in solids. 2. ed., reprinted. Oxford: Clarendon Press (Oxford science publications).
- Cesana, Cristoph; Siwek, Richard (2010): MIKE 3 Handbuch, Kühner AG.
- Cimolino, Ulrich (2014): Analyse der Einsatzerfahrungen und Entwicklung von Optimierungsmöglichkeiten bei der Bekämpfung von Vegetationsbränden in Deutschland. Dissertation, Bergische Uni-versität Wuppertal, Wuppertal.
- Cloney, Chris (2018): 2018 Mid-Year Combustible Dust Incident Report – Version #1. Hg. v. DustEx Research Ltd. Online verfügbar unter <http://dustsafetyscience.com/2018-Report>.
- Dalgic, M.; Löwisch, G.; Mayr, P. (2003): Fachgebiet Werkstofftechnik, Werkstoffprüfung, Wärmebehandlung - Teilprojekt C1 Stoffwertbestimmungen. Arbeitsbericht, Universität Bremen, Bremen. Fachgebiet Werkstofftechnik.

- Dereniak, Eustace L.; Boreman, Glenn D. (1996): Infrared detectors and systems. New York: Wiley (A Wiley-Interscience publication). Online verfügbar unter <http://www.loc.gov/catdir/description/wiley037/96000212.html>.
- DIN 18230-3: Baulicher Brandschutz im Industriebau Teil 3: Rechenwerte, August 2002, DIN Deutsches Institut für Normung e. V.
- DIN 5030-2: DIN 5030 Teil 2 Spektrale Strahlungsmessung Strahler für spektrale Strahlungsmessungen Auswahlkriterien, 09/1982, DIN Deutsches Institut für Normung e. V.
- DIN 51900-1: Bestimmung des Brennwertes mit dem Bomben-Kalorimeter und Berechnung des Heizwertes Teil 1 : Allgemeine Angaben, Grundgeräte, Grundverfahren, April 2000, DIN Deutsches Institut für Normung e. V.
- DIN 5401: Kugeln für Wälzlager und allgemeinen Industriebedarf, August 2002, DIN Deutsches Institut für Normung e. V.
- DIN 5402-1: Wälzlager – Wälzlagerteile – Teil 1: Zylinderrollen, Mai 2014, DIN Deutsches Institut für Normung e. V.
- DIN 5402-3: Wälzlager – Wälzlagerteile – Teil 3: Nadelrollen, April 2012, DIN Deutsches Institut für Normung e. V.
- DIN EN 1127-1: Explosionsfähige Atmosphären - Explosionsschutz, Oktober 2011, DIN Deutsches Institut für Normung e. V.
- DIN EN 15188: Bestimmung des Selbstentzündungsverhaltens von Staubschüttungen, November 2007, DIN Deutsches Institut für Normung e. V.
- DIN EN ISO 11357-1: Kunststoffe – Dynamische Differenz-Thermoanalyse (DSC) – Teil 1: Allgemeine Grundlagen, Februar 2017, DIN Deutsches Institut für Normung e. V.
- DIN EN ISO 9288: Wärmeübertragung durch Strahlung Physikalische Größen und Definitionen, August 1996, DIN Deutsches Institut für Normung e. V.
- DiNenno, Philip J. (Hg.) (2002): SFPE handbook of fire protection engineering, Society of Fire Protection Engineers; National Fire Protection Association. 3. ed. Quincy, Mass., Bethesda, Md.: NFPA National Fire Protection Association; Society of Fire Protection Engineers.
- Doyle, C. D. (1962): Estimating isothermal life from thermogravimetric data. In: J. Appl. Polym. Sci. 6 (24), S. 639–642. DOI: 10.1002/app.1962.070062406.
- Fernandez-Pello, A. C.; Lautenberger, C.; Rich, D.; Zak, C.; Urban, J.; Hadden, R. et al. (2014): Spot Fire Ignition of Natural Fuel Beds by Hot Metal Particles, Embers, and Sparks. In: Combustion Science and Technology 187 (1-2), S. 269–295. DOI: 10.1080/00102202.2014.973953.

- Flynn, Joseph H.; Wall, Leo A. (1966): A quick, direct method for the determination of activation energy from thermogravimetric data. In: J. Polym. Sci. B Polym. Lett. 4 (5), S. 323–328. DOI: 10.1002/pol.1966.110040504.
- Frank-Kamenetzki, D. A. (1959): Stoff- und Wärmeübertragung in der chemischen Kinetik. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg.
- Friedman, M. H. (1969): A general thermal explosion criterion application to initiation by imbedded wires. In: Combustion and Flame 13 (6), S. 567–576. DOI: 10.1016/0010-2180(69)90064-9.
- GefStoffV, vom 26.11.2010 (26.11.2010): Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen (Gefahrstoffverordnung - GefStoffV), Bundesrepublik Deutschland.
- Gerthsen, Christian; Vogel, Helmut (1999): Gerthsen Physik Mit 10 Farbtafeln, 89 Tabellen, 105 durchgerechneten Beispielen und 1065 Aufgaben mit vollständigen Lösungswegen. 20., aktualisierte Aufl. Berlin: Springer (Springer-Lehrbuch).
- Gol'dshleger, U. I.; Pribytkova, K. V.; Barzykin, V. V. (1973): Ignition of a condensed explosive by a hot object of finite dimensions. In: Combust Explos Shock Waves 9 (1), S. 99–102. DOI: 10.1007/BF00740368.
- Görner, Klaus (1991): Technische Verbrennungssysteme Grundlagen, Modellbildung, Simulation. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-84488-1>.
- Hadden, Rory M.; Scott, Sarah; Lautenberger, Chris; Fernandez-Pello, A. Carlos (2011): Ignition of Combustible Fuel Beds by Hot Particles An Experimental and Theoretical Study. In: Fire Technol 47 (2), S. 341–355. DOI: 10.1007/s10694-010-0181-x.
- Hensel, Willi (1988): Entzündung abgelagerter Stäube. In: Sichere Handhabung brennbarer Stäube. Kolloquium Nürnberg, 19.-21.Okt.1988, 701 Band 1. VDI-Kommission Reinhaltung der Luft (VDI-Berichte, Bd.701), S. 143–166.
- Hesby, I. (2000): Ignition of dust layers by metal particle sparks. Master-Thesis, University of Bergen, Bergen, Norway. Department of Physics and technology.
- Hussels, Alexander (2016): Beurteilung der Erkennungssicherheit verschiedener Brandquellen auf Förderbändern durch Infrarottechnik. Bachelor Thesis, Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal.
- Jeske, Arno; Beck, Hartmut (1997): BIA-Report 11/97: Staubexplosionen Dokumentation Staubexplosionen Analyse und Einzelfalldarstellung. Hg. v. Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften, Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitssicherheit - BIA. Sankt Augustin.

- Joos, Franz (2006): Technische Verbrennung Verbrennungstechnik, Verbrennungsmodellierung, Emissionen: mit 65 Tabellen. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/3-540-34334-2>.
- JUMO GmbH & Co. KG (2009): Aufbau und Anwendung von Thermoelementen Typenblatt 90.1000.
- Krause, G. (Hg.) (2014): Theorie der Wärmeexplosion. Symposium der Wärmeexplosion. Potsdam, Dr. Krause GmbH. 1 Band. 6. Aufl.
- Krause, Ulrich (2002): Wärme- und Stofftransportvorgänge bei sicherheitstechnischen Untersuchungsverfahren für Staubbrände und Staubexplosionen. Zugl.: Dresden, Techn. Univ., Habil.-Schr., 2001. Aachen: Shaker (Berichte aus der Verfahrenstechnik).
- Krause, Ulrich; Schmidt, Martin (2000): Propagation Of Smouldering In Dust Deposits Caused By Glowing Nests Or Embedded Hot Bodies. In: Journal of Loss Prevention in the Process Industries 13 (3-5), S. 319–326.
- Lehder, Günter; Skiba, Reinald (2007): Taschenbuch betriebliche Sicherheitstechnik. 5., völlig neu bearb. und wesentlich erw. Aufl. Berlin: E. Schmidt.
- Linan, A.; Kindelan, M. (1981): Ignition of a Reactive Solid by an Inert Hot Spot. Hg. v. E.T.S.I. Aero-náuticos (UPM).
- Liske, B.; Barth, U. (2017): Zündquelle Glimmnest: Mythos oder Realität? Erfahrungen - Wissen - Kenntnislücken. In: VDI Wissensforum GmbH (Hg.): Sichere Handhabung Brennbarer Stäube 2017. VDI Fachtagung mit begleitender Fachaussstellung, Bd. 2314. Sichere Handhabung brennbarer Stäube. Nürnberg, 24. - 25.10.2017. VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH (VDI-Berichte, 2314), S. 107–117.
- Liske, Bastian; Bechem, Jonathan; Barth, Uli; Vespermann, Nils (2018): Hochmobil, zündwirksam und brandgefährlich. In: Schüttgut 24. Jahrgang (Nr. 2), S. 44–48.
- Lottermann, Johannes Wilhelm (2012): Ansätze zur integrierten Brand- und Explosionssicherheit Entwicklung, Validierung und normative Verankerung einer bilateralen, kohärenten Beurteilungssystematik am Beispiel staubführender Anlagen. Zugl.: Wuppertal, Univ., Diss., 2012. 1. Aufl. Berlin: Pro Business.
- Martini, Ferdinand (2017): Gespräch im Rahmen einer Werkbesichtigung bei EGGGER Holzwerkstoffe in Brilon. Brilon, 12.07.2017 an Jonathan Bechem.
- Möps, Alfred (2019): Besprechung der Versuchsergebnisse der DSC Messung im Rahmen einer Schulung von PerkinElmer. Wuppertal, 28.10.2019. Mündlich an Jonathan Bechem.
- Müller, Lukas (2019): Aufbau und Inbetriebnahme einer Versuchsanordnung für die Messung der Wärmeleitfähigkeit von Staubschüttungen. Master-Thesis, Bergische Universität Wuppertal, Wup-

pertal. Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik Lehrstuhl für Methoden der Sicherheitstechnik/Unfallforschung.

Müller, R. (1988): Zündfähigkeit von mechanisch erzeugten Funken und heißen Oberflächen in Staub/Luft-Gemischen. In: Sichere Handhabung brennbarer Stäube. Kolloquium Nürnberg, 19.-21.Okt.1988, 701 Band I. VDI-Kommission Reinhaltung der Luft (VDI-Berichte, Bd.701), S. 421–466.

Optris GmbH (2016): Grundlagen der berührungslosen Temperaturmessung. Berlin (IR-Broschüre-D2016-01-A).

Optris GmbH (2017): Optikkalkulator Wärmebildkamera.

Optris GmbH (2018): Technische Daten Optris PI400 (PI 400-D2018-08-A).

Pedersen, Geir H.; Eckhoff, Rolf K. (1987): Initiation of Grain Dust Explosions by Heat Generated during Single Impact between Solid Bodies. In: Fire Safety Journal (12).

Peekel Instruments (2016): Handbuch Autolog 3000/PICAS-Touch. v2.22.

Ritter, K. (1984): Mechanisch erzeugte Funken als Zündquelle. Hg. v. Verein Deutscher Ingenieure, Verein Deutscher Ingenieure (VDI Berichte, 494).

Rogers, R. L.; Hawksworth, S.; Beyer, M.; Proust, C.; Lakic, D.; Gummer, J.; Raveau, D. (2006): Ignition Of Dust Clouds And Dust Deposits By Friction Sparks And Hotspots, Institution of Chemical Engineers.

Röschenbleck, Benno (1960): Die Zündung explosibler Gas-Luft-Gemische durch Metallfunken. In: Bergbau Archiv 21 (1).

Rowntree, G. W. G.; Stokes, A. D. (1994): Fire ignition by Aluminium Particles of Controlled Size. In: Journal of Electrical and Electronics Engineering, Australia (14), S. 117–123.

Schneider, Dirk (2017): Untersuchung von Methoden zur Früherkennung von Bränden in Wald- und Vegetationsgebieten. Dissertation, Technische Universität Dresden, Dresden. Online verfügbar unter <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-227018#?>; <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-227018>; <https://tud.qucosa.de/id/qucosa%3A30414>.

Schuster, Norbert; Kolobrodov, Valentin G. (2009): Infrarotthermographie. 1. Aufl. s.l.: Wiley-VCH. Online verfügbar unter <http://gbv.ebib.com/patron/FullRecord.aspx?p=481685>.

Semenov, N. (1928): Zur Theorie des Verbrennungsprozesses. In: Z. Physik (Zeitschrift für Physik) 48 (7-8), S. 571–582. DOI: 10.1007/BF01340021.

Sommer, Peter; Sommer, Jens; Sommer, Philipp (2019): Datenbank StahlWissen 19 XXL. Version : Dr. Sommer Werkstofftechnik GmbH.

Stahl, Konrad; Miosga, Gerhard (1986): Infrarottechnik Grundlagen, Strahlungssender und Detektoren, Infrarotbildaufnahmen und -wiedergabe, Fernmeßverfahren. 2., stark bearb. Aufl. Heidelberg: Hüthig.

Stiny, Leonhard (2018): Grundwissen Elektrotechnik und Elektronik Eine leicht verständliche Einführung : 117 Aufgaben mit Lösungswegen. 7., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-18319-6>.

Tessendorf, Florian (2017): Wissenschaftliche Untersuchung zur Brandentstehung in durchströmten Staubablagerungen durch hochmobile zündwirksame Partikeln. Bachelor-Thesis, Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal. Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik Lehrstuhl für Methoden der Sicherheitstechnik/Unfallforschung.

Tränkler, Hans-Rolf; Reindl, Leonhard M. (2014): Sensortechnik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

TRBS 2152-3: Technische Regeln für Betriebssicherheit: TRBS 2152 Teil 3 Gefährliche explosionsfähige Atmosphäre - Vermeidung der Entzündung gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre, 20.11.2009, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.

TRGS 720: Technische Regeln für Gefahrstoffe: TRGS 720 "Gefährliche explosionsfähige Atmosphäre - Allgemeines", 02.06.2006, Bundesministerium für Arbeit und Sozialordnung.

TRGS 800: Technische Regeln für Gefahrstoffe: TRGS 800 "Brandschutzmaßnahmen", 12.2010, Bundesministerium für Arbeit und Sozialordnung.

TÜV Süd (2016): Apparatur zur Bestimmung der Mindestzündtemperatur von aufgewirbeltem Staub (nach BAM).

Urban, James L. (2017): Spot Ignition of Natural Fuels by Hot Metal Particles. Dissertation, University of California, Berkeley.

Urban, James L.; Zak, Casey D.; Fernandez-Pello, Carlos (2014): Cellulose spot fire ignition by hot metal particles.

Urban, James L.; Zak, Casey D.; Fernandez-Pello, Carlos (2018): Spot Fire Ignition of Natural Fuels by Hot Aluminum Particles. In: Fire Technol 54 (3), S. 797–808. DOI: 10.1007/s10694-018-0712-4.

VDI (Hg.) (2006): VDI-Wärmeatlas, VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen. 10., bearb. und erw. Aufl. Berlin: Springer.

VDI 2263 Blatt 1: Staubbrände und Staubexplosionen Gefahren - Beurteilung - Schutzmaßnahmen Untersuchungsmethoden zur Ermittlung von sicherheitstechnischen Kenngrößen von Stäuben, Mai 1990, Verein Deutscher Ingenieure.

- VdS 2106: VdS 2106 Richtlinien für Funkenerkennungs-, Funkenausscheidungs- und Funkenlöschanlagen, 2012-12, VdS.
- VdS 2518: VdS 2518 Funkenlöschsysteme - Anforderungen und Prüfmethode, 05 2017, VdS.
- Wang, Supan; Huang, Xinyan; Liu, Naian; Rein, Guillermo (2015): Ignition of low-density expandable polystyrene foam by a hot particle. In: Combustion and Flame (162).
- Wingerden, Kees van; Hesby, Ingunn; Eckhoff, Rolf K. (2011): Ignition of dust layers by mechanical sparks. 7th Global Congress on Process Safety. Chicago, Illinois.
- Worpenberg, Reinhard (1989): Untersuchungen zur Brandentstehung und Brandverhütung beim Schweißen und thermischen Trennen, insbesondere durch glühende Partikel sowie zur Abgrenzung von Gefahrenbereichen. Dissertation, Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal.
- Wüdrich, Thomas (2012): Schutzzielorientierte Systematiken zur nachhaltigen Bewältigung oberflächennaher Kohleflözbrände. Dissertation, Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal.
- Xiong, Linkun (2018): Experimentelle und analytische Untersuchung des Zündmechanismus inerte Partikel in Staubschüttungen. Master Thesis, Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal. Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik Lehrstuhl für Methoden der Sicherheitstechnik/Unfallforschung.
- Zak, C. D.; Murphy, D. C.; Fernandez-Pello, A. C. (2013): Understanding ignition of natural fuels by heated particles. In: M. Guarascio, C.A Brebbia und F. Garzia (Hg.). SAFE 2013. Rome, Italy, 17.09.2013 - 19.09.2013: WIT PressSouthampton, UK (WIT Transactions on The Built Environment), S. 607–614.
- Zak, Casey D.; Urban, James L.; Fernandez-Pello, Carlos (2014): Characterizing the Flaming Ignition of Cellulose Fuel Beds by Hot Steel Spheres. In: Combustion Science and Technology 186 (10-11), S. 1618–1631. DOI: 10.1080/00102202.2014.935612.
- Zak, Casey; Urban, James L.; Tran, Vi; Fernandez-Pello, Carlos (2015): Flaming Ignition Behavior of Hot Steel and Aluminum Spheres Landing in Cellulose Fuel Beds. Draft, University of California Berkeley. Berkeley, zuletzt geprüft am 10.09.2015.
- Zalosh, Robert; Grossel, Stanley; Kahn, Russell; Sliva, Daniel (2005): Dust Explosion Scenarios in the New CCPS Guidelines for Safe Handling of Powders and Bulk Solids.
- Zarko, V. E.; Khlevnoi, S. S. (1971): Hot-wire ignition of ballistite propellants. In: Combust Explos Shock Waves 4 (2), S. 89–95. DOI: 10.1007/BF00783555.
- Zarko, V. E.; Khlevnoi, S. S. (1974): Hot-wire ignition of an ammonium perchlorate-starch mixture. In: Combust Explos Shock Waves 7 (4), S. 516–517. DOI: 10.1007/BF00740689.

## Bilderverzeichnis

Bild 1: Branddreieck.....	5
Bild 2: Abbrand eines Feststoffs nach [Görner 1991, S. 180], eigene Darstellung .....	6
Bild 3: Spektrale spezifische Ausstrahlung nach [Bernhard 2004, S. 987 Bild 13.4], eigene Darstellung .....	10
Bild 4: Strahlertypen nach [Bernhard 2004, S. 994 Bild 13.10], eigene Darstellung .....	11
Bild 5: Lage der Zündquelle im Brennstoff .....	13
Bild 6: Wärmestromdichten, die eine Entzündung beeinflussen [Bechem und Liske 2019].....	14
Bild 7: Semenov-Diagramm [Semenov 1928; Darstellung nach Krause 2002] .....	14
Bild 8: Arrheniusdiagramm zum Bestimmen der kinetischen Parameter.....	19
Bild 9: Schematische Darstellung der TGA zur Bestimmung der Umsatzrate C und der entsprechenden Temperatur .....	22
Bild 10: Schematische Darstellung der verschiedenen Umsatzraten (Werte in %) in Abhängigkeit der Heizraten für die Bestimmung der scheinbaren Aktivierungsenergie.....	22
Bild 11: Zündzusammenhang der Partikelgröße und Partikeltemperatur [Hadden et al. 2011, S. 347].....	26
Bild 12: Zündzusammenhang der Partikelgröße und Partikelenergie [Hadden et al. 2011, S. 348].	26
Bild 13: Zündzusammenhang der Partikelgröße und Partikeltemperatur bei unterschiedlichen Partikelwerkstoffen von [Urban 2017, S. 34] .....	27
Bild 14: Verbrennung eines Schleiffunkens nach [Ritter 1984, S. 134], eigene Darstellung.....	30
Bild 15: Fremdkörper, der nach einer Staubexplosion in einem Mühlenbunker gefunden wurde [Bartknecht und Zwahlen 1993, S. 389].....	33
Bild 16: Magnetische, metallische Agglomeration in einem Siebter [Bechem und Liske 2019].....	34
Bild 17: Modellvorstellung inerter HZP nach [Bechem und Barth 2018] .....	35
Bild 18: Ausgewählte Staubproben [Bechem und Liske 2019] .....	38
Bild 19: Schematischer Versuchsaufbau der Zündwirksamkeitsversuche mit abgelagerter Staubschicht [Bechem et al. 2017] .....	42
Bild 20: Schematischer Versuchsaufbau der Zündwirksamkeitsversuche mit abgelagerter, durchströmter Staubschicht [Bechem et al. 2017].....	43
Bild 21: Bildliche Darstellung der Versuchsdurchführung .....	44
Bild 22: Ergebnisse der Versuche mit Kugeln in abgelagerter Staubschicht – Buchenstaub nach [Bechem und Barth 2019].....	47
Bild 23: Zündgrenztemperaturen von Kugeln in abgelagerter Staubschicht [Bechem und Barth 2019].....	48
Bild 24: ZGT für die Versuche von Kugeln in abgelagerter, durchströmter Staubschicht nach [Tessendorf 2017].....	49

Bild 25: Vergleich der ZGT zwischen abgelagerter und abgelagerter, durchströmter Staubschicht nach [Tessendorf 2017] .....	50
Bild 26: Zündgrenztemperaturen von Scheiben in abgelagerter Staubschicht nach [Xiong 2018] ..	51
Bild 27: Zündgrenztemperaturen von Zylindern in abgelagerter Staubschicht nach [Xiong 2018]..	52
Bild 28: Vergleich der ZGT der unterschiedlichen Partikelformen.....	53
Bild 29: Vergleich der flächenbezogenen ZGT über der Partikeloberfläche der Versuche.....	54
Bild 30: Temperaturabhängige spezifische Wärmekapazität der Partikelwerkstoffe nach [Dalgic et al. 2003; Sommer et al. 2019] .....	55
Bild 31: Vergleich der Partikelenergie über den Partikeldurchmesser, die der ZGT entsprechen ....	56
Bild 32: Vergleich der Partikelenergie, die der ZGT entspricht, über die volumenbezogene Oberfläche (A/V) – beide Achsen sind logarithmisch skaliert.....	57
Bild 33: Vergleich der flächenbezogenen Partikelenergie, die der ZGT entspricht .....	58
Bild 34: Versuchsaufbau der pneumatischen Transportleitung .....	59
Bild 35: pneumatische Förderanlage auf dem Firmengelände der Fagus-GreCon Greten GmbH & Co. KG .....	60
Bild 36: Versuchsaufbau für die Detektierbarkeit inerte heißer Partikeln .....	62
Bild 37: Temperaturabhängige spezifische Wärmekapazität der Partikelwerkstoffe nach [Dalgic et al. 2003; Sommer et al. 2019] .....	72
Bild 38: Temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit der Partikelwerkstoffe nach [Dalgic et al. 2003; Sommer et al. 2019].....	72
Bild 39: Vergleich des Einflusses des Heizwerts oder der Reaktionsenthalpie auf die HS.....	73
Bild 40: Vergleich der ZGT mit den verschiedenen HS von Buchenstaub und allen Partikelformen	75
Bild 41: Vergleich der ZGT mit den verschiedenen HS von Yellow Pine Staub und allen Partikelformen.....	76
Bild 42: Vergleich der ZGT mit den verschiedenen HS von Kakaopulver und allen Partikelformen.	76
Bild 43: Vergleich der ZGT mit den verschiedenen HS von Gummiabrieb und allen Partikelformen	77
Bild 44: Schematische Abbildung des Systems „Funkenlöschung“ nach [Bechem und Liske 2019] .	78
Bild 45: Mensch-Umgebungs-System (MUS) von Compes nach [Bundesinstitut für Arbeitsschutz 1971, S. 152] eigene Darstellung.....	79
Bild 46: Beispiel für die Anwendung des Mensch-Umgebungs-Systems (MUS) von Compes nach [Bundesinstitut für Arbeitsschutz 1971, S. 154], eigene Darstellung .....	80
Bild 47: Kritikalitätsgraph für inerte heiße Partikeln .....	83
Bild 48: Energieübergabe zwischen inerte heißem Partikel und Staubschicht nach [Bechem und Liske 2019; Bechem 2018] .....	87
Bild 49: Erklärungsmöglichkeit der höheren ZGT der Scheiben im Kakaopulver.....	90
Bild 50: Projizierte Kugelfläche im Vergleich zum Messfleck nach [Bechem und Liske 2019].....	92
Bild 51: Vergleich der realen Zündversuche und der HS aus [Hadden et al. 2011, S. 352].....	96

Bild 52: Verkohlung im Randbereich eines iHZZ ohne Entstehung eines selbstständigen  
Schwelbrands im Yellow Pine Staub..... 97

Bild 53: Aktivitätsdauer der Kugel mit  $\varnothing = 15$  mm nach [Bechem und Liske 2019, S. 56] ..... 98

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Spektralbereiche der optischen Strahlung nach [DIN 5030-2, Tabelle 1] .....	9
Tabelle 2: Ergebnisse nach [Rogers et al. 2006], eigene Darstellung.....	29
Tabelle 3: Ergebnisse der Versuche mit einer Heizpatrone nach [Rogers et al. 2006, S. 7], eigene Darstellung .....	32
Tabelle 4: Vergleich der Zündkriterien der bisher veröffentlichten und der in der vorliegenden Dissertation beschriebenen Zündwirksamkeitsversuche .....	37
Tabelle 5: Mikroskopaufnahmen der Stäube [Bechem und Liske 2019].....	39
Tabelle 6: Siebanalyse (Siebdurchgang) der Staubproben [Bechem und Liske 2019].....	40
Tabelle 7: Ermittelte Brennzahl der Staubproben nach [VDI 2263 Blatt 1] .....	41
Tabelle 8: Größen der verschiedenen iHZP .....	42
Tabelle 9: Versuchsreihen und Einzelversuche zur Bestimmung der ZGT in abgelagerter Staubschicht.....	44
Tabelle 10: Zündgrenztemperaturen von Kugeln in abgelagerter Staubschicht [Bechem und Barth 2019].....	48
Tabelle 11: Zündgrenztemperaturen von Kugeln in abgelagerter, durchströmter Staubschicht.....	49
Tabelle 12: Zündgrenztemperaturen von Scheiben in abgelagerter Staubschicht .....	50
Tabelle 13: Zündgrenztemperaturen von Zylindern in abgelagerter Staubschicht.....	51
Tabelle 14: Massen der verschiedenen Partikeln.....	55
Tabelle 15: Ergebnisse der Transportversuche .....	59
Tabelle 16: Detektierbarkeit inerte heißer Partikeln.....	62
Tabelle 17: Gegenüberstellung des bisherigen Vorgehens der Sicherheitsbetrachtung inerte heißer Partikeln und der neuen Vorgehensmöglichkeiten der vorliegenden Dissertation .....	64
Tabelle 18: Zusammenfassung der kinetische Parameter aus den TGA.....	68
Tabelle 19: Spezifische Wärmekapazitäten aus DSC-Analysen für eine Temperatur von 20 °C .....	69
Tabelle 20: Werte der Reaktionsenthalpie aus der DSC-Analyse und den Heizwerten aus der Literatur.....	69
Tabelle 21: Wärmeleitfähigkeiten der Staubproben [Müller 2019].....	70
Tabelle 22: Schüttdichten der Staubproben [Bechem und Liske 2019] und Varianz der Werte .....	70
Tabelle 23: Kinetische Parameter aus Warmlagerversuchen .....	71
Tabelle 24: Dichten der Partikelwerkstoffe [Sommer et al. 2019] .....	71
Tabelle 25: Kritikalität der jeweiligen inerten heißen Partikeln für den Fallprozess oder mechanischen Transport in abgelagerter Staubschicht .....	84
Tabelle 26: Vergleich der ZGT mit der GT .....	102

## Anhang A Bilder

Bild-A 1: Kalibrierzertifikat Teil 1 .....	III
Bild-A 2: Kalibrierzertifikat Teil 2 .....	IV
Bild-A 3: Kalibrierzertifikat Teil 3 .....	V
Bild-A 4: Kalibrierzertifikat Teil 4 .....	VI
Bild-A 5: Sachverhalt der neuen Einzelversuche pro Versuchsreihe der Zündwirksamkeitsversuche mit inerten heißen Partikeln.....	VII
Bild-A 6: Feste Agglomeration des Milchpulvers nach der Bestimmung mit einer Kugel $\varnothing = 15$ mm .....	VIII
Bild-A 7: Flächenbezogene ZGT über Partikeloberfläche der Versuche im Buchenstaub.....	IX
Bild-A 8: Flächenbezogene ZGT über Partikeloberfläche der Versuche im Yellow Pine Staub.....	X
Bild-A 9: Flächenbezogene ZGT über Partikeloberfläche der Versuche im Kakaopulver .....	XI
Bild-A 10: TGA von Buchenstaub .....	XII
Bild-A 11: TGA von Yellow Pine Staub.....	XIII
Bild-A 12: TGA vom Gummiabrieb .....	XIV
Bild-A 13: TGA vom Kakaopulver .....	XV
Bild-A 14: DSC-Kurven vom Buchenstaub zur Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität – Messung 1 Rot, Messung 2 Blau, Messung 3 Grün, Messung 4 Cyan, Messung 5 Schwarz.....	XVI
Bild-A 15: DSC-Kurven vom Yellow Pine Staub zur Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität – Messung 1 Rot, Messung 2 Blau, Messung 3 Grün, Messung 4 Cyan, Messung 5 Schwarz.....	XVII
Bild-A 16: DSC-Kurven vom Kakaopulver zur Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität – Messung 1 Rot, Messung 2 Blau, Messung 3 Grün, Messung 4 Cyan, Messung 5 Schwarz.....	XVIII
Bild-A 17: DSC-Kurven vom Gummiabrieb zur Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität – Messung 1 Rot, Messung 2 Blau, Messung 3 Grün, Messung 4 Cyan, Messung 5 Schwarz.....	XIX
Bild-A 18: DSC-Analyse zur Bestimmung der Reaktionsenthalpie von Buchenstaub; Messung 1 ...	XX
Bild-A 19: DSC-Analyse zur Bestimmung der Reaktionsenthalpie von Buchenstaub; Messung 2 .	XXI
Bild-A 20: DSC-Analyse zur Bestimmung der Reaktionsenthalpie von Buchenstaub; Messung 3	XXII
Bild-A 21: DSC-Analyse zur Bestimmung der Reaktionsenthalpie von Buchenstaub; Messung 4	XXIII
Bild-A 22: DSC-Analyse zur Bestimmung der Reaktionsenthalpie von Buchenstaub; Messung 5	XXIV
Bild-A 23: DSC-Analyse zur Bestimmung der Reaktionsenthalpie von Yellow Pine Staub; Messung 1 .....	XXV
Bild-A 24: DSC-Analyse zur Bestimmung der Reaktionsenthalpie von Yellow Pine Staub; Messung 2 .....	XXVI
Bild-A 25: DSC-Analyse zur Bestimmung der Reaktionsenthalpie von Yellow Pine Staub; Messung 3 .....	XXVII

Bild-A 26: DSC-Analyse zur Bestimmung der Reaktionsenthalpie von Yellow Pine Staub; Messung 4	XXVIII
Bild-A 27: DSC-Analyse zur Bestimmung der Reaktionsenthalpie von Yellow Pine Staub; Messung 5	XXIX
Bild-A 28: DSC-Analyse zur Bestimmung der Reaktionsenthalpie von Kakaopulver; Messung 1	XXX
Bild-A 29: DSC-Analyse zur Bestimmung der Reaktionsenthalpie von Kakaopulver; Messung 2	XXXI
Bild-A 30: DSC-Analyse zur Bestimmung der Reaktionsenthalpie von Kakaopulver; Messung 3	XXXII
Bild-A 31: DSC-Analyse zur Bestimmung der Reaktionsenthalpie von Kakaopulver; Messung 4	XXXIII
Bild-A 32: DSC-Analyse zur Bestimmung der Reaktionsenthalpie von Kakaopulver; Messung 5	XXXIV
Bild-A 33: DSC-Analyse zur Bestimmung der Reaktionsenthalpie von Gummiabrieb; Messung 1	XXXV
Bild-A 34: DSC-Analyse zur Bestimmung der Reaktionsenthalpie von Gummiabrieb; Messung 2	XXXVI
Bild-A 35: DSC-Analyse zur Bestimmung der Reaktionsenthalpie von Gummiabrieb; Messung 3	XXXVII
Bild-A 36: DSC-Analyse zur Bestimmung der Reaktionsenthalpie von Gummiabrieb; Messung 4	XXXVIII
Bild-A 37: DSC-Analyse zur Bestimmung der Reaktionsenthalpie von Gummiabrieb; Messung 5	XXXIX
Bild-A 38: Kritikalitätsgraph	XL





## Kalibrierzertifikat

Calibration Certificate

WKS 19070025

Zertifikat-Nr.  
Certificate No.

## Messergebnisse / Results

Temperaturpunkt / temperature point	Anzeigewert des Gerätes / indicated value of the unit	Blenden- durchmesser / aperture	Distanz/ distance	Temperatur- Bereich / temperature range	Mess- unsicherheit /uncertainty
[°C]	[°C]	[mm]	[mm]	[°C]	[°C]
29,0	29,8	50	150	-20...100	0,6
50,2	50,3	50	150	-20...100	0,6
100,2	100,1	50	150	-20...100	0,6
29,0	29,9	50	150	0...250	0,6
50,2	50,5	50	150	0...250	0,6
100,2	100,3	50	150	0...250	0,6
200	200,2	50	150	0...250	0,6
200	199,8	50	150	150...900	0,6
500	499,3	50	150	150...900	1,8

\*) Messunsicherheit der Kalibrierung  
Measurement Uncertainty of calibration

Qualitätssicherung  
Quality Control

Datum: 22.07.2019  
Date:

Prüfer:  
Inspector:

DIN ISO 9001:2015  
(Registrier-Nr./ Registration no.: 11865-2811)

<sup>1)</sup> Werksnorm/ Factory standard

Optris GmbH Ferdinand-Buisson-Str. 14 D-13127 Berlin Tel.: +49(0)30 500197-0  
Fax: +49(0)30 500197-10 Email info@optris.de Homepage www.optris.de

Bild-A 2: Kalibrierzertifikat Teil 2





## Kalibrierzertifikat

WKS 19070026

Calibration Certificate

Zertifikat-Nr.  
Certificate No.

## Messergebnisse / Results

Temperaturpunkt / temperature point [°C]	Anzeigewert des Gerätes / indicated value of the unit [°C]	Blenden- durchmesser / aperture [mm]	Distanz/ distance [mm]	Temperatur- Bereich / temperature range [°C]	Mess- unsicherheit /uncertainty [°C]
27,2	27,8	50	288	-20...100	0,6
50,2	50,2	50	288	-20...100	0,6
100,2	99,9	50	288	-20...100	0,6
27,2	26,9	50	288	0...250	0,6
50,2	49,8	50	288	0...250	0,6
100,2	99,7	50	288	0...250	0,6
200	200,0	50	288	0...250	0,6
200	198,7	50	288	150...900	0,6
500	499,3	50	288	150...900	1,8

\*) Messunsicherheit der Kalibrierung  
Measurement Uncertainty of calibration

Qualitätssicherung  
Quality Control

Datum: 22.07.2019  
Date:

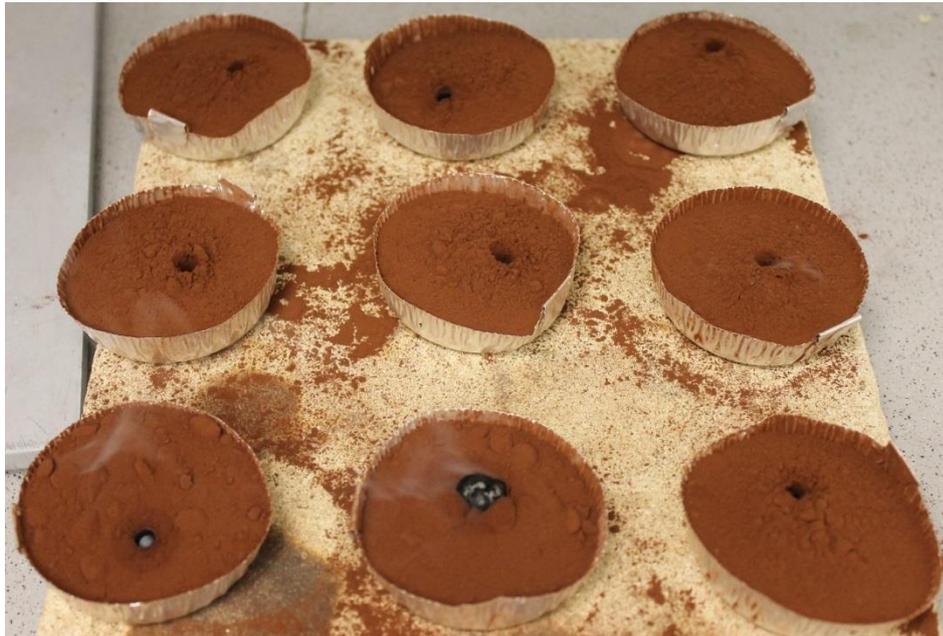
Prüfer:  
Inspector:

DIN ISO 9001:2015  
(Registrier-Nr./ Registration no.: 11865-2811)

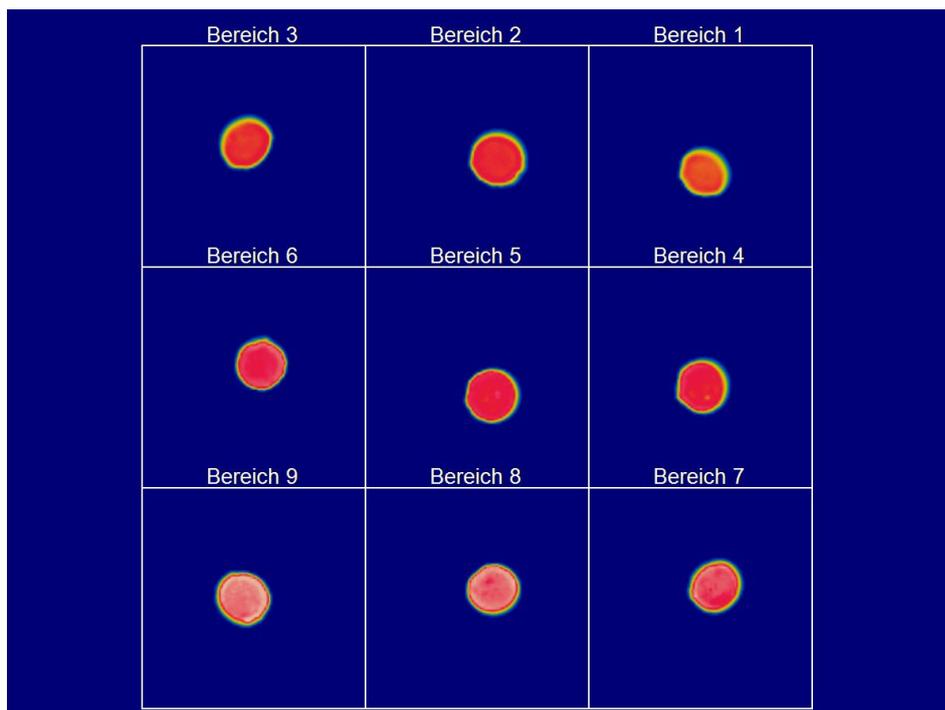
<sup>1)</sup> Werksnorm/ Factory standard

Optris GmbH Ferdinand-Buisson-Str. 14 D-13127 Berlin Tel.: +49(0)30 500197-0  
Fax: +49(0)30 500197-10 Email info@optris.de Homepage www.optris.de

Bild-A 4: Kalibrierzertifikat Teil 4



exemplarische Schalenanordnung



exemplarischer Bildausschnitt der Software der Wärmebildkamera

Bild-A 5: Sachverhalt der neuen Einzelversuche pro Versuchsreihe der Zündwirksamkeitsversuche mit inerten heißen Partikeln



Bild-A 6: Feste Agglomeration des Milchpulvers nach der Bestimmung mit einer Kugel  $\varnothing = 15$  mm

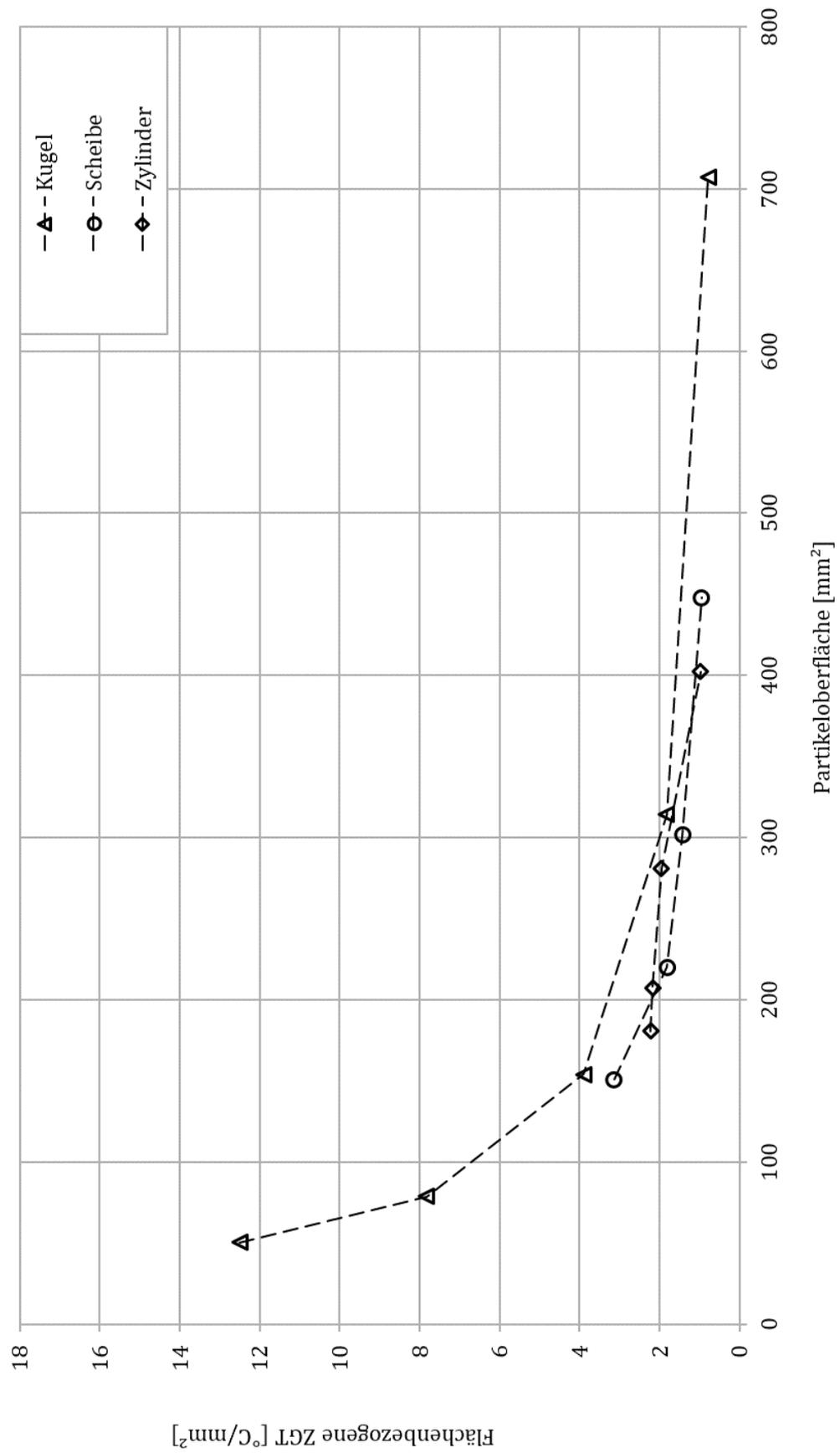


Bild-A 7: Flächenbezogene ZGT über Partikeloberfläche der Versuche im Buchenstaub

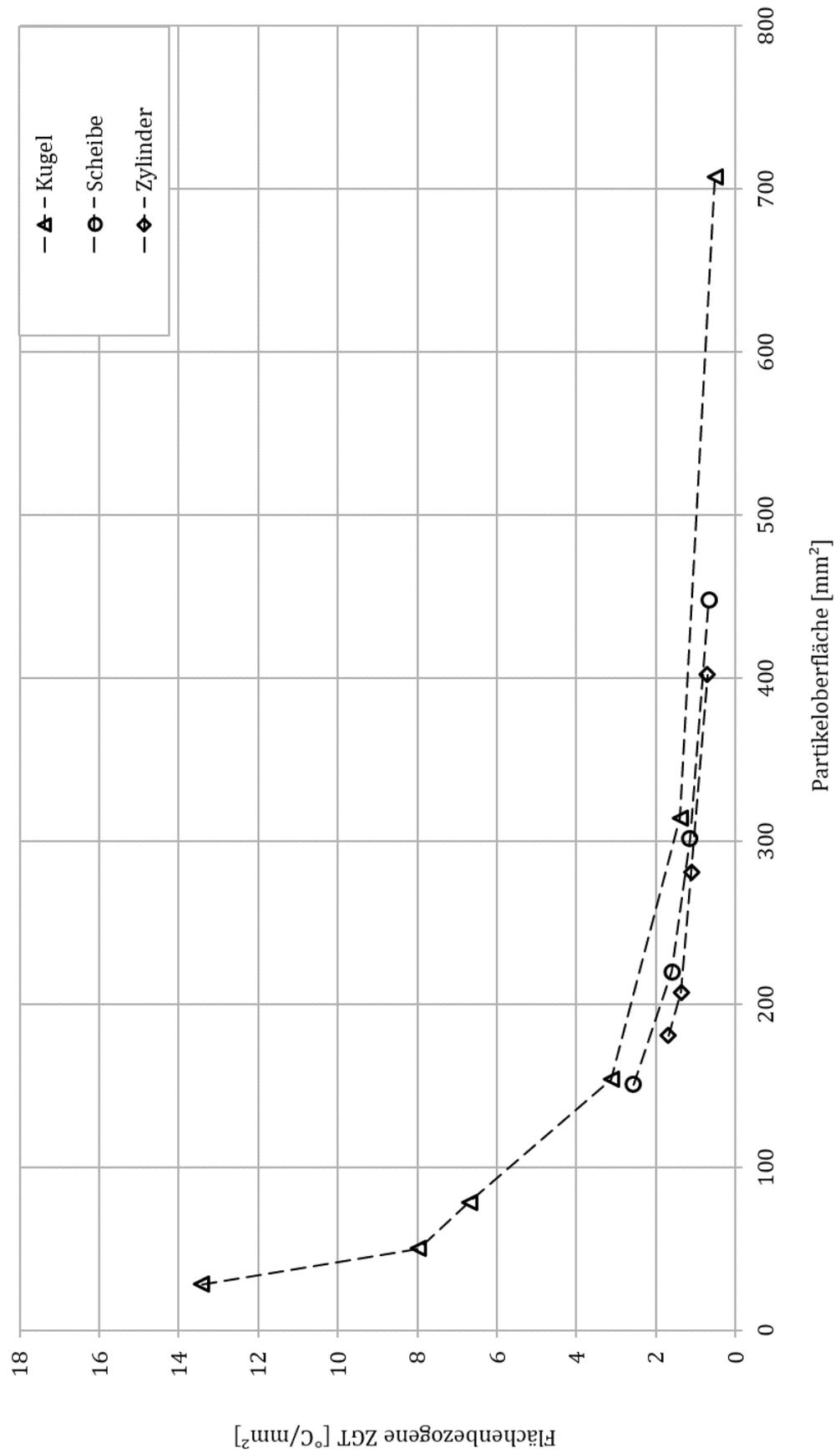


Bild-A 8: Flächenbezogene ZGT über Partikeloberfläche der Versuche im Yellow Pine Staub

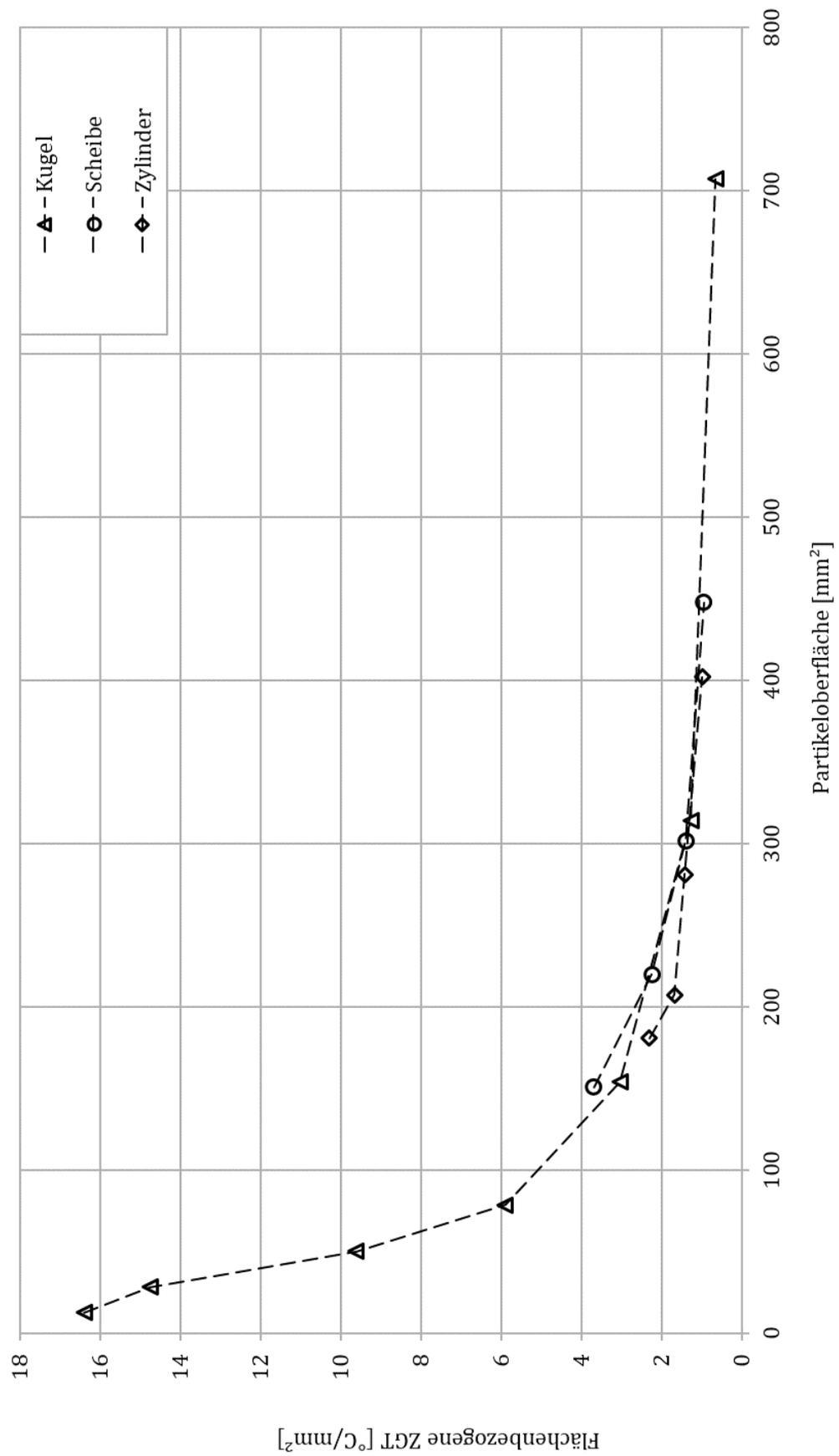


Bild-A 9: Flächenbezogene ZGT über Partikeloberfläche der Versuche im Kakaopulver

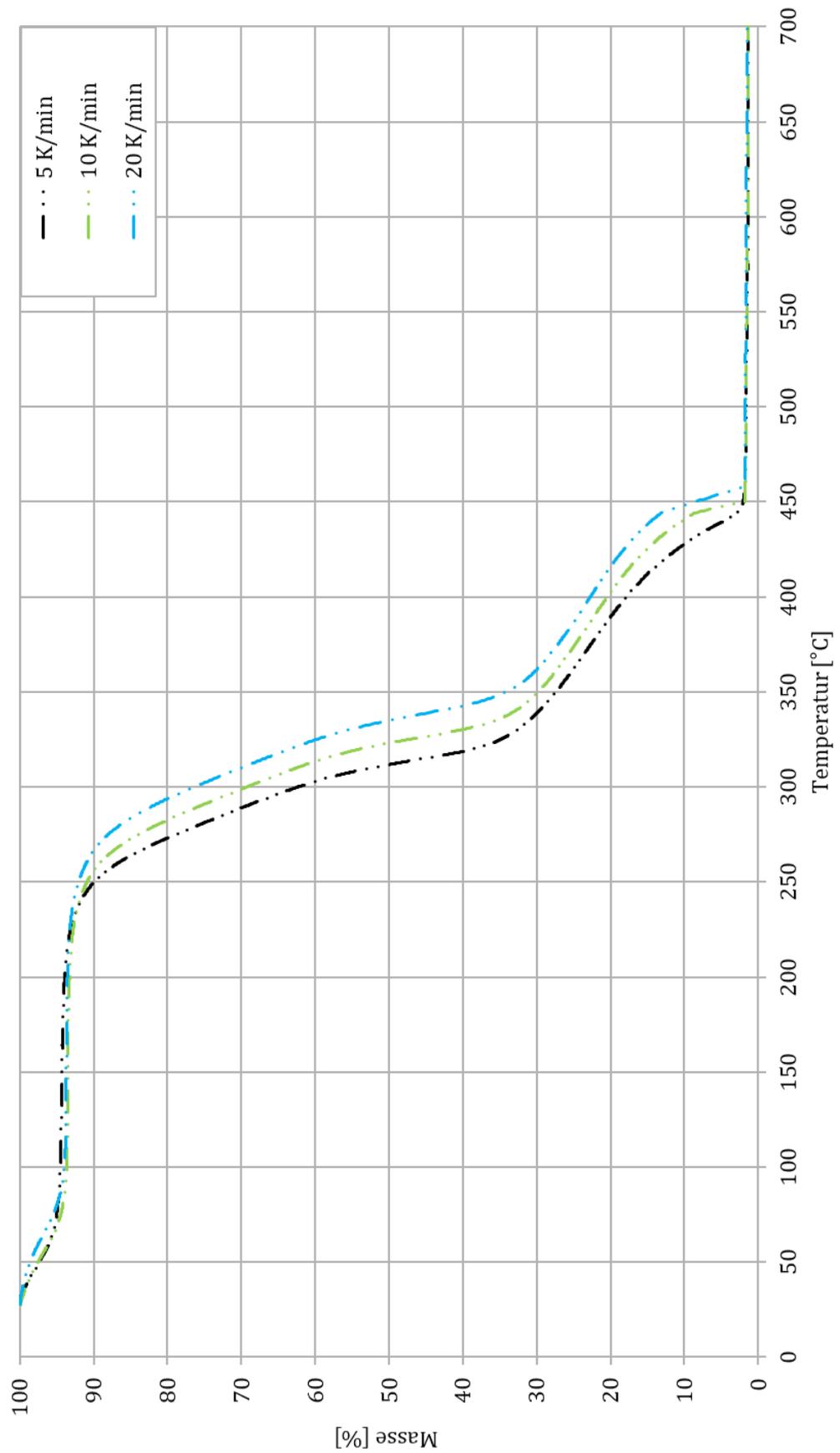


Bild-A 10: TGA von Buchenstaub

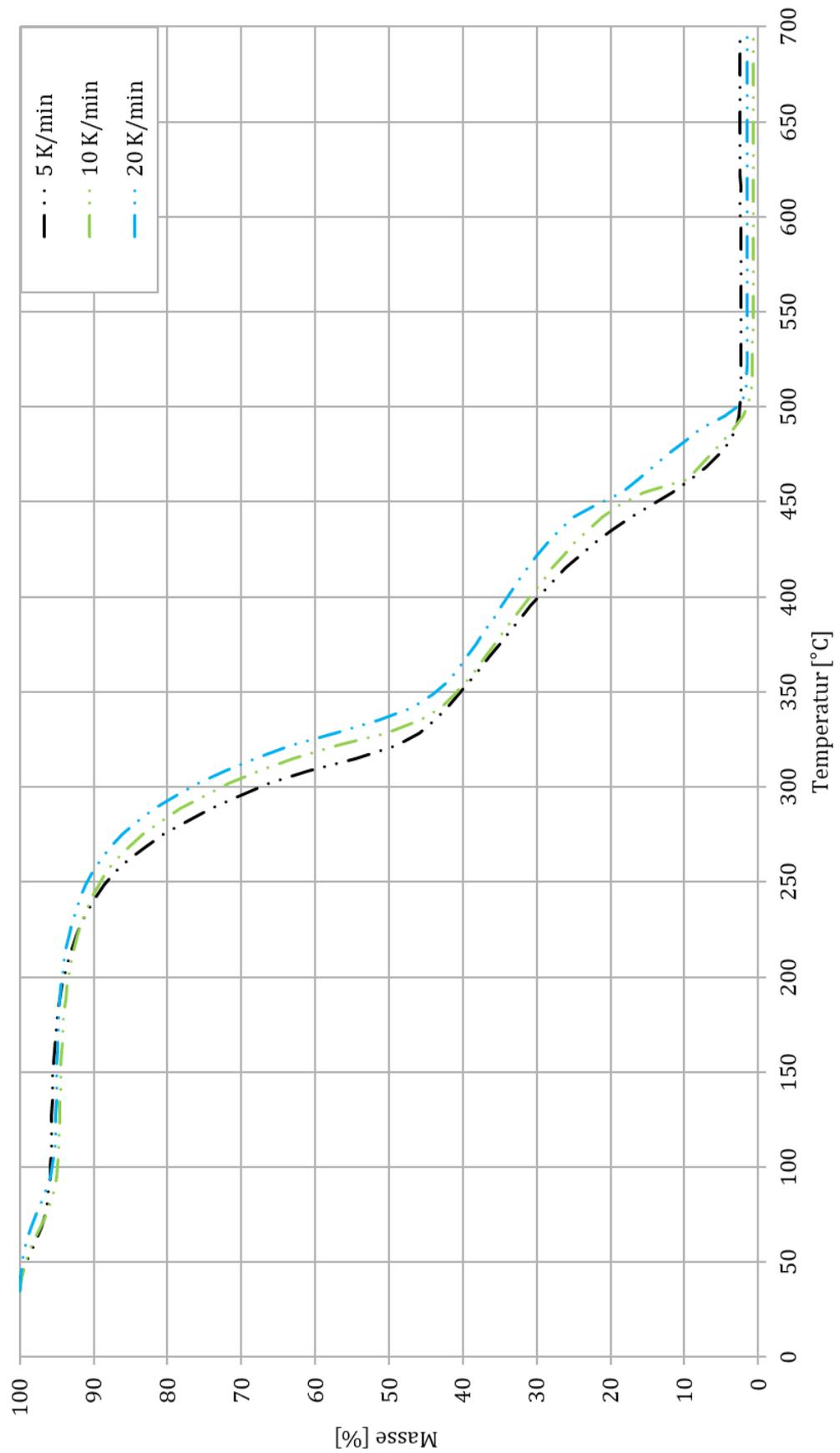


Bild-A 11: TGA von Yellow Pine Staub

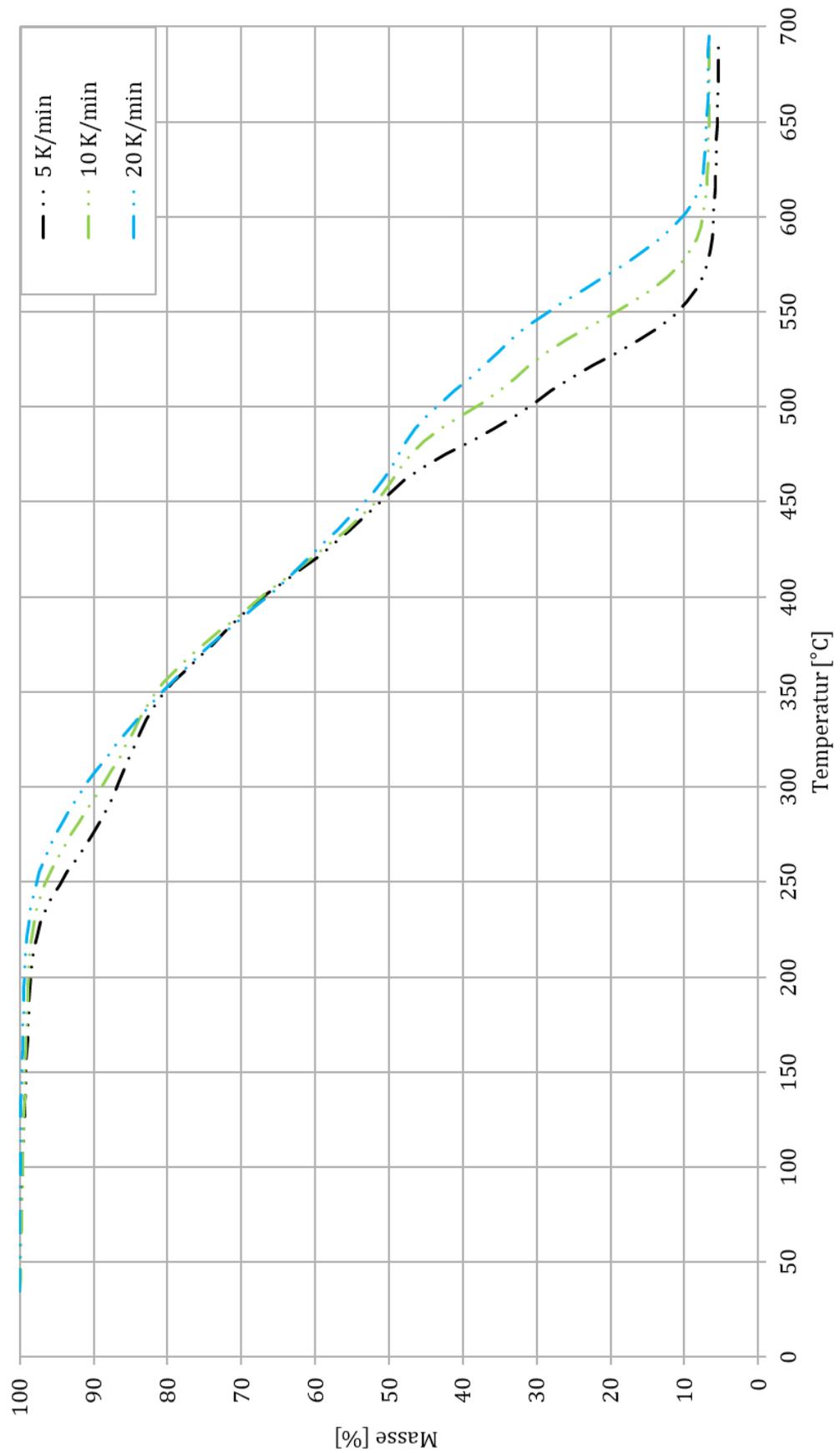


Bild-A 12: TGA vom Gummiabrieb

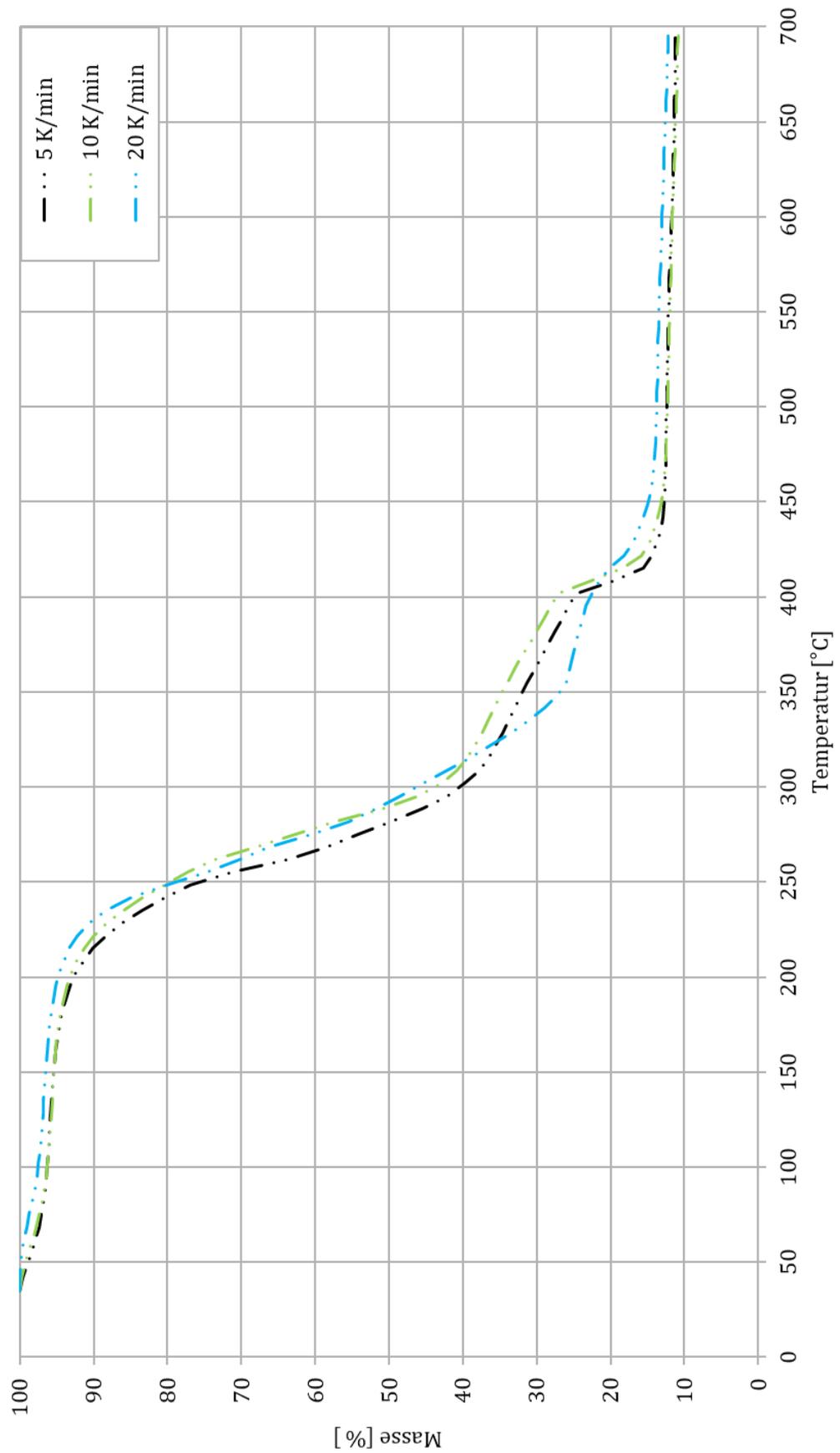


Bild-A 13: TGA vom Kakaopulver

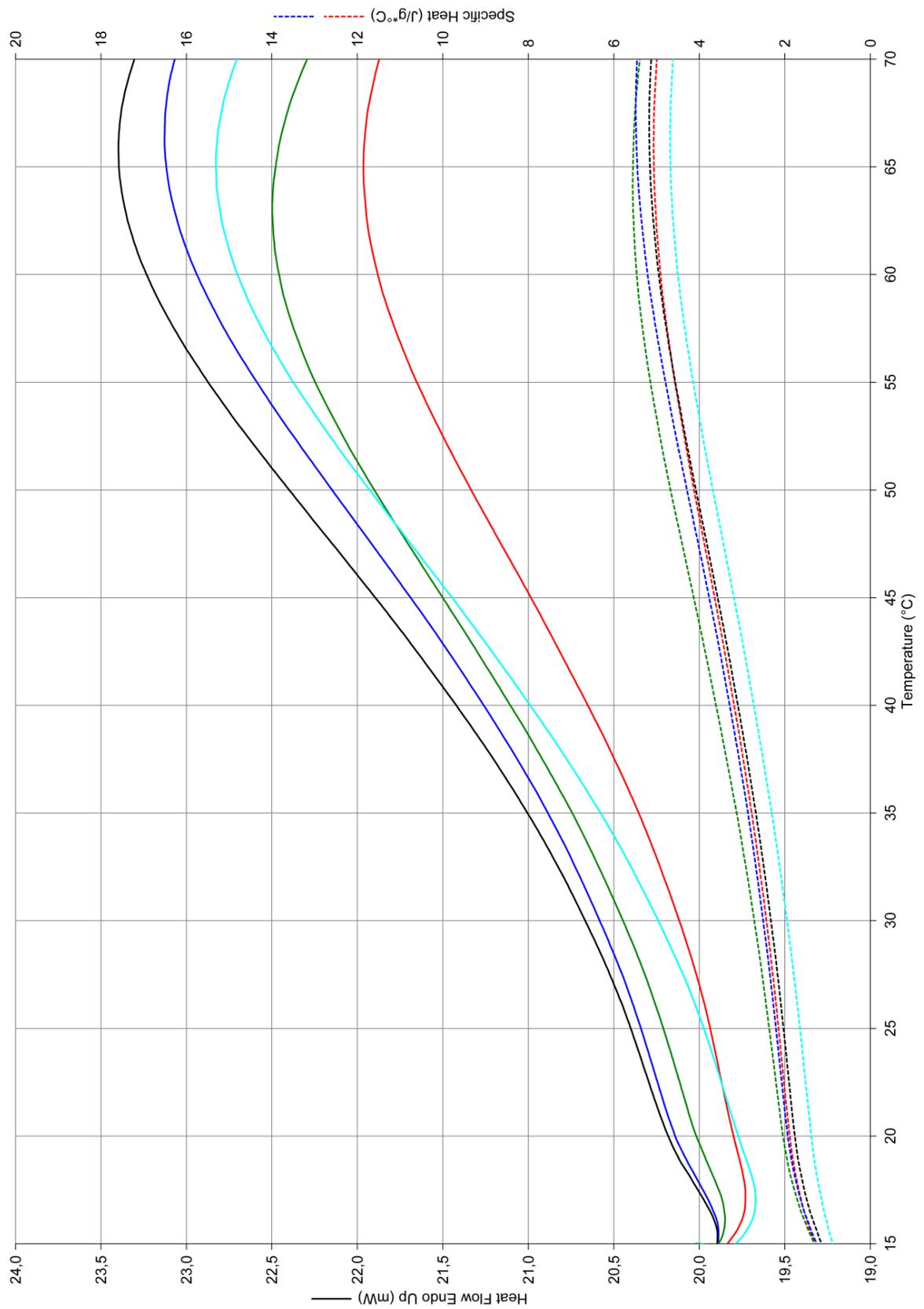


Bild-A 14: DSC-Kurven vom Buchenstaub zur Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität – Messung 1 Rot, Messung 2 Blau, Messung 3 Grün, Messung 4 Cyan, Messung 5 Schwarz

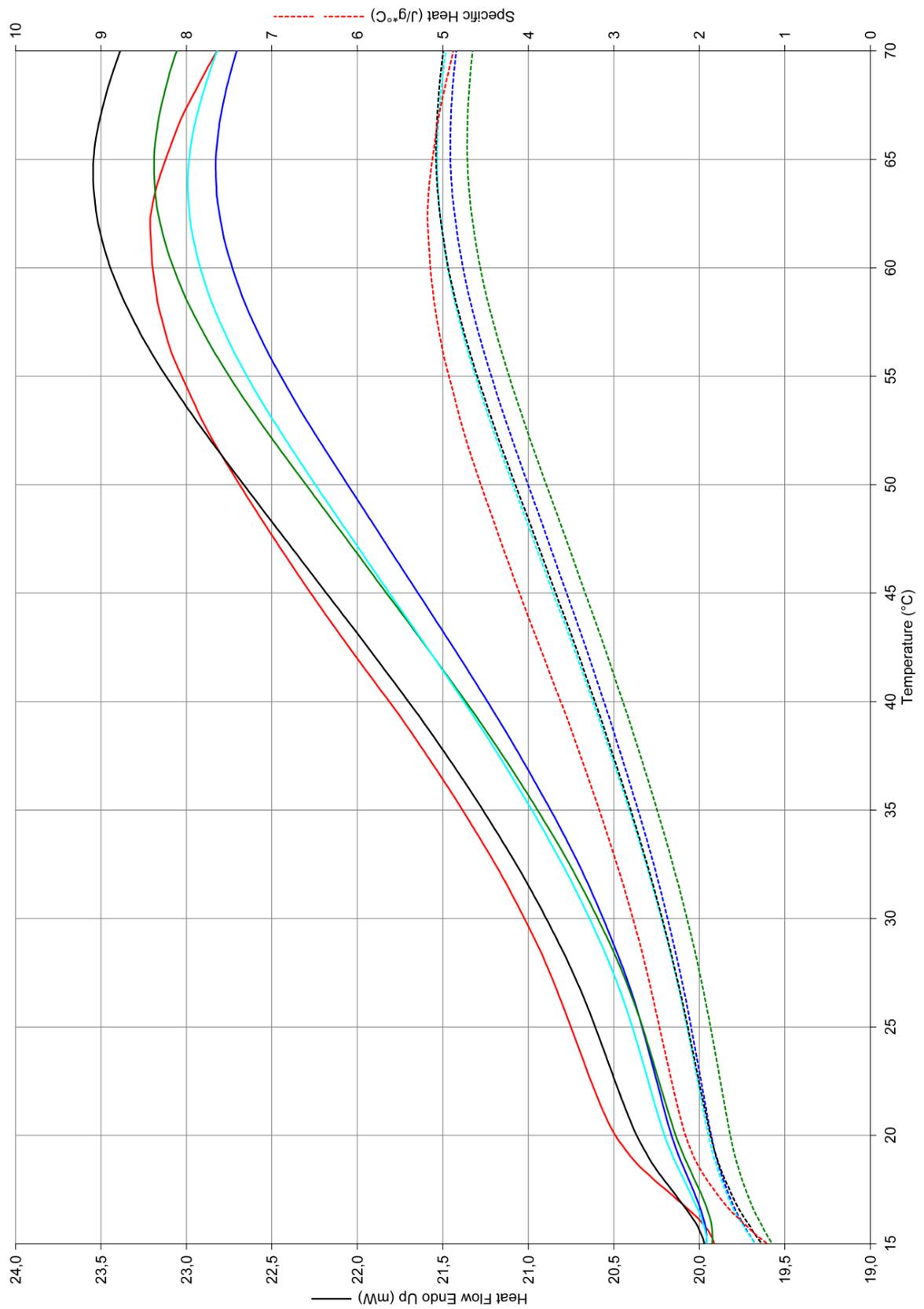


Bild-A 15: DSC-Kurven vom Yellow Pine Staub zur Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität – Messung 1 Rot, Messung 2 Blau, Messung 3 Grün, Messung 4 Cyan, Messung 5 Schwarz

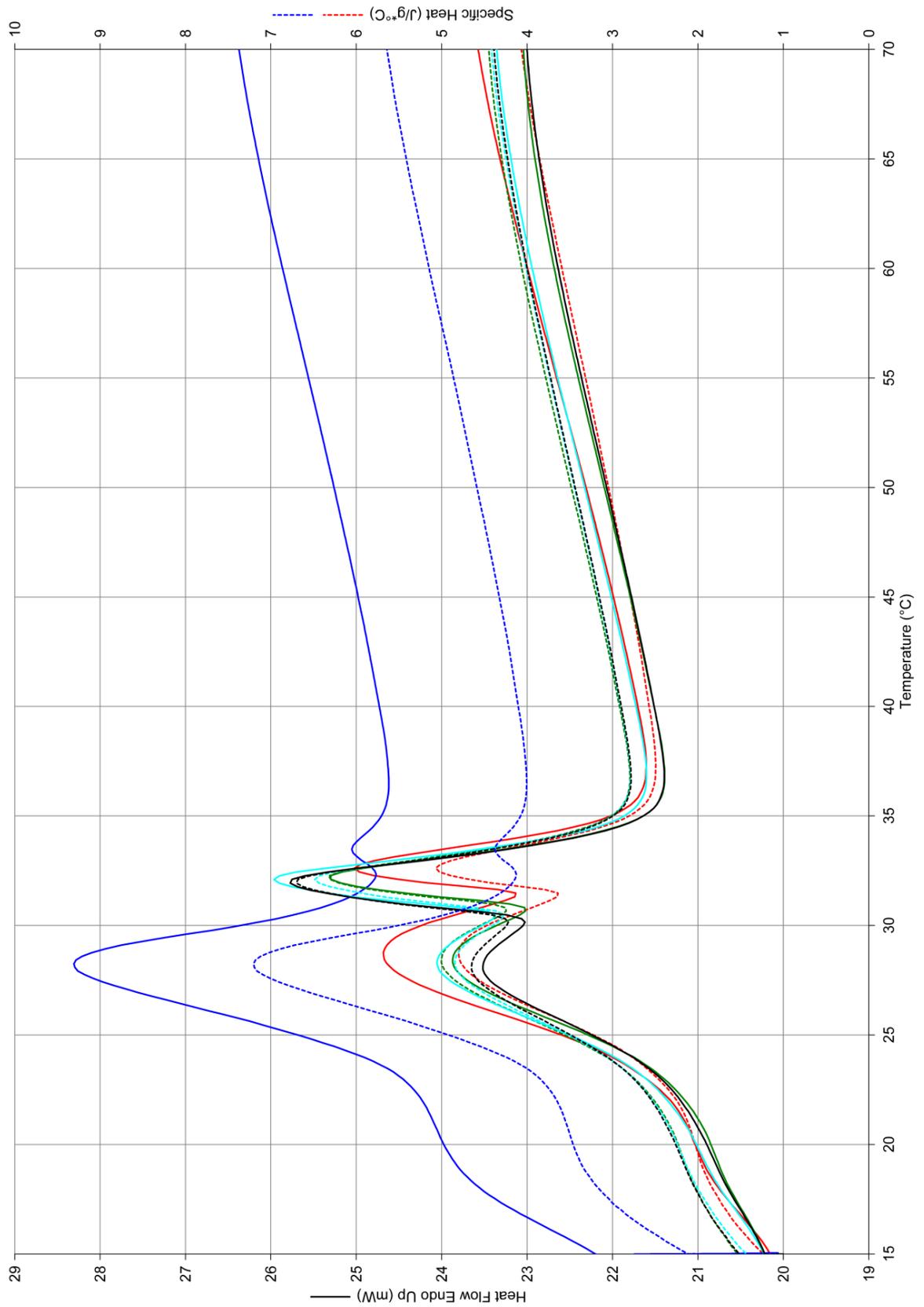


Bild-A 16: DSC-Kurven vom Kakaopulver zur Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität – Messung 1 Rot, Messung 2 Blau, Messung 3 Grün, Messung 4 Cyan, Messung 5 Schwarz

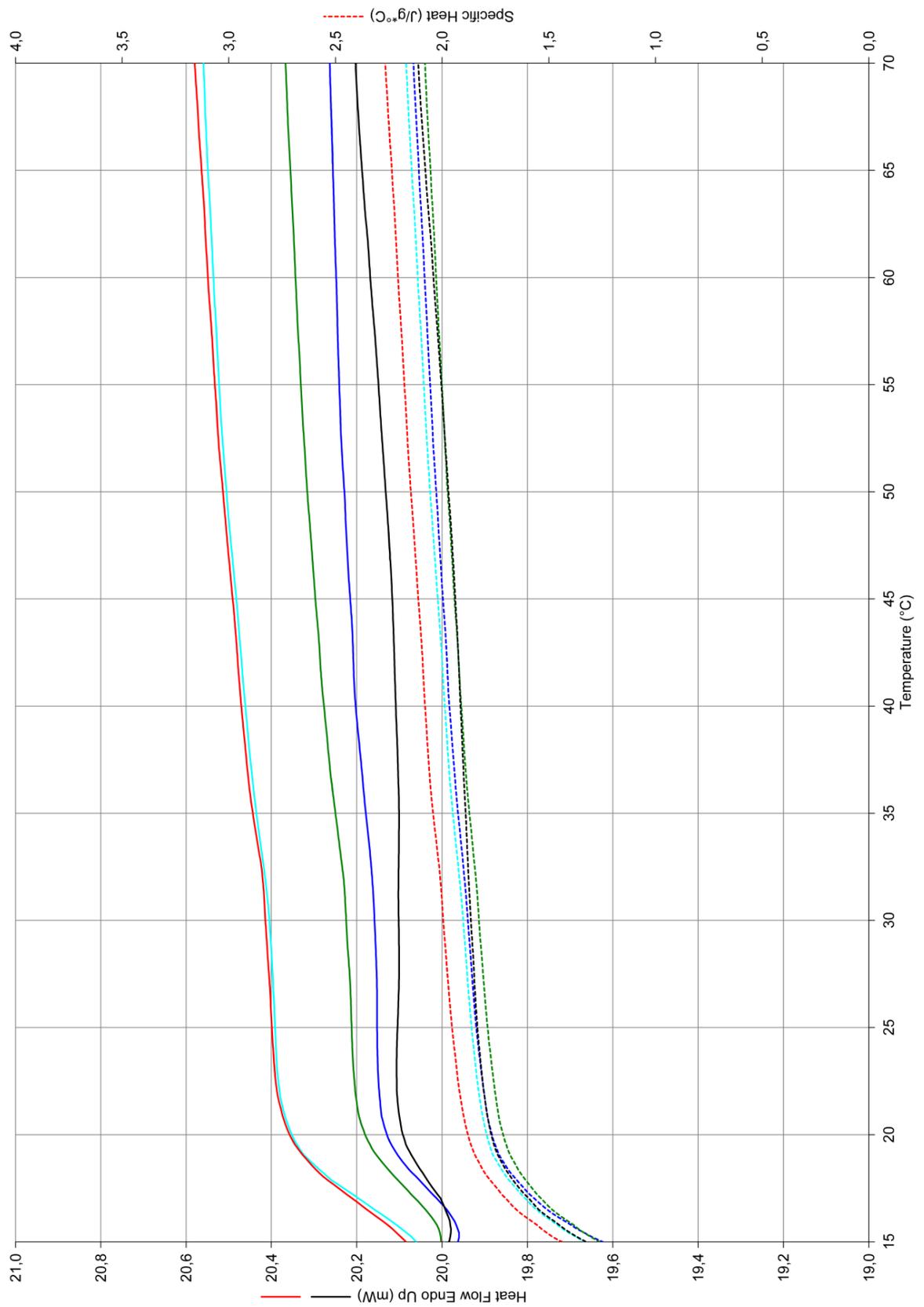


Bild-A 17: DSC-Kurven vom Gummiabrieb zur Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität – Messung 1 Rot, Messung 2 Blau, Messung 3 Grün, Messung 4 Cyan, Messung 5 Schwarz

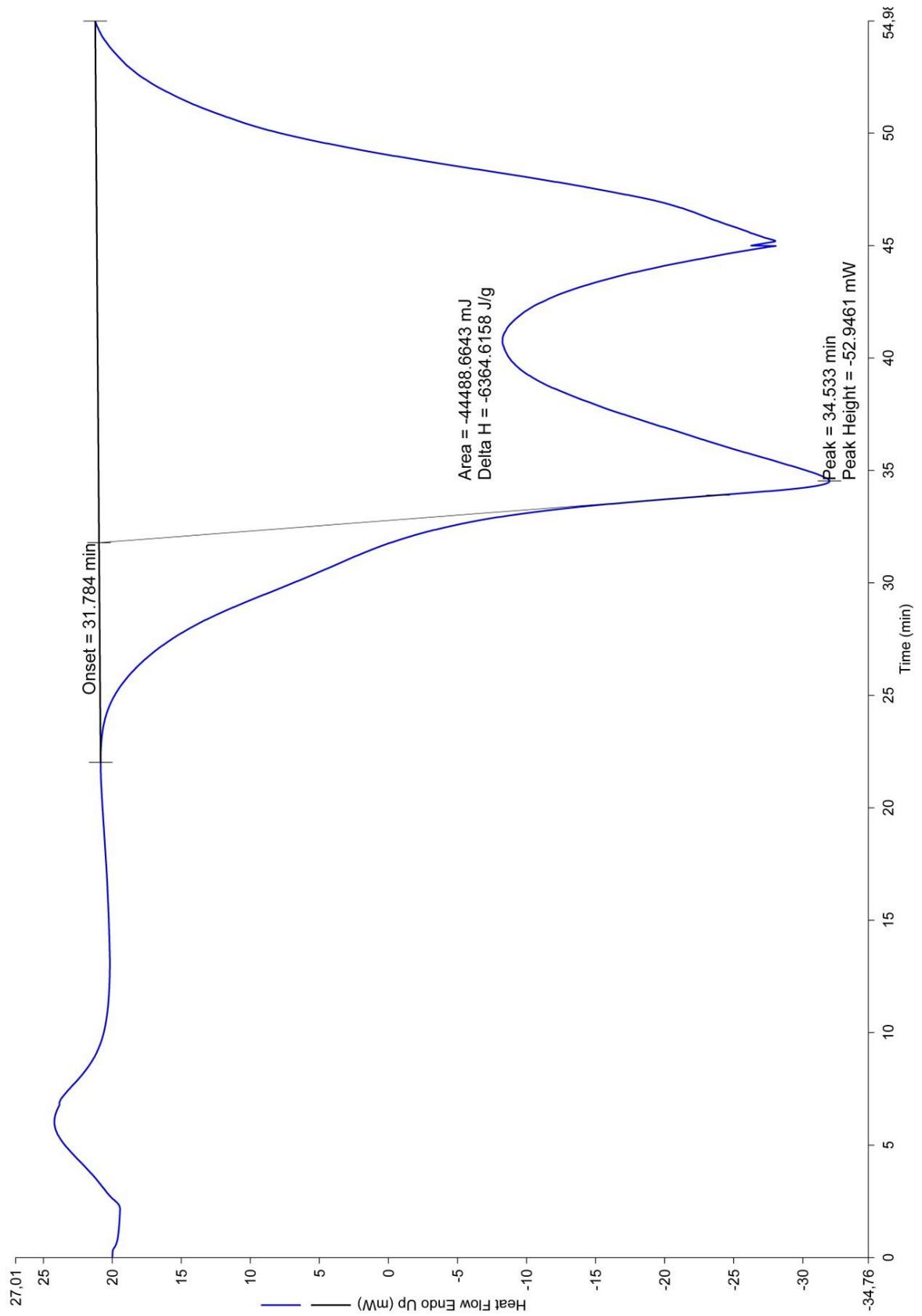


Bild-A 18: DSC-Analyse zur Bestimmung der Reaktionsenthalpie von Buchenstaub; Messung 1

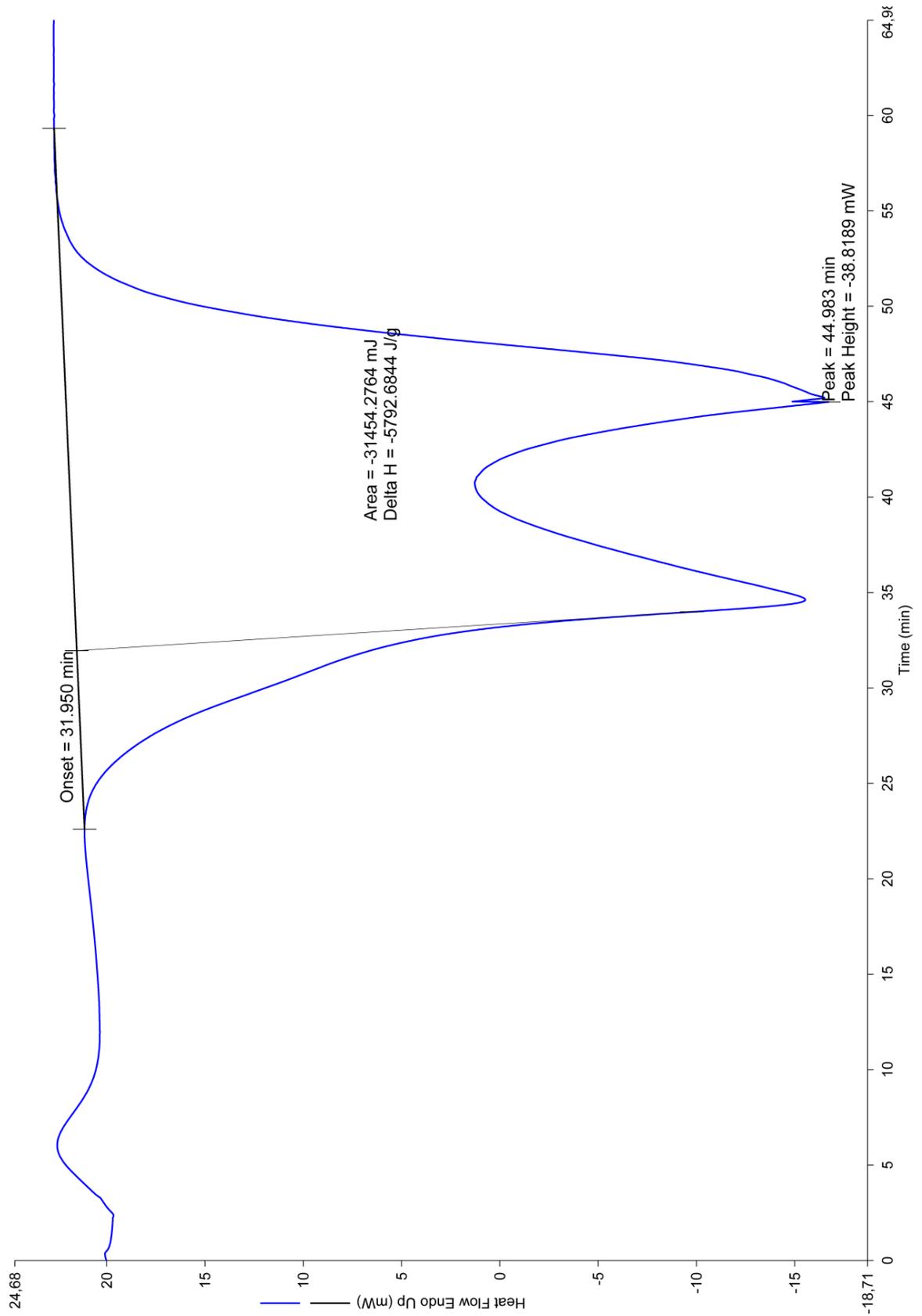


Bild-A 19: DSC-Analyse zur Bestimmung der Reaktionsenthalpie von Buchenstaub; Messung 2

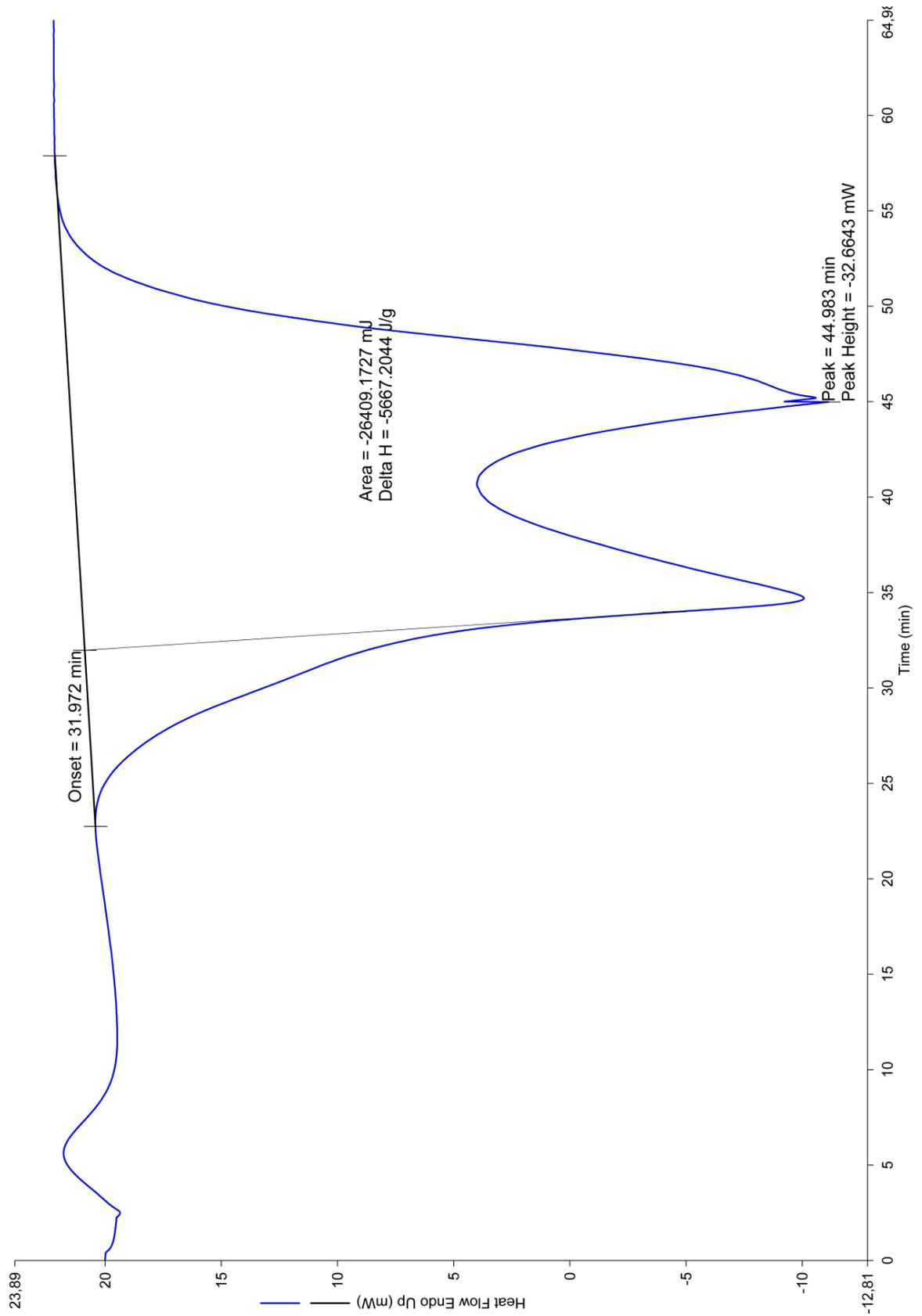


Bild-A 20: DSC-Analyse zur Bestimmung der Reaktionsenthalpie von Buchenstaub; Messung 3

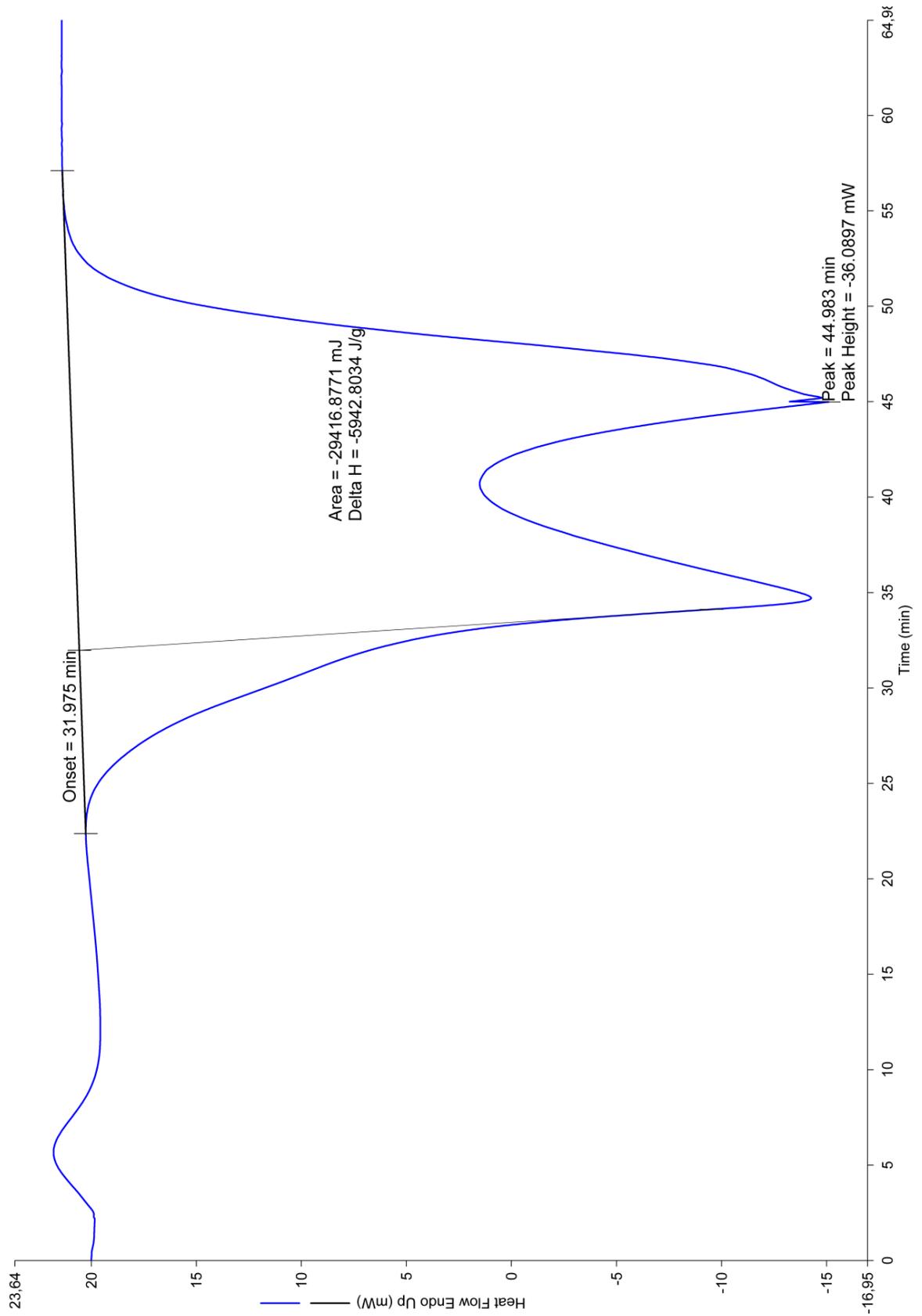


Bild-A 21: DSC-Analyse zur Bestimmung der Reaktionsenthalpie von Buchenstaub; Messung 4

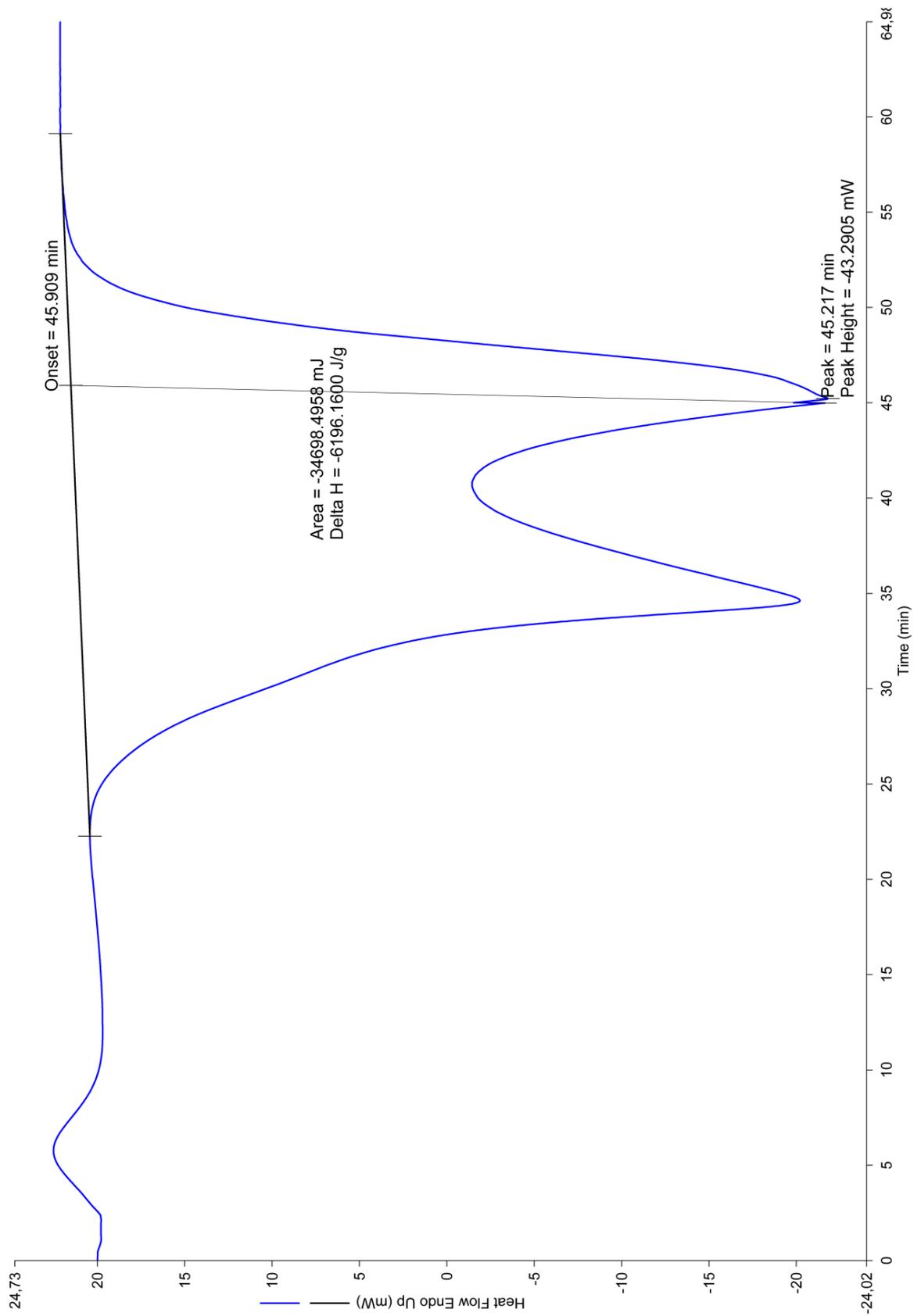


Bild-A 22: DSC-Analyse zur Bestimmung der Reaktionsenthalpie von Buchenstaub; Messung 5

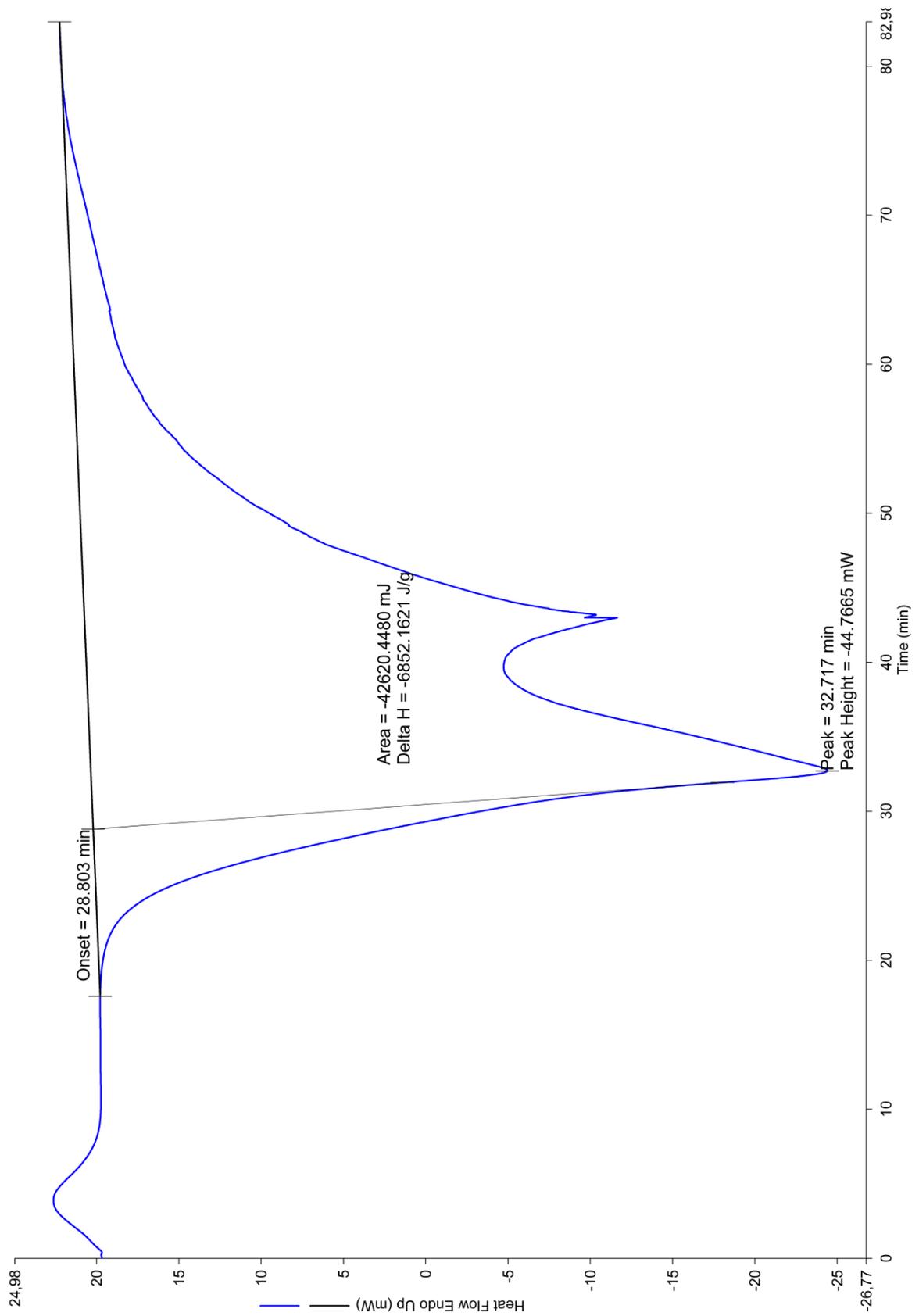


Bild-A 23: DSC-Analyse zur Bestimmung der Reaktionsenthalpie von Yellow Pine Staub; Messung 1

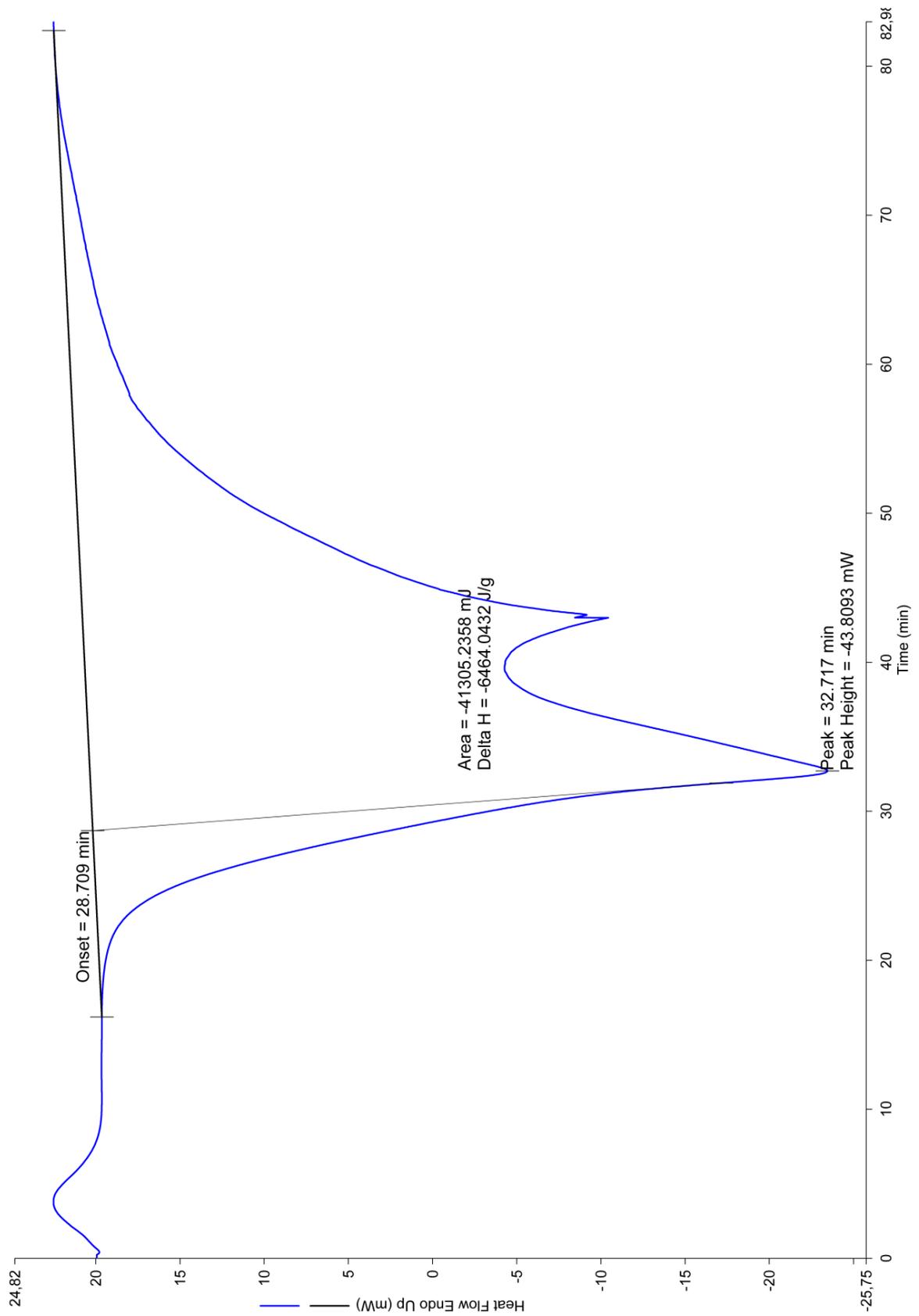


Bild-A 24: DSC-Analyse zur Bestimmung der Reaktionsenthalpie von Yellow Pine Staub; Messung 2

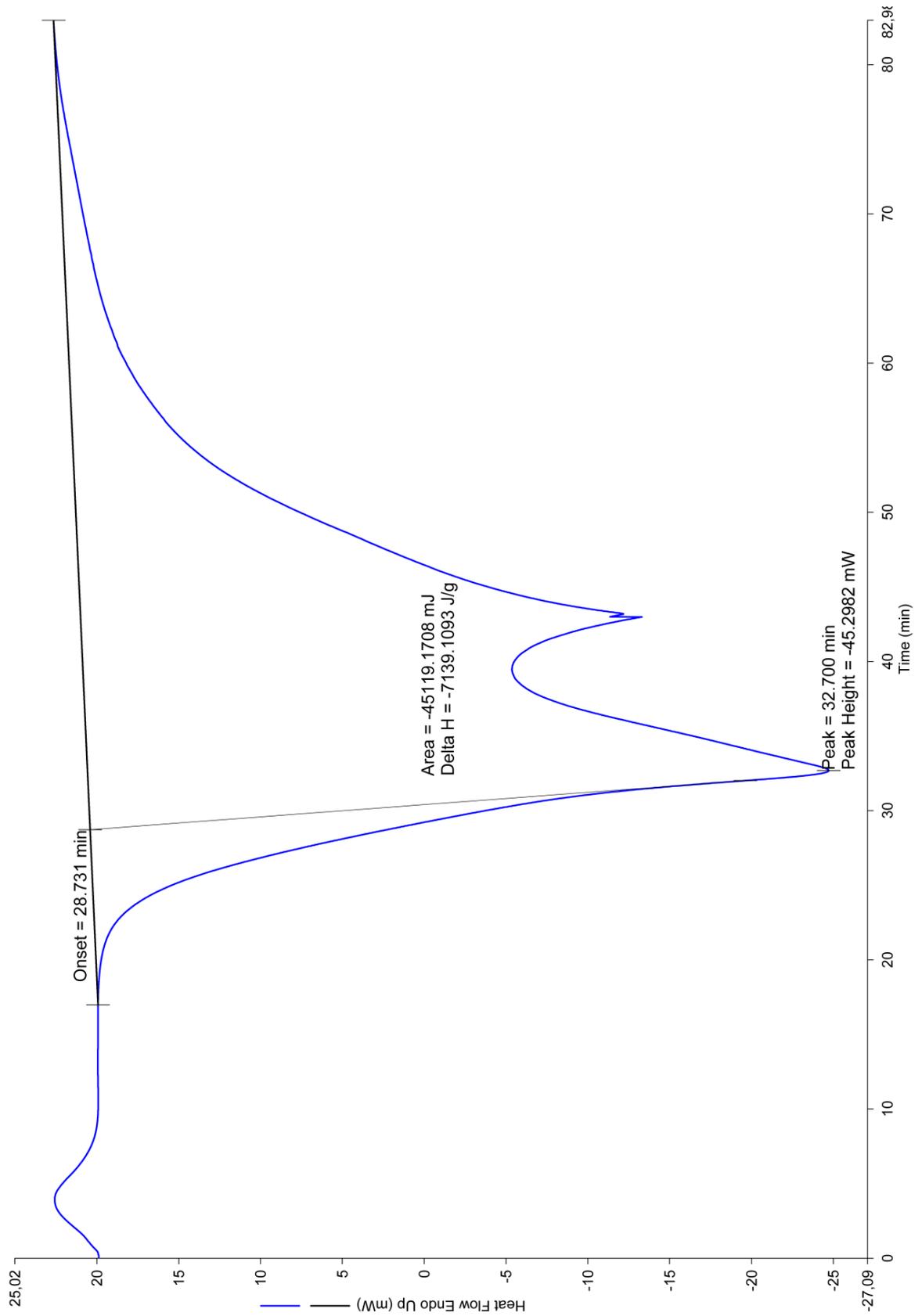


Bild-A 25: DSC-Analyse zur Bestimmung der Reaktionsenthalpie von Yellow Pine Staub; Messung 3

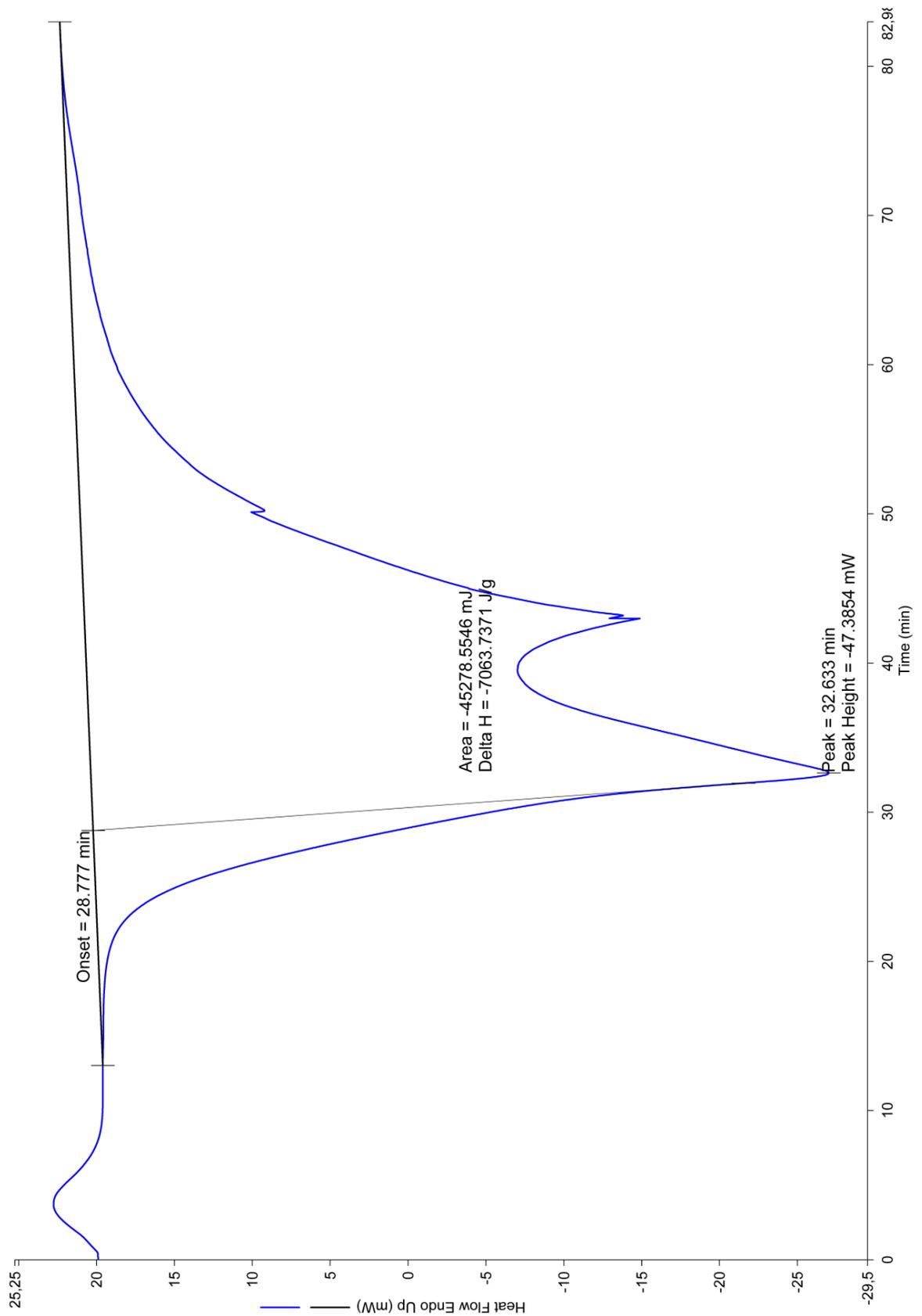


Bild-A 26: DSC-Analyse zur Bestimmung der Reaktionsenthalpie von Yellow Pine Staub; Messung 4

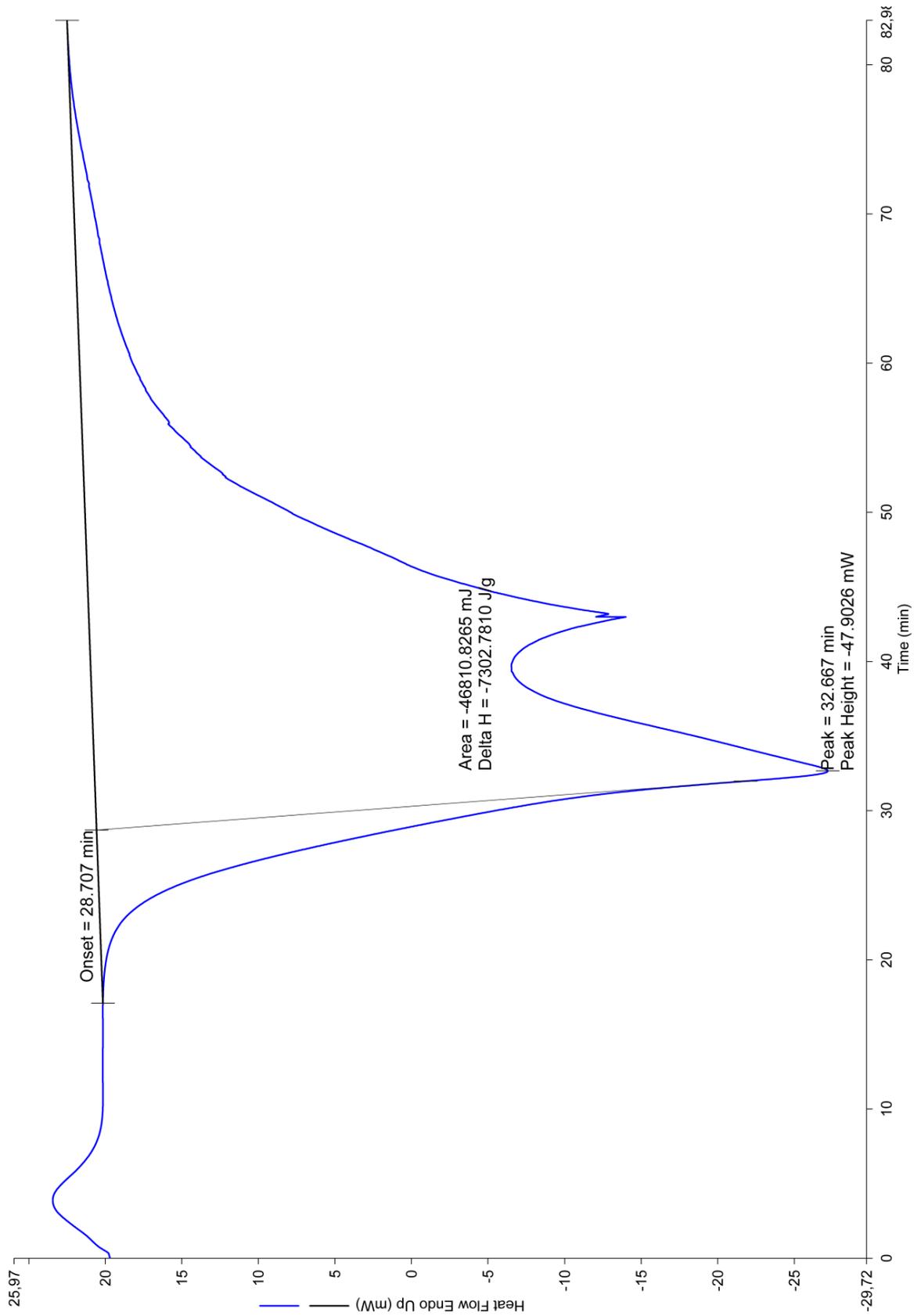


Bild-A 27: DSC-Analyse zur Bestimmung der Reaktionsenthalpie von Yellow Pine Staub; Messung 5

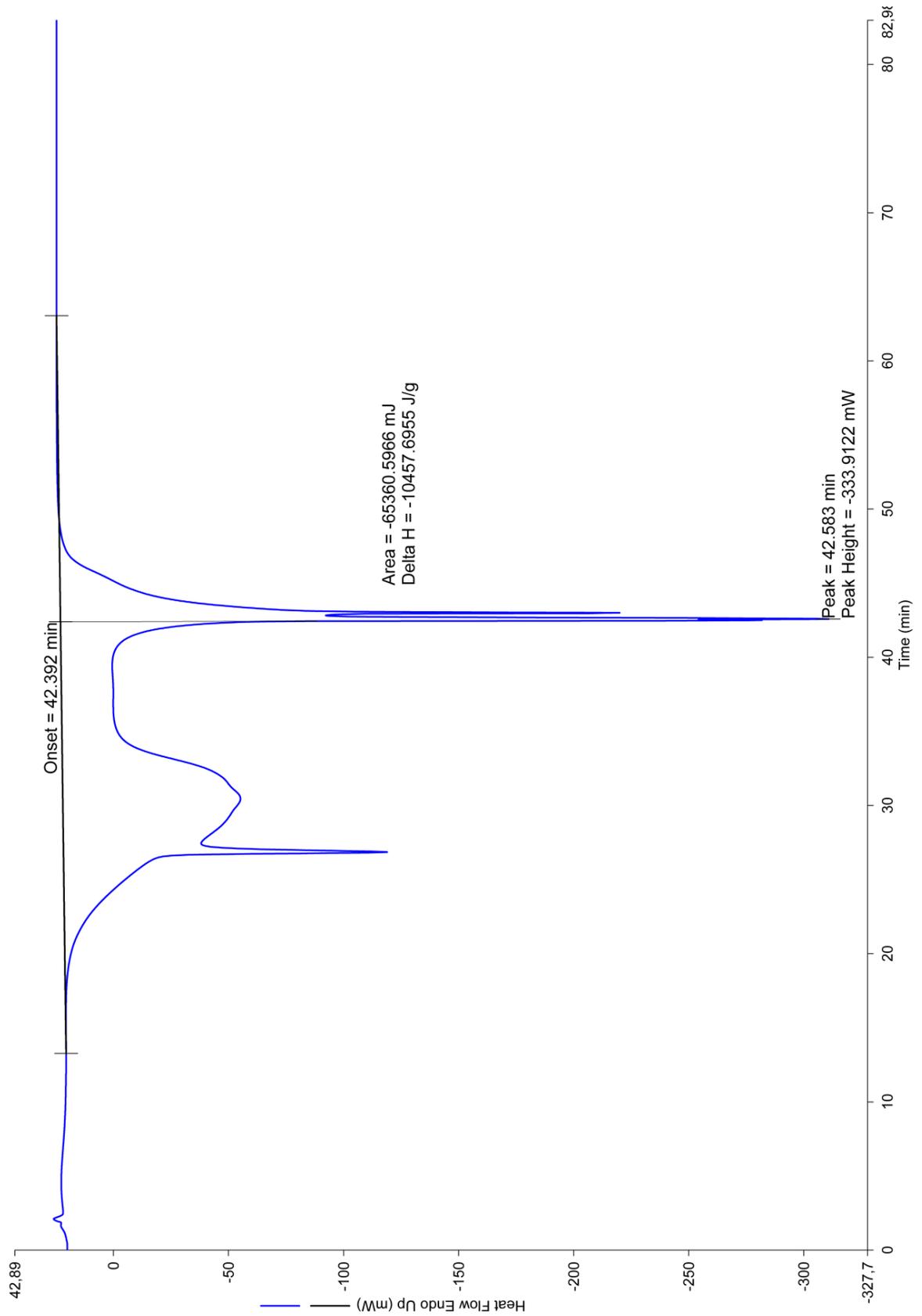


Bild-A 28: DSC-Analyse zur Bestimmung der Reaktionsenthalpie von Kakaopulver; Messung 1

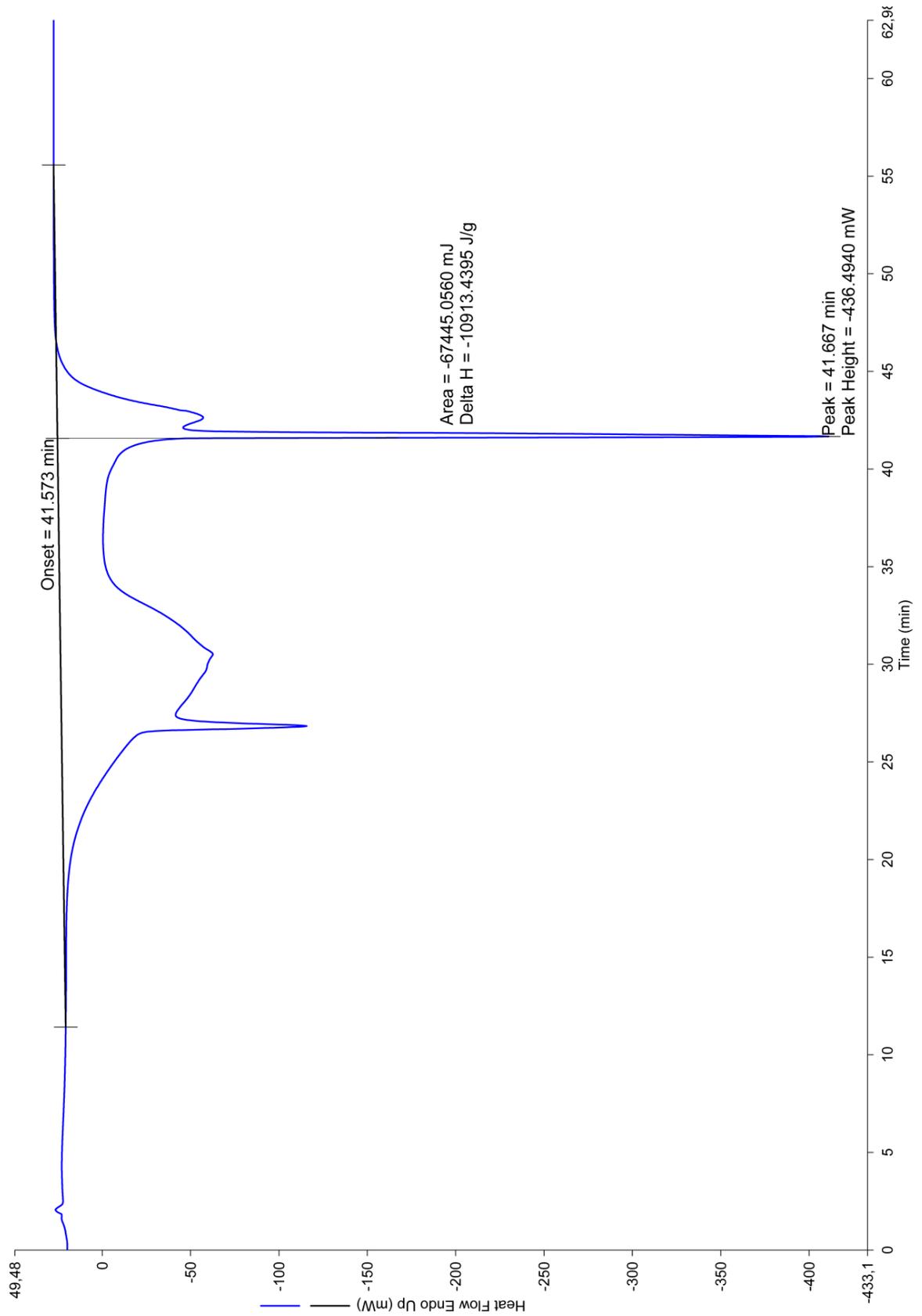


Bild-A 29: DSC-Analyse zur Bestimmung der Reaktionsenthalpie von Kakaopulver; Messung 2

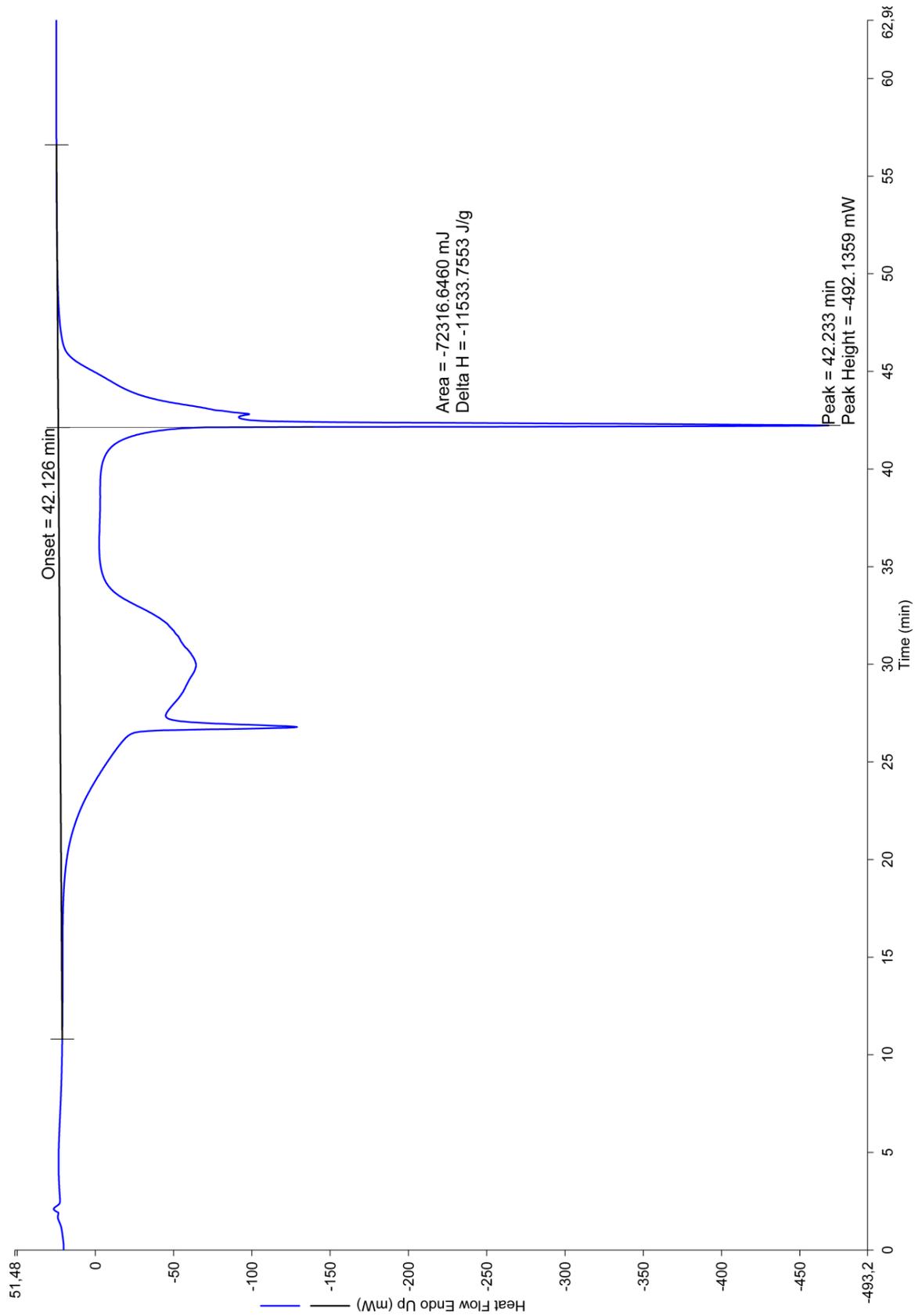


Bild-A 30: DSC-Analyse zur Bestimmung der Reaktionsenthalpie von Kakaopulver; Messung 3

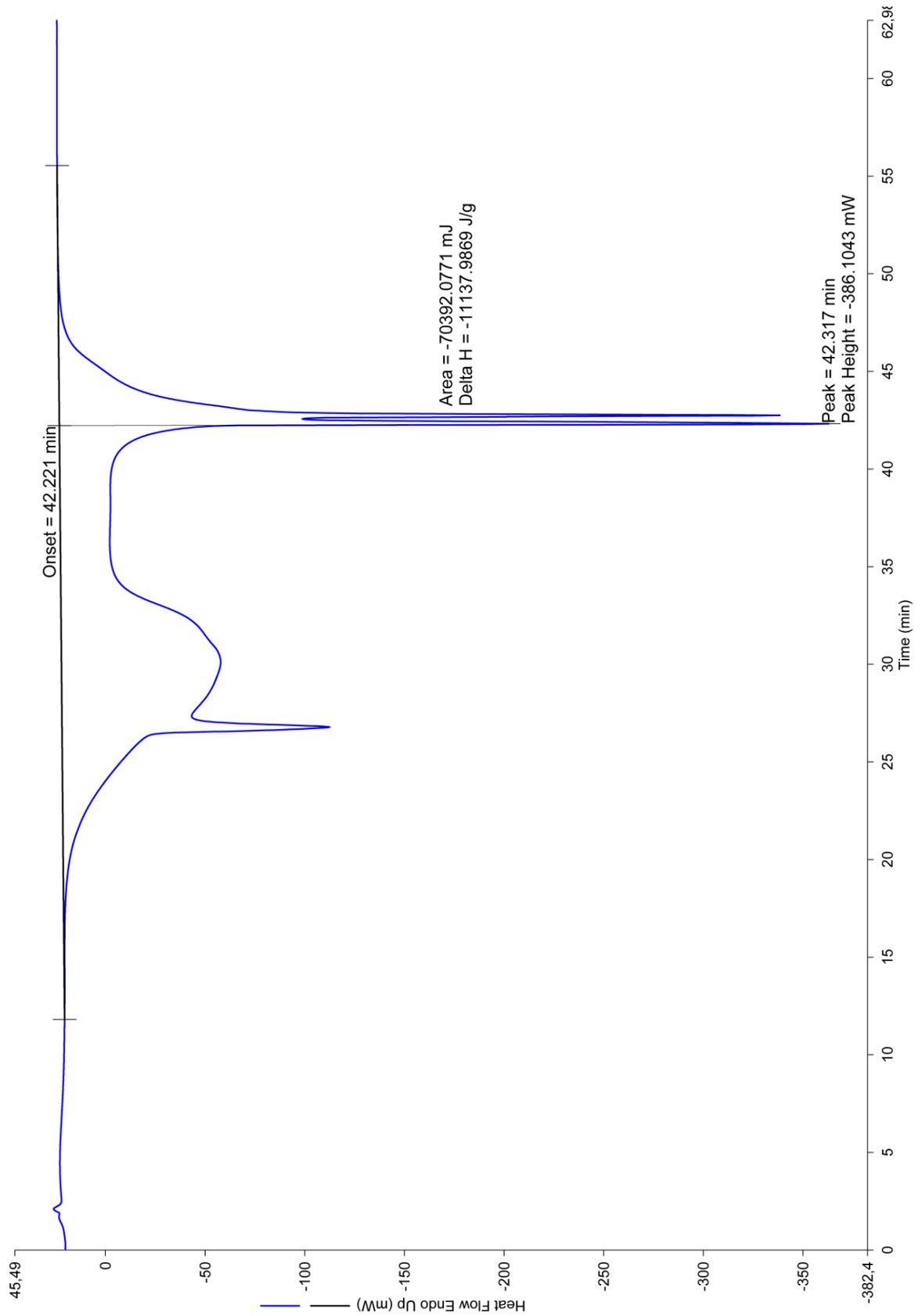


Bild-A 31: DSC-Analyse zur Bestimmung der Reaktionsenthalpie von Kakaopulver; Messung 4

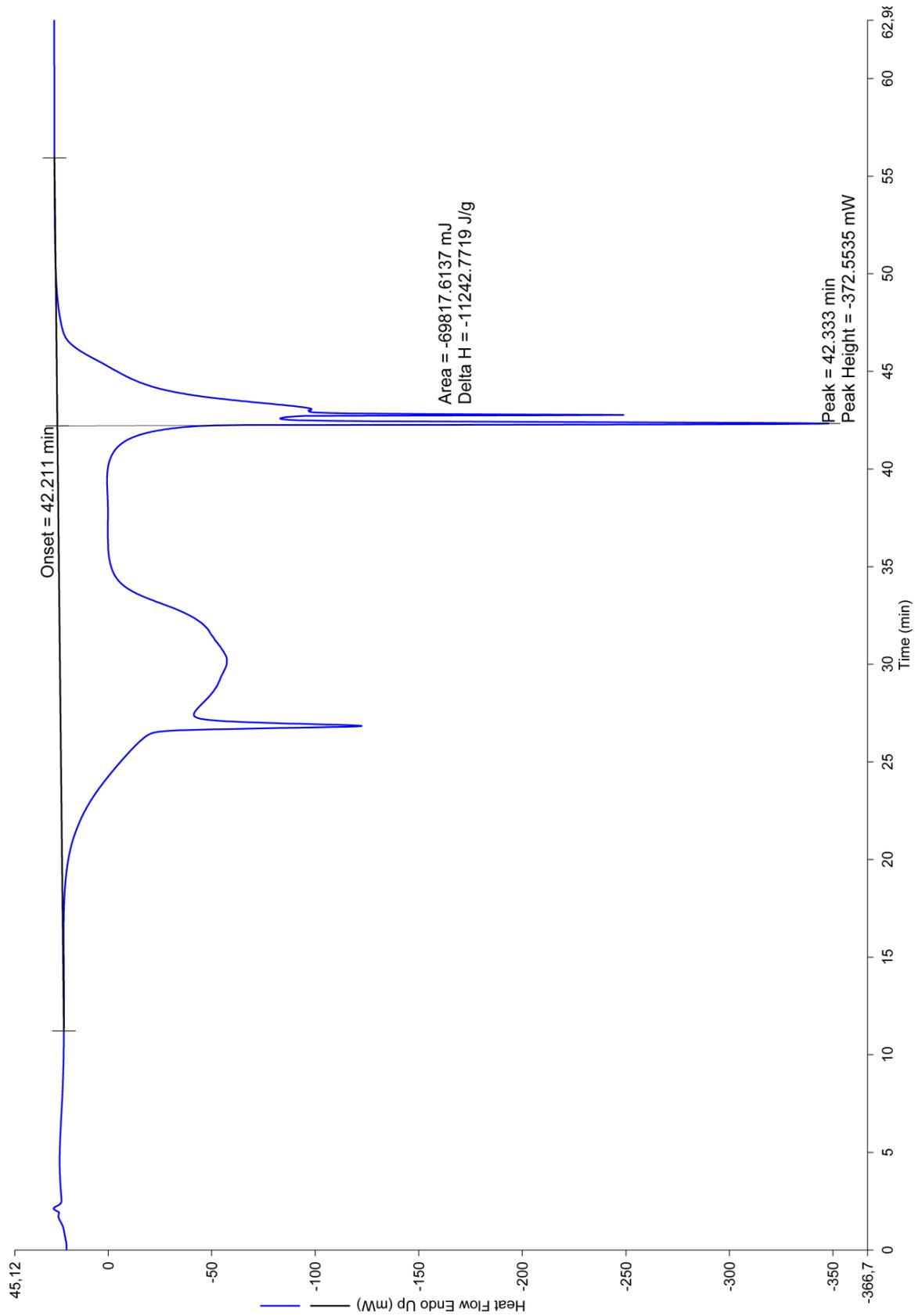


Bild-A 32: DSC-Analyse zur Bestimmung der Reaktionsenthalpie von Kakaopulver; Messung 5

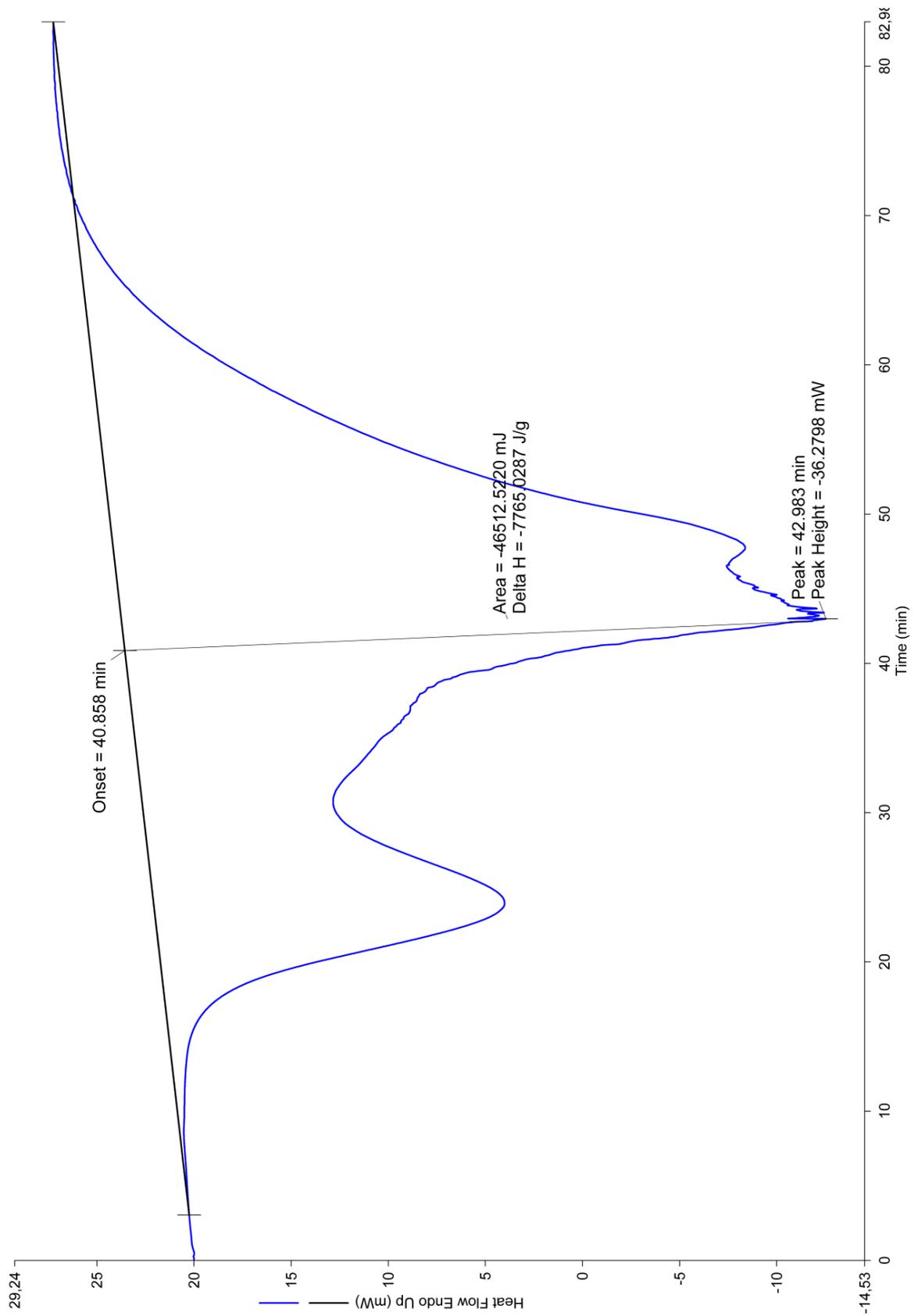


Bild-A 33: DSC-Analyse zur Bestimmung der Reaktionsenthalpie von Gummiabrieb; Messung 1

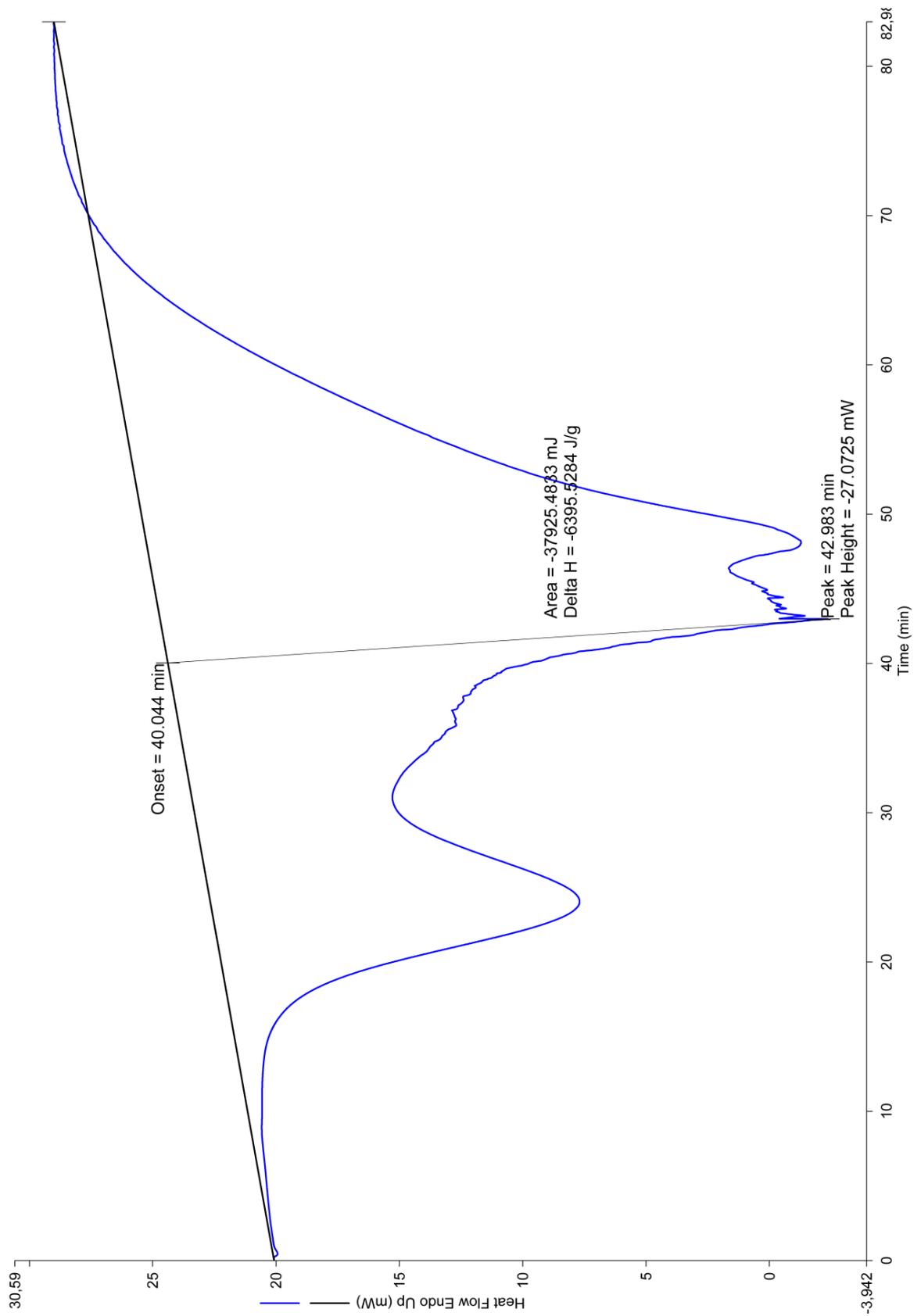


Bild-A 34: DSC-Analyse zur Bestimmung der Reaktionsenthalpie von Gummiabrieb; Messung 2

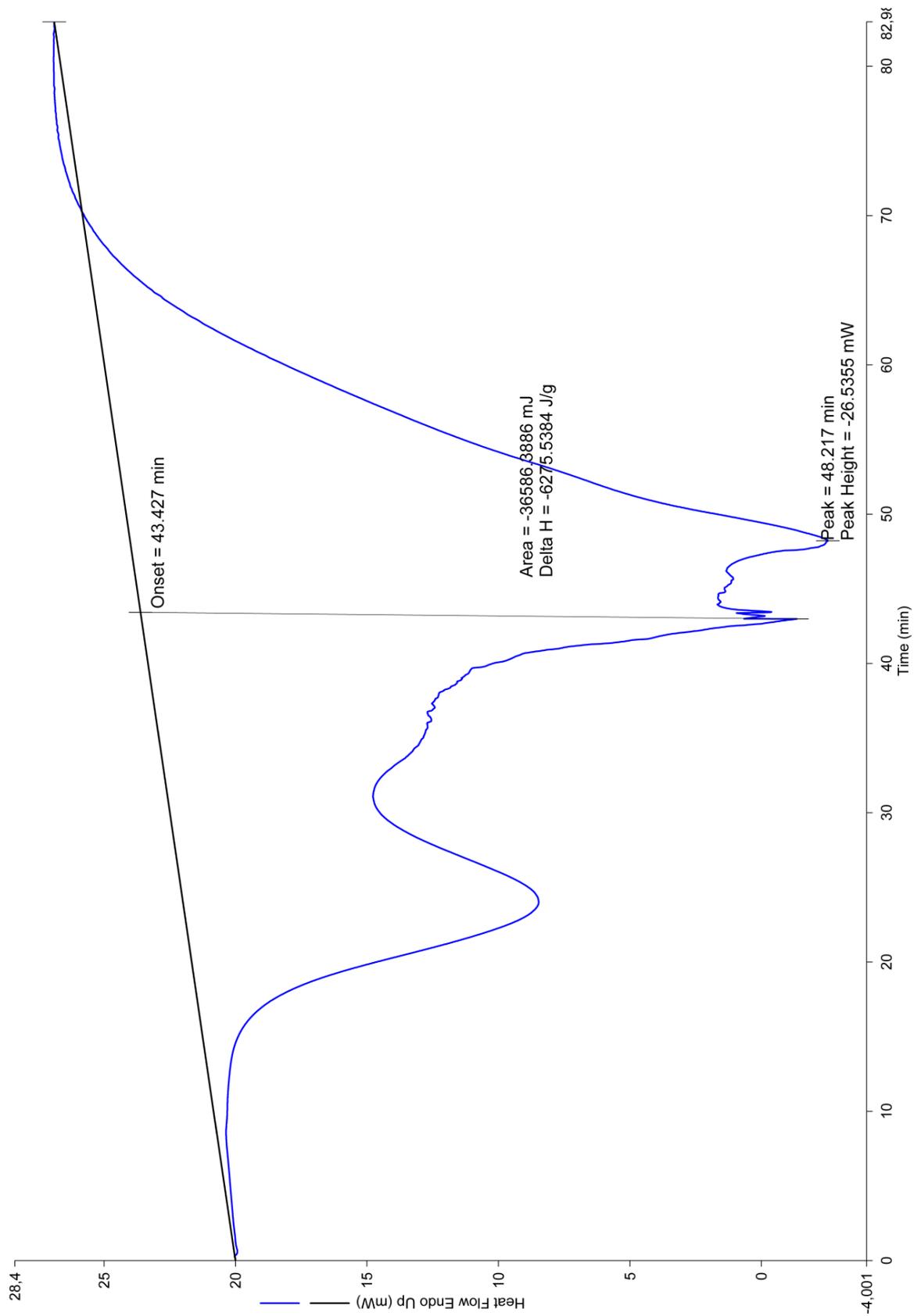


Bild-A 35: DSC-Analyse zur Bestimmung der Reaktionsenthalpie von Gummiabrieb; Messung 3

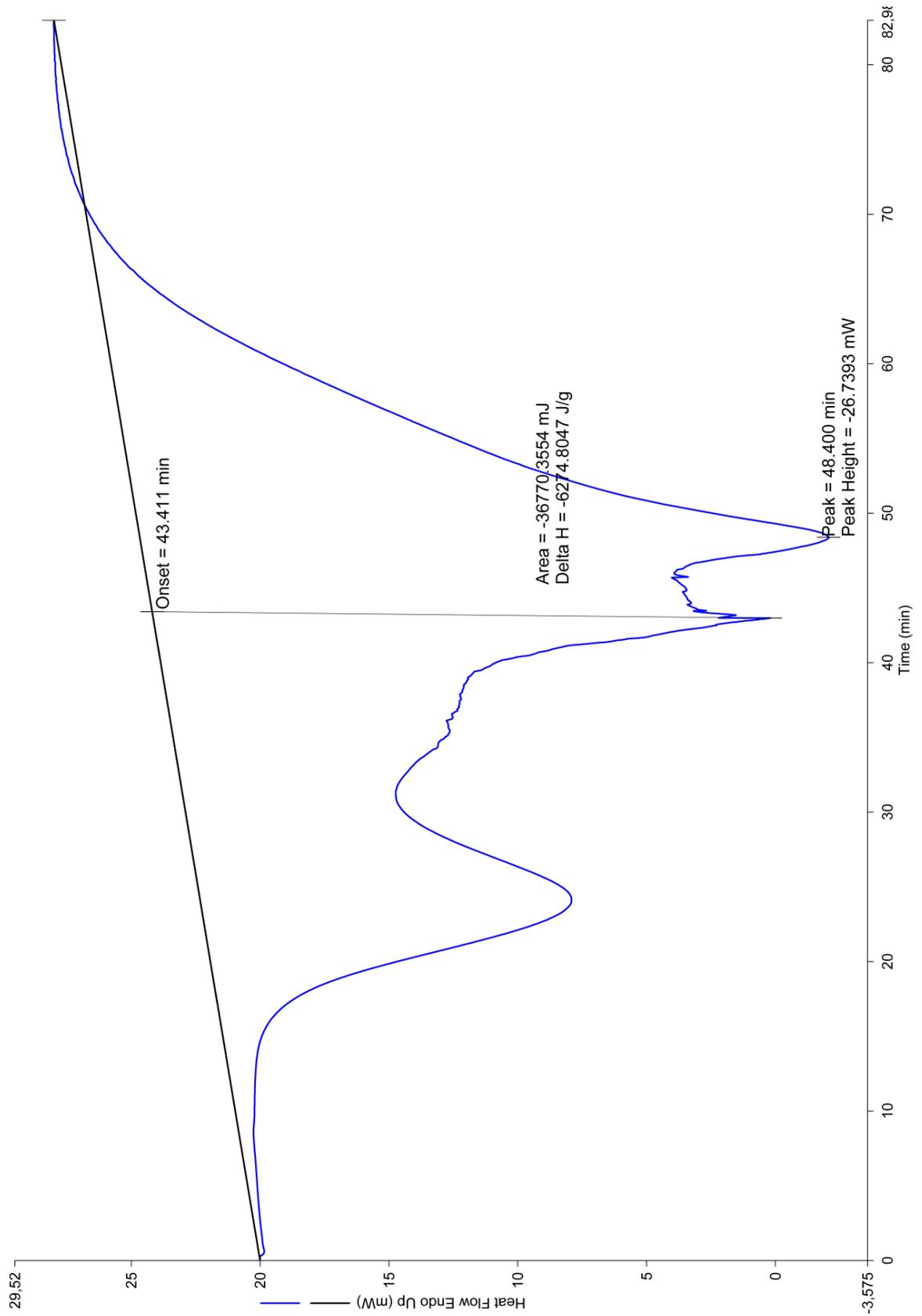


Bild-A 36: DSC-Analyse zur Bestimmung der Reaktionsenthalpie von Gummiabrieb; Messung 4

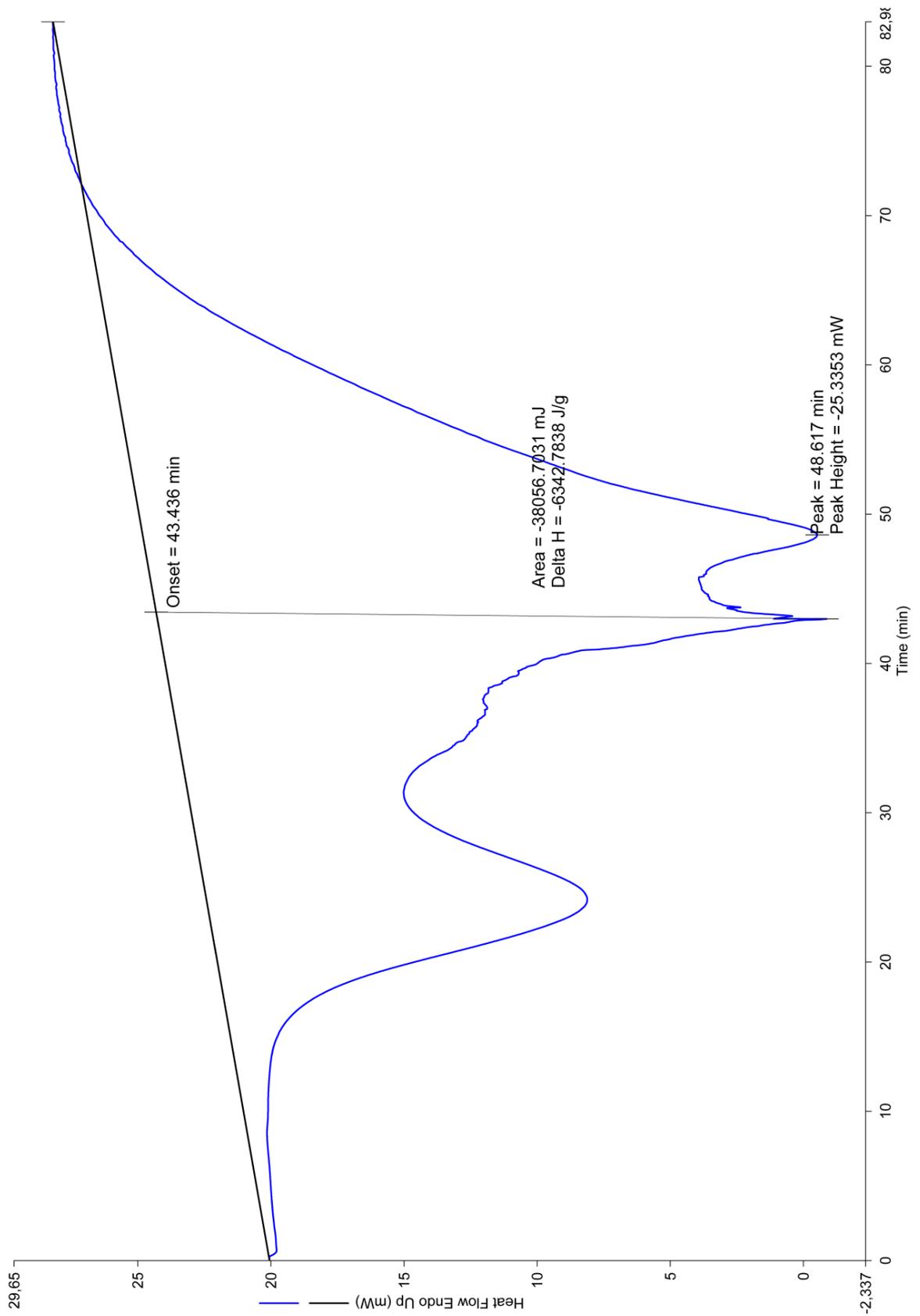


Bild-A 37: DSC-Analyse zur Bestimmung der Reaktionsenthalpie von Gummiabrieb; Messung 5

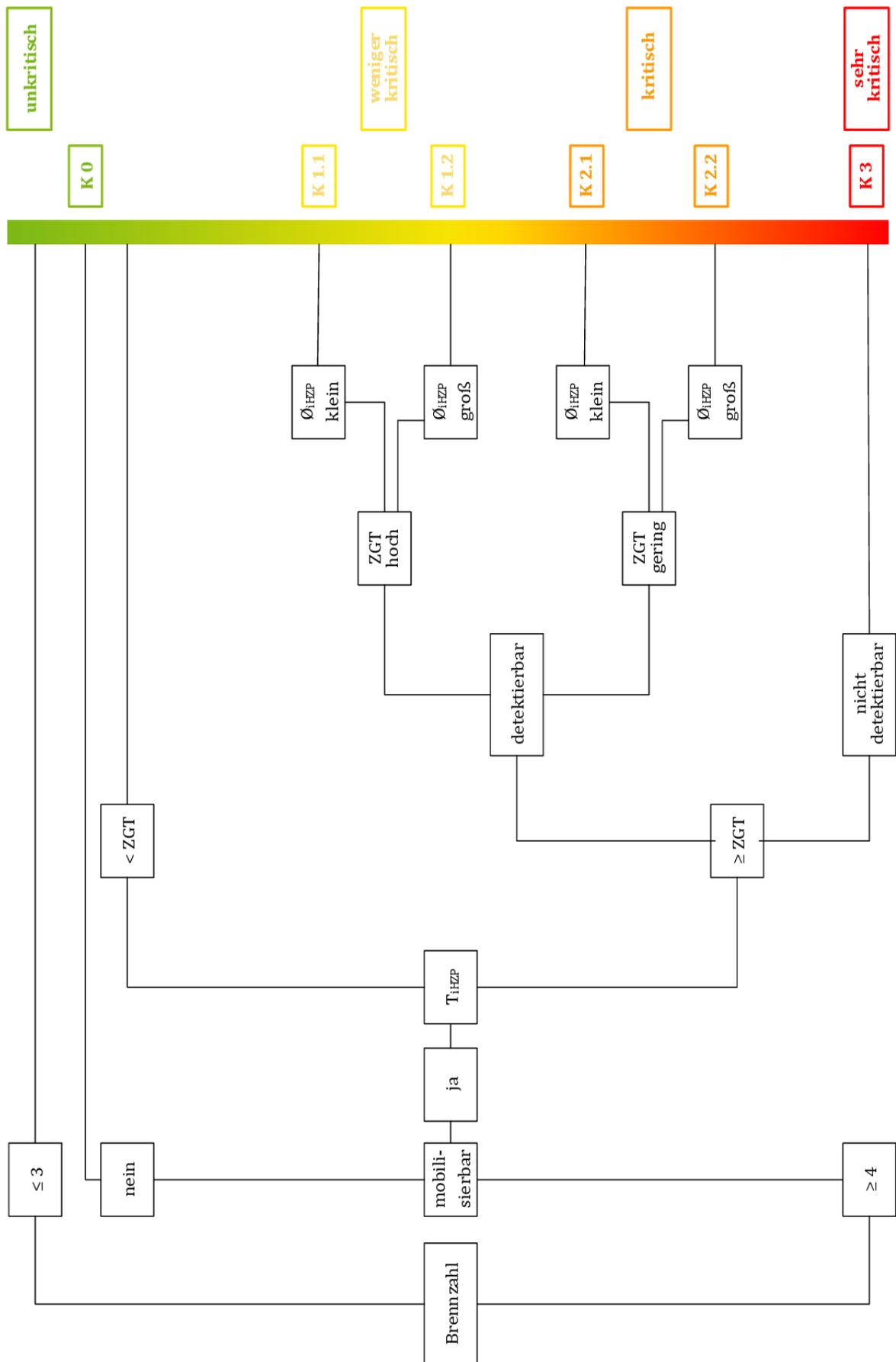


Bild-A 38: Kritikalitätsgraph

## Anhang B Zündwirksamkeitsversuche mit Heizdraht

Im Anhang B wird der Demonstrator einer Versuchsapparatur zur reproduzierbaren Herstellung von inerten heißen Partikeln mittels elektrischer Gleichspannung behandelt. Dieser Demonstrator entstand zum Ende des Promotionsvorhabens und stellt im Kontext der vorliegenden Dissertation einen Exkurs für eine mögliche Prüfapparatur zur Bewertung des Zündverhaltens von Staubschichten durch inerte heiße Partikeln dar.

Vorherige Untersuchungen zur Zündwirksamkeit von heißen metallischen Kugeln ließen auf einen Zusammenhang zwischen Kugeltemperatur und ihrer gespeicherten Energie schließen, wobei zündwirksame kleinere Kugeln eine geringere Energie aufweisen als größere zündunwirksame Kugeln (vgl. Bild 12 und [Hadden et al. 2011]). Aus diesen Beobachtungen und aus der Auswertung der ersten Zündwirksamkeitsversuche der Kugeln entstanden die Fragen:

- Welchen Wärmestrom muss ein inertes heißes Partikel abgeben, damit sich die Staubschicht entzündet?
- Ist ein kritischer Wärmestrom vorhanden, der nicht von der Größe des inerten heißen Partikels abhängig ist?

Die oben beschriebenen Ergebnisse der flächenbezogenen Partikelenergie (vgl. Kapitel 5.1.2.4) untermauern diese Frage und lassen vermuten, dass ein partikelform- und größenunabhängiger, kritischer Wärmestrom existiert. Die Bestimmung des Wärmestromes, der von den iHZP auf die Staubprobe übergeht, ist bei den durchgeführten Versuchen nicht möglich. Für die mathematische Bestimmung des Wärmestromes stehen zwar die Formeln, die aus Kapitel 2.3 bekannt sind, zur Verfügung, jedoch sind zu viele Parameter unbekannt bzw. müssten abgeschätzt werden. Zu diesen gehören beispielsweise die Einsinktiefe der Partikeln in den Staub und damit die Kontaktfläche zwischen Partikeln und der Staubschicht oder der Wärmeübergangskoeffizient für den konvektiven Wärmestrom vom Partikel.

Daher wurde eine Methode gesucht, den Wärmestrom einfacher bestimmen zu können. Als Möglichkeiten stehen elektrische Heizpatronen, elektrische Widerstandsdrähte oder andere elektrisch erwärmte Partikeln zur Verfügung. Die Nutzung des elektrischen Stromes ist sinnvoll, da der abgebende Wärmestrom einem Widerstandsdraht oder einer Heizpatrone der elektrischen Leistung dieses Bauteils entspricht. Darüber hinaus ist es ratsam, diese Leistung mittels Gleichstroms zu erzeugen, um eine ungewollte Minderung der elektrischen Leistung durch Induktionsvorgänge zu verhindern. Beide Bauteile (Widerstandsdraht und Heizpatrone) erlauben die Anlegung reproduzierbarer Spannungen, die dann reproduzierbare Temperaturen ergeben.

Für die hier beschriebenen ersten durchgeführten Versuche wurde die Verwendung eines Widerstandsdrahtes, im Weiteren als Heizdraht (Hd) bezeichnet, beschlossen. Die Gründe hierfür sind:

- Die zurzeit auf dem Markt erhältlichen Heizpatronen sind von ihren Abmessungen im Verhältnis zur Staubschichtstärke von 15 mm zu groß.

- Der erwärmte Bereich eines Hd kann leichter individuell angepasst werden als der von Heizpatronen.
- Die Beschaffung und der Versuchsaufbau mit einem Hd sind wesentlich leichter realisierbar und günstiger als mit anders geformten Partikeln.
- Es können leichter unterschiedliche Längen des Hd untersucht werden.
- Im Schadensfall durch ein Durchbrennen einer Heizpatrone oder eines Hd ist ein neuer Hd schneller beschafft und die Beschaffungskosten sind geringer.

Ziel der Versuche ist es, neben der Bestimmung des kritischen Wärmestromes eine Korrelation zwischen Wärmestrom und Temperatur zu erhalten, die zur Entzündung der Staubschicht führt. Der kritische Wärmestrom wird als Wärmestrom definiert, der gerade noch einen Staubbrand initiiert. Als Zündkriterium wird, wie bei den Versuchen mit iHZP, die Entstehung eines Schwelbrandes angesetzt. Des Weiteren wird die Möglichkeit der Entzündung bewertet, die Bestimmung von Zündwahrscheinlichkeiten erfolgt nicht.

Aus dieser Versuchsidee ergibt sich eine weitere Forschungsfrage:

- Erfolgt die Entzündung der Staubschicht aufgrund der am Hd anliegenden Spannung oder aufgrund seiner Temperatur?

## **B.1 Versuchsaufbau und Beschreibung des Demonstratorverfahrens**

Für die Versuche wurde eine Apparatur entwickelt, welche der Platindraht-Apparatur ähnelt, die als Zündquelle der Brennzahlprüfung gemäß [VDI 2263 Blatt 1] genutzt wird. Sie ist noch nicht ausgereift und bedarf einer Weiterentwicklung bzw. Optimierung. Anders als bei der Platindraht-Apparatur wird nicht die Stromstärke, sondern die elektrische Spannung des Hd am Apparat angezeigt. Diese neue Heizdraht-Apparatur (HdA) wird mit normaler Netzspannung von 230 V betrieben. Damit eine Grundlast erreicht wird, wurden Vorwiderstände (R1) mit 47  $\Omega$  verbaut. Die Regelung der Leistung am Hd erfolgt mittels eines Drahtpotentiometers mit einem frei einstellbaren Widerstand (R2) von 470  $\Omega$ . Da der Hd einen kleinen Widerstand besitzt, wird die Spannung anschließend mittels des Transformators (T) von 230 V auf 24 V herab transformiert. Nachdem der Strom durch den Gleichrichter (G) gleichgerichtet wurde, fließt er zum Hd und erwärmt diesen. Direkt am Hd befinden sich zwei Messleitungen zur Bestimmung der elektrischen Spannung. Die Spannung wird durch eine Digitalanzeige an der HdA angezeigt und kann ebenfalls durch einen Datenlogger dargestellt und aufgezeichnet werden. Für die Anzeige an der HdA wird eine Betriebsspannung von 9 V benötigt, welche eine Batterie (B) liefert. Der Schaltplan dieser Apparatur ist in Bild-B 1 dargestellt.

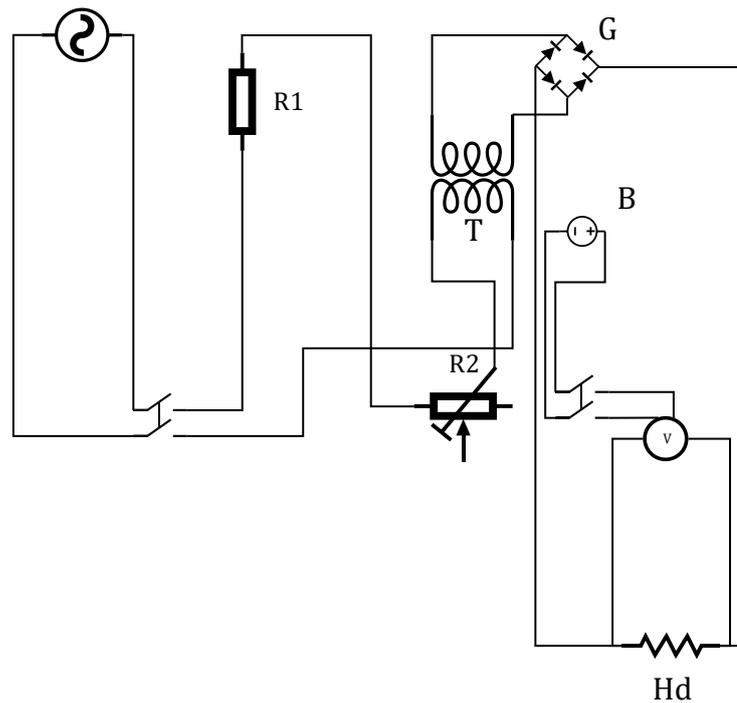


Bild-B 1: Schaltplan der Heizdraht-Apparatur

Der Hd besteht aus einer CrFeAl-Legierung (Werkstoffnummer: 1.4765v) mit einem  $\varnothing = 1,2$  mm. Der spezifische elektrische Widerstand des Hd beträgt  $R_{Hd, spe} = 1,45 \frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$ . Die Temperaturfaktoren sind in Tabelle-B 1 angeführt [Bohlen Elektrowärme 2018].

Tabelle-B 1: Temperaturfaktoren des spezifischen elektrischen Widerstands

Temperatur [°C]	Temperaturfaktor (TF)
400	1,00
600	1,02
800	1,03
1.000	1,04
1.200	1,04

Anders als bei den Versuchen mit iHZZP wurde die Temperatur des Hd durch ein Thermoelement Typ K ( $\varnothing = 0,5$  mm) bestimmt, welches mittig am Hd positioniert war. Neben der Spannung am Hd wird die Temperatur durch das Thermoelement mit dem Datenlogger angezeigt. Hierdurch kann ein Zusammenhang zwischen elektrischer Leistung bzw. Wärmestrom des Hd und seiner Temperatur direkt ermittelt werden. Die Staubschichtstärke entsprach den Versuchen der iHZZP und betrug 15 mm. Als Proben wurden Buchenstaub und Kakaopulver genutzt. Der Yellow Pine Staub konnte aufgrund der fehlenden Probenmenge nach den Versuchen mit iHZZP nicht weiter untersucht werden.

Da bei der Bestimmung der Zündgrenztemperatur (ZGT) im Milchpulver keine Temperatur bestimmbar war und das Pulver eine Brennzahl von BZ 2-3 (keine Entstehung eines selbstständigen Schmelz-, Glimm- oder Flammenbrands) besitzt, wurden keine Versuche mit Milchpulver und dem Hd durchgeführt. Mit Gummiabrieb konnten aufgrund des Demonstrators der Prüfapparatur keine Versuche durchgeführt werden. In Kapitel B.4 erfolgt die entsprechende ausführlichere Begründung. Anders als bei den Versuchen mit den inerten heißen Partikeln wurde die Staubprobe bei diesen Versuchen mittels einer Labor-Hebebühne (Laborboy) von unten an den erwärmten Hd heran gehoben. Grund hierfür war, dass dadurch das Thermoelement am Hd weniger verrutschte und somit die Position des Thermoelementes am Hd bei mehreren Versuchen identisch war. Der gesamte Versuchsaufbau ist in Bild-B 2 schematisch abgebildet. Die Spannungsmessleitung zum Datenlogger sind nicht dargestellt.

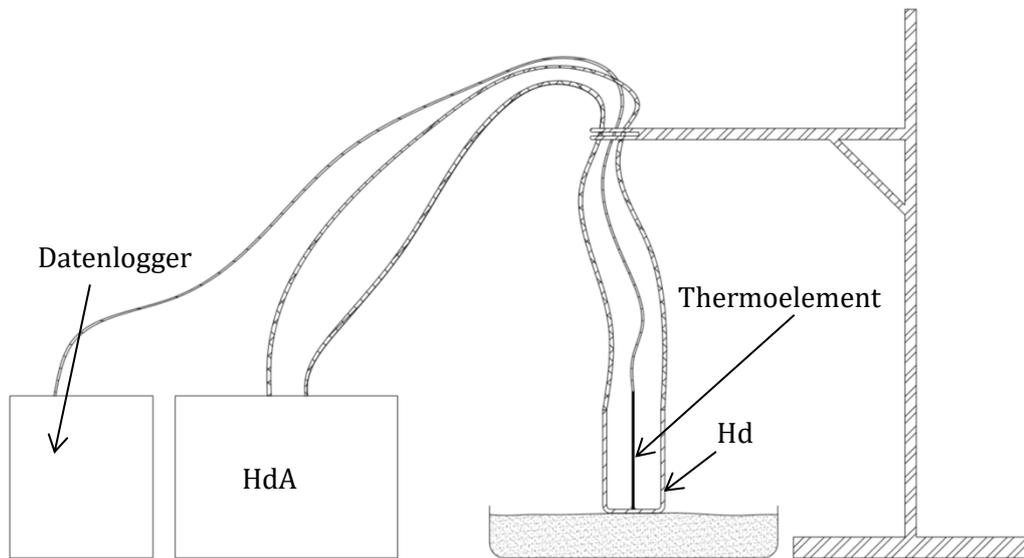


Bild-B 2: Schematischer Versuchsaufbau der Zündwirksamkeitsversuche mit Heizdraht

In Bild-B 3 ist der Anschluss des Heizdrahtes an die Mess- und Stromleitung dargestellt. Um diese Leitungen thermisch vom Heizdraht zu entkoppeln, wurde zwischen diesen Leitungen und dem Hd auf beiden Seiten jeweils ein 6 cm langes Stück formstabiler Kupferdraht eingebaut. Um sowohl den Kupferdraht als auch den Hd einfacher tauschen zu können, wurden die entsprechenden Übergänge durch Lüsterklemmen realisiert. Hierbei wurden im Vorfeld die Kunststoffummantelungen entfernt, um einem Aufschmelzen bzw. Entzünden derselben vorzubeugen. Die Verbindung mit Lüsterklemmen hat darüber hinaus den Vorteil, dass diese auch bei hohen Temperaturen einen sehr guten Kontakt zwischen dem Kupferdraht und dem Hd ermöglichen. Verbindungen mit Weich- oder Hartlot könnten bei hohen Temperaturen schmelzen und zu einem Kontaktverlust führen.

In den ersten orientierenden Versuchen, die im Rahmen der Entwicklung durchgeführt wurden, wurde der Hd direkt nach den Lüsterklemmen gebogen, sodass eine Gesamtlänge von 3 cm erreicht wurde. Eine kürzere Gesamtlänge führt zu geringeren Widerständen und somit zu größeren Leistun-

gen am Hd. Jedoch tauchten die Klemmen hier teilweise mit in den Staub ein, wodurch sie verschmutzten und sich der Kontakt zwischen Hd und Klemme verschlechterte. Um beim Eintauchen des Hd ein Verschmutzen der Lüsterklemmen zwischen Kupferdraht und Hd zu verhindern, wurde der Hd jeweils 1 cm nach der Klemme gebogen. Die eingetauchte Länge des Hd betrug 3 cm, somit ergab sich eine Gesamtlänge von 5 cm.

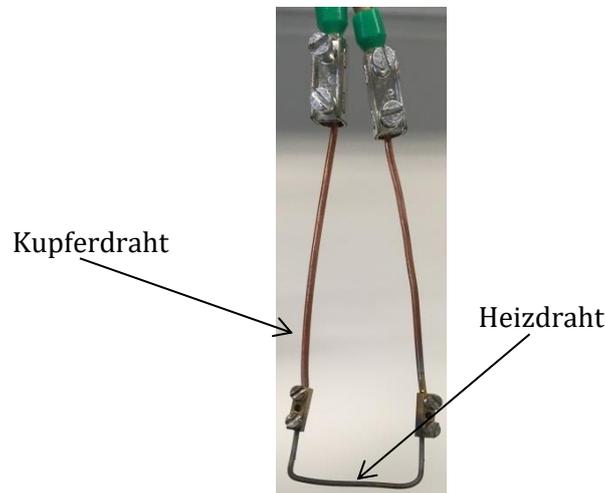


Bild-B 3: Heizdrahtanschluss

Die am Hd angelegte Spannung wurde in 0,1 V Schritten variiert, um den kritischen Wärmestrom zu ermitteln. Die maximale Spannung am Hd betrug 2,4 V. Nachdem die entsprechende Spannung am Hd anlag und die Temperatur einen konstanten Wert erreicht hatte, wurde die Staubprobe von unten an den Hd gehoben, bis dieser komplett in die Staubschicht eingesunken war.

In diesen Versuchen simuliert der Hd die inerten heißen Partikel, allerdings besitzt er eine wesentlich geringere Masse als die Partikel und verliert folglich schneller an Temperatur. Damit das Abkühlverhalten des Hd jenem der inerten heißen Partikeln näherkommt, wurde der Hd nachdem er in die Staubschicht eingesunken war, für 10 s auf der entsprechenden Spannung bzw. Temperatur gehalten und anschließend stromlos geschaltet. Für die Bewertung des Zündkriteriums wurde die Staubschicht weitere 120 s beobachtet.

Da die Möglichkeit einer Entzündung bewertet wird, wurden maximal zehn Versuche mit derselben Spannung am Hd durchgeführt. Erfolgte bei diesen Versuchen eine Entzündung, wurde eine entsprechend 0,1 V geringere Spannung überprüft. Dieses Vorgehen, mehrere Versuche mit denselben Randbedingungen durchzuführen, ist bereits von anderen sicherheitstechnischen Kenngrößen bekannt. Bei der Prüfung der Mindestzündtemperatur eines Staub/Luft-Gemisches mit dem BAM-Ofen werden jeweils drei Kontrollmessungen durchgeführt [TÜV Süd 2016; VDI 2263 Blatt 1]. Für die Bestimmung der Mindestzündenergie mit der Mike 3 werden zehn Aufwirbelungen gefordert, bevor die Versuchsparameter geändert werden [Cesana und Siwek 2010; VDI 2263 Blatt 1]. Hieraus folgt, dass die zehn Versuche zur Bestimmung des kritischen Wärmestromes dem Vorgehen der bisherigen und anerkannten sicherheitstechnischen Kenngrößen entsprechen.

## B.2 Kurzbeschreibung des Entwicklungsprozesses

Im Rahmen der Entwicklung dieses Demonstrators einer neuen Prüfapparatur wurden insgesamt 159 Einzelversuche mit Buchenstaub durchgeführt. Hierbei wurde festgestellt, dass eine konstante Korrelation zwischen der Spannung am Hd und seiner Temperatur wesentlich vom Kontakt zwischen den Kupferdrähten und dem Hd selbst beeinflusst wird. Ist der Kontakt schlecht, werden mit höheren Spannungen geringere Drahttemperaturen erreicht als bei einem guten Kontakt. Im Rahmen der Entwicklung wurden die Schrauben an den Lüsterklemmen teilweise nach jedem Einzelversuch nachgezogen. Vereinzelt mussten die Drähte mittels eines feinen Schleifpapiers von Verschmutzungen oder der oxidierten Oberfläche gereinigt werden. Dies führte zu einem besseren Kontakt, war aber teilweise nur für wenige Versuche erfolgreich. Neben dieser unsteten Korrelation zeigte sich der schlechte Kontakt durch eine starke Schwankung der gemessenen Spannung des Hd. Aus diesen Beobachtungen ergab sich der oben beschriebene und in Bild-B 3 dargestellte Anschluss zwischen Kupferdraht und Hd sowie die Länge des Hd.

Während die letzten Versuche im Rahmen der Entwicklung stattfanden, wurden im Datenlogger und in der gerätinternen Anzeige deutlich unterschiedliche Spannungswerte angezeigt. Daraufhin wurde ein Multimeter genutzt, um den Fehler zu ermitteln. Es zeigte sich, dass die Werte der geräteinternen Anzeige falsch waren. Es wurde daher vermutet, dass diese defekt sei. Für alle weiteren Versuche wurde statt der Anzeige ein Multimeter neben dem Datenlogger für die Anzeige der Spannung verwendet.

Bei den ersten Versuchen betrug die Änderung der Spannung 0,05 V, dies erwies sich jedoch nicht als sinnvoll, da diese Änderungen durch die allgemein geringen Spannungen fast den festgestellten Spannungsschwankungen entsprachen. Deshalb wurden die Spannungsänderungen auf 0,1 V festgelegt. Bei der endgültigen Heizdrahtlänge von 5 cm ergaben sich somit Temperaturänderungen im Mittel zwischen 40 K–60 K pro 0,1 V Spannungsänderung. Diese spannungsabhängige Temperaturänderung wird im Wesentlichen durch die Länge und dem daraus folgenden elektrischen Widerstand des Hd bestimmt. Der Widerstand ist maßgebend für die am Hd anliegende Spannung, für die elektrische Leistung und somit auch für den emittierenden Wärmestrom des Hd. Die flächenbezogene elektrische Leistung  $P''$  kann als emittierender Wärmestrom  $\dot{q}''_e$  vom Hd auf die Staubschicht angesehen werden. Dieser Wärmestrom errechnet sich wie folgt:

$$P = U_{Hd} \cdot I_{Hd} \quad (\text{B-1})$$

mit

$$I_{Hd} = \frac{U_{Hd}}{R_{Hd}} \quad (\text{B-2})$$

folgt

$$P = \frac{U^2}{R_{Hd}} \quad (\text{B-3})$$

Hierbei ist

$$R_{Hd} = \frac{R_{Hd,spe} \cdot L_{Hd}}{A_{Hd}} \cdot TF \quad (\text{B-4})$$

Die flächenbezogene elektrische Leistung folgt mit der eingetauchten Oberfläche des Hd  $O_{Hd}$  zu

$$P'' = \dot{q}''_e = \frac{P}{O_{Hd}} \quad (\text{B-5})$$

Da der Hd komplett in die Staubschicht eintaucht, kann angenommen werden, dass der gesamte Wärmestrom über Wärmeleitung vom Hd auf die Staubschicht übertragen wird. Daraus folgt:

$$\dot{q}''_e = \dot{q}''_{\lambda} = \dot{q}''_i \quad (\text{B-6})$$

### B.3 Beobachtungen und Ergebnisse der ersten Validierungsversuche

Für die ersten Validierungsversuche wurde der Buchenstaub zehnmal getestet, um zu prüfen, inwieweit der oben beschriebene Testablauf valide ist. Diese zehn Durchläufe stellen zwar keine umfangreiche Validierungsstudie dar, sind jedoch ausreichend, da dieses Prüfverfahren in der vorliegenden Dissertation eine Idee bzw. einen Demonstrator beschreibt, der gegen Ende der Arbeit entwickelt und erprobt wurde.

Der erste Durchgang begann mit einer Spannung am Hd von 1 V. Die weiteren neun Validierungsdurchläufe wurden mit einer Spannung von 1,1 V durchgeführt. Grund hierfür war, dass bei einer Spannung von 1,1 V keine Entzündung beobachtet wurde und daher eine Verringerung der Spannung nicht notwendig war. In Tabelle-B 2 sind die entsprechenden Spannungen, Temperaturen und Wärmeströme gemäß den Gleichungen (B-1) bis (B-6) zusammengefasst. Für die Bestimmung der Wärmeströme wurde die Oberfläche des eingetauchten Hd angesetzt. Die geometrische Form wurde vereinfacht als Zylinder angenommen. Seine Oberfläche ergibt somit  $115,36 \text{ mm}^2$ .

Tabelle-B 2: Vergleich der Spannungen, Temperaturen und Wärmeströme am Hd

Spannung [V]	Temperatur [°C]	Wärmestrom $\left[\frac{kW}{m^2}\right]$
1,0	440 ± 10	135
1,1	490 ± 10	163
1,2	530 ± 10	193
1,3	580 ± 15	225

Bei der Durchführung der Validierungsversuche wurden die Oberflächentemperaturen des Hd mittels der Wärmebildkamera gemessen, um zu prüfen, wie sich diese über die Länge des Hd verteilen. Bild-B 4 stellt diesen Temperaturverlauf dar. Es ist zu erkennen, dass die Oberflächentemperatur in dem eingetauchten 3 cm langen Hd-Stück annähernd konstant (rote Färbung) ist. Trotzdem wurde

bei den Versuchen beobachtet, dass die Lage des Thermoelementes einen Einfluss auf die gemessene Temperatur hat. Teilweise wurden wenige Millimeter außerhalb der Mitte des Hd Temperaturen festgestellt, die bis zu 20 K geringer waren als in der Mitte selbst. Daher wurde das Thermoelement vor jedem Einzelversuch mittig bzw. an der Stelle der höchsten Temperatur positioniert. Hier wurden dann die angegebenen Temperaturen bei gleichbleibender Spannung erreicht.

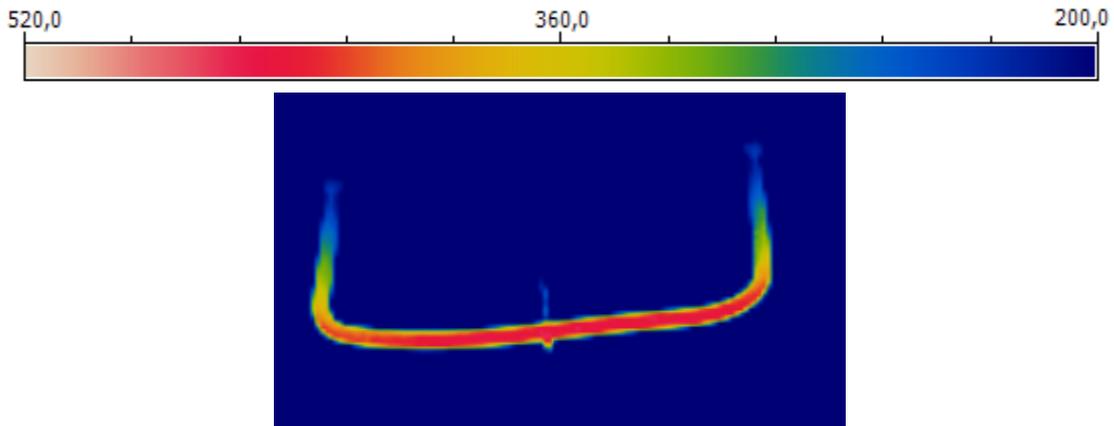


Bild-B 4: Qualitativer Temperaturverlauf am Hd

Bei einer Entzündung der Staubschicht konnte beobachtet werden, dass diese im Bereich einer der Bögen des Hd initiiert wurde. Teilweise wurde erst nach dem Absenken des Laborboys und somit nach dem Herausheben des Hd aus der Schüttung festgestellt, dass eine Entzündung erfolgte. Der Entstehungsort lag auch hier im Bereich der Bögen. Eine Entzündung mittig in dem Hd wurde nicht beobachtet. Die Entzündung der Staubschicht an einem Bogen des Hd ist in Bild-B 5 exemplarisch dargestellt.



Bild-B 5: Entzündung der Staubschicht im Bogenbereich des Hd

Tabelle-B 3 fasst die Entzündungen der jeweiligen Durchläufe in Abhängigkeit zum Wärmestrom zusammen. Es ist zu erkennen, dass keine Entzündung bei einem Wärmestrom von ca.  $163 \frac{kW}{m^2}$  beobachtet wurde. Bei einem Wärmestrom von ca.  $193 \frac{kW}{m^2}$  wurden insgesamt zwei Entzündungen festgestellt und bei ca.  $225 \frac{kW}{m^2}$  17 Entzündungen. Für alle Versuche (je 100 pro Wärmestrom) ergibt sich für ca.  $163 \frac{kW}{m^2}$  eine Zündwahrscheinlichkeit von 0 %, bei ca.  $193 \frac{kW}{m^2}$  eine Zündwahrscheinlichkeit von 2 %

und bei ca.  $225 \frac{kW}{m^2}$  eine Zündwahrscheinlichkeit von 17 %. Dass im neunten Durchgang eine Entzündung mit  $193 \frac{kW}{m^2}$  beobachtet wurde und mit  $225 \frac{kW}{m^2}$  nicht, stellt einen statistischen Ausreißer dar.

Tabelle-B 3: Beobachtete Zündungen der entsprechenden Wärmeströme in den einzelnen Validierungsdurchläufen

Durchlauf	$163 \frac{kW}{m^2}$	$193 \frac{kW}{m^2}$	$225 \frac{kW}{m^2}$
1	0	0	2
2	0	1	1
3	0	0	2
4	0	0	3
5	0	0	3
6	0	0	1
7	0	0	1
8	0	0	1
9	0	1	0
10	0	0	3

Da die Zündmöglichkeit für die Gefährdungsbeurteilung betrachtet werden muss, erfolgen im Weiteren keine statistischen bzw. stochastischen quantitativen Auswertungen der Validierungsdurchläufe. Daher fasst Tabelle-B 4 die jeweiligen niedrigsten kritischen Wärmeströme, Spannungen und Temperaturen der einzelnen Validierungsdurchläufe zusammen, die die Zündmöglichkeit darstellen. Es ist zu erkennen, dass in zwei der zehn Durchläufe der niedrigste kritische Wärmestrom bei ca.  $193 \frac{kW}{m^2}$  und in acht Durchläufen bei ca.  $225 \frac{kW}{m^2}$  liegt. Als kritische Temperatur ist die jeweilige spannungsabhängige mittlere Temperatur angegeben.

Neben den Validierungsversuchen wurde als letztes das Kakaopulver nach dem hier beschriebenen Verfahren geprüft und der kritische Wärmestrom bestimmt. Hierfür wurden insgesamt 17 Einzelversuche durchgeführt. Bei dieser Prüfung hat es sich als zweckmäßig erwiesen, mit einem Wärmestrom zu beginnen, bei dem eine Entzündung erwartet wird. Bei diesem Top-DownVorgehen (hohe Spannung zu geringer Spannung) wird weniger Probenmenge benötigt, als beim Bottom-Up-Vorgehen (geringe Spannung zu hoher Spannung). Für diese Prüfung wurde zuerst eine Spannung von 1 V angelegt. Hieraus ergab sich ein Wärmestrom von  $135 \frac{kW}{m^2}$  und eine Temperatur von 440 °C. Für diese Abschätzung wurde die ZGT des Kakaopulvers genommen, die in diesem Temperaturbereich liegt. In der Tabelle-B 5 ist der Prüfvorgang zusammengefasst. Für das Kakaopulver ergibt sich

ein kritischer Wärmestrom von  $67 \frac{kW}{m^2}$ , eine kritische Temperatur von 310 °C und eine kritische Spannung von 0,7 V.

Tabelle-B 4: Kritische Zündparameter der Validierungsdurchläufe26

Durchlauf	Kritischer Wärmestrom $\left[\frac{kW}{m^2}\right]$	Kritische Temperatur [°C]	Kritische Spannung [V]
1	225	575	1,3
2	193	510	1,2
3	225	575	1,3
4	225	575	1,3
5	225	575	1,3
6	225	575	1,3
7	225	575	1,3
8	225	575	1,3
9	193	510	1,2
10	225	575	1,3

Tabelle-B 5: Zusammenfassung der Prüfung des kritischen Wärmestroms für Kakaopulver

Wärmestrom $\left[\frac{kW}{m^2}\right]$	Anzahl der Versuche	Anzahl der Zündungen
135	1	1
110	2	1
87	4	1
67	10	0

Zusammenfassend ergeben sich aus den hier beschriebenen Versuchen die kritischen Wärmeströme für Buchenstaub zu  $193 \frac{kW}{m^2}$  und für Kakaopulver zu  $67 \frac{kW}{m^2}$ . Die kritischen Temperaturen erreichen im Buchenstaub 530 °C und im Kakaopulver 310 °C. Im Vergleich zu den ZGT liegt die kritische Temperatur für den Buchenstaub ca. 50 °C und für das Kakaopulver ca. 130 °C niedriger.

Eine grafische Aufbereitung der Spannungs- und Temperatur-Zeitkurven erfolgt nicht, der Datenlogger wurden ausschließlich zur Anzeige der Temperatur und Spannung während der Versuche genutzt.

#### **B.4 Diskussion der Ergebnisse und des Versuchsaufbaus**

Wie bereits beschrieben, konnten keine Versuche mit dem Gummiabrieb erfolgen. Der Grund hierfür war, dass der beschriebene Zusammenhang zwischen der Temperatur des Hd und der anliegenden Spannung (vgl. Tabelle-B 2) nicht mehr gegeben war. Um diesen Fehler zu beheben, wurden die Kontakte zwischen Hd und Kupferdraht gereinigt und neu verdrahtet. Nach dieser Reinigung wurde der Zusammenhang zwar bei einem Versuch wieder festgestellt, bei einem zweiten Versuch aber bereits nicht mehr. Hier entstand die Vermutung, dass der Hd nach über 330 Versuchen und den daraus resultierenden Lastwechseln strukturelle Schäden erlitten hat. Hierauf wurde eine neuer Hd entsprechend gebogen und ausgetauscht. Leider ergab sich auch hier nicht der Spannungs-Temperatur-Zusammenhang, der bei den Validierungsversuchen festgestellt wurde. Somit wären die ermittelten kritischen Wärmeströme nicht vergleichbar gewesen. Die gemessenen Temperaturen bei gleicher Spannung am Draht waren bis zu 100 K geringer, was deutlich außerhalb des Messfehlers des Thermoelements lag. Der Effekt konnte ebenfalls nicht durch einen Wechsel der Lüsterklemmen oder des Kupferdrahtes behoben werden, noch lässt er sich auf eine Beschädigung des Thermoelements oder auf ein Softwareproblem des Datenloggers zurückführen, da diese die Raumtemperatur korrekt gemessen und angezeigt haben. Dieses Phänomen lässt auf eine systematische Schwachstelle des Demonstrators schließen, die im Rahmen dieses Promotionsvorhabens nicht mehr umfassend analysiert und behoben werden konnte. Dass dieser Effekt in derartiger Intensität auftrat, lag sehr wahrscheinlich daran, dass der Hd durch geringe Spannungen erwärmt wurde. Bei kleinen Spannungen haben neben dem Widerstand des Hd selbst alle elektrischen Kontakte einen wesentlichen Einfluss auf den Gesamtwiderstand und somit auf den Spannungs-Temperatur-Zusammenhang.

Mit dem Wissen über diese Schwachstelle ist die Validität des Demonstrators und die Ergebnisse der Validierungsverläufe in Frage gestellt. Da dieser Effekt erst nach den Validierungsdurchläufen und der Prüfung des Kakaopulvers auftrat, kann davon ausgegangen werden, dass die Ergebnisse in sich valide sind, da der Versuchsaufbau innerhalb dieser Durchläufe nicht verändert wurde, wodurch sich ebenfalls keine Änderungen an den Übergangskontakten ergaben.

Der angesprochene Messfehler der Temperaturmessung ergibt sich aus der Messungenauigkeit des Thermoelements und des Datenloggers. Für das Thermoelement ergibt sich die Messungenauigkeit zu  $\pm 0,0075 \cdot T$  oder  $\pm 2,5 \text{ K}$  [JUMO GmbH & Co. KG 2009, S. 2, Tabelle 3]. Der Datenlogger selbst besitzt eine Messungenauigkeit von 0,1 % [Peekel Instruments 2016, S. 144]. Hieraus folgt eine gesamte Messungenauigkeit der Temperatur-Messung von  $\pm 0,85075 \%$  oder  $2,5 \text{ K} \pm 0,25 \text{ K}$ . Für Messungen der Spannung muss lediglich die Messungenauigkeit des Datenloggers von 0,1 % betrachtet werden.

Werden die hier ermittelten Wärmeströme mit den Ergebnissen aus der Literatur verglichen, zeigt sich, dass die hier ermittelten Werte deutlich höher sind. Der Vergleich ist jedoch nicht sinnvoll, da in den Untersuchungen von [Rogers et al. 2006] beispielsweise eine Heizpatrone mit 3,3 W über 400 min gebraucht hat, um Maisstärke zu entzünden [vgl. Rogers et al. 2006, S. 7]. Die in den hier durchgeführten Heizdrahtversuchen genutzte Induktionszeit betrug nur 10 s. Somit ist ersichtlich, dass in den Heizdrahtversuchen deutlich höhere Leistungen bzw. Wärmeströme vorhanden sein müssen. In den Untersuchungen von [Hensel 1988] wird überhaupt keine Aussage zur Induktionszeit angeführt. Daher ist auch hier ein Vergleich nicht sinnvoll. Grundsätzlich kann gesagt werden, dass der Wärmestrom, der für eine Entzündung notwendig ist, mit steigender Induktionszeit sinkt.

## **B.5 Fazit der Heizdrahtversuche**

Grundsätzlich kann der kritische Wärmestrom, der für eine Entzündung einer Staubschicht benötigt wird, durch die Heizdrahtversuche bestimmt werden. Die ersten Validierungsversuche zeigen eine gute Reproduzierbarkeit der Entzündung durch den Hd. Für eine genauere Aussage sollten noch weitere Proben untersucht werden. Jedoch zeigt der Versuchsaufbau wesentliche Schwächen, die für weitere Versuche genauer analysiert und optimiert werden müssen.

Ein Vergleich mit den Ergebnissen der Versuche mit erwärmten Partikeln erfolgte nicht, da keine Partikeln in der Größe des Hd untersucht wurden. Des Weiteren wurde der Hd immer komplett eingetaucht und war somit von allen Seiten vom Staub umgeben. Diese Bedingung war bei den heißen Partikeln nicht gegeben, wodurch ein Vergleich nicht zweckmäßig ist.

### **Welchen Wärmestrom muss ein inertes heißes Partikel abgeben, damit sich die Staubschicht entzündet?**

Der Wärmestrom, der von einem inerten heißen Partikel abgegeben werden muss, damit eine Entzündung erfolgt, ist von dem jeweiligen Staub abhängig. Für den untersuchten Buchenstaub beträgt er  $193 \frac{kW}{m^2}$ , für das Kakaopulver  $87 \frac{kW}{m^2}$ . Diese Aussagen gelten für den hier beschriebenen Versuchsaufbau. Inwiefern eine Übertragung auf andere Wärmequellen möglich ist, bedarf einer weiteren Untersuchung, wobei diese im direkten Zusammenhang zur nächsten Forschungsfrage stehen sollte.

### **Ist ein kritischer Wärmestrom vorhanden, der nicht von der Größe des inerten heißen Partikels abhängig ist?**

Inwiefern ein größenunabhängiger kritischer Wärmestrom existiert, kann an dieser Stelle nicht bewertet werden, da bei den Heizdrahtversuchen bisher nur eine Größe des inerten heißen Partikels (Drahtlänge/Drahtdurchmesser-Verhältnis) untersucht wurde. Ein Vergleich mit anderen Drahtlängen und/oder Drahtdurchmessern fand im Rahmen der vorliegenden Dissertation nicht statt. Um einen größenunabhängigen Wärmestrom ermitteln zu können, müssen weitere Versuche mit anderen Größen und/oder Formen inerte heißer Partikeln erfolgen.

**Erfolgt die Entzündung der Staubschicht aufgrund der am Hd anliegenden Spannung oder aufgrund seiner Temperatur?**

Nach jetzigem Standpunkt wird vermutet, dass die Entzündung aufgrund der Temperatur des Hd erfolgt. Grund dieser Vermutung ist der beschriebene Temperatur-Spannungs-Effekt: Bei konstanter Spannung schwankte die Temperatur dennoch. Dies wurde insbesondere in der Entwicklungsphase beobachtet. Um diese Frage jedoch endgültig beantworten zu können, müssen weitere Versuche durchgeführt werden. Ziel dieser Versuche sollte es sein, die Spannung am Hd und damit den Wärmestrom konstant zu halten und nur die Temperatur zu variieren, beispielsweise durch unterschiedliche Heizdraht-Materialien.

## Kurzlebenslauf

Der Kurzlebenslauf ist in der Online-Version aus Gründen des Datenschutzes nicht enthalten. In der gedruckten Version ist dieser vorhanden.