



**Bewertung der Energieeffizienz von Baumaschinen
mithilfe einer praxisnahen Lastzyklusentwicklung für
einen In-Situ-Test**

**Dissertation
zur Erlangung eines Doktorgrades
Doktor-Ingenieur**

in der
Fakultät für Architektur und Bauingenieurwesen
der
Bergischen Universität Wuppertal

vorgelegt von
Marco Fecke, M.Sc.
aus Essen

Wuppertal, im Juli 2018

Die Dissertation kann wie folgt zitiert werden:

urn:nbn:de:hbz:468-20191031-115008-7

[<http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=urn%3Anbn%3Ade%3Ahbz%3A468-20191031-115008-7>]

DOI: 10.25926/v2qd-mq87

[<https://doi.org/10.25926/v2qd-mq87>]

Geleitwort

Der maßgebliche Energiekostenfaktor im Bauprozess stellt der Dieserverbrauch von Baumaschinen dar. Trotz immenser Verbräuche ist eine einheitliche Bewertungsbasis der Kraftstoffverbräuche nicht vorhanden. Während beispielsweise ein Großteil von Haushaltselektrogeräten energetisch bewertet werden, fehlt für mobile Arbeitsmaschinen eine Normierungsbasis.

Ein nachhaltiger und energieeffizienter Umgang mit den bestehenden Ressourcen gewinnt fortwährend an Bedeutung. Jedoch werden diese Trends für mobile Arbeitsmaschinen im Erdbau auf normativer Ebene nicht umgesetzt. Somit ist die Bauwirtschaft weiterhin gezwungen im Zuge einer Neubeschaffung von Maschinen eigene Tests zur Effizienzbewertung aufzustellen. Dieses ist mit erheblichem Aufwand verbunden und daher nur für Großunternehmen durchführbar, welches diametral zur KMU-lastigen Bauwirtschaft steht.

Im Zuge seiner Dissertationsschrift hat Herr Dr.-Ing. Marco Fecke sich mit dieser Problemstellung befasst, um eine Grundlage für eine standardisierte Effizienzbewertung zu schaffen. Der Forschungsansatz besteht hierbei aus einer Lastzyklusableitung anhand von Realtests. Die ausgewerteten 8,0 Mio. Flottendaten gewähren eine größtmögliche Praxisnähe, um anhand der durchgeführten 478 Testdurchläufe einen neuen Standard zur Effizienzbewertung von Baumaschinen zu schaffen. Die aufgewendeten Forschungsarbeiten haben aufgezeigt, dass ein Realtest zu einer praxisnahen und reproduzierbaren Ausweisung der Energieeffizienz geeignet ist. Ferner konnten vielfältige Erkenntnisse zur Optimierung der Baustellenabläufe und Fahrersensibilisierung gewonnen werden.

Die Resonanz der Bauwirtschaft ist mit den aufgestellten Forschungsarbeiten sehr positiv. Wenngleich es gilt diese Erkenntnisse auf Normebene umzusetzen, um eine transparente, energieeffiziente und nachhaltige Beschaffung von Baumaschinen zu ermöglichen.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Manfred Helmus

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand größtenteils während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehr- und Forschungsgebiet Baubetrieb und Bauwirtschaft der Bergischen Universität Wuppertal.

Mein besonderer Dank für das mir entgegengebrachte Vertrauen sowie die Unterstützung und wissenschaftliche Betreuung gilt meinem Doktorvater Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Manfred Helmus.

Bei der Prüfungskommission möchte ich mich ebenso bedanken. Hier sind Frau Prof. Dr.-Ing. Daniela Paffrath und Herr Univ.-Prof. Dr.-Ing. Steffen Anders für die Zweit- und Drittbegutachtung sowie Herr Univ.-Prof. Dr.-Ing. Felix Huber für die Übernahme des Prüfungskommissionsvorsitzes zu nennen.

Bedanken möchte ich mich bei den Unternehmen Zeppelin Baumaschinen GmbH, MTS Maschinentechnik Schrode AG sowie dem Berufsförderungswerk der Bauindustrie NRW gGmbH. Hervorzuheben sind hier Herr Horst Wicker, Herr Rainer Schrode sowie Herr Klaus Winkler, ohne dessen großartige Unterstützung die Umsetzung der Praxistests nicht möglich gewesen wäre.

Desweiteren danke ich den Herrn Dr.-phil. Heussen, Dr.-Ing. Mariutti und Dr.-Ing. Beetz für die Unterstützung im Bereich der Flottendaten.

Ebenso gilt mein Dank den zahlreichen Praxispartnern in Form der Bauunternehmen und Baumaschinenhersteller für stetig neue Anregungen und Impulse, sowie die gute Zusammenarbeit. Hier möchte ich Herrn Dr.-Ing. Reno Filla hervorheben, dessen Forschungen und Veröffentlichungen zu ständig neuen Denkanstößen geführt haben.

Weiterhin gilt ein großer Dank an die Kolleginnen und Kollegen vom Lehrstuhl für die fortwährende Unterstützung und dessen anregende Diskussionsbereitschaft. Frau Silke Wiesemann danke ich darüber hinaus für die kritische Durchsicht des Manuskripts.

Das größte Dankeschön gebührt meiner Familie. Ohne die großartige Unterstützung meiner Eltern, Hedwig und Wilhelm Fecke sowie meiner Schwester Karina Fecke, wäre weder eine Promotion noch ein Studium möglich gewesen. Ihnen möchte ich diese Arbeit widmen.

Marco Fecke

Kurzfassung

Die wesentliche Herausforderung beim anstehenden Klimawandel besteht in der Senkung von Energieverbräuchen. Eine Bilanzierung der Verbräuche für Baumaschinen erfolgt aber nicht. Hierdurch ist weder eine Transparenz noch eine normierte Bewertungsbasis für die Senkung von Verbräuchen durch Neuentwicklungen gegeben. Hieraus leitet sich das Thema und der notwendige Forschungsbedarf dieser Arbeit ab.

Der Aufbau dieser Arbeit lässt sich in drei wesentliche Methoden einteilen. Dies sind die Erfassung vom Stand der Technik, dem Praxiseinsatz und der Lastzyklusableitung sowie der Validierung.

Die erste Methode beinhaltet die Erfassung des Standes der Technik. Hiermit ist die Identifizierung von bestehenden Methoden zur Ausweisung der Energieeffizienz aus der Normung und Forschung gemeint. Ferner fallen hierunter die Analyse von Einflussfaktoren sowie Neuentwicklungen von Baumaschinen. Hieraus lassen sich die Handlungsfelder sowie Anforderungen an einen Praxistest ableiten.

In zweiter Stufe erfolgt für eine größtmögliche Praxisnähe die Bestimmung von relevanten Maschinen sowie die Eruierung zum Arbeitseinsatz. Dies wird über die Erhebung von Statistiken, der Analyse von Bauprozessen sowie durch Flottenmanagementauswertungen gewährleistet. Bei den Flottenmanagementauswertungen werden knapp 12.000 Baumaschinen, die 8,0 Mio. Daten gesendet haben, analysiert. Somit sind repräsentative und detaillierte Soll-Vorgaben für einen definierten Lastzyklus möglich.

Die dritte Methodik sieht eine Validierung in Form von Praxistests vor. Über vier Testreihen werden die marktrelevantesten Maschinen im Realeinsatz getestet. Hiermit ist eine Bewertung und Ausweisung der Energieeffizienz für Baumaschinen möglich. Die entwickelten Methoden ermöglichen ein reproduzierbares und praxisnahes Ergebnis, trotz der komplexen Arbeitsaufgabe und vielzähligen Einflussfaktoren im Baumaschineneinsatz. Das zweistufige Modell zur Energieeffizienzausweisung kann hierbei die Ansprüche aller Akteure in Form der Hersteller und Anwender erfüllen.

Abstract

The main challenge when facing climate change is to reduce energy consumption. However, the consumption of construction machinery is not included in the balance sheet. This provides neither transparency nor a standardized valuation basis for the reduction of consumption through future developments. This is the basis for the topic and the necessary need for research of this work.

The structure of this work can be divided into three main methods. These are analysing the state of the art, the practical applications of construction machinery and the load cycle derivation as well as its validation.

The first method involves recording the state of the art. This refers to the identification of existing methods for evaluating energy efficiency from current standardization and research. This also includes the analysis of influencing factors and new developments of construction machinery. From this, the fields of action and requirements for a practical test can be derived.

In the second stage, relevant machines are determined and evaluated for their use in the field to ensure practical relevance. This is ensured through the collection of statistics, the analysis of construction processes and fleet management evaluations. Nearly 12,000 construction machines that have sent 8.0 million datasets are analysed in the fleet management evaluations. This allows representative and detailed target specifications for a defined load cycle.

The third method provides for validation in the form of practical tests. The most market-relevant machines are tested in real operation via four test series. This makes it possible to assess and identify the energy efficiency of construction machinery. The developed test processes allow a reproducible and practical result, despite the complex work tasks and numerous influencing factors in the real world use of construction machinery. The two-stage model for designating energy efficiency can meet the requirements of all stakeholders in the form of manufacturers and users.

Inhaltsverzeichnis

<i>Kurzfassung</i>	<i>I</i>
<i>Abstract</i>	<i>IV</i>
<i>Inhaltsverzeichnis</i>	<i>V</i>
<i>Abbildungsverzeichnis</i>	<i>IX</i>
<i>Tabellenverzeichnis</i>	<i>XI</i>
<i>Abkürzungsverzeichnis</i>	<i>XIII</i>
1 Einleitung und Forschungsgegenstand	1
1.1 Problemstellung und Abgrenzung	1
1.2 Zielsetzung der Arbeit	2
1.3 Methodik und Vorgehensweise	2
1.4 Vorveröffentlichungen	5
2 Stand der Technik und Forschung	6
2.1 Prüfzyklen der PKW-Branche	6
2.1.1 NEFZ	6
2.1.2 WLTP	7
2.1.3 RDE	8
2.2 Prüfzyklen für mobile Arbeitsmaschinen	8
2.2.1 ISO 8178	9
2.2.2 NRTC	9
2.2.3 Entwurf zur ISO 11152	9
2.2.4 Liebherr-Normtest	10
2.2.5 DLG-PowerMix	10
2.3 Forschungsprojekte und Studien	11
2.4 Maßgebliche Einflussfaktoren auf den Kraftstoffverbrauch	13
2.4.1 Fahrer	13
2.4.2 Untergrund	15
2.4.3 Boden	16
2.4.4 Anbaugeräte	17
2.4.5 Zusammenfassung	18
2.5 Entwicklungen und Trends der Baumaschinenbranche mit Relevanz auf die Ausweisung der Energieeffizienz	19
2.5.1 Abgasnachbehandlung	20
2.5.2 Alternative Antriebsstränge	21
2.6 Differenzierung Prozesseffizienz – Energieeffizienz	23
2.7 Anforderungen an die Energieeffizienzbilanzierung für Baumaschinen	25
3 Baumaschineneinsatz in der Praxis	27
3.1 Statistiken und Betriebskostenauswertungen	28
3.2 Bauprozessanalysen	32
4 Flottenmanagementauswertung	35

4.1	Flottenauswertung Hersteller „A“	37
4.1.1	Jährlicher Kraftstoffbericht.....	37
4.1.1.1	Allgemeine Auswertung.....	38
4.1.1.2	Betrachtung von Großmaschinen	41
4.1.1.3	Leerlaufzeiten.....	42
4.1.1.4	Motorauslastungsgrad.....	42
4.1.1.5	Baujahrabhängiger Verbrauch.....	44
4.1.2	Flottenstatusbericht.....	46
4.1.2.1	Jährliche Betriebsstunden	47
4.1.2.2	Finale Bewertung der Relevanz von Maschinentypen	48
4.1.2.3	Fahrstrecken	49
4.1.3	Monatlicher Kraftstoffbericht.....	50
4.1.4	Lademengenbericht	51
4.1.5	Zusammenfassung Hersteller „A“	55
4.2	Flottenauswertung Hersteller „B“	56
4.2.1	Allgemeine Auswertungen.....	57
4.2.2	Maschinenbasierte Auswertungen.....	58
4.2.3	Leerlaufschwankungen	60
4.2.4	Europäischer Vergleich zum Maschineneinsatz	62
4.3	Modellentwicklung.....	64
4.3.1	Interne Faktoren mit Einzelfaktorbetrachtung	66
4.3.1.1	Fehleranalyse.....	69
4.3.1.2	Aufbau Modell	70
4.3.1.3	Ergebnisse Korrelationsanalyse	71
4.3.2	Modellentwicklung.....	72
4.3.2.1	Bestimmung eines Temperaturkorrekturfaktors	74
4.3.2.2	Bestimmung eines Bodenkorrekturfaktors	77
4.3.3	Zusammenführende Berechnungen	81
4.3.4	Ergebnis.....	84
4.4	Leerlauf.....	86
4.4.1	Berechnung Leerlaufereignisse und -zeiten	86
4.4.2	Gesamteinsparpotentiale	90
4.5	Weitere Anwendungsfelder und Forschungsbedarf	92
4.6	Ausweisung der Energieeffizienz	94
4.7	Zusammenfassung Flottenmanagementauswertung	95
5	Lastzyklusdefinition	96
5.1	Hydraulikbagger.....	97
5.2	Radlader	99
5.2.1	Großlader.....	99
5.2.2	Kleinlader	100
5.3	Festzustellende Parameter	101

6 Validierung der definierten Lastzyklen mithilfe von Praxistests	102
6.1 Rahmenbedingungen und Vorgehensweise	102
6.1.1 Testgelände	102
6.1.2 Fahrer	104
6.1.3 Messtechnik	104
6.1.4 Aufbau und Vorgehensweise.....	105
6.2 I. Testreihe.....	106
6.2.1 Lastzyklus „Laden“	106
6.2.2 Lastzyklus „Laden - definiertes Gewicht“	107
6.2.3 Lastzyklus „Laden - Grabenaushub“	107
6.2.4 Erkenntnisse und abzuleitende Handlungsfelder.....	108
6.3 II. Testreihe.....	110
6.3.1 Mobilbagger	110
6.3.1.1 Lastzyklus „Laden - Kies“	110
6.3.1.2 Lastzyklus „Laden - ohne Boden“	112
6.3.1.3 Lastzyklus „Planieren“	112
6.3.1.4 Lastzyklus „Fahren“	113
6.3.1.5 Zusammenstellung	114
6.3.1.6 Erweiterte Untersuchung zum Fahruntergrund	115
6.3.2 Kettenbagger	117
6.3.2.1 Lastzyklus „Laden“	117
6.3.2.2 Lastzyklus „Planieren“	118
6.3.2.3 Lastzyklus „Fahren“	119
6.3.2.4 Zusammenstellung	120
6.3.2.5 Messabgleich Durchflussmessgerät und Bordcomputer	121
6.3.2.6 Mehrverbrauch Dieselpartikelfilter	122
6.3.3 Kleinlader	124
6.3.3.1 Lastzyklus „Heben“.....	124
6.3.3.2 Lastzyklus „Kleines Ladespiel“	125
6.3.3.3 Lastzyklus „Fahren“	126
6.3.3.4 Zusammenstellung	127
6.3.4 Großlader.....	128
6.3.4.1 Lastzyklus „Kleines Ladespiel“	128
6.3.4.2 Lastzyklus „Großes Ladespiel“	131
6.3.4.3 Lastzyklus „Fahren“	132
6.3.4.4 Zusammenstellung	132
6.3.5 Erkenntnisse und Handlungsfelder II. Testreihe	134
6.4 III. Testreihe	136
6.4.1 Schaufelfüllstrategien	137
6.4.2 Schüttgüter.....	141

6.4.3 Verbrauchsmessung mit zeitlicher Variation	142
6.5 IV. Testreihe	146
6.6 Wesentliche Erkenntnisse der Testreihen und abschließende Handlungsfelder	149
6.7 Modell zur Energieeffizienzausweisung	150
6.7.1 Stufe I.	151
6.7.2 Stufe II.	151
7 Zusammenfassung und Ausblick	153
7.1 Zusammenfassung	153
7.2 Ausblick	157
<i>Literaturverzeichnis</i>	<i>159</i>
<i>Anhangsverzeichnis</i>	<i>164</i>

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Anteile Kraftstoffverbräuche nach Baumaschinen.....	1
Abbildung 1-2: Methodischer Ansatz und Aufbau der Arbeit.....	4
Abbildung 2-1: Übersicht weltweite Abgasnormen.....	19
Abbildung 2-2: Wechselwirkung Energieeffizienz/Prozesseffizienz.....	24
Abbildung 3-1: Definition Maschinenklasse, Maschinentyp, Modelltyp.....	27
Abbildung 3-2: Zulassungsstatistiken in Relation zum Kraftstoffverbrauch	28
Abbildung 3-3: Zulassungsstatistik nach Verwenderbereiche für Kettenbagger > 12 t.....	29
Abbildung 3-4: Verteilung der Anbaugeräte.....	30
Abbildung 3-5: Betriebskostenauswertung Hydraulikbagger und Radlader.....	31
Abbildung 3-6: Beispielhafte Auswertung Bauprozessanalysen.....	33
Abbildung 4-1: Verteilung Mobilbagger.....	39
Abbildung 4-2: Verteilung Kettenbagger	40
Abbildung 4-3: Verteilung Radlader	40
Abbildung 4-4: Motorauslastung Hydraulikbagger und Radlader	43
Abbildung 4-5: Korrelation zwischen Kraftstoffverbrauch und Betriebsgewicht	44
Abbildung 4-6: Jährliche Betriebsstunden Hydraulikbagger und Radlader.....	48
Abbildung 4-7: Saisonale Schwankungen für Leerlaufzeiten	51
Abbildung 4-8: Lademenge/Zyklus für Radlader	53
Abbildung 4-9: Vergleich Ladeleistung zu Ladekosten	54
Abbildung 4-10: Tätigkeiten Kettenbagger.....	59
Abbildung 4-11: Leerlaufschwankungen Flottenmanagement "B".....	60
Abbildung 4-12: Leerlaufschwankungen nach Klimazonen.....	62
Abbildung 4-13: EU-Vergleich 14-t-Mobilbagger.....	63
Abbildung 4-14: Beispiel Punktwolken.....	67
Abbildung 4-15: Einzelfaktorauswertungen Kettenbagger	71
Abbildung 4-16: Vergleich monatlicher Leerlaufverbrauch zu Durchschnittstemperaturen....	75
Abbildung 4-17: Zusammenhang Außentemperatur zum Kraftstoffverbrauch.....	76
Abbildung 4-18: Ergebnis Bodenkorrekturfaktor	80
Abbildung 4-19: Ergebnis gefilterte Bodenkorrekturfaktoren.....	81
Abbildung 4-20: Ergebnis Modellberechnung 14,0 t Mobilbagger	85
Abbildung 4-21: Ergebnis saisonale Leerlaufzeiten - Mobilbagger.....	88
Abbildung 4-22: Ergebnis saisonale Leerlaufereignisse - Radlader	89
Abbildung 4-23: Anteile Leerlaufdauer nach Maschinenkategorie	90
Abbildung 4-24: Ergebnis ausgewiesener Standort für Leerlauf	92
Abbildung 4-25: Ergebnis Leerlaufauswertung als Heatmap	93
Abbildung 4-26: Beispiel Liebherr Spritsparrechner für Radlader L566 XPower	94

Abbildung 6-1: Übungsgelände Ausbildungszentrum Essen.....	103
Abbildung 6-2: Hafengelände Essen	103
Abbildung 6-3: Anschlussschema Kraftstoffmessgerät	104
Abbildung 6-4: Applikation zur Vereinheitlichung der Testdauer	109
Abbildung 6-5: Ablauf Lastzyklus „Laden - Kies“.....	111
Abbildung 6-6: Kettenbagger CAT 324E.....	117
Abbildung 6-7: Kraftstoffverbrauch-Vergleich	121
Abbildung 6-8: Kleinlader CAT 907H2	124
Abbildung 6-9: Lastzyklus „Kleines Ladespiel“	128
Abbildung 6-10: Aufbau Lastzyklus "Großes Ladespiel"	131
Abbildung 6-11: „Kleines Ladespiel“ mit Verbrauchsrate und Totalverbrauch	136
Abbildung 6-12: Übersicht Schaufelfüllstrategien.....	137
Abbildung 6-13: Schaufelfüllstrategie nach Verbrauchsrate und Totalverbrauch	139
Abbildung 6-14: Schüttgüter nach Verbrauchsrate und Totalverbrauch	142
Abbildung 6-15: Ergebnis „Kleines Ladespiel“ mit zeitlicher Variation.....	145
Abbildung 6-16: Beispiel einer Anwenderkonfiguration	152

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Ergebnis interner Herstellertest.....	15
Tabelle 3-1: Auswertung Bauprozessanalysen	33
Tabelle 4-1: Zeitraum, Aufbau, Datenbasis und Grenzwerte Jährlicher Kraftstoffverbrauch .	37
Tabelle 4-2: Übersicht Flottenauswertung Jährlicher Kraftstoffbericht	38
Tabelle 4-3: Anteil Großmaschinen Kettenbagger	41
Tabelle 4-4: Anteil Großmaschinen Radlader	41
Tabelle 4-5: Leerlaufanteile Hydraulikbagger und Radlader	42
Tabelle 4-6: Rechenbeispiel Maximalverbrauch	43
Tabelle 4-7: Vergleich Baujahre	45
Tabelle 4-8: Zeitraum, Aufbau, Datenbasis und Grenzwerte Flottenstatusbericht.....	46
Tabelle 4-9: Datenbasis Betriebsstunden	47
Tabelle 4-10: Umrechnung Zulassungsstatistik	49
Tabelle 4-11: Durchschnittliche Geschwindigkeit Hydraulikbagger und Radlader	50
Tabelle 4-12: Zeitraum, Aufbau, Datenbasis und Grenzwerte Monatlicher Kraftstoffbericht..	50
Tabelle 4-13: Zeitraum, Aufbau, Datenbasis und Grenzwerte Lademengenbericht	52
Tabelle 4-14: Übersicht Ergebnisse Lademengenbericht.....	52
Tabelle 4-15: Zyklen pro Arbeitsstunde	54
Tabelle 4-16: Zeitraum, Aufbau, Datenbasis, Grenzwerte Flottenauswertung Hersteller "B".	56
Tabelle 4-17: Gesamtauswertung Flottenauswertung Hersteller "B"	58
Tabelle 4-18: Auswertung Radlader	59
Tabelle 4-19: Berechnung Anteile Ladespiele	60
Tabelle 4-20: Einordnung der Länder nach Klimazonen	61
Tabelle 4-21: Ergebnis Bestimmtheitsmaß auf Kraftstoffverbrauch	68
Tabelle 4-22: Zuordnung Kraftstoffverbrauchsrate zum Lastzustand.....	69
Tabelle 4-23: Übersicht Faktoren	72
Tabelle 4-24: Korrelationskoeffizienten Lastzustände und Lastfaktor	73
Tabelle 4-25: Ergebnisse Lastfaktorberechnung.....	73
Tabelle 4-26: Ergebnis länderspezifische Temperaturkorrektur	77
Tabelle 4-27: Exemplarische Daten Bodendatenbank	78
Tabelle 4-28: Lösefaktoren nach Bodenarten	79
Tabelle 4-29: Erläuterung Indizes	82
Tabelle 4-30: Beispielrechnung zu Formeln (4-18) und (4-19)	82
Tabelle 4-31: Beispielrechnung zur Formel (4-20)	83
Tabelle 4-32: Beispielrechnung zur Formel (4-21)	83
Tabelle 4-33: Beispielrechnung zur Formel (4-24)	84
Tabelle 4-34: Beispielrechnung zur Formel (4-26)	84

Tabelle 4-35: Beispielrechnung zur Formel (4-27)	84
Tabelle 4-36: Rohdaten Leerlauf	87
Tabelle 4-37: Zwischenergebnisse Leerlaufereignisse und -zeiten	88
Tabelle 4-38: Hochrechnung Gesamteinsparpotential	91
Tabelle 5-1: Übersicht Anteile Hydraulikbagger	98
Tabelle 5-2: Anteile Lastzyklen Großlader	100
Tabelle 5-3: Anteile Lastzyklen Kleinlader	100
Tabelle 6-1: Ergebnisse I. Testreihe Lastzyklus „Laden“	108
Tabelle 6-2: Ergebnis CAT M316D Lastzyklus „Laden - ohne Boden“	112
Tabelle 6-3: Ergebnis CAT M316D Lastzyklus „Planieren“	113
Tabelle 6-4: Ergebnis CAT M316D Lastzyklus „Fahren“	114
Tabelle 6-5: Zusammenstellung CAT M316D	115
Tabelle 6-6: Ergebnis Analyse Fahruntergrund	116
Tabelle 6-7: Ergebnis CAT 324E Lastzyklus „Laden“	118
Tabelle 6-8: Ergebnis CAT 324E Lastzyklus „Planieren“	119
Tabelle 6-9: Ergebnis CAT 324E Lastzyklus „Fahren“	119
Tabelle 6-10: Zusammenstellung CAT 324E	120
Tabelle 6-11: Vergleich Kraftstoffverbrauch: Durchflussmessgerät - Bordcomputer	122
Tabelle 6-12: Rechenbeispiel Mehrverbrauch Dieselpartikelfilter	123
Tabelle 6-13: Ergebnis CAT 907H2 Lastzyklus „Heben“	125
Tabelle 6-14: Ergebnis CAT 907H2 Lastzyklus „Kleines Ladespiel“	126
Tabelle 6-15: Ergebnis CAT 907H2 Lastzyklus „Fahren“	127
Tabelle 6-16: Zusammenstellung CAT 907H2	127
Tabelle 6-17: Ergebnis CAT 966K Lastzyklus „Kleines Ladespiel“	130
Tabelle 6-18: Ergebnis CAT 966K Lastzyklus „Großes Ladespiel“	131
Tabelle 6-19: Ergebnis CAT 966K Lastzyklus „Fahren“	132
Tabelle 6-20: Zusammenstellung CAT 966K	133
Tabelle 6-21: Ergebnis Schaufelfüllstrategien	138
Tabelle 6-22: Ergebnis Extrapolation aus Lastzyklus „Kleines Ladespiel“	140
Tabelle 6-23: Ergebnis Schüttgüter	142
Tabelle 6-24: Ergebnis „Kleines Ladespiel“ mit zeitlicher Variation	143
Tabelle 6-25: Ergebnis IV. Testreihe	148
Tabelle 6-26: Ausweisung Energieeffizienz nach Stufe I.	151

Abkürzungsverzeichnis

BC	Bordcomputer
bspw.	beispielsweise
bzw.	beziehungsweise
CAD	Computer Aided Design
DIN	Deutsches Institut für Normung
DLG	Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft
DOC	Diesel-Oxidationskatalysator
DPF	Dieselpartikelfilter
ebd.	ebendieser
EPA	United States Environmental Protection Agency
ESDAC	European Soil Data Centre
et al.	und andere
etc.	et cetera
fm ³	feste Masse
GIS	Geoinformationssystem
h	Stunde
ISO	International Organization for Standardization
IFEU	Institut für Energie- und Umweltforschung
JCMA	Japan Construction Mechanization Association
JRC	Joint Research Center
kW	Kilowatt
l	Liter
l/h	Liter pro Stunde
LKW	Lastkraftwagen
lm ³	lose Masse
lt.	laut
Mio.	Million

NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NRTC	Nonroad Transient Cycle
o. g.	oben genannt
PDF	Portable Document Format
PKW	Personenkraftwagen
RC	Recyclingboden
RDE	Real Driving Emissions
SCR	selektive katalytische Reduktion
StVZO	Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung
t	Tonnen
TCO	Total Cost of Ownership
u. a.	unter anderem
usw.	und so weiter
UTM	Universal Transverse Mercator
ü.NN	über Normal Null
vgl.	Vergleiche
z.B.	zum Beispiel

1 Einleitung und Forschungsgegenstand

1.1 Problemstellung und Abgrenzung

Den Bestand an Baumaschinen in Deutschland stellen 250.000 Maschinen mit einer Leistung von mehr als 19 kW dar.¹ Diese Maschinen verbrauchen jährlich in Deutschland ca. 1,6 Mio. Tonnen Diesel, verursachen eine Belastung von ca. 5,0 Mio. Tonnen CO₂ und gelten mit einem Anteil von 10,0 % als Feinstaubverursacher der vom Straßenverkehr produzierten Feinstäube.² Zudem haben die Kraftstoffkosten nach eigenen Auswertungen einen erheblichen Anteil an den Betriebskosten in Höhe von bis zu 40 %. Der Kraftstoffverbrauch von Baumaschinen wird dennoch nicht ausgewiesen. Es fehlen hierfür standardisierte Verfahren und Methoden, um dies einheitlich und repräsentativ darzustellen.

Um dennoch Aussagen in Bezug auf die Energieeffizienz von mobilen Arbeitsmaschinen zu erhalten, führen die Anwender in Form von Bauunternehmen eigene Messreihen durch. Der Umfang ist hierfür aufwändig und kostspielig. Zudem beziehen sich die Tests auf die spezifischen Rahmenbedingungen der Bauunternehmen und wären im Fall einer Veröffentlichung der Ergebnisse nur bedingt für andere Unternehmen nutz- bzw. vergleichbar.

In dieser Arbeit ist der Fokus der mobilen Arbeitsmaschinen auf die Baumaschinen gesetzt. Innerhalb der Maschinenklassen der Baumaschinen weisen die Hydraulikbagger und Radlader mit über 55 % den maßgeblichen Anteil an Verbräuchen auf (siehe Abbildung 1-1). Die Datenbasis bilden die jährlichen Verbräuche aus dem Tremod-Modell des IFEU, wovon in der eigenen Berechnung die Zeiträume aus dem Jahr 1980 bis 2018 berücksichtigt sind.

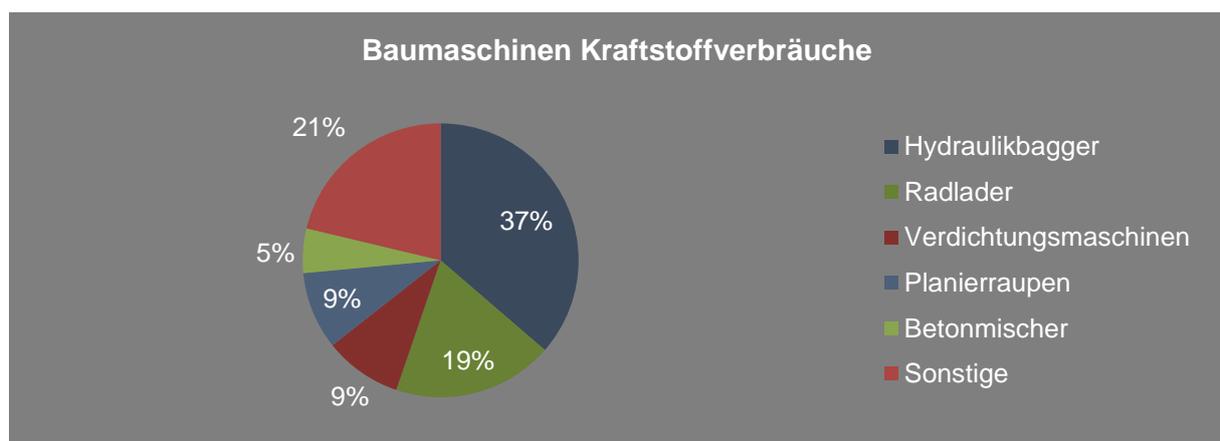


Abbildung 1-1: Anteile Kraftstoffverbräuche nach Baumaschinen³

¹ Vgl. [7] Bauer, Winz: Ermittlung des Baumaschinenbestandes in Deutschland, 2015, S. 23

² Eigene Berechnung (basiert auf Daten des IFEU, schriftliche Mitteilung) sowie [14] Helms, Heidt: Erarbeitung eines Konzepts zur Minderung der Umweltbelastung aus NRMM, 2013, S. 15

³ Eigene Berechnung (basiert auf Daten des IFEU, schriftliche Mitteilung)

Aufgrund der vielfältigen Einflussfaktoren auf ein Arbeitsspiel sind inhaltliche Abgrenzungen notwendig. Dies betrifft insbesondere die Prozesseffizienz (siehe Kapitel 2.6), die maßgeblich von steuerbaren Einflussfaktoren, wie beispielsweise dem Fahrer, bestimmt wird. Ebenso führen Technologien, wie ein vollhydraulischer Schnellwechsler, zu einer Steigerung der Maschinenauslastung. Diese Faktoren und deren Einfluss auf den Bauprozess werden erfasst und beschrieben, jedoch sind diese für eine Bewertung der Energieeffizienz einer mobilen Arbeitsmaschine nicht zu betrachten. Daher entfällt im Rahmen dieser Arbeit eine wissenschaftliche Erhebung, wie die Produktivität einer Baustelle zu erhöhen und Mitarbeiter für einen energieeffizienten Umgang mit den Maschinen zu motivieren sind.

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Ziel der Arbeit ist es, mithilfe einer Lastzyklusentwicklung und anschließenden Validierung im Rahmen eines In-Situ-Tests die Energieeffizienz einer Baumaschine auszuweisen. Der Fokus liegt hierbei auf einer größtmöglichen Praxisnähe bei einer gleichzeitig möglichst hohen Reproduzierbarkeit, welches für einen definierten Lastzyklus einen Konflikt darstellt. Die Zielgruppe für die Ausweisung richtet sich an den Anwender.

Basierend auf dieser Zielstellung und der damit einhergehenden Zielkonflikte lassen sich folgende Forschungsfragen ableiten:

- Welche methodischen Ansätze bestehen bis dato bei der Ausweisung der Energieeffizienz und welche Anforderungen lassen sich hieraus ableiten?
- Welche Maschinen haben Relevanz auf den Kraftstoffverbrauch?
- Was ist ein praxisnaher Arbeitseinsatz und welche Tätigkeiten sowie Belastungen gehen damit einher?
- Wie ist ein definierter Lastzyklus zu gestalten?
- Ist eine praxisnahe, reproduzierbare Ausweisung der Energieeffizienz für mobile Arbeitsmaschinen möglich und welche Methoden sind hierfür zu entwickeln?

1.3 Methodik und Vorgehensweise

Der methodische Ansatz lässt sich im Wesentlichen in drei Stufen unterteilen, welches kurz gefasst auf eine Literaturrecherche, einer eigenen Datenanalyse und anschließender praktischer Überprüfung zu beschreiben ist. Transferiert man die Methodik inhaltlich, gehen damit die Arbeitsschritte einher, die Einflussfaktoren zu erkennen, deren Einfluss zu analysieren und zu quantifizieren sowie im Rahmen der Testreihe methodisch zu eliminieren.

Die erste Methode besteht in der Erfassung vom Stand der Technik. Basierend auf den bestehenden Prüfzyklen der PKW-Branche, den Ansätzen im Bereich der mobilen Arbeitsmaschinen sowie in Bezug auf Studien zu Einflussfaktoren lassen sich die Handlungsfelder für die Entwicklung eines Lastzyklus ableiten. Ebenso sind zum besseren Verständnis die Begriffe der Prozess- und Energieeffizienz zu definieren und gegenüberzustellen. Die detaillierte Vorgehensweise und Erkenntnisse der ersten Methode sind im Kapitel 2 aufgeführt.

Mit der zweiten Methode geht die Bestimmung des Baumaschineneinsatzes aus der Praxis einher, die die Lastzyklusdefinition ermöglichen soll. Zu Beginn werden in Kapitel 3 relevante Statistiken sowie eigens aufgestellte Bauprozessanalysen ausgewertet. Daran schließt sich in Kapitel 4 die Auswertung von Flottendaten an. Die Anzahl von rund 8,0 Mio. Datensätzen lässt detaillierte Rückschlüsse auf den Maschineneinsatz zu. Aufgrund der Vielzahl an Daten wird eine Modellentwicklung vorgenommen. Diese Modellentwicklung hat zum Ziel, interne und externe Faktoren auf den Maschineneinsatz mit Relevanz auf den Kraftstoffverbrauch herauszufiltern und deren Einfluss zu quantifizieren. Ebenso findet eine detaillierte Beleuchtung auf die Leerlaufanteile statt, welche Ursachen es hierfür gibt und wie Leerlaufzeiten reduziert werden können. Abschließend wird im Kapitel 4 die Ausweisung der Energieeffizienz basierend auf den Flottendaten diskutiert. Die vollumfänglichen Erkenntnisse aus den Flottendaten sowie die Ergebnisse der ersten Methode lassen eine Lastzyklusdefinition zu, was im Kapitel 5 erläutert wird. Dies erfolgt differenziert nach den Maschinenklassen der Hydraulikbagger und Radlader. Wichtig ist dabei der methodische Ansatz, welcher im Rahmen dieser Arbeit als Ergebnis offen zu verstehen ist. Hiermit geht einher, dass nicht starr an abzuleitende Definitionen festzuhalten ist, sondern vielmehr verschiedene Variationen und Einflüsse auf den Kraftstoffverbrauch in der Praxis zu analysieren und auf deren Einfluss zu quantifizieren sind.

Die dritte Methode sieht eine Validierung der gewonnenen Erkenntnisse im Rahmen eines In-Situ-Tests vor, was im Kapitel 6 beschrieben wird. Als erster Schritt sind die Vorgehensweise sowie die Rahmenbedingungen zu erläutern. Die Validierung erfolgt innerhalb von vier Testreihen, die jeweils unterschiedliche Aspekte und deren Auswirkung auf die Energieeffizienz beinhalten. Abschließend erfolgt eine Beschreibung der wesentlichen Erkenntnisse sowie die Ausweisung der Effizienz durch ein zu entwickelndes, zweistufiges Modell.

Die beschriebene Methodik sowie der Aufbau der Arbeit gehen aus der Abbildung 1-2 hervor. Zur besseren Übersicht sind die Kapitelüberschriften auf Schlagworte reduziert worden.

Viele Daten und Statistiken in dieser Arbeit sind von den Kooperationspartnern nur mithilfe einer Geheimhaltungserklärung bereitgestellt worden. Die Auswertung erfolgt innerhalb dieser Arbeit nur deskriptiv. Ferner sind zur besseren Übersicht die Indizes der Formeln ohne eine Erläuterung aufgeführt. Diese befinden sich im Anhang 2.

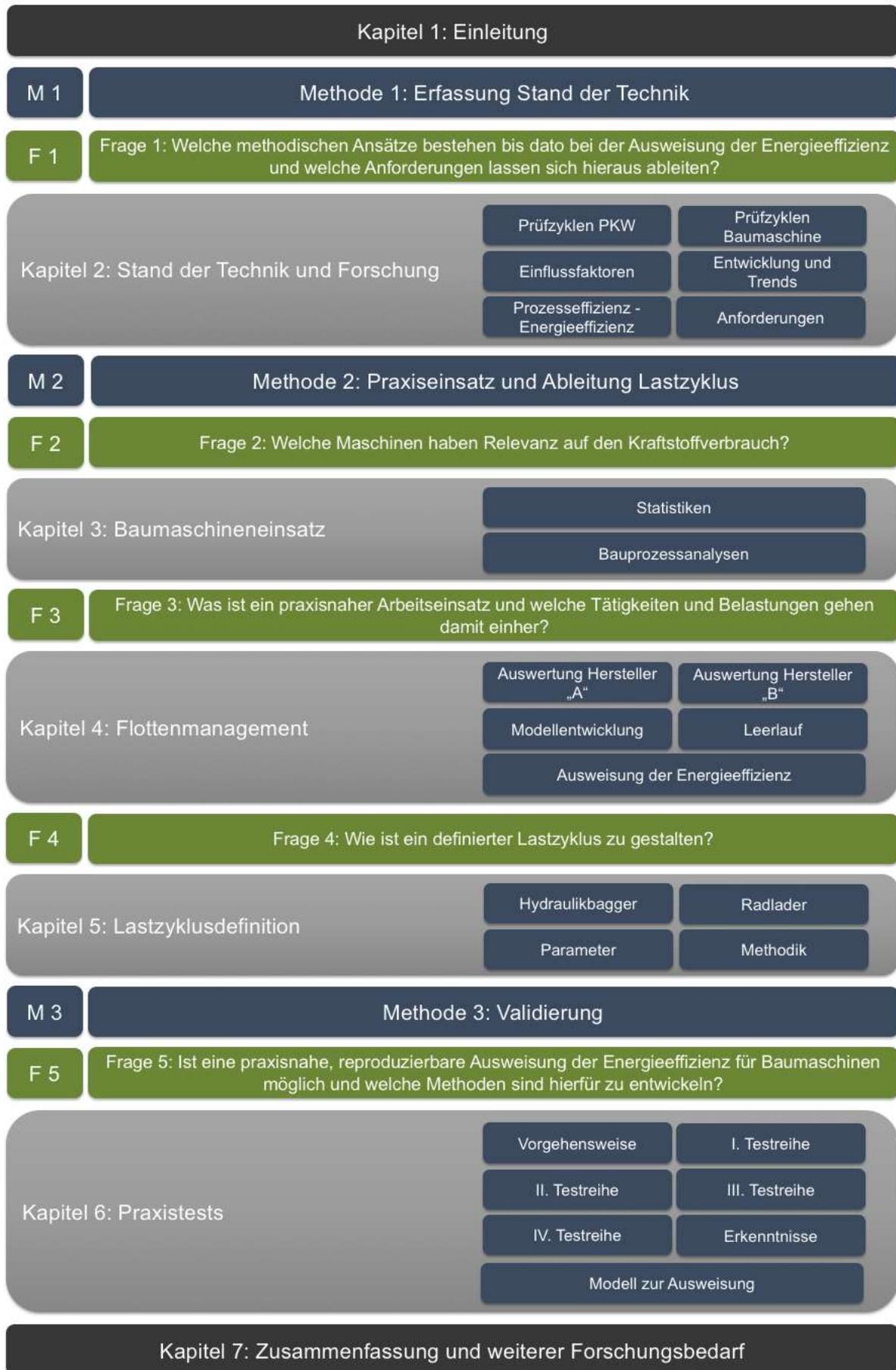


Abbildung 1-2: Methodischer Ansatz und Aufbau der Arbeit

1.4 Vorveröffentlichungen

Der Anstoß zu dieser Arbeit erfolgte durch ein Forschungsprojekt am Interdisziplinären Zentrum III für das Management technischer Prozesse der Bergischen Universität Wuppertal. Der Titel des Projektes lautet „Standardisierung definierter Lastzyklen und Messmethoden zur Energieverbrauchsermittlung von Baumaschinen“ und wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert. In Bezug auf das Forschungsprojekt sind Teilergebnisse bereits vorveröffentlicht worden (siehe Anhang 1).

Um eine größtmögliche Praxisnähe zu gewährleisten, sind Teilergebnisse des Forschungsprojektes mit diversen Akteuren sowohl aus der Bauwirtschaft als auch seitens der Baumaschinenhersteller intensiv diskutiert worden. Resultierend aus den Gesprächen sind weitere Testreihen angestoßen und neue methodische Ansätze entwickelt worden, um eine ganzheitliche Betrachtung in Bezug auf die Energieeffizienz von Baumaschinen zu gewährleisten.

2 Stand der Technik und Forschung

Für die Lastzyklusdefinition ist der Stand der Technik und Forschung umfänglich zu erfassen und sich mit diesem kritisch auseinanderzusetzen. In diesem Kapitel ist die folgende Forschungsfrage zu beantworten:

F 1

Welche methodischen Ansätze bestehen bis dato bei der Ausweisung der Energieeffizienz und welche Anforderungen lassen sich hieraus ableiten?

Die Forschungsfrage 1 mit der Methodik der Literaturanalyse stellt die grundsätzliche Fragestellung dar. Hieraus lassen sich weitere Forschungsfragen ableiten:

- Welche Prüfzyklen bestehen im Bereich der PKW-Branche sowie für mobile Arbeitsmaschinen und welche Handlungsfelder gehen hiermit einher?
- Welche Einflussfaktoren wirken sich maßgeblich auf die Produktivität aus und welche quantitative Auswirkung haben diese?
- Welche Entwicklungen sind bei mobilen Arbeitsmaschinen zu beobachten und inwiefern haben diese Relevanz auf den Kraftstoffverbrauch?
- Wie sind die Begrifflichkeiten der Energieeffizienz und Prozesseffizienz zu differenzieren und welche wechselseitige Wirkung besteht hierzu?

Mit der Betrachtung der PKW-Branche geht der Rückschluss auf einen normierten Prüfstandtest einher. Die Beantwortung der jeweiligen Forschungsfragen erfolgt hierzu in den folgenden Unterkapiteln.

2.1 Prüfzyklen der PKW-Branche

Die Prüfzyklen der PKW-Branche führen, vor allem im europäischen Raum, zu kontroversen Diskussionen, inwieweit der hier gültige Zyklus den tatsächlichen Kraftstoffverbräuchen und Schadstoffemissionen entspricht.

Im Folgenden soll näher dargestellt werden, welche Zyklen mit den jeweiligen Richtlinien einhergehen und wie realitätsnah diese sind.

2.1.1 NEFZ

Die Richtlinie 70/220/EWG ist seit dem 20.03.1970 gültig und reguliert den Neuen Europäischen Fahrzyklus (kurz: NEFZ). Die Kritik an die Praxisferne dieses Messverfahrens konnten die zahlreichen Novellierungen nicht verringern und bestehen in der aktuellen Fassung vom 01.01.2007 immer noch.

Das Verfahren sieht für die Effizienzbewertung ein Fahrprofil auf einem Rollenprüfstand vor. Die Brems- und Beschleunigungsvorgänge sind zeitlich definiert. Als Beispiel für die Praxisferne des Messverfahrens ist die Beschleunigung von 0 – 50 km/h zu nennen, die mit einer zeitlichen Dauer von insgesamt 26,0 Sekunden definiert ist.⁴ Eigene, nicht repräsentative Erhebungen weisen eine Dauer von 12,0 Sekunden in der Praxis auf. Das geringe Beschleunigungsmaß führt in Verbindung mit der geringen Maximalgeschwindigkeit von 120 km/h dazu, dass für den Test eine durchschnittliche Antriebsleistung von 4 kW benötigt wird.⁵

Ein weiterer Kritikpunkt besteht in der Ausweisung der Emissionen bei hybriden Antriebssträngen. Der Zyklus wird mit ge- und entladenen Batterien absolviert und die beiden Werte gemittelt. Jedoch findet eine Anrechnung der benötigten elektrischen Energie nicht statt.⁶ Hierdurch weichen die ausgewiesenen Verbrauchswerte noch stärker von praxisnahen Werten ab. Als Beispiel ist ein Porsche 918 Spyder zu nennen. Der hybride Antriebsstrang besteht aus einem V8-Verbrennungsmotor mit 608 PS und einem Elektromotor mit 286 PS. Aufgrund der Testbedingungen des NEFZ weist dieser einen Normverbrauch von 3,1 l/100 km auf.⁷

Laut einer Studie des österreichischen Umweltbundesamts weichen die normierten Verbräuche von den tatsächlichen Verbräuchen im Jahr 2013 um 27 % ab. Für die Folgejahre ist die Tendenz der Abweichungen als steigend zu verzeichnen.⁸

2.1.2 WLTP

Aufgrund der stark abweichenden Werte aus dem NEFZ ist der Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure (WLTP) zum 01.07.2017 beschlossen worden. Die Einführung des WLTP erfolgt stufenweise in den Jahren 2017 bis 2020, beispielsweise in Abhängigkeit der Kategorien Steuer, Zulassung und Verbraucherinformationen.⁹

Der WLTP findet ebenso auf einem Rollenprüfstand statt. Im Vergleich zum NEFZ sind allerdings die Beschleunigungsvorgänge, die Maximalgeschwindigkeit sowie die Leistungsabfrage realitätsnäher ausgelegt. Ferner sind zusätzliche Verbraucher zu berücksichtigen, Gewichtsreduktionen ausgeschlossen sowie Manipulationen für den Luftwiderstand unzulässig.¹⁰ Der

⁴ Vgl. [1] Richtlinie 70/220/EWG, 2007, S. 73, Tabelle III.1.2

⁵ Vgl. [70] Verband der Automobilindustrie: WLTP – weltweit harmonisierter Zyklus für leichte Fahrzeuge

⁶ Vgl. [4] ECE-R 101, 2012, S. L138/54

⁷ Vgl. [30] Porsche AG: Technische Daten 918 Spyder, 2013, S. 37

⁸ Vgl. [21] Umweltbundesamt (Österreich): Abweichung realer Verbrauchswerte von Testwerten bei PKW in Österreich, 2015, S. 2

⁹ Vgl. [59] ADAC e.V.: Einführung in das Typengenehmigungsverfahren und dessen Auswirkung auf andere Gesetzgebungen und Verbraucherinformationen

¹⁰ Vgl. [8] Borgeest: Manipulation von Abgaswerten, 2016, S. 13

Verband der Automobilindustrie (VDA) rechnet mit einer Steigerung der Verbräuche zum NEFZ von bis zu 20 %.¹¹

Im Rahmen des WLTP erfolgt zusätzlich die Integration eines Messverfahrens aus folgendem Unterkapitel.

2.1.3 RDE

Mit den Real Driving Emissions (RDE) werden die Schadstoffemissionen unter realen Bedingungen auf der Straße gemessen. Das Testverfahren ist dabei wenig reglementiert. Es gibt Vorgaben für ein Temperaturfenster, aber Parameter wie Beschleunigungsvorgänge etc. sind nicht definiert. Hierdurch sollen reale Messungen auf der Straße Bestandteil des Messprotokolls für den WLTP werden. Allerdings werden die gemessenen Werte durch einen Konformitätsfaktor abgeschwächt, welcher eine Umrechnung auf einen Prüfstands-Test ermöglichen soll.

BORGEEST hält es trotz der realen Messungen für möglich, dass aufgrund der notwendig einzubauenden Messtechnik und Sensorik weiterhin Abschaltvorrichtungen zur Manipulation der Ergebnisse entwickelt werden können.¹²

2.2 Prüfzyklen für mobile Arbeitsmaschinen

Im Vergleich zu den PKWs gibt es für mobile Arbeitsmaschinen keine normative Ausweisung der Energieeffizienz. Es ist besonders zu betonen, dass ein Prüfzyklus für eine mobile Arbeitsmaschine ungleich komplexer als bei einem PKW ist. Der PKW hat als einzige Arbeitsaufgabe eine Strecke von A nach B zu bewältigen. Die mobile Arbeitsmaschine verrichtet im Gegensatz dazu eine Arbeit, die von der Arbeitsaufgabe (Graben, Planieren, Abbruch), dem Anbaugerät (Tiefelöffel, Betonpulverisierer, Anbauverdichter) bis zu den Baustellenrahmenbedingungen (enges Baufeld, Fels) sehr vielfältig sein kann. Ferner stellen sich auf jeder Baustelle die Rahmenbedingungen anders dar. Eine einfache Ausweisung der tätigkeitsbezogenen Kraftstoffverbrauchsrate ist immer im Kontext zu der geleisteten Arbeitsleistung zu sehen, sodass die Produktivität (z.B. in [t/l]) das maßgebliche Kriterium für die Effizienz einer mobilen Arbeitsmaschine ist.

¹¹ Vgl. [71] Verband der Automobilindustrie, WLTP – weltweit am Start für realitätsnähere Ergebnisse beim Kraftstoffverbrauch

¹² Vgl. [8] Borgeest; Manipulation von Abgaswerten; Springer; S. 16

2.2.1 ISO 8178

In der ISO 8178 ist die Abgasmessung für Verbrennungsmotoren reguliert. Die verschiedenen Teile der ISO 8178 sind in den vergangenen Jahren zurückgezogen worden. Trotz der zurückgezogenen Norm sind hier Regularien aufzufinden, wie die Abgaswerte zum damaligen Zeitpunkt festgestellt wurden.

Der Testablauf ist dabei in verschiedene Prüfstufen und Wichtungsfaktoren aufgeteilt. Dabei unterteilen sich die Stufen in maximal fünf unterschiedlich konstante Drehzahlbereiche in Abhängigkeit des maximalen Drehmoments.¹³

Verschiedene Studien haben aufgezeigt, dass die Messmethodik zu grob eingestuft ist und weder realistische Resultate für den Kraftstoffverbrauch noch für die Abgasemissionen möglich waren.¹⁴

2.2.2 NRTC

Aus den o.g. Gründen erfolgte die Entwicklung des Nonroad Transient Cycle (NRTC). Die Testdauer weist eine Dauer von 1.238 Sekunden bzw. 20,63 Minuten auf. Über diesen Zeitraum werden unterschiedliche Drehzahlen und Drehmomente des Verbrennungsmotors abgefragt. Der Testzyklus wird dabei genutzt, um die Vorgaben aus den unterschiedlichen, internationalen Abgasvorschriften für mobile Arbeitsmaschinen zu überprüfen.¹⁵

Nach Meinung von FILLA spiegelt der Testzyklus die Praxis nicht ausreichend wieder. Ein Abgleich zu einem Lastzyklus „Kleines Ladespiel“ für einen Radlader weist entsprechende Differenzen auf. Allerdings ist eine deutliche Annäherung zur Realität im Vergleich zur ISO 8178 erkennbar, welche als ausreichend für die Emissionsüberprüfung befunden wird.¹⁶

2.2.3 Entwurf zur ISO 11152

Der Entwurf zur ISO 11152 basiert überwiegend auf den Vorgaben der Japan Construction Mechanization Association (JCMA), welche für Bagger (H 020), Radlader (H 022) und Planier-
raupen (H 021) getroffen sind.

Für den Bagger werden als Arbeitsaufgaben das „Laden“, „Planieren“, „Fahren“ und „Leerlauf“ definiert. Das Ladespiel sieht einen Schwenkwinkel von 90° sowie in den meisten Fällen eine

¹³ Vgl. [5] DIN EN ISO 8178-4, 1996, S. 9

¹⁴ Vgl. [17] Lindgren et al.: „Engine load pattern and engine exhaust gas emissions from off-road vehicles and methods to reduce fuel-consumption and engine exhaust gas emissions“, 2002

¹⁵ Vgl. [61] Ecopoint Inc.: Nonroad Transient Cycle (NRTC), 2013

¹⁶ Vgl. [12] Filla: Representative Testing of Emissions and Fuel Consumption of Working Machines in Reality and Simulation, 2012, S. 5-6

baugrößenabhängige Grabtiefe von 2,0 m und eine Anhebung des Löffels von 4,5 m vor. Material wird beim Ladespiel nicht bewegt, welches ebenso für die Tätigkeit „Planieren“ gilt. Für alle vier Arbeitsspiele werden Anteile der Tätigkeiten in Abhängigkeit vom Maschinentyp (Ketten-/Mobilbagger) vorgegeben.¹⁷

Die Lastzyklen für den Radlader bestehen aus einem „Kleinen Ladespiel“, „Großen Ladespiel“, „Fahren“ und „Leerlauf“. Das „Kleine Ladespiel“ beinhaltet eine LKW-Beladung mit kurzer Fahrstrecke, währenddessen das „Große Ladespiel“ eine Fahrstrecke von 130,0 m vorsieht. Beim Radlader findet eine Erdbewegung statt bzw. alternativ kann der Zyklus mit einer definierten Last absolviert werden.¹⁸

Im Wesentlichen ist beim Entwurf der ISO 11152 zu konstatieren, dass viele Vorgaben zur Erfassung von betriebsgewichtsabhängigen Faktoren getroffen werden. In Gänze fehlen jedoch Methoden zur Bestimmung und Einschränkung von Einflussfaktoren, wie dem Fahrer, Boden, Untergrund etc. Diese sind im folgenden Unterkapitel 2.4 detailliert beschrieben.

2.2.4 Liebherr-Normtest

Der Liebherr-Normtest stellt eine definierte Arbeitsaufgabe für Radlader dar. Es wird von einem Haufwerk Material entnommen und in 20,0 m Abstand ein neues Haufwerk aufgeschüttet, wobei die Abkipphöhe 2,50 m beträgt. Die Zykluszeit für das somit auszuführende „Kleine Ladespiel“ beträgt 35,0 Sekunden. Als Messinstrument dient ein Kraftstoffkanister mit einem Nenninhalt von 5,0 l. Die Anzahl der Ladespiele sowie die bewegten Massen werden bis zum Entleeren des Kanisters protokolliert.¹⁹

2.2.5 DLG-PowerMix

Für Traktoren hat die Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft (DLG) einen Testzyklus zur Bewertung der Energieeffizienz entwickelt. Der methodische Ansatz besteht darin, verschiedene Arbeitsprozesse zu identifizieren und auf deren Leistungsabfrage zu quantifizieren. Die prozessbedingten Parameter werden in einem Laborversuch auf einen Prüfstand übertragen und dort validiert. Eine Umsetzung auf einem Feld wird nicht vorgenommen, da mit dem Arbeitseinsatz vom Traktor keine ausreichende Reproduzierbarkeit erzielbar ist. Die Ausweisung der Verbrauchsrate erfolgt dabei in [g/kWh].²⁰ In Summe sind mittlerweile 14 verschiedene Belastungszyklen definiert, welche unterschiedlichen Arbeitstätigkeiten entsprechen. In 2013 sind

¹⁷ Vgl. [74] Entwurf zur ISO 11152, 2011, S. 11-19

¹⁸ Vgl. [74] Entwurf zur ISO 11152, 2011, S. 24-30

¹⁹ Vgl. [42] Liebherr-Werk Bischofshofen GmbH: Radlader L550-L586 2plus2, 2008, S. 37

²⁰ Vgl. [29] Degrell, Feuerstein: „DLG-PowerMix“-Ein praxisorientierter Traktorentest, 2005

aufgrund der zunehmenden Transporteinsätze zwei weitere Belastungszyklen in der Gesamtbetrachtung ergänzt worden.²¹

2.3 Forschungsprojekte und Studien

Normen stellen den Stand der Technik dar und sind als dementsprechend träge auf Neuentwicklungen einzuordnen. Um diese Neuentwicklungen zu berücksichtigen, gilt es den Stand der Wissenschaft zu eruieren.

In Bezug auf den kontrovers diskutierten Rollenprüfstand für PKW nach dem NEFZ ist die Fragestellung offen, inwieweit ein Rollenprüfstand für die Ausweisung der Energieeffizienz von mobilen Arbeitsmaschinen geeignet ist. Eine Studie von REICH und GEIMER überprüft Vergleichszyklen für einen Radlader auf einem Rollenprüfstand. Die Abweichungen fallen mit 10,5% für einen Prüfstandtest hoch aus.²² Ebenso ist in Frage zu stellen, wie beim Rollenprüfstand das Einstecken des Radladers ins Haufwerk sowie verschiedene Lastsituationen beim Anheben der Schaufel dargestellt werden sollen.

STURM entwickelt eine simulative Methodik zur Bewertung der Energieeffizienz von einem Mobilbagger. Die Simulationsberechnungen sind für einen 90°-Ladezyklus aufgestellt worden, das um ein Fahrermodell aus Realmessungen ergänzt wurde. Mit den Berechnungen sollen Energieeinsparpotentiale für den Arbeitsprozess transparent gestaltet werden.²³

Aus dem Forschungsprojekt „Technologien für energiesparende Antriebe mobiler Arbeitsmaschinen“ entstand die Dissertation von SCHERER. Ziel der Arbeit ist es, eine Herleitung zum Vorgehen einer Effizienzbewertung für mobile Arbeitsmaschinen aufzustellen. Bei der Umsetzung werden viele Einsatzdaten erfasst und zusammengeführt. Die Ausweisung der Effizienz erfolgt als durchschnittliche Kraftstoffleistung [kW]. Aussagen zu Reproduzierbarkeit und Abweichungen für die Tests werden nur in geringem Maße getroffen.²⁴

In Bezug auf das Prüfverfahren werden von SCHERER Gesamtkosten für die Versuchsdauer genannt. Für einen Feldtest mit einer Dauer von 40 Stunden und Kosten von über 40.000 € stehen bei einem Prüfstandtest mit Modellerstellung Kosten von über 120.000 € gegenüber.²⁵ Aufgrund der o.g. hohen Abweichungen für einen Prüfstand und den deutlich höheren Kosten ist dieser als unwirtschaftlich einzuordnen.

²¹ Vgl. [60] DLG e.V.: DLG-Powermix, 2013

²² Vgl. [51] Reich, Geimer: Vergleichszyklen für Mobile Arbeitsmaschinen auf dem Rollenprüfstand, 2014, S. 40

²³ Vgl. [20] Sturm: Bewertung der Energieeffizienz von Antriebssystemen mobiler Arbeitsmaschinen am Beispiel Bagger, 2015

²⁴ Vgl. [19] Scherer: Methodik zur Bewertung der Energieeffizienz von mobilen Arbeitsmaschinen, 2016

²⁵ Vgl. Ebd., S. 110

Ein Verfahren zur Effizienzbewertung entwickelt DEITERS in seiner Dissertation. Methodisch werden die Einsatzdaten für ein Y-Arbeitsspiel eines Radladers erfasst und auf einen abgeleiteten Standard-Lastzyklus übertragen. Basierend auf den Erkenntnissen erfolgt eine simulative Überprüfung von unterschiedlichen Getriebearten sowie eine Verifizierung der Ergebnisse mit einem Messstand. Ferner untersucht DEITERS die Verluste von einzelnen Komponenten auf das Arbeitsspiel. Die Aussagekraft der Ergebnisse beschränkt sich allerdings auf das Y-Arbeitsspiel und wird nicht auf weitere Arbeitsaufgaben oder weitere Maschinentypen erweitert.²⁶

WULFMEIER definiert Kriterien und Indikatoren für die Ausweisung der Energieeffizienz. Der Fokus liegt dabei auf mobilen Arbeitsmaschinen aus der Landtechnik. Das Ergebnis ist ein Anforderungskatalog mit dem Vorschlag, die Ausweisung modular und individuell zu gestalten. Die Bewertung soll dabei über Simulationen aufgrund einer höheren Reproduzierbarkeit und geringeren Kosten erfolgen.²⁷

Für einen Mähdrescher entwickelt FLECZORECK ein Verfahren zur Verlustanalyse und Effizienzbewertung. Die Validierung der Ergebnisse aus den Simulationsberechnungen erfolgen mithilfe von Einsatzdaten. Der Fokus liegt darin, die Verluste von unterschiedlichen Antriebskomponenten eines Mähdreschers basierend auf Kennzahlen quantifizieren zu können.²⁸

FILLA differenziert in einer Studie aus 2012 vier verschiedene Verwendungszwecke für die Ausweisung der Energieeffizienz. Diese reichen von einer Richtlinie über externe und interne Benchmarks bis hin zur Designoptimierung. FILLA sieht für die Regulierung einer Richtlinie ähnliche Probleme wie beim NEFZ-Zyklus in Form einer zu geringen Leistungsabfrage. Ferner hält er im Jahr 2012 vor dem VW-Dieselskandal in 2017 eine Verwendung von Abschalteneinrichtungen zur Testoptimierung für möglich. Aufgrund der vielen Freiheitsgrade wird ein standardisierter Test als unmöglich angesehen, da sich durch die Einschränkung der Freiheitsgrade die Rahmenbedingungen als zu pauschal und demzufolge nicht aussagekräftig darstellen. Insbesondere für Hybridbagger ist ein Test nach JCMAS ohne eine Last als kritisch anzusehen, da nach FILLAs Berechnung eine Abweichung um den Faktor 4 für den idealisierten Test auftritt. Aus diesem Grund ist abzuwägen, welche Ergebnisse man erzielen möchte, wobei es überschlägige Pauschalisierungen zu vermeiden gilt.²⁹

²⁶ Vgl. [9] Deiters: Standardisierung von Lastzyklen zur Beurteilung der Effizienz mobiler Arbeitsmaschinen, 2008

²⁷ Vgl. [22] Wulfmeier: Anforderungen an Methoden zur Effizienzbewertung von mobilen Maschinen, 2015

²⁸ Vgl. [13] Fleczonek: Effizienzbewertung von Antrieben mobiler Arbeitsmaschinen am Beispiel eines Mähdreschers, 2012

²⁹ Vgl. [12] Filla: Representative Testing of Emissions and Fuel Consumption of Working Machines in Reality and Simulation, 2012

In einer weiteren Studie entwickeln SAMUELSSON et al. eine Methodik zur Auswahl von repräsentativen Lastzyklen für einen Radlader. Die Auswahl betrifft den Lastzyklus „Kleines Ladespiel“ mit einer Datenbasis aus 100 Lastzyklen. Dabei werden die Geschwindigkeit, Dauer, Produktivität sowie der Kraftstoffverbrauch und Anhebe- und Schwenkwinkel erfasst. Die entwickelte Methodik eignet sich für eine Beurteilung des Fahrvermögens, zur Identifikation von speziellen Anwendungsfällen oder für weitere Produktentwicklungen.³⁰

NG et al. untersuchen einen zusätzlichen Ansatz bei der Bewertung der Energieeffizienz und Produktivität für einen Hydraulikbagger, indem als weitere Variable die Löffelschnitttiefe für den Grabprozess berücksichtigt wird. Die Tests werden in einem realen Arbeitseinsatz durchgeführt, wobei die maßgeblichen Parameter die Motordrehzahl sowie die Löffelschnitttiefe sind. Das Ergebnis der Studie zeigt auf, dass die höchste Produktivität nicht mit einer hohen Drehzahl und Löffelschnitttiefe einhergeht. Durch eine Optimierung dieser Parameter kann die Produktivität um 30 % gesteigert und der Kraftstoffverbrauch um 24 % reduziert werden.³¹ Eine Ausweisung zur Reproduzierbarkeit der Ergebnisse und Abweichungen im Rahmen der Testreihe werden nicht erzielt.

Sämtlichen o.g. Forschungsmethoden ist gemeinsam, dass eine Validierung unter realen Praxisbedingungen mit einer Kennzahl zur Reproduzierbarkeit bzw. Abweichung nicht erfolgt. Ferner sind bis auf SAMUELSSON keine großen Datensätze aus den tatsächlichen Einsatzbedingungen zur Ableitung von definierten Lastzyklen generiert worden. Diese resultieren aus einzelnen Messreihen und sind in deren Aussage zur Repräsentativität eingeschränkt.

Diese beiden methodischen Ansätze sind das Kernelement dieser Arbeit und leiten den notwendigen Forschungsbedarf ab.

2.4 Maßgebliche Einflussfaktoren auf den Kraftstoffverbrauch

2.4.1 Fahrer

Der Fahrer ist als maßgeblicher Einflussfaktor auf ein Arbeitsspiel für mobile Arbeitsmaschinen zu bezeichnen. Es stellt sich die Frage, inwiefern sich ein hohes Level an Fahrvermögen von einem schlechten Fahrvermögen unterscheidet. Dabei wird im Rahmen der Lastzyklusbetrachtung die Arbeitsweise in Form von strukturierten Abläufen auf der Baustelle ausgeklammert und eine ausschließliche Betrachtung auf die Bedienung der Maschine gelegt.

³⁰ Vgl. [18] Samuelsson et al.: Selecting representative working cycles from large measurement data sets, 2016

³¹ Vgl. [48] Ng et al.: An eco-approach to optimise efficiency and productivity of a hydraulic excavator, 2015

Bei einer isolierten Betrachtung auf die Bedienung lässt sich die Frage ableiten, inwieweit zwischen einem guten und schlechten Fahrer zu differenzieren ist. KUNZE et al. definieren als Indikator für das Fahrvermögen den Gleichzeitigkeitsgrad bei der Bedienung der Maschine. Als Hypothese wird dabei aufgestellt, dass ein geübter Fahrer die Bedienelemente am Bagger mit deren unterschiedlichen Ansteuerungen gleichzeitig ausführt. Im Rahmen der Studie kann nachgewiesen werden, dass mit einer Clusterung unterschiedliche Fahrerniveaus mit einer Differenzierung zwischen „Geübt“ und „Ungeübt“ identifiziert werden können.³² Eine Quantifizierung der einzelnen Gruppen hinsichtlich der Kraftstoffverbräuche oder Produktivität wird nicht vorgenommen.

Hierzu gibt es mehrere Richtwerte aus Studien und der Literatur. STURM hat bei Messungen an einem Mobilbagger Unterschiede im Bereich vom Kraftstoffverbrauch in Höhe von 17 % sowie bei Zykluszeiten in Höhe von 23 % festgestellt.³³ FRANK et al. haben bei einer Studie mit einem Radlader unterschiedliche Fahrerniveaus von Anfängern ohne Maschinenerfahrung bis hin zu professionellen Fahrern verglichen. Die Unterschiede zwischen den ungeübten Fahrern zu den Testfahrern betragen in der Produktivität 700 % und beim Kraftstoffverbrauch 200 %.³⁴ HOGG et al. stellen bei einer Studie mit trainierten Fahrern in Südafrika eine Differenz von 58 % in der Produktivität und 24 % in der Maschinenauslastung fest.³⁵

Aus der Literatur gehen unterschiedliche Leistungsansätze zur Berücksichtigung des Fahrers einher. HÜSTER unterstellt ein Leistungsgefälle in Höhe von 20 %, während KÜHN eine Differenz von bis zu 55 % für möglich hält.³⁶

Die Richtwerte zeigen auf, dass eine große Spannweite hinsichtlich des Fahrvermögens existiert. Gesicherte Erkenntnisse sind immer auf einen Einzelfall mit den spezifischen Rahmenbedingungen zu beziehen.

Aufgrund der hohen Abweichungen sind Maßnahmen und Methoden für einen definierten Lastzyklus zu entwickeln, welche den Einfluss begrenzen und zu einem repräsentativen Ergebnis führen. Eine ausführliche Beschreibung hierzu erfolgt in Kapitel 6 mit der Praxistestvalidierung.

³² Vgl. [40] Kunze et al.: Bedienerinfluss auf Leistungszyklen mobiler Arbeitsmaschinen, 2011

³³ Vgl. [20] Sturm: Bewertung der Energieeffizienz von Antriebssystemen mobiler Arbeitsmaschinen am Beispiel Bagger, 2015, S. 40

³⁴ Vgl. [32] Frank et al.: On Increasing Fuel Efficiency by Operator Assistance Systems in a Wheel Loader, 2012

³⁵ Vgl. [33] Hogg et al: Excavator-based processor operator productivity and cost analysis in Zululand, 2011

³⁶ Vgl. [15] Hüster: Leistungsberechnung der Baumaschinen, 2003, S. 36 sowie Kühn: Der maschinelle Erdbau, 1984, S. 158

2.4.2 Untergrund

Zur isolierten Betrachtung der Einflussnahme des Untergrundes auf die Produktivität und den Kraftstoffverbrauch ist ein interner Herstellertest eines Baumaschinenherstellers zu nennen. Die Daten sind hierfür mit einer Geheimhaltungserklärung zur Verfügung gestellt worden, weshalb eine Veröffentlichung dieser nicht erfolgen kann.

Der Hersteller hat einen Radlader-Vergleich von eigenen Maschinen und Fremdfabrikaten in der 24-t-Klasse aufgestellt. Dabei wurden die Tätigkeiten „Kleines Ladespiel“ und „Großes Ladespiel“ bewertet. Die Ausgangssituation auf dem Testgelände bestand darin, dass sich der Boden aufgrund längerer Niederschläge zu Beginn der Testreihe als sehr weich darstellte. Im Laufe der Testwoche hat dieser sich verfestigt, sodass die Umschlagzeiten sich deutlich verbesserten und die Rollwiderstände reduzierten. Daher erfolgte sowohl zu Testbeginn als auch zum Testende die Prüfung der eigenen Maschinen, mit der ein direkter Rückschluss zur Verbesserung des Bodens möglich ist.

Tabelle 2-1: Ergebnis interner Herstellertest³⁷

Hersteller	A	B	C	D	A-Eco	A-Power
Zyklen	38	39	42	45	53	54
Zeit Zyklus [Sek.]	93,8	90,8	85	79,5	67,6	66,8
Schaufel [kg]	5.920	5.908	5.830	5.730	5.920	5.920
Gesamt geladen [t]	227,9	231,9	244,9	257,9	313,8	319,7
Geschw. [km/h]	11,6	11,9	12,7	13,7	16,0	16,2
Verbrauch [l/h]	29,8	36,3	31,6	33,1	35,5	39,6
Produktivität [t/l]	7,6	6,4	7,8	7,8	8,8	8,1

In der Tabelle 2-1 sind die einzelnen Ergebnisse der Testreihe aufgeführt. Die Reihenfolge der Hersteller entspricht der Testreihenfolge innerhalb der Woche. Hervorzuheben sind die Werte des Herstellers A zwischen Beginn und Ende, die sich sowohl in der Geschwindigkeit als auch bei der Produktivität deutlich unterscheiden. Die Differenzen in der Geschwindigkeit zwischen „A“ und „A-Power“ betragen 39,65 % und bei der Produktivität („A“ und „A-Eco“) 15,79 %. Nähere Untersuchungen über die veränderten Rollwiderstände, die Verdichtung des Bodens oder dessen Wassergehalt sind nicht erfasst worden. Jedoch ist mit diesem simplen Beispiel näherungsweise abschätzbar, welchen Einfluss der Boden auf die Arbeitsleistung ausüben kann.

³⁷ Originalquelle darf aus Geheimhaltungsgründen nicht veröffentlicht werden

2.4.3 Boden

Hinsichtlich des Bodens ist für den Maschineneinsatz das Lösen von Material von entscheidender Bedeutung. Als zwei wesentliche Indikatoren können der Lösefaktor sowie die seismische Wellengeschwindigkeit zur Bewertung herangezogen werden. Mit dem Lösefaktor wird das Maß der Auflockerung von fester Masse [fm^3] zu loser Masse [lm^3] beschrieben. Der Lösefaktor kann dann als indirekter Richtwert zur Festigkeit des Bodens genutzt werden. Ein Fels weist beispielsweise ein deutlich höheres Maß an Auflockerung auf als ein Kies. HÜSTER hat hierzu eine Tabelle mit einer Einstufung der Bodenarten nach dem Auflockerungsfaktor entwickelt, welche aus Umfangsgründen im Anhang 3 aufgeführt ist.

Als zweiter Indikator dient die seismische Wellengeschwindigkeit, die mit einem Seistest eruiert wird. Die Höhe der Geschwindigkeit lässt dabei Rückschlüsse auf die Gesteinsschicht und deren Lösbarkeit zu. EYMER et al. haben hierzu eine Tabelle entwickelt, welche die Wellengeschwindigkeit zu den Bodenklassen nach DIN 18300 und dem benötigten Werkzeug zuordnet.³⁸

Damit stehen jedoch nur Kennzahlen zur Einordnung der Böden zur Verfügung. Ein Rückschluss, welcher Mehr- oder Minderverbrauch aus welcher Bodenart resultiert, lässt sich nicht ableiten. Dies ist von vielzähligen Parametern abhängig, wie beispielsweise dem Anbaugerät (Fräse, Hammer, Reißzahn), das Betriebsgewicht der Maschine, der Maschinenklasse (Kettendozer, Kettenbagger) usw. Zur Ausweisung müsste daher der Bauprozess mit den einzelnen Parametern auf den anzutreffenden Boden in Form von fm^3/l bewertet werden. Um eine Vergleichbarkeit herzustellen, wäre der notwendige Energieeintrag zum Lösen des jeweiligen Bodens zu messen. Hierzu liegen keine belastbaren Statistiken vor.

PARASKHO et al. führen eine Studie zur Auswirkung von Bodenparametern auf die Produktivität eines Hydraulikbaggers bei einem Waldwirtschaftsweg im Miana Wald in Iran durch. Als Parameter werden u.a. die Feuchtigkeit, der Hohlraumgehalt sowie die Rohdichte für jeden Arbeitstag erfasst. Parallel dazu wird die Arbeitsleistung des eingesetzten Kettenbaggers protokolliert. Das Ergebnis weist eine Abhängigkeit der Arbeitsleistung auf die o.g. Bodenparameter auf. Dabei ist für den betrachteten Boden die Auswirkung ebendieser mathematisch bestimmt worden.³⁹ Beispielsweise geht mit einem Wassergehalt von 28 % eine Produktivität von 46,43 m^3/h einher, während bei einem Wassergehalt von 22 % die Leistung auf 68,97 m^3/h ansteigt.⁴⁰ Mit dieser Studie wird deutlich, dass die beschriebene Methodik eine Einzelfallbetrachtung für den dort angetroffenen Boden mit der eingesetzten Baggergröße darstellt. Wie

³⁸ Vgl. [10] Eymer et al.: Grundlagen der Erdbewegung, 2007, S. 36

³⁹ Vgl. [49] Parsakho et al.: Physical Soil Properties and Slope Treatments Effects on Hydraulic Excavator Productivity for Forest Road Construction, 2008

⁴⁰ Eigene Berechnung (basierend auf Studie von Parsakho et al, S. 1426, Fig. 2)

oben beschrieben, ist hierfür zur Vergleichbarkeit ein baustellenunabhängiger Energieeintrag zu eruieren, was aber nicht Gegenstand dieser Arbeit ist.

Mit Verweis auf die unterschiedlichen Lösefaktoren (siehe Anhang 3) ist zu konstatieren, dass der Boden maßgeblich die Energieeffizienz und eine Bilanzierung beeinflusst. Dies ist vor allem der Arbeitsvorbereitung mit der Auswahl an Löseverfahren und eingesetzten Maschinen zuzuordnen. Eine pauschale Spannweite, in welchem Maß der Boden dies beeinflusst, ist zahlenmäßig nicht zu quantifizieren.

2.4.4 Anbaugeräte

In Bezug auf die Anbaugeräte gibt es Unterschiede durch die vielfältige Auswahl an diversen Geräten, wie beispielsweise Löffel, Hydraulikhammer, Betonpulverisierer, Anbauverdichter, Tiltrotator etc. Hier ist in erster Linie zwischen mechanischen und hydraulischen Anbaugeräten zu differenzieren. Die hydraulischen Anbaugeräte stellen einen zusätzlichen Verbraucher dar, welcher pauschal aber keine Rückschlüsse auf den Kraftstoffverbrauch zulässt. Beispielsweise hat ein Pendelgreifer eine zusätzliche Hydraulik zum Öffnen und Schließen der Schalen. Inwieweit dieser aber einen höheren Verbrauch als beispielsweise einen mechanischen Reißzahn im schweren Fels mit hohen Lösekräften oder einen Betonpulverisierer erfordert, ist nicht bekannt.

Allein die Modellierung des Tieflöffels bei einem Bagger kann zu unterschiedlichen Ladeleistungen und Verbräuchen führen. Als Beispiel ist eine Studie der Firma Miller Buckets zu nennen. Mit einem 30-t-Bagger sind unterschiedliche Löffel auf deren Füllgrade nach SAE-Volumen für einen Schluff-Boden untersucht worden. In Bezug auf den Testgraben erzielt der Löffel von Miller eine höhere Leistung bei der Materialmenge (+17,42 %) im Vergleich zum Mittelwert der drei Standardlöffel.⁴¹

KOTTE beschreibt ein ähnliches Ausmaß, allerdings für den Leistungsabfall in Höhe von bis zu 20% in Form von nicht abgestimmten Grabgefäßen zum Baggergewicht sowie durch stumpfe Grabzähne.⁴²

Es wird deutlich, dass allein die Betrachtung eines Tieflöffels die Energieeffizienz respektive die Produktivität der Maschine maßgeblich beeinflussen kann. Hierzu zählt noch nicht die Erweiterung des Aufgabenspektrums durch weitere Anbaugeräte, wie Fräsen, Pulverisierer etc.

⁴¹ Vgl. [45] Miller UK Ltd: Buckets and Other Attachments, 2014, S. 6

⁴² Vgl. [35] Kotte: Arbeitswerkzeuge für leistungsfähige Erdbaumaschinen, 1997, S. 33

2.4.5 Zusammenfassung

Hinsichtlich eines Lastzyklus' wirken sich viele weitere Faktoren auf ein Ladespiel und damit maßgeblich auf die Energieeffizienz aus. Mit den vier beschriebenen Faktoren sind die wesentlichen und in deren Auswirkung häufig schwierig zu kalkulierenden Einflüsse beschrieben. Zudem ist der Forschungsbedarf für diese Faktoren herauszustellen. Dies betrifft vor allem den Boden sowie unterschiedliche Anbaugeräte, die in deren Vielfältigkeit auf die Energieeffizienz ein großes Potential im Bereich der Forschung aufweisen.

Als weitere Faktoren auf ein Ladespiel sind auszugsweise der Schwenkwinkel, Füllfaktor, Fahrwege, Entleerungsgenauigkeit, Grabtiefe zu nennen. Diese sind in der Literatur hinreichend beschrieben und stellen ein geringes Forschungspotential auf.

2.5 Entwicklungen und Trends der Baumaschinenbranche mit Relevanz auf die Ausweisung der Energieeffizienz

Im Bereich der Entwicklungen und Trends für die Baumaschinenbranche sind zwei wesentliche Aspekte zu betrachten. Zum einen die Abgasnachbehandlung sowie zum anderen die Hybridisierung und Elektrifizierung, was zunehmend an Bedeutung bei mobilen Arbeitsmaschinen gewinnt.

Für die Abgasnachbehandlung stellen die Grenzwerte der Schadstoffemissionen die maßgebliche Anforderung an die technische Lösung dar. Die Grenzwerte für mobile Maschinen und Geräte (non-road mobile machinery kurz: NRMM) in der EU gelten seit Dezember 1997 durch die Richtlinie 97/68/EG.⁴³ Diese ist in mehreren Stufen aktualisiert worden und reguliert in Abhängigkeit der Motorleistung die Grenzwerte für Stickoxide, Kohlenwasserstoffe, Partikel und Kohlenmonoxide.⁴⁴ Die aktuelle Fassung ist am 06. Oktober 2016 in Kraft getreten und sieht die Einführung der Stufe V für 2018 bzw. 2019 vor.⁴⁵

Die Stufe V legt eine Ausweitung der Motorleistung auf Klein- und Großmaschinen (< 19 kW; > 560 kW) sowie eine Verpflichtung für einen Dieselpartikelfilter für Maschinen mit einer Leistung von 19 – 560 kW fest.⁴⁶ Bei der aktuell gültigen Stufe IV sind die Anforderungen im Bereich der Partikel geringer, sodass ohne einen Partikelfilter diese eingehalten werden können.⁴⁷

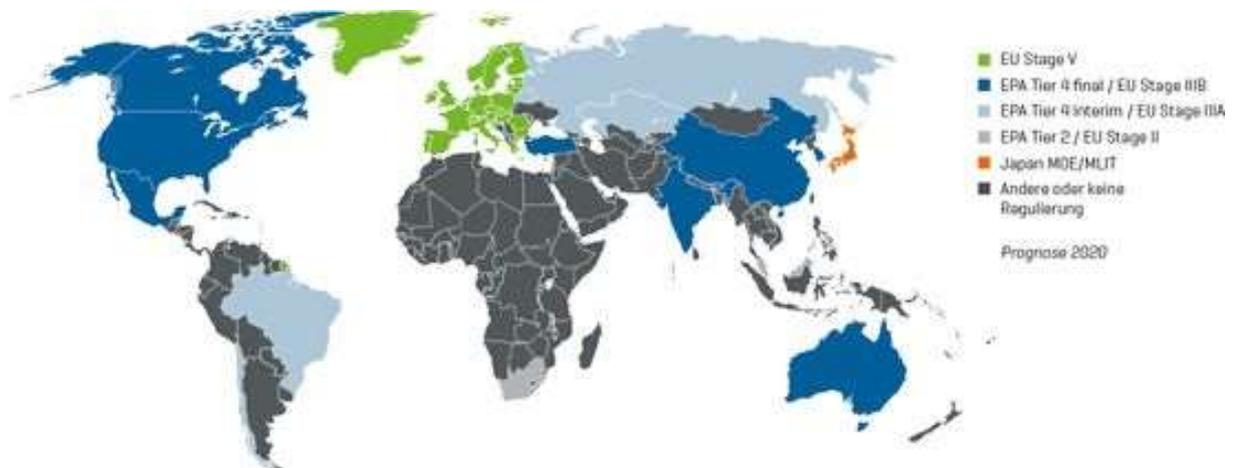


Abbildung 2-1: Übersicht weltweite Abgasnormen⁴⁸

⁴³ Vgl. [2] Richtlinie 97/68/EG, 2013

⁴⁴ Vgl. [34] ICCT: European Stage V non-road emission standards, 2016, S. 2-5

⁴⁵ Vgl. [56] VDMA: Emissionsgesetzgebung für mobile Maschinen: EU Stufe V – Fact Sheet, 2015

⁴⁶ Vgl. [6] Verordnung (EU) 2016/1628, 2016, S. L252/104

⁴⁷ Vgl. [3] Richtlinie 2004/26/EG, 2004, S. L146/15-16

⁴⁸ [46] Motorenfabrik Hatz: Schon heute fit für die Abgasnorm Stufe V, 2016, S. 2

Global betrachtet gibt es weitere Abgasnormen, die sich länderabhängig unterscheiden. Zu nennen ist insbesondere die von der amerikanischen Umweltbehörde EPA festgelegte Abgasnorm „Tier“. Die Anforderungen zwischen der EU und USA sind auf einem ähnlichen Niveau, was ebenso für die Grenzwerte in Japan gilt.⁴⁹ Generell ist festzustellen, dass in den Industrieländern die höchsten Anforderungen an die Grenzwerte gestellt werden. Im Vergleich dazu sind in den Entwicklungsländern nur geringe oder keine Regularien vorzufinden (siehe Abbildung 2-1).

Die Intervalle an Novellierungen hinsichtlich der Schadstoffemissionen ist seitens der Baumaschinenhersteller stark kritisiert worden. Die Technologie zur Einhaltung der Grenzwerte erfordert ein neues Maschinendesign, da kein Platz für eine aufwändigere Abgasnachbehandlung vorhanden ist. Der Entwicklungsaufwand sowie die Kosten stellen sich als sehr groß dar. Hinzu kommen die global unterschiedlichen Vorgaben der Abgasnormen. Diese führen zu einer Konstruktion von zwei verschiedenen Maschinentypen. Zum einen die Maschinen, welche die strengen Vorgaben in den Industrieländern einhalten, und zum anderen Maschinen, welche aufgrund der laschen Vorgaben in die Entwicklungsländer verkauft werden können.⁵⁰

In Bezug auf die Abgasnachbehandlung respektive den Schadstoffemissionen beim Dieselmotor ist im PKW-Sektor eine massive Verunsicherung der Anwender aufgrund von möglichen Fahrverboten in Innenstädten festzustellen.⁵¹ Ähnliche Entwicklungen sind im Bereich der mobilen Arbeitsmaschinen zu verzeichnen. Beispielsweise fordert die Stadt Berlin eine Nachrüstpflicht bei Dieselpartikelfilter sowie eine Schadstoffplakette für Baumaschinen. Dabei müssen bei der Beschaffung von Neumaschinen sowie bei der Vergabe von Bauleistungen die Maschinen mindestens die Stufe IIIA erfüllen. Bei Nichteinhaltung der Abgasstufen ist ein Dieselpartikelfilter nachzurüsten.⁵² Hinsichtlich der Dieselpartikelfilter gibt es seit 2014 gleiche Forderungen bei öffentlichen Auftraggebern, wie der Deutschen Bahn, für innerstädtische Baumaßnahmen.⁵³

2.5.1 Abgasnachbehandlung

Es stellt sich die Frage, in welchem Maße die Abgasnachbehandlung die Energieeffizienz von Baumaschinen beeinflusst. Für die aktuell gültige Stufe IV sowie die kommende Stufe V sind die wesentlichen Systeme zur Schadstoffreduktion die Dieselpartikelfilter (DPF) sowie die selektive katalytische Reduktion (SCR).

⁴⁹ Vgl. Ebd., S. 3

⁵⁰ Vgl. [52] Schnieder: Die neue Abgasstufe: Für Baumaschinenhersteller eine große Herausforderung, 2011

⁵¹ Vgl. [69] Springer Fachmedien: Verunsicherung bei Kaufinteressenten wächst, 2017

⁵² Vgl. [53] Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz Berlin: Leitfaden zur Kontrolle von emissionsarmen Baumaschinen und Partikelfilternachschrüstungen, 2017

⁵³ Vgl. [28] DB ML AG: Emissionsanforderungen für Baufahrzeuge und Baumaschinen, 2013, S. 1

Eine Bewertung zur Einflussnahme ist mit einem Vergleich zwischen der Kraftstoffverbrauchsrate aus einem Herstellerprospekt und der Abgasstufe nicht möglich. Aufgrund von Innovationen in der Motor- und Antriebstechnik variiert die Verbrauchsrate bei neuen Modellgenerationen und lässt keinen eindeutigen Bezug zur Abgasbehandlung und einen möglichen Mehrverbrauch zu.

Aus diesem Grund sind Studien, mit einem Fokus auf diesen Sachverhalt, auszuwerten. In Bezug auf den Dieselpartikelfilter ist eine Studie des Herstellers John Deere zu nennen, welcher einen Mehrverbrauch von < 1,0 % für den Partikelfilter beziffert.⁵⁴ Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt bei den Praxistests zu dieser Thematik eine eigene Validierung.

Physikalisch bedingt sind bei der Nutzung der SCR-Technologie Mehrverbräuche zu verzeichnen. Eine Untersuchung wurde hierzu vom ADAC für einen PKW mit einer nachgerüsteten SCR-Technik durchgeführt. Der Mehrverbrauch für den Kraftstoff beträgt 5 %.⁵⁵ Zusätzlich ist der Verbrauch für den benötigten Harnstoff zu berücksichtigen, welcher Kosten in Höhe von 20 Cent pro 100 km verursacht. Aktuelle Studien für mobile Maschinen liegen hierzu nicht vor. Eine Transferierung der Mehrverbräuche auf den Bereich der mobilen Maschinen ist aber denkbar.

Hinsichtlich der Abgasnachbehandlungen liegen nur Studien zu den Reduzierungen der Schadstoffexpositionen, zum Abgasgegendruck beim Dieselpartikelfilter usw. vor.

2.5.2 Alternative Antriebsstränge

Für die alternativen Antriebsstränge sind die Entwicklungen in Richtung einer Hybridisierung und Elektrifizierung maßgeblich. Die Vielfältigkeit an verschiedenen Varianten und Konzepten kann umfangsmäßig nicht dargestellt werden. Im Rahmen dieser Arbeit soll daher ein Überblick über die Technologien und deren Berücksichtigung auf die Energieeffizienz gegeben werden.

Der hybride Antriebsstrang ist generell so konzipiert, dass Verlustenergie wie z.B. beim Schwenken als Energie für die Rekuperation zwischengespeichert wird. Diese Energie wird beim Folgeprozess wieder nutzbar gemacht, um den Energieaufwand für die Gesamtleistung zu reduzieren.

Von den Baumaschinenherstellern gibt es verschiedene Konzepte zur Umsetzung dieser Technologie. Exemplarisch sei ein System des Herstellers Komatsu für einen Kettenbagger genannt. Die Energie beim Abbremsen des Oberwagens wird in einem Kondensator zwischengespeichert und beim Zurückschwenken für den elektrischen Schwenkmotor des Oberwagens

⁵⁴ Vgl. [47] Neunaber, Wilmer: Es geht auch ohne AdBlue, 2011, S. 17

⁵⁵ Vgl. [58] ADAC e.V.: Diesel-Nachrüstung mit SCR-System

zur Verfügung gestellt.⁵⁶ Das Maß der Energieeinsparung richtet sich folglich nach dem Maschineneinsatz bzw. auf den o.g. Kettenbagger bezogen auf den Schwenkanteil. Die von den Herstellern ausgewiesenen Ersparnisse belaufen sich auf eine Bandbreite von 25 – 40%.⁵⁷

Bei einer Marktanalyse stellt sich für einen hybriden Hydraulikbagger eine deutliche größere Modellvielfalt als für den Radlader dar. Von der Baugröße sind die Hybridbagger als Kettenbagger in einem Segment der Leistungsgeräte von 24,0 – 36,0 t größtenteils vertreten. Für den Bereich der Elektrifizierung ist eine gegensätzliche Verteilung bei den Baugrößen zu erkennen. Dort sind elektrische Antriebsstränge bei Klein- oder Großgeräten vertreten. Mit großen Baumaschinen sind beispielsweise Elektroseilbagger von CAT mit Betriebsgewichten von 789,0 – 1.429,0 t zu nennen.

Bei einem elektrischen Antriebsstrang ersetzt ein elektrischer Erzeuger den Verbrennungsmotor. Die Kraftübertragung und -verteilung erfolgt nach wie vor über die Hydraulik.

Im Bereich der Elektrifizierung ist bei den Großmaschinen ein Kabelbetrieb notwendig, um die Energieversorgung zu gewährleisten. Die Anwendung beschränkt sich daher auf Maschinen, die überwiegend stationär arbeiten, wie im Bereich der Umschlag- oder Großbagger.

Für das Segment der Kleinmaschinen ist ein kabelloser Einsatz möglich. Die am Markt verfügbaren Kompaktlader weisen eine Akkulaufzeit von bis zu 5,0 Stunden auf. Die Ladezeiten für eine vollständige Beladung werden mit 7,0 Stunden angegeben.⁵⁸ Im Bereich der Bagger sind Akkulaufzeiten von bis zu 8,0 Stunden möglich.⁵⁹ Die Einschränkung in der Akkulaufzeit zeigt die Problematik beim Einsatz für die Baustelle auf. Daher ist das aktuelle Produktportfolio den Hilfsgeräten mit einer geringen täglichen Laufzeit auf Baustellen zuzuordnen.

Aufgrund steigender Energiekosten, der Endlichkeit von fossilen Energieträgern sowie die Verschärfungen im Bereich der Schadstoffemissionen ist eine Verbreitung von hybriden und elektrifizierten Antriebssträngen zwangsläufig.

Die Berücksichtigung von neuen Antriebstechnologien für definierte Lastzyklen respektive der Energieeffizienzbilanzierung erfolgt gesondert im Kapitel 2.7.

⁵⁶ Vgl. [50] Pleic: Der Hybrid von Komatsu – effizient und umweltschonend, 2018, S. 21-22

⁵⁷ Vgl. [26] Cohrs: Keine Energie verschwenden!, 2017, S. 21

⁵⁸ Vgl. [38] Kramer-Werke GmbH: Der eRadlader 5055e; [39] Der eRadlader KL25.5e setzt Maßstäbe sowie [72] Wacker Neuson SE: Technische Daten WL20e

⁵⁹ Vgl. [66] Groupe Mecalac S.A.: MECALAC e12: 100 % Elektrobagger für den Einsatz auf städtischen Baustellen, 2018

2.6 Differenzierung Prozesseffizienz – Energieeffizienz

Die Grenzen der Prozesseffizienz zur Energieeffizienz sind fließend. Zum näheren Verständnis, inwiefern die Prozess- von der Energieeffizienz zu differenzieren sind, seien folgende Definitionen genannt. Der Bereich der Energieeffizienz beschreibt den Energieaufwand, der notwendig ist, um die Maschine zu betreiben. Hierzu zählen als Einflussfaktoren beispielsweise innermotorische Verluste, unterschiedliche Getriebearten oder verschiedene Hydrauliksysteme. Unter der Prozesseffizienz wird die tatsächliche Arbeitsleistung der Maschine verstanden. Hierunter fallen der Maschinenauslastungsgrad, Leerlaufanteil und die Produktivität der Maschine. Zusammengefasst können diese Begrifflichkeiten einmal der Maschinenleistung im Bereich der Energieeffizienz sowie der Baustellenleistung für die Prozesseffizienz differenziert werden. Die Wechselwirkung bei der Ausweisung dieser Effizienzarten soll im Folgenden näher erläutert werden.

Um eine eindeutige Differenzierung aufzustellen, verfolgt beispielsweise KLEIBEL den Ansatz, nur die Maschineneffizienz zu bewerten und Anbaugeräte sowie Randbedingungen der Baustelle auszuschließen.⁶⁰ Eine isolierte Betrachtung der reinen innermotorischen Effizienz ist als nicht zielführend anzusehen. Es würden maßgebliche Innovationen, die den Bauprozess beeinflussen, nicht mitbetrachtet (siehe Kapitel 2.4.4). Eine ganzheitliche Betrachtung der Maschineneffizienz würde ein deutlich breiteres Spektrum an Anwendungsfeldern abdecken und vermutlich zu einer besseren Akzeptanz seitens der Ausweisung sowohl beim Anwender als auch bei den Herstellern führen.

Als Beispiel für die Prozesseffizienz ist der Einsatz eines vollhydraulischen Schnellwechslers zu nennen. Dieser verringert die Leerlauf- und Stillstandzeiten auf der Baustelle bei einem Anbaugerätewechsel erheblich und erhöht die Wirtschaftlichkeit der Maschine.

Die Firma Liebherr hat hierzu eine Studie aufgestellt, veröffentlicht jedoch diese aus wettbewerbstechnischen Gründen nicht. Als grober Richtwert ist eine Maschinenauslastung von bis zu 90 % sowie eine Produktivitätssteigerung von 30 % im Mittel möglich.⁶¹

Der Kraftstoffverbrauch und demzufolge die Energieeffizienz der Maschine ändern sich dadurch aufgrund des Mehrgewichts des Schnellwechslers nur in einem geringen Maße. Um den Mehrwert dieser Vorrichtung bilanzieren zu können, ist daher die Bewertung der Baustellenprozesse und der Geräteauslastung notwendig.

Einen Schritt zur Bilanzierung der Prozesseffizienz stellt ein Forschungsprojekt des KIT dar. Ziel des Projektes ist es, die Gesamtbilanzen an Emissionen für ein Bauwerk zu betrachten.

⁶⁰ Vgl. [37] Kleibl: Effizienzbewertung bei Spezialtiefbaumaschinen, 2015, S. 134

⁶¹ Vgl. [41] Liebherr-Hydraulikbagger GmbH: Schnellwechselsysteme, 2013, S. 8

Es werden dabei sowohl die Emissionen der Maschinen, des Baustellenprozesses als auch die Emissionen bei der Materialherstellung berücksichtigt.⁶²

Die Wechselwirkungen dieser Bilanzierung sollen im Folgenden näher erläutert werden.

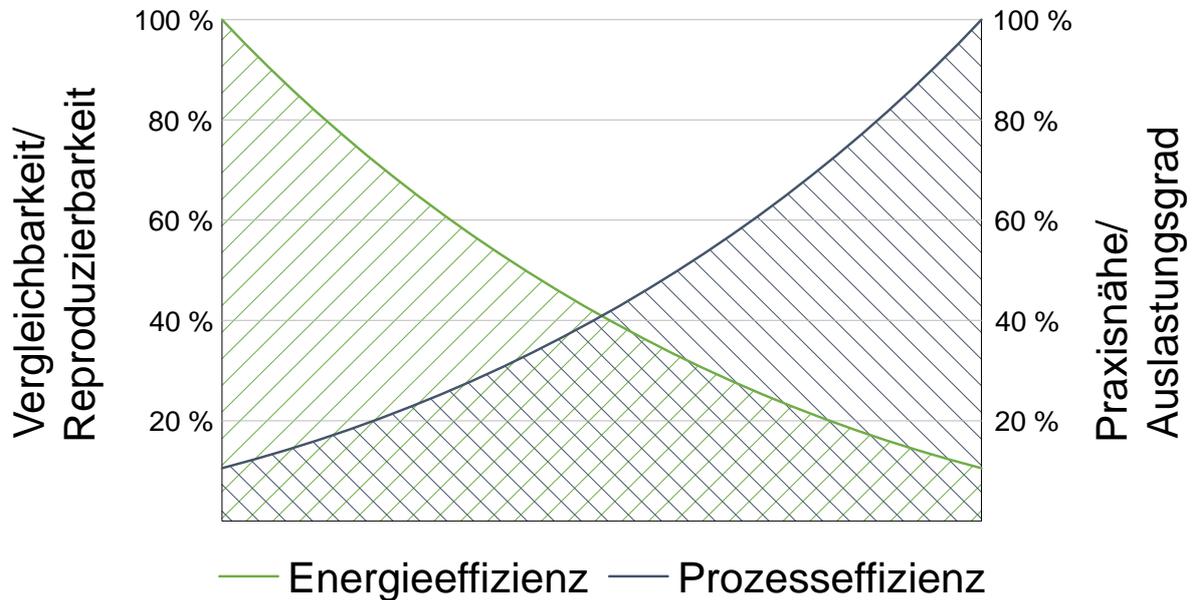


Abbildung 2-2: Wechselwirkung Energieeffizienz/Prozesseffizienz

Zur näheren Betrachtung dient die Abbildung 2-2. Hieraus lässt sich das Ziel unter den aufgestellten Definitionsbedingungen ableiten. Die dargestellten Kurven und deren Zuordnung zur prozentualen Übereinstimmung sind exemplarisch und erheben keinen Anspruch auf Richtigkeit. Es wird daraus ersichtlich, in welchem Spannungsfeld sich die Effizienzbilanzierung befindet. Aus dem Diagramm lässt sich ableiten, dass eine hohe Reproduzierbarkeit eine geringe Praxisnähe zur Folge hat. Daher gilt es abzuwägen, welche Ergebnisse man erzielen möchte und an welche Zielgruppe sich diese ausrichten.

Der Ansatz von KLEIBEL ist nach der Abbildung 2-2 eindeutig auf der linken Seite im Bereich der Energieeffizienz zuzuordnen. Eine Vergleichbarkeit ist hiermit maximal gegeben, jedoch ist eine Praxisnähe auszuschließen, da nur innermotorische Verluste bilanziert werden. Weitere Einflussfaktoren, wie beispielsweise Anbaugeräte oder Schnellwechsler, die von Relevanz für den Anwender sind, werden hierbei konsequent ausgeschlossen, sodass diese Zielgruppe nicht erreicht werden kann.

Im Gegensatz dazu stellt sich die Studie des KIT mit der Bewertung der Emissionen für ein Bauwerk dar. Die Bilanzierung kann allein durch unterschiedliche Lieferanten, Fahrwege zur

⁶² Vgl. [23] Ays, Geimer: CO₂e Quantifizierung von mobilen Arbeitsmaschinen im Erdbau, Steinbruch, Straßen- und Hochbau, 2017

Baustelle usw. variieren. Eine maximale Praxisnähe ist hiermit gewährleistet, aber immer individuell auf das Bauwerk mit den spezifischen Rahmenbedingungen zu beziehen. Diese Faktoren schließen eine Vergleichbarkeit aus.

Diese Arbeit legt den Fokus auf die Ausweisung der Energieeffizienz. Die Herausforderung besteht daher darin, ein Messverfahren auszuarbeiten, welches hinsichtlich der Energieeffizienz zu reproduzierbaren und belastbaren Ergebnissen führt, aber auch Faktoren der Prozesseffizienz ausweisen kann. Nur mit diesem Ansatz kann eine Ausweisung erfolgen, die die Interessen aller Akteure zufriedenstellt. Dies soll mit den Anforderungen näher beschrieben werden.

2.7 Anforderungen an die Energieeffizienzbilanzierung für Baumaschinen

Mit den Anforderungen geht eine Zusammenfassung der Erkenntnisse aus diesem Kapitel einher. Hierbei ist nochmal hervorzuheben, dass die anvisierte Zielgruppe für die Ausweisung der Energieeffizienz im Rahmen dieser Arbeit der Anwender ist.

Die Normzyklen der PKW-Branche weisen durch praxisferne Prüfstandtests einen erheblichen Optimierungsbedarf auf. Bestehende Tests seitens der Baumaschinen sind auf den Motor isoliert (ISO 8178/NRTC), betrachten nur einzelne Tätigkeiten (Liebherr-Normtest) oder sind zu stark pauschalisiert (Entwurf zur ISO 11152).

Die Auswertung von unterschiedlichen Studien und Forschungsprojekten zeigt eine Vielzahl an Projekten im Bereich der Ausweisung auf. Allerdings fehlt der methodische Ansatz, Realdaten aus der Praxis als Vorgabe zu eruieren und diese in situ zu überprüfen. Stattdessen werden vielzählige Datenmengen durch Datenlogger für Baugruppen und Komponenten generiert. Dies ist geeignet, um Verlustanalysen der einzelnen Energieströme mit dem Ziel der Maschinoptimierung durchzuführen. Das hier erklärte Ziel der transparenten, reproduzierbaren und praxisnahen Ausweisung der Energieeffizienz für den Anwender ist mit dieser Methodik als nicht zielführend einzustufen.

Als größten Einflussfaktor ist eindeutig der Maschinist zu identifizieren. Eine Quantifizierung hinsichtlich des Bodens und dessen Einfluss auf die Energieeffizienz sind auf den Bauprozess zu beziehen und schwer zu pauschalisieren. Aus diesen Grund liegen hierzu keine Kennwerte vor. Ferner ist ein Trend beim Bagger als Universalmaschine mit dem Einsatz von diversen Anbaugeräten zu verzeichnen. Daher ist eine Berücksichtigung dieser erforderlich.

In Bezug auf die Abgasnachbehandlung sind Mehrverbräuche bis zu 5 % für die SCR-Technologie zu verzeichnen. Im Gegensatz dazu weist der Dieselpartikelfilter eine Steigerung der Verbrauchsrate von <1,0 % auf.

Im Bereich der Neuentwicklungen und Trends sind die Hybridisierung und Elektrifizierung zu nennen. Zur Berücksichtigung sind bei hybriden Antriebssträngen vorzugsweise die Energieströme der Rekuperation zusätzlich zu messen. Sofern keine externe Energie in die Arbeitsmaschine gespeist wird (bspw. durch das Laden einer Batterie), erfolgt die Generierung der Rekuperationsenergie innerhalb der Maschine. Für den Anwender ist daher von Interesse, welche Einsparungen hiermit erzielt werden und welche Amortisationszeiten sich ergeben (Mehrpreis/Einsparung Kraftstoff).

Gegensätzlich stellt sich dies für Plug-In-Hybride dar. Eine kritische Auseinandersetzung zu diesem Thema findet im Kapitel 2.1.1 statt. Beim PKW sind die Kapazitäten der Batterie und damit eine Verbrauchsminderung nur bei Kurzstrecken festzustellen. Daher sind die Vorteile der Technologie stark einsatzabhängig, weisen aber einen irreführenden Normverbrauch auf. Dies gilt es in der Entwicklung von Lastzyklen für Baumaschinen auszuschließen.

Eine wesentliche Abgrenzung ist in Bezug auf die Prozesseffizienz zu nehmen, mit der eindeutige Rückschlüsse auf die Wirtschaftlichkeit von Bauprozessen möglich sind. Diese steht allerdings in wechselseitiger Wirkung zur Energieeffizienz, sodass eindeutige Trennungen vorzunehmen sind.

Stichpunktartig gehen folgende Anforderungen an einen definierten Lastzyklus für die Ausweisung der Energieeffizienz mit dem Anwender als Zielgruppe einher:

- In-Situ-Test unter realen Einsatzbedingungen
- Ausweisung der Verbräuche und Produktivität
- Keine zu starken Pauschalisierungen
- Berücksichtigung neuer Antriebstechnologien

Aus den Anforderungen lassen sich weitere zahlreiche Vorgaben sowohl für die Maschineneinstellung als auch für die Rahmenbedingungen ableiten. Diese werden ausführlicher im Kapitel 5.3 erläutert.

3 Baumaschineneinsatz in der Praxis

Mit dem Kapitel 3 geht die Beantwortung folgender Forschungskernfrage einher.

F 2

Welche Maschinen haben Relevanz auf den Kraftstoffverbrauch?

Aus der Forschungskernfrage lassen sich weitere Fragestellungen ableiten:

- In welchen Branchen werden die Maschinen eingesetzt und welche übergeordneten Tätigkeiten lassen sich hieraus ableiten?
- Welche Anbaugeräte sind relevant für den Einsatz der Hydraulikbagger und Radlader?
- Wie hoch sind die Anteile der Kraftstoffkosten an den Gesamtbetriebskosten?
- Welche Aussagen können mit Bauprozessanalysen zum Maschineneinsatz formuliert werden?

Wichtig bei der Identifikation von relevanten Maschinen ist die Deklaration von eindeutigen Begrifflichkeiten. Aus diesem Grund ist eine Definition der Begriffe für die einzelnen Maschinen unter Abbildung 3-1 vorgenommen. Dies ist sowohl zur eindeutigen Beschreibung für das Kapitel 3 aber insbesondere für das Kapitel 4 elementar.

Die in der Abbildung 3-1 aufgeführten Begriffe sind Beispiele und stellen einen Auszug der in dieser Arbeit zu betrachtenden Baumaschinen dar. Unter einer Maschinenklasse wird in dieser Arbeit die übergeordnete Kategorie der Hydraulikbagger und Radlader verstanden. Darunter ordnen sich die verschiedenen Maschinentypen wie Mobilbagger, Kettenbagger etc. ein. Innerhalb der einzelnen Maschinentypen ist zwischen unterschiedlichen Modelltypen zu differenzieren. Diese unterteilen sich sowohl nach den Betriebsgewichten wie auch nach Modellserien. Die Modellserien werden je nach Hersteller durch Nummern oder Buchstaben kenntlich gemacht.

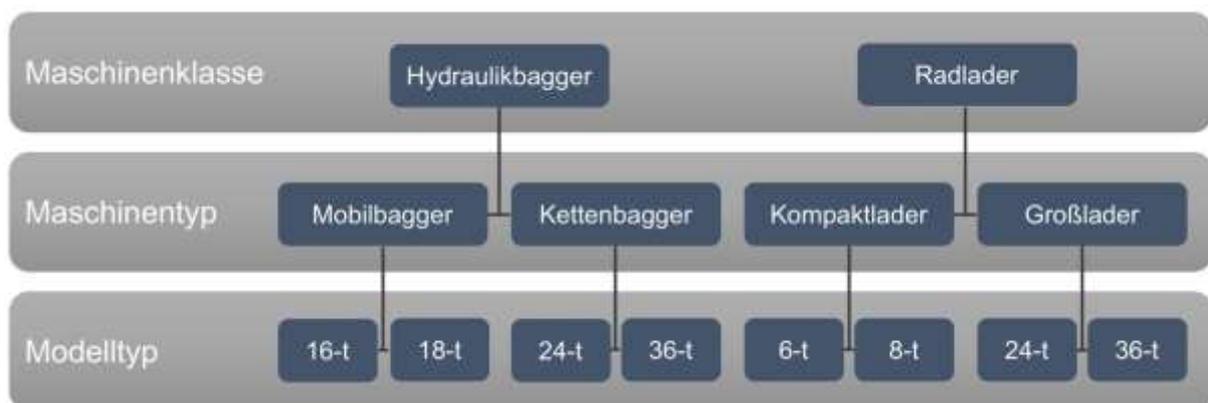


Abbildung 3-1: Definition Maschinenklasse, Maschinentyp, Modelltyp

3.1 Statistiken und Betriebskostenauswertungen

Wie in der Einleitung dieser Arbeit beschrieben, stellen die Hydraulikbagger und Radlader die Maschinenklassen dar, die den höchsten Kraftstoffverbrauch seitens der mobilen Arbeitsmaschinen für die Baubranche verursachen. Zur näheren Bestimmung, welche Maschinentypen innerhalb dieser Maschinenklassen von Bedeutung sind, dienen Statistiken des Verbandes Deutscher Maschinen- und Anlagenbauer (VDMA), die Rückschlüsse hinsichtlich der relevanten Maschinentypen und Verwenderbereiche zulassen.

In der Abbildung 3-2 sind die Anteile der im Jahr verkauften Maschinen für die Hydraulikbagger und Radlader dargestellt. Zur besseren Übersicht sind die Mini- und Kompaktbagger zusammengefasst als Kleinbagger ausgewiesen. Zur näheren Betrachtung des Maschinentyps auf den Kraftstoffverbrauch ist ein typischer Mittelwert für die Verbrauchsrate, unabhängig von den durchschnittlichen Betriebsstunden, mit der Anzahl multipliziert worden. Angenommen ist hier beispielhaft eine Verbrauchsrate für einen Kleinlader von 7,5 l/h und für einen Großlader von 16,0 l/h. Daher sind für die Maschinenklassen jeweils zwei Werte in Form von der „Anzahl“ und der berechnete Wert der Anzahl mit der durchschnittlichen Verbrauchsrate als „Verbrauch“ ausgewiesen.



Abbildung 3-2: Zulassungsstatistiken in Relation zum Kraftstoffverbrauch⁶³

Beim Hydraulikbagger stellen von der Anzahl der verkauften Maschinen die Kleinbagger den größten Anteil dar. Aufgrund der Tatsache, dass ein Kleinbagger wesentlich weniger Kraftstoffverbrauch benötigt als ein Kettenbagger, sinkt die Relevanz hierfür deutlich mit einer Reduzierung des Anteils von 61,1 % auf 19,3 %. Auf Basis dieser Berechnung wird ersichtlich, dass innerhalb der Maschinenklasse „Hydraulikbagger“ die relevantesten Maschinentypen die

⁶³ Eigene Berechnung (basiert auf Daten des VDMA, schriftliche Mitteilung)

Mobil- und Kettenbagger sind und die Kleinbagger aufgrund der niedrigen Verbrauchsrate vernachlässigt werden können.

Für die Maschinenklasse der „Radlader“ ist ein ähnliches Ergebnis festzustellen. Kompaktlader sind sowohl hinsichtlich der Anzahl als auch vom Kraftstoffverbrauch mit einem Anteil von < 5,0 % zu vernachlässigen. Relevant sind die Kleinlader und Großlader, wobei die Kleinlader mit 66,7 % einen deutlich größeren Anteil hinsichtlich der Anzahl darstellen. Wird der Kraftstoffverbrauch als Faktor mit einbezogen, stellen sich die beiden Typen mit 51,5 % für den Kleinlader und 47,1 % für den Großlader als nahezu identisch dar.

Neben den Anteilen der einzelnen Maschinentypen innerhalb der Maschinenklassen stellt sich die Frage, in welchen Branchen diese eingesetzt werden und welche Tätigkeiten sich hieraus ableiten lassen. In Abbruchbetrieben werden beispielsweise andere Anbaugeräte als im Galabau verwendet. Daher ist zu untersuchen, welche Anteile diese Sonderbereiche haben und ob diese relevant für eine Lastzyklusdefinition sind.

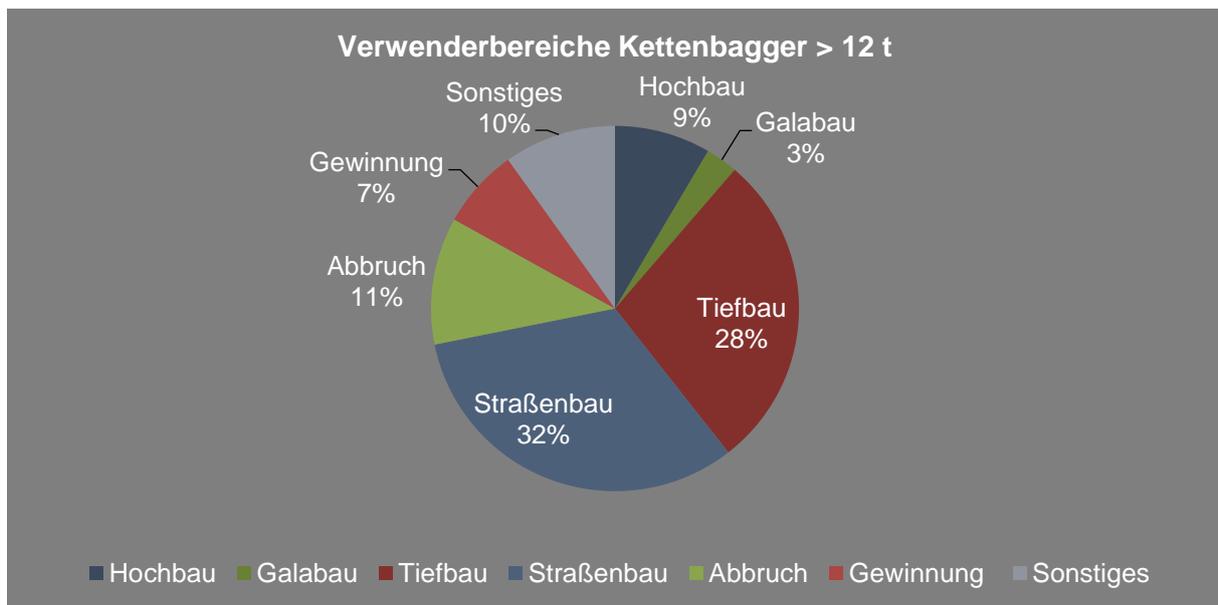


Abbildung 3-3: Zulassungsstatistik nach Verwenderbereiche für Kettenbagger > 12 t⁶⁴

Die in Abbildung 3-3 dargestellte Statistik führt die verkauften Maschinen sortiert nach den Branchen auf, exemplarisch für die Maschinen mit einem Betriebsgewicht > 12 t. Bei der Auswertung ist die Branche mit dem größten Anteil in Form der Vermietung nicht betrachtet worden, da dort keine Rückschlüsse auf den Arbeitseinsatz möglich sind. Je nach Branche fällt der Arbeitseinsatz sowie die zur Anwendung kommenden Anbaugeräte unterschiedlich aus. Aus der Statistik lässt sich ableiten, dass die Branchen Hoch-, Gala-, Tief- sowie Straßenbau mit in Summe 72,0 % den größten Anteil darstellen. Diese Branchen sind dem klassischen Erd- und Kanalbau mit einem Tieflöffel oder Pendelgreifer als Anbaugerät zuzuordnen. Die

⁶⁴ Eigene Berechnung (basiert auf Daten des VDMA, schriftliche Mitteilung)

Abbruchbranche mit speziellen Anbaugeräten, wie Pulverisierer oder Schrottscheren, stellt mit 11,0 % einen deutlich kleineren Anteil dar. Die verbleibenden Bereiche mit der Gewinnungsindustrie und Sonstiges sind ebenfalls eher dem klassischen Erd- und Kanalbau mit einem Grabgefäß als Anbaugerät zuzuordnen.

Um detailliert beurteilen zu können, welche Anbaugeräte von der Marktverteilung relevant sind, dienen Statistiken über die Geräteverteilung von einem Vermietungsunternehmen sowie der maschinentechnischen Abteilung eines Baukonzerns. Die Datenbasis umfasst seitens des Baukonzerns eine Anzahl von Anbaugeräten in Höhe von 4.847 Stück für die Hydraulikbagger sowie 197 Stück seitens des Vermieters für Radlader. Aus Geheimhaltungsgründen dürfen die Unternehmen namentlich nicht genannt werden.

Die Auswertung aus der Abbildung 3-4 für die Hydraulikbagger unterstützt das Ergebnis der vorherigen Statistik. Die Tief- und Grabräumlöffel stellen in Summe mit 78,1 % den größten Anteil an Anbaugeräten dar. Die Geräte im Bereich Abbruch fallen unter „Sonstiges“ mit einem Anteil von 2,7 %.

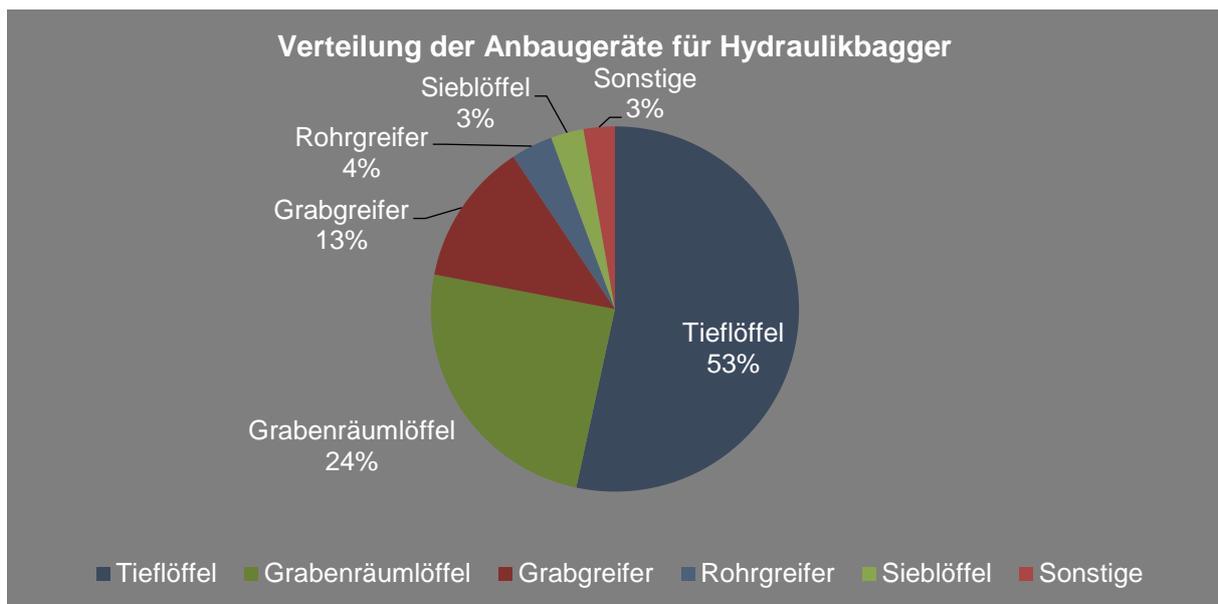


Abbildung 3-4: Verteilung der Anbaugeräte⁶⁵

Beim Radlader stellt sich eine noch eindeutigere Verteilung der Anbaugeräte dar (eine Abbildung ist hierzu nicht aufgeführt). Die Standard- und Klappschaufel sowie eine Stapleinrichtung weisen in dem Mietpark vom Vermieter einen Anteil von 97,1 % auf. Die verbleibenden 2,9 % bestehen aus Kehrmaschinen und Schneeschilder.

⁶⁵ Eigene Berechnung (basiert auf Daten eines Kooperationspartners, schriftliche Mitteilung)

Als Anbaugeräte sind für einen definierten Lastzyklus aufgrund der Marktanteile für den Hydraulikbagger der Tieflöffel sowie für den Radlader die Standardschaufel und für die Kleinlader zusätzlich die Stapelinrichtung zu betrachten.

Zur näheren Bestimmung von relevanten Maschinengrößen dient die Auswertung von Betriebskosten mobiler Arbeitsmaschinen. Die Datenbasis umfasst dabei 106 Maschinen, die sich in Kleinlader, Mini-, Kompakt-, Mobil-, und Kettenbagger aufschlüsseln und von zwei Bauunternehmen zur internen Auswertung zur Verfügung gestellt wurden.

In der Abbildung 3-5 ist der Anteil der Kraftstoffkosten an den Gesamtbetriebskosten bzw. Total Cost of Ownership (TCO) dargestellt. Es wird aus der Abbildung ersichtlich, dass der Anteil an Kraftstoffkosten mit steigender Maschinengröße zunimmt und beim Kettenbagger über 40 % an den TCO beträgt. Im Vergleich zu den Hydraulikbaggern ist der Anteil der Kraftstoffkosten an den TCO bei den Kleinladern mit 25 % mit Abstand am geringsten. Die Kosten für die Abschreibung sind bei allen Maschinentypen relativ konstant und betragen zwischen 46 und 49 %.

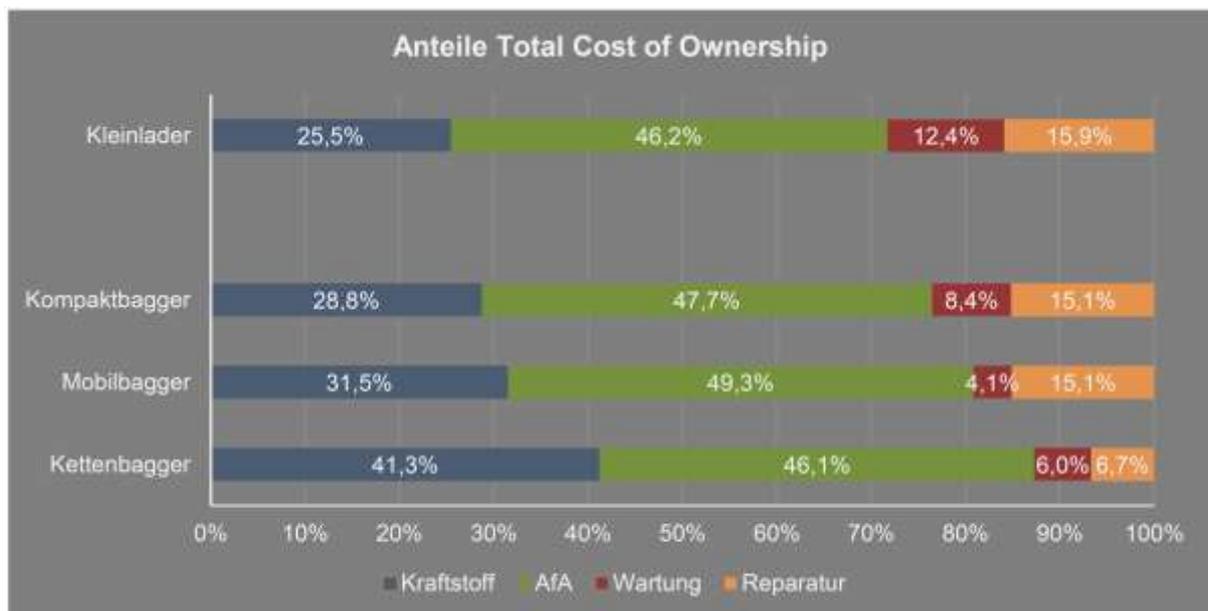


Abbildung 3-5: Betriebskostenauswertung Hydraulikbagger und Radlader⁶⁶

Die Auswertung der Betriebskosten bestätigt die aus der Auswertung zur Zulassungsstatistik (siehe Abbildung 3-2) abgeleiteten Hypothese, dass für Maschinentypen im Klein- und Kompaktsegment die Kraftstoffverbräuche und demzufolge eine Effizienzausweisung im Vergleich zu den Großgeräten nachrangig einzuordnen sind.

Auf Basis der ausgewerteten Statistiken kann zusammengefasst werden, dass hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs bei den Hydraulikbaggern die Mobil- und Kettenbagger sowie bei den

⁶⁶ Eigene Berechnung (basiert auf Daten von zwei Kooperationspartnern, schriftliche Mitteilung)

Radladern die Klein- und Großlader von besonderer Bedeutung sind. Als Anbaugeräte für den Hydraulikbagger sind dabei die klassischen Ausrüstungen für den Erdbau in Form von Tief- und Grabenräumlöffel sowie Zweischalengreifer und beim Radlader die Standard- und Klapp-schaufel am relevantesten.

3.2 Bauprozessanalysen

Mithilfe der Festlegung von relevanten Maschinen, Anbaugeräten und demzufolge ableitbaren Tätigkeiten ergibt sich die Fragestellung, wie diese Tätigkeiten und Prozesse auf der Baustelle ablaufen. Anhand der Bauprozessanalysen sind Referenzwerte zu eruieren, die für einen definierten Lastzyklus eine größtmögliche Praxisnähe herstellen sollen. Der Referenzwert basiert dabei auf einer zeitlichen Tätigkeitsanalyse, die sowohl eine quantitative Ausweisung von verschiedenen Baustellenprozessen [%] ermöglicht als auch detaillierte Rückschlüsse zu der Dauer von einzelnen Arbeitsabläufen [Sek.] zulässt.

Um dies methodisch möglichst einfach für die Bauprozessanalysen durchzuführen, ist eine eigene Applikation programmiert worden. Die Funktionsweise des Programms kann, vereinfacht ausgedrückt, als programmierte Stoppuhr beschrieben werden. Den einzelnen Tätigkeiten wie Lösen, Laden etc. ist eine Schaltfläche zugeordnet. Bei Betätigung der Schaltfläche beginnt das Programm mit der zeitlichen Erfassung. Sofern die Maschinentätigkeit sich ändert, wird die neue passende Schaltfläche betätigt und der zeitliche Wert für den alten Prozess im Programm gespeichert. Die Benutzeroberfläche der Applikation befindet sich im Anhang 4. Neben der zeitlichen Erfassung der Baustellenabläufe wird die Aufnahme der äußeren Rahmenbedingungen wie Maschinentyp, Tätigkeit, Anbaugerät, Witterung, Bodenklasse, Untergrund, Schwenkwinkel usw. ebenfalls protokolliert.

Die Bauprozessanalysen wurden auf diversen Baustellen bei kooperierenden Bauunternehmen umgesetzt. In Summe standen acht Baustellen bzw. Kieswerke von sieben verschiedenen Firmen zur Verfügung. Es sind zwölf verschiedene Maschinen, von Mobil- und Kettenbagger bis zu Klein- und Großlader zeitlich erfasst worden.

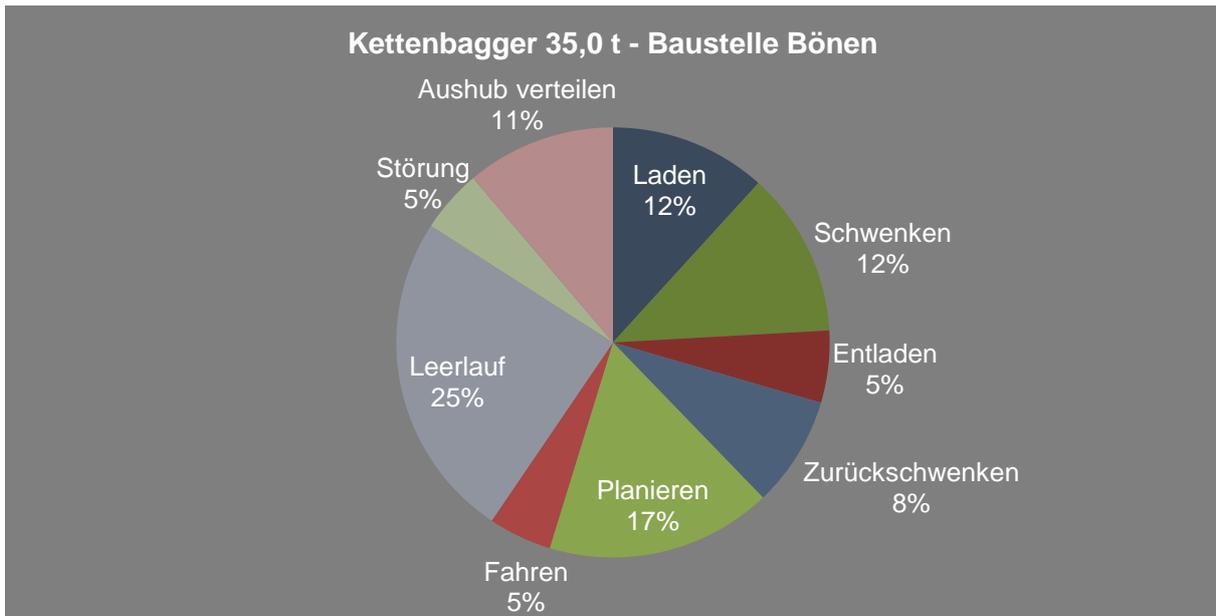


Abbildung 3-6: Beispielhafte Auswertung Bauprozessanalysen

In der Abbildung 3-6 ist eine exemplarische Auswertung der Bauprozessanalysen dargestellt. Es gehen hieraus die Anteile der auf der Baustelle durchgeführten Tätigkeiten hervor. Basierend auf dieser Erfassung ist ein Abgleich mit den in Kapitel 2.2.3 – Entwurf zur ISO 11152 getroffenen Annahmen zu den Anteilen von Tätigkeiten möglich.

Ferner besteht mithilfe der umgesetzten Bauprozessanalyse die Möglichkeit eine detaillierte und praxisnahe zeitliche Vorgabe für ein Arbeitsspiel mit den auf den Baustellen erfassten Rahmenbedingungen zu treffen. Diese sind in Tabelle 3-1 aufgeführt und können als Anhaltswert für die praktische Überprüfung verstanden werden.

Tabelle 3-1: Auswertung Bauprozessanalysen

Maschinentyp	Laden	Planieren
Mobilbagger	18,0 Sek.	-
Kettenbagger	20,0 Sek.	10,0 Sek.
Maschinentyp	Kleines Ladespiel	Großes Ladespiel
Kleinlader	-	-
Großlader	40,0 Sek.	80,0 Sek.

Die Quantität an Daten lässt jedoch keinen repräsentativen Rückschluss auf den tatsächlichen Maschineneinsatz zu. Dies ist durch den methodisch bedingten hohen Personalaufwand nicht darstellbar. Um repräsentative Aussagen zum detaillierten Maschineneinsatz in der Praxis zu erhalten bieten, sich zwei verschiedene Ansätze an.

MATHUR et al. verfolgen eine ähnliche Methodik und entwickeln diese weiter, indem mithilfe eines Smartphones die Maschinendaten automatisiert erfasst werden. Das Smartphone befindet sich dabei in der Fahrerkabine und zeichnet mithilfe von Beschleunigungssensoren die Maschineneinsatzdaten auf.⁶⁷

Mit dieser methodischen Erweiterung und der Adaption auf eine ausreichende Anzahl an repräsentativen Baustellen wäre die Generierung einer belastbaren Datenbasis möglich.

Der zweite Ansatz besteht in der Auswertung der von der Baumaschine aufgezeichneten Telemetriedaten. Mit einer hinreichenden Anzahl an Maschinen sind repräsentative Rückschlüsse hierzu möglich, welches im Rahmen dieser Arbeit erfolgt.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass beim Hydraulikbagger und Radlader die relevanten Maschinentypen die Mobil- und Kettenbagger sowie die Klein- und Großlader darstellen. In Bezug auf die Anbaugeräte stellen die Standardausrüstungen den maßgeblichen Anteil dar. Bei den Gesamtbetriebskostenauswertungen weisen die Leistungsgeräte, wie ein Kettenbagger oder Großlader, einen Anteil der Kraftstoffkosten von bis zu 40 % auf. Mit den Bauprozessanalysen geht eine Identifikation der wesentlichen Prozesse für den Maschineneinsatz einher. Aufgrund des hohen zeitlichen Personalaufwands stellen diese Daten keine repräsentativen Ergebnisse dar, was im nachfolgenden Kapitel näher erläutert wird. Die Anzahl an Daten, Analysen und Erkenntnisse der Telemetriedaten sind sehr vielzählig und als repräsentativ anzusehen. Aufgrund der Quantität und Qualität der Daten wird der erste oben beschriebene Ansatz im Rahmen nicht weiterverfolgt.

⁶⁷ Vgl. [44] Mathur et al.: Automated Cycle Time Measurement and Analysis of Excavator's Loading Operation Using Smart Phone-Embedded IMU Sensors, 2015

4 Flottenmanagementauswertung

Das Flottenmanagement gewinnt unter dem Megatrend der Digitalisierung zunehmend an Bedeutung. Die Flottendaten sind dabei die von der Maschine generierten Telemetriedaten, welche via Mobilfunk an einen Server des Herstellers übertragen und über ein Onlineportal dem Kunden zur Verfügung gestellt werden.

Das Flottenmanagement ermöglicht dabei detaillierte Rückschlüsse auf den Maschineneinsatz. Es werden Daten wie die Kraftstoffverbrauchsrate, Kraftstoffanzeige, Leerlaufstunden, Standort, Fahrer-ID, Arbeitsleistung sowie Service- und Wartungszustände erfasst. Hierdurch bieten sich zahlreiche Vorteile wie ein Geofencing, Kraftstoffmonitoring, proaktiver Service etc. an.

Die generierten Daten können, mit einer ausreichenden Datenbasis, dazu genutzt werden, Referenzwerte aus der Praxis für einen definierten Lastzyklus zu transferieren. Hilfreiche Daten sind hier ebenfalls der Kraftstoffverbrauch, Leerlaufanteil aber auch die Nutzung von verschiedenen Arbeitsausrüstungen, Fahr- und Grabanteilen etc.

Die Flottendaten werden dabei vorrangig von größeren Baumaschinen mit einem Betriebsgewicht > 12 t erzeugt, da bei kleineren Geräten der Kraftstoffverbrauch eher nachrangig behandelt wird. Der Großteil der ausgewerteten Maschinen bezieht sich daher auf Mobil- und Kettenbagger sowie auf Großlader. Von kleineren Maschinen sind ebenfalls Daten vorhanden, jedoch beziehen sich diese in der Regel ausschließlich auf die Erfassung von Arbeitsstunden, sodass keine Rückschlüsse auf den Kraftstoffverbrauch und demzufolge nicht auf die Maschineneffizienz möglich sind.

Die Datenbasis der betrachteten Maschinen bezieht sich auf den Flottendaten von zwei führenden Baumaschinenherstellern. Die Bereitstellung dieser erfolgte nur durch eine Geheimhaltungserklärung, sodass eine namentliche Nennung weder vom Hersteller noch von den Maschinenklassen oder -typen erfolgen kann. Die Auswertung der Daten erfolgt daher im Rahmen dieser Arbeit ausschließlich deskriptiv. Die Maschinen von Hersteller „A“ beziehen sich auf Deutschland, die Daten von Hersteller „B“ umfassen Maschinen aus Europa. In Summe beträgt die Anzahl der gefilterten Rohdaten insgesamt 8.067.601, welche aus 11.951 Maschinen und 106.506 Monatsberichten generiert wurden.

F 3

Was ist ein praxisnaher Einsatz und welche Tätigkeiten sowie Belastungen gehen damit einher?

Das Ziel der Flottenmanagementauswertung besteht darin, detaillierte Kennzahlen zum Maschineneinsatz zu generieren und diese auf einen definierten Lastzyklus ableiten und anwenden zu können. Hiermit gehen folgende Forschungsfragen einher:

- Welche Betriebsgewichte sind relevant?
- Wie viele Arbeitsstunden leistet eine Baumaschine und gibt es Unterschiede in Bezug auf die Maschinentypen?
- Welchen Anteil haben Großgeräte am Gesamtverbrauch?
- Gibt es Unterschiede bei der Motorbelastung zwischen den Maschinentypen?
- Unterliegt der Maschineneinsatz saisonalen Schwankungen und stellt sich dies europaweit gleich dar?
- Welche Lademengen erzielt ein Radlader pro Lastzyklus?
- Welche Tätigkeiten sind von Relevanz auf den Arbeitseinsatz und wie wirken sich diese Tätigkeiten auf den Kraftstoffverbrauch aus?
- Welchen Anteil hat der Fahrer am Leerlaufanteil und kann der Leerlauf reduziert werden?
- Sind Flottendaten geeignet, um die Energieeffizienz einer Maschine auszuweisen?

Zur Generierung eines repräsentativen Ergebnisses sind alle Daten auf Normalverteilung zu untersuchen und Ausreißer nach Grubbs zu eliminieren. Die allgemeingültige Formel hierfür lautet:

$$S = \sum_{k=1}^n (2k - 1) [\ln F(Y_k) + \ln(1 - F(Y_{n+1-k}))] \quad (4-1)$$

$$g = \frac{\max_{i=1..n} |x_i - \bar{x}|}{s} \quad (4-2)$$

Zusätzlich sind untere und obere Grenzwerte für die erfassten Parameter festzulegen (siehe Tabelle 4-1). Dies erfolgt aus dem Grund, dass manche Ausreißer nicht mathematisch bestimmt werden können, dennoch außerhalb eines logischen Ergebnisses liegen. Als vereinfachtes Beispiel sei die Anzahl an täglichen Betriebsstunden genannt. Laut Flottenauswertungen gibt es Datensätze, in denen die Maschinen 26 Stunden am Tag eingesetzt wurden. Die Grenze eines Ausreißer-Tests liegt jedoch über diesem Wert. Da die Maschine aber nicht mehr als 24 Stunden am Tag arbeiten kann, ist ein Grenzwert hierfür nachträglich festzulegen. Gleiches gilt für die Kraftstoffverbrauchsdaten, deren Grenzwerte mithilfe von Herstellerangaben zu definieren sind. Aufgrund der Geheimhaltungserklärung können die modellabhängigen Grenzwerte der Kraftstoffverbrauchsrate in der Tabelle nicht aufgeführt werden.

4.1 Flottenauswertung Hersteller „A“

Die vom Hersteller „A“ bereitgestellten Daten umfassen Berichte über den Kraftstoffverbrauch, Flottenstatus, Lademengen sowie Leerlaufereignisse. Die Betrachtungszeiträume sowie die Anzahl an Maschinen variieren je nach Berichtsart. Die Maschinenanzahl beträgt zwischen 6.248 und 9.593 Stück und beinhaltet die Mobil- und Kettenbagger sowie Radlader.

Die in den Unterkapiteln ausgeführten Auswertungen sind so aufgebaut, dass sie von einer anfänglichen groben Ebene, wie marktrelevante Betriebsgewichte, über die Motorauslastung bis hin zu Detailbetrachtungen herausgearbeitet werden. Basierend auf dieser Struktur orientieren sich die Überschriften, welche auf den Berichtstypen basieren.

4.1.1 Jährlicher Kraftstoffbericht

Mit dem jährlichen Kraftstoffbericht sind modellabhängige Auswertungen zu den Kraftstoffverbräuchen möglich. Die erfassten Maschinen weisen ein Betriebsgewicht von > 8,0 t auf. Von kleinen Maschinen, wie Minibagger und Kompaktlader, werden in der Regel nicht die Verbrauchsdaten gesendet. Dies unterstreicht letztendlich die in Kapitel 3.1 aufgestellte Hypothese, dass der Kraftstoffverbrauch für diese Maschinentypen zu vernachlässigen ist.

In der Tabelle 4-1 sind zur Übersicht die Daten und Spezifikationen für die Auswertung dieser Berichtsart aufgeführt.

Tabelle 4-1: Zeitraum, Aufbau, Datenbasis und Grenzwerte Jährlicher Kraftstoffverbrauch

Zeitraum	Beginn	Ende			
	1.12.2015	30.11.2016			
Aufbau	Kategorie	Detailauswertungen			
	Modell				
	Baujahr				
	Leerlauf	Verbrauch [l]	Stunden	Verbrauch [l/h]	
	Last	Verbrauch [l]	Stunden	Verbrauch [l/h]	
	Kumuliert	Verbrauch [l]	Stunden	Verbrauch [l/h]	
	Leerlaufanteil				
	Lastanteil				
Datenbasis		Betriebsgewicht			
	Maschine	Anzahl	Min	Max	Rohdaten
	Mobilbagger	2.605	13,0 t	40,0 t	39.090
	Kettenbagger	2.752	11,0 t	90,0 t	44.048
	Radlader	2.263	8,0 t	100,0 t	33.960

Grenzwerte	Stunden	Leerlaufanteil
	Unterer Grenzwert	80,00
Oberer Grenzwert	7.000,00	99,0%

Im Folgenden sollen zur besseren Struktur die jeweiligen Erkenntnisse in den weiteren Unterkapiteln aufgeführt werden.

4.1.1.1 Allgemeine Auswertung

In erster Instanz sind mit der Auswertung des jährlichen Kraftstoffberichts Rückschlüsse auf die Maschientypen sowie deren Gesamtkraftstoffverbrauch möglich.

Für diese Datenanalyse sind die Maschinendaten aufzusummieren. Als erster Anhaltspunkt, welche Auswertungen möglich sind, dient Tabelle 4-2. Die Verbrauchsrate ist ein arithmetischer Mittelwert, wohingegen der Verbrauch und die Betriebsstunden die Summen des Flottenberichts darstellen.

Tabelle 4-2: Übersicht Flottenauswertung Jährlicher Kraftstoffbericht

Maschinentyp	Verbrauchsrate	Verbrauch	Betriebsstunden
Mobilbagger	9,26 l/h	22.728.555,82 l	2.384.635,50 h
Kettenbagger	17,95 l/h	54.300.898,45 l	2.904.966,10 h
Radlader	15,26 l/h	48.665.562,72 l	3.011.763,90 h

Basierend auf der ersten Auswertung ist die Unterteilung nach der Maschinenanzahl und der Gesamtverbräuche in Abhängigkeit des Betriebsgewichtes vorzunehmen. Verschiedene Produktserien, die aus unterschiedlichen Produktionsjahren stammen aber das gleiche Betriebsgewicht aufweisen, werden unter diesem zusammengefasst.

Aus der Abbildung 4-1 geht die Verteilung nach Anzahl und Kraftstoffverbrauch für die Mobilbagger hervor. Zur besseren Übersicht sind in der Abbildung die Mobilbagger für den Materialumschlag mit einem Betriebsgewicht von > 24,0 t nicht dargestellt, da diese eine untergeordnete Rolle mit einem Anteil von insgesamt 3,69 % spielen. In der Abbildung sind diese Anteile rechnerisch nicht mit betrachtet.

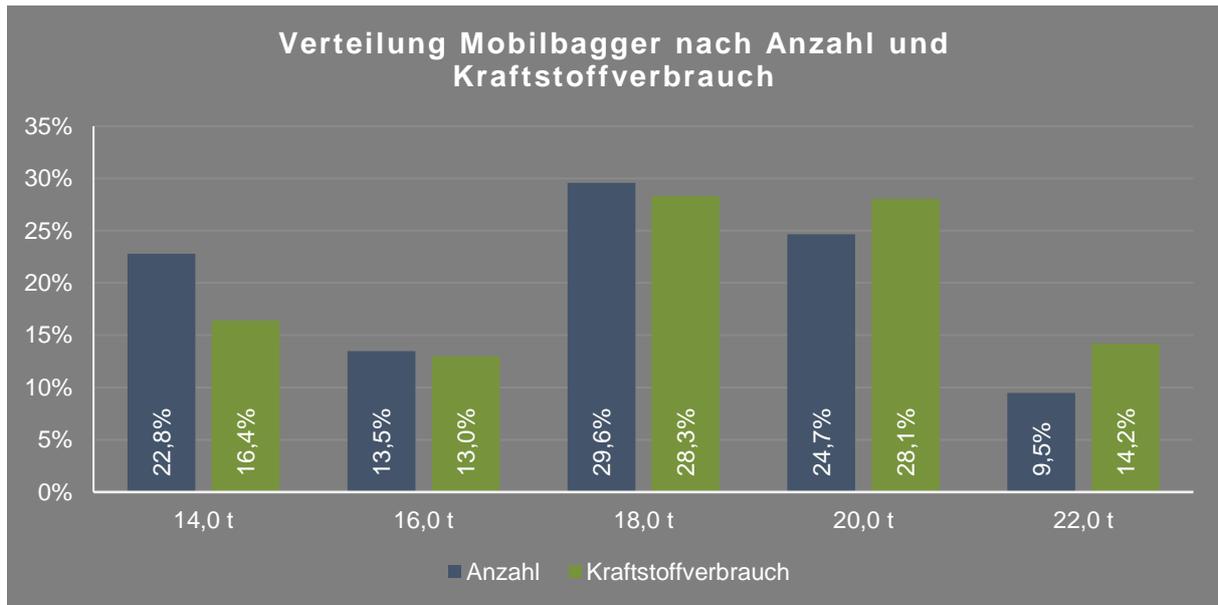


Abbildung 4-1: Verteilung Mobilbagger

Die Auswertung für die Mobilbagger zeigt auf, dass die marktrelevanteste Maschine hinsichtlich der Maschinenanzahl bei einem Betriebsgewicht von 18,0 t vorzufinden ist. Beim Kraftstoffverbrauch sind die Betriebsgewichte mit 18,0 t und 20,0 t nahezu identisch.

Die Verteilung der relevantesten Betriebsgewichte für die Kettenbagger ist in der Abbildung 4-2 dargestellt. Es sind ebenso Maschinentypen, die von der Anzahl her eine untergeordnete Rolle spielen, in dem Diagramm nicht aufgeführt. Dies betrifft aufgrund der Vielfalt an Betriebsgewichten insgesamt 17 Maschinentypen von 11,0 bis 90,0 t Einsatzgewicht, die in Summe 8,4 % der Gesamtanzahl ausweisen. Des Weiteren sind die Maschinen mit einem Betriebsgewicht von 23,0 und 24,0 t sowie 29,0 und 30,0 t unter einem Maschinentyp zusammengefasst. Dies erfolgte aus dem Grund, dass die Serienbezeichnung sich mit einem Nachfolgemodell geändert hat, jedoch ist das Einsatzgewicht identisch mit dem Vorgängermodell.

Mit dieser vorgenommenen Filterung und Sortierung stellt sich die Maschine mit einem Betriebsgewicht von 24,0 t mit einem Anteil bei der Maschinenanzahl von 33,2 % als auch beim Kraftstoffverbrauch mit 27,6 % als die marktrelevanteste Maschinegröße dar.

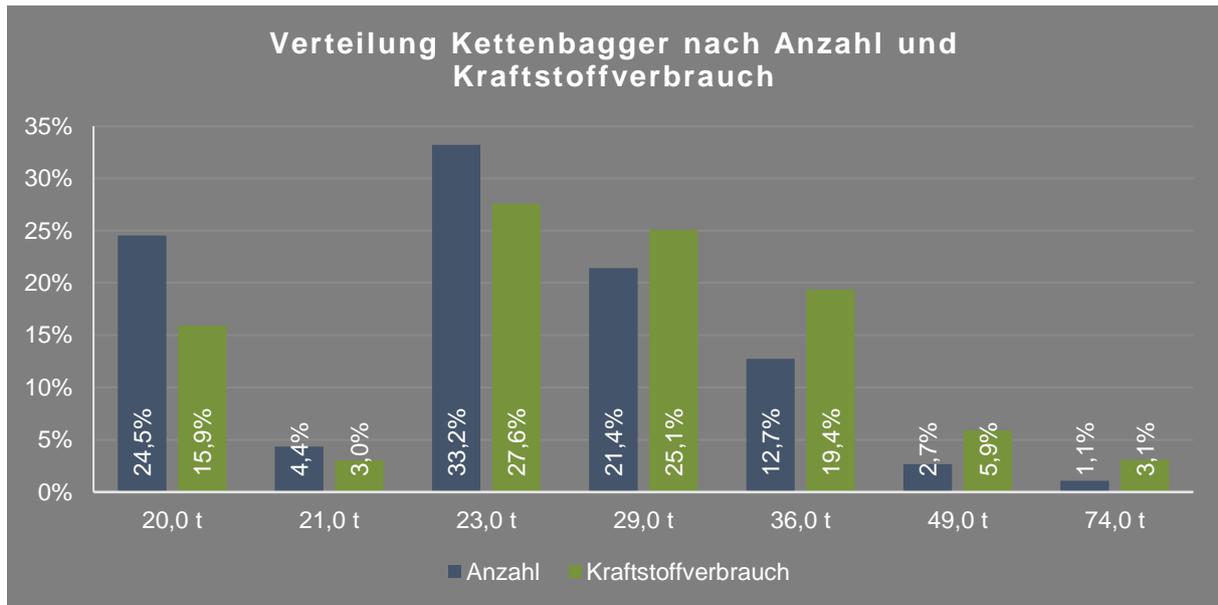


Abbildung 4-2: Verteilung Kettenbagger

Für die Radlader ist die Verteilung der Einsatzgewichte in der Abbildung 4-3 dargestellt. Es sind ebenfalls Maschinentypen mit einem geringen Marktanteil der Übersicht halber nicht in der Abbildung aufgeführt. Dies sind zehn unterschiedliche Betriebsgewichte, die einen Anteil von 6,98 % darstellen.

Wie beim Kettenbagger weist auch beim Radlader die marktrelevanteste Maschine ein Einsatzgewicht von 24,0 t auf. Der Anteil dieses Maschinentyps fällt hinsichtlich der Anzahl (35,5 %) als auch vom Kraftstoffverbrauch (34,8%) im Vergleich zu den anderen Betriebsgewichten höher als beim Kettenbagger aus.

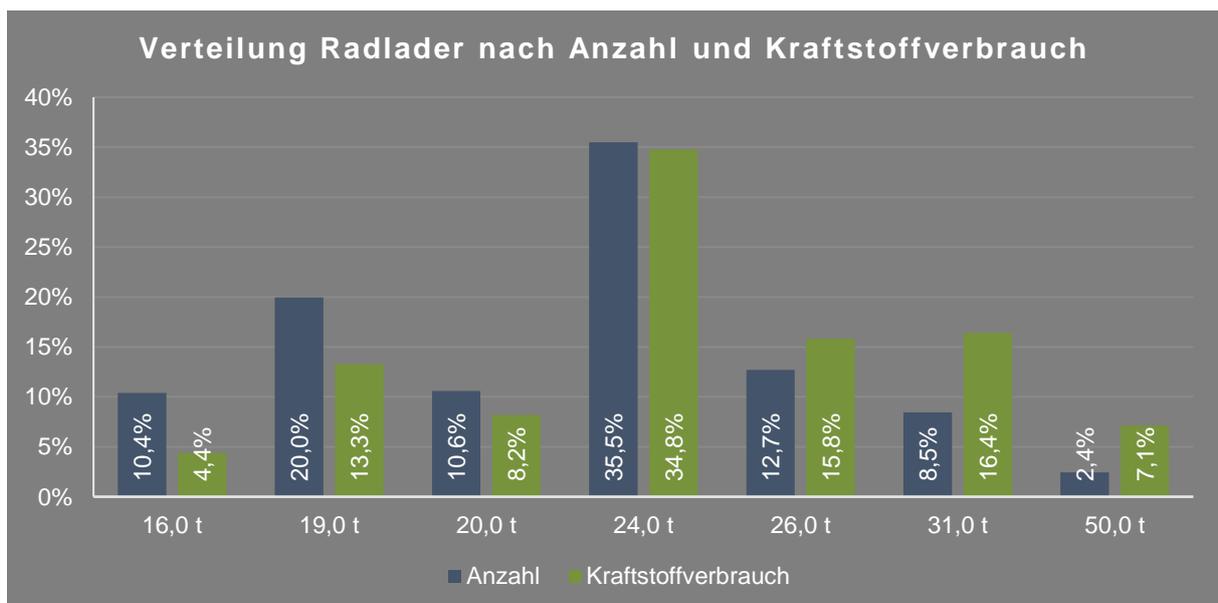


Abbildung 4-3: Verteilung Radlader

Die Marktrelevanz der Maschinen mit einem Einsatzgewicht von 24,0 t ist vermutlich der Tatsache geschuldet, dass Maschinen mit dieser Masse die Auflagen der Paragraphen §32, §34 und §35 b der StVZO einhalten und keine Sondergenehmigung für den Transport über öffentliche Straßen nach § 70 StVZO benötigen.⁶⁸

4.1.1.2 Betrachtung von Großmaschinen

Eine detaillierte Betrachtung, inwieweit Großmaschinen relevant für einen definierten Lastzyklus sind, erfolgt mit der untenstehenden Tabelle 4-3. Der im Kapitel 2.2.3 beschriebene Entwurf zur ISO 11152 definiert die Grenze für den Kettenbagger bei einem Einsatzgewicht von 45,0 t und für die Radlader bei 35,0 t.⁶⁹ Es soll mit dieser Auswertung aufgezeigt werden, ob Großgeräte im Bereich der Kettenbagger und Radlader tatsächlich eine nachrangige Rolle einnehmen oder ob eine Betrachtung dennoch sinnvoll ist.

Die Anzahl an Maschinen sowie Betriebsstunden beim Kettenbagger mit einem Einsatzgewicht von > 45,0 t fällt mit jeweils rund 7,0 % gering aus (siehe Tabelle 4-3). Die deutlich höhere Verbrauchsrate der Großmaschinen von bis zu durchschnittlich 50,0 l/h führt jedoch dazu, dass der Anteil am Gesamtkraftstoffbereich wesentlich höher ausfällt und mit 14,79 % keinen unerheblichen Bereich darstellt.

Tabelle 4-3: Anteil Großmaschinen Kettenbagger

	Anzahl	Betriebsstunden	Verbrauch
Gesamt Kettenbagger	2.752	2.904.966,10 h	54.300.898,57 l
> 45,0 t	177	210.203,80 h	8.028.661,07 l
Anteil	6,43 %	7,24 %	14,79 %

Die Gewichtung der Großmaschinen für die Maschinenanzahl und Betriebsstunden fällt beim Radlader mit gerundet jeweils 4,0 % geringer als beim Kettenbagger aus. Die Kraftstoffverbrauchsrate ist bei den Großmaschinen mit bis zu durchschnittlich 70,0 l/h höher. Somit fällt der Anteil am Gesamtkraftstoff mit 11,48 % ebenfalls hoch aus und beträgt über den dreifachen Anteil im Vergleich zur Maschinenanzahl.

Tabelle 4-4: Anteil Großmaschinen Radlader

	Anzahl	Betriebsstunden	Verbrauch
Gesamt Radlader	2.263	3.011.763,90 h	48.665.562,72 l
> 35,0 t	82	136.561,30 h	5.588.086,86 l
Anteil	3,62 %	4,53 %	11,48 %

⁶⁸ Vgl. [54] Sprenger: Straßentauglichkeit von mobilen Baumaschinen, 2011, S. 23

⁶⁹ Vgl. [74] Entwurf zur ISO 11152, 2011, S. 11, S. 24

Mit dem Ergebnis ist eine Tendenz erkennbar, die aufgrund der hohen Verbräuche und Anteile am Gesamtverbrauch dazu führt, dass Großgeräte in der Lastzyklusdefinition zu betrachten sind. Im Kapitel 5 findet eine weitere Diskussion hierzu statt, indem weitere Aspekte für einen möglichen Testbetrieb mitbetrachtet werden.

4.1.1.3 Leerlaufzeiten

In der Tabelle 4-5 sind die Leerlaufanteile für die Hydraulikbagger und Radlader dargestellt. Die Anteile variieren zwischen den einzelnen Maschinentypen nur geringfügig und betragen gemittelt für alle Maschinen rund 30 %. In Summe beläuft sich für diese Maschinen die Gesamtdauer auf 2,44 Mio. Stunden im Leerlauf, die jährlich nur für die 7.620 Maschinen des Herstellers in Deutschland anfallen.

Tabelle 4-5: Leerlaufanteile Hydraulikbagger und Radlader

	Mobilbagger	Kettenbagger	Radlader
Stunden - Leerlauf	731.723,80 h	790.130,30 h	918.284,40 h
Stunden - Last	1.652.911,70 h	2.114.835,80 h	2.093.479,50 h
Leerlaufanteile	30,67 %	27,46 %	31,41 %

Mit den Leerlaufanteilen geht ein binärer Zusammenhang mit einem effizienten Maschineneinsatz einher. Dies betrifft überwiegend den Bereich der Prozesseffizienz, dennoch soll dies im Rahmen dieser Arbeit im Kapitel 4.4 näher analysiert werden.

4.1.1.4 Motorauslastungsgrad

Eine weitere Auswertung über den tatsächlichen Maschineneinsatz erfolgt mit der Zuordnung der Kraftstoffverbräuche zu der Motorauslastung. Methodisch wird dies über die modellabhängige, durchschnittliche Kraftstoffverbrauchsrate bewerkstelligt. Mit diesem Mittelwert kann ein Abgleich zu den Herstellerangaben erfolgen. Die Herstellerangaben beinhalten eine Zuweisung der modellabhängigen Kraftstoffverbrauchsrate in drei verschiedenen Lastzuständen „Leicht“, „Mittel“ und „Hoch“. Diesen Lastzuständen ist noch ein Auslastungsgrad mit einer prozentualen Spannweite zugeordnet. Mit diesem lastzustandsabhängigen Auslastungsgrad ist die Bestimmung einer Maximalverbrauchsrate für die Maschine möglich, welcher mithilfe der durchschnittlichen Verbrauchsrate einen Rückschluss auf die tatsächliche Motorauslastung zulässt. Ein vereinfachtes Beispiel geht aus der Tabelle 4-6 hervor.

Tabelle 4-6: Rechenbeispiel Maximalverbrauch

Verbrauch [l/h]			Auslastungsgrad [%]			Rechn. Maximalverbrauch [l/h]			Gemittel- ter Ver- brauch
Leich	Mittel	Hoch	Leich	Mittel	Hoch	Leicht	Mittel	Hoch	
V_{l,M_i}	V_{m,M_i}	V_{h,M_i}	V_{A_l}	V_{A_m}	V_{A_h}	$V_{l,M_i}/V_{A_l}$	$V_{m,M_i}/V_{A_m}$	$V_{h,M_i}/V_{A_h}$	
11,50	19,25	26,70	30,0	50,0	70,0	38,33	38,50	38,14	38,33

Die in der Tabelle genannten Rechenschritte sind für die Mobil- und Kettenbagger sowie für die Radlader umzusetzen. Als Datenbasis ist die durchschnittliche Kraftstoffverbrauchsrate unter Last anzusetzen. Der kumulierte Verbrauch aus Leerlauf und Last würde zu einem verzerrten Ergebnis führen, da der Leerlaufanteil den kumulierten Verbrauch maßgeblich beeinflusst. Mit dieser Auswertung sollen jedoch Rückschlüsse auf die reine Arbeitsbelastung getroffen werden, die nur mit der isolierten Betrachtung der Lastverbräuche möglich sind.

Das Ergebnis ist in der Abbildung 4-4 dargestellt. Es ist erkennbar, dass die Maschine mit der geringsten Motorauslastung der Mobilbagger ist. Dieser befindet sich über alle Einsatzgewichte in einer geringen, mittleren Auslastung. Im Gegensatz dazu weisen die Kettenbagger und Radlader eine wesentliche höhere Motorauslastung auf, die sich an der Grenze zwischen dem mittleren und hohen Bereich befindet.

Für die Lastzyklusdefinition lässt sich hieraus ableiten, dass die Mobil- und Kettenbagger mit einer unterschiedlichen Maschinenauslastung zu testen sind, um den Anspruch eines praxisnahen Tests erfüllen zu können.

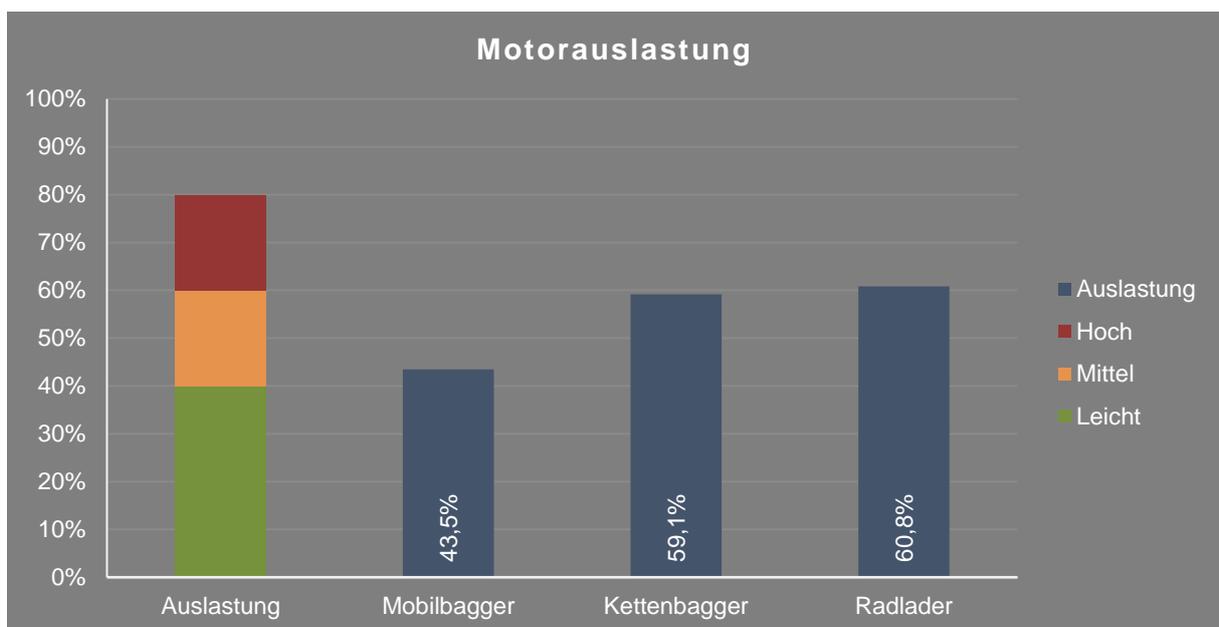


Abbildung 4-4: Motorauslastung Hydraulikbagger und Radlader

4.1.1.5 Baujahrabhangiger Verbrauch

Im Kapitel 2.5.1 ist erläutert worden, inwieweit sich die Kraftstoffverbräuche aufgrund einer aufwändigeren Abgasnachbehandlung infolge der Schadstoffnovellierungen verändert haben. In den Flottendaten sind u.a. die Baujahre der Maschinen aufgezeichnet, sodass pauschale Rückschlüsse basierend auf das Alter der Maschine möglich sind.

Für die Bewertung der baujahrabhangigen Verbräuche sind die Verbrauchsraten, wie bei der vorherigen Auswertung, für den Lastanteil zu vergleichen. Die Auswahl der kumulierten Verbräuche, bestehend aus Last und Leerlauf, würde zu Verfälschungen aufgrund der unterschiedlichen Leerlaufanteile führen. Hierfür müsste zusätzlich eine Berechnung der Leerlaufanteile erfolgen. Aus diesem Grund erfolgt die Beschränkung der Verbräuche unter Last.

Der Abgleich erfolgt über die gemittelten Verbräuche für den betrachteten Zeitraum vom 01.12.2015 bis zum 30.11.2016. Als ausreichend repräsentatives Baujahr wird ein Baujahr mit einer Anzahl von über 100 Maschinen festgesetzt. Der Verbrauchsrate für den Lastanteil aus dem ältesten Baujahr dient dabei als Referenzjahr, sodass der Abgleich der Folgejahre hier über erfolgt.

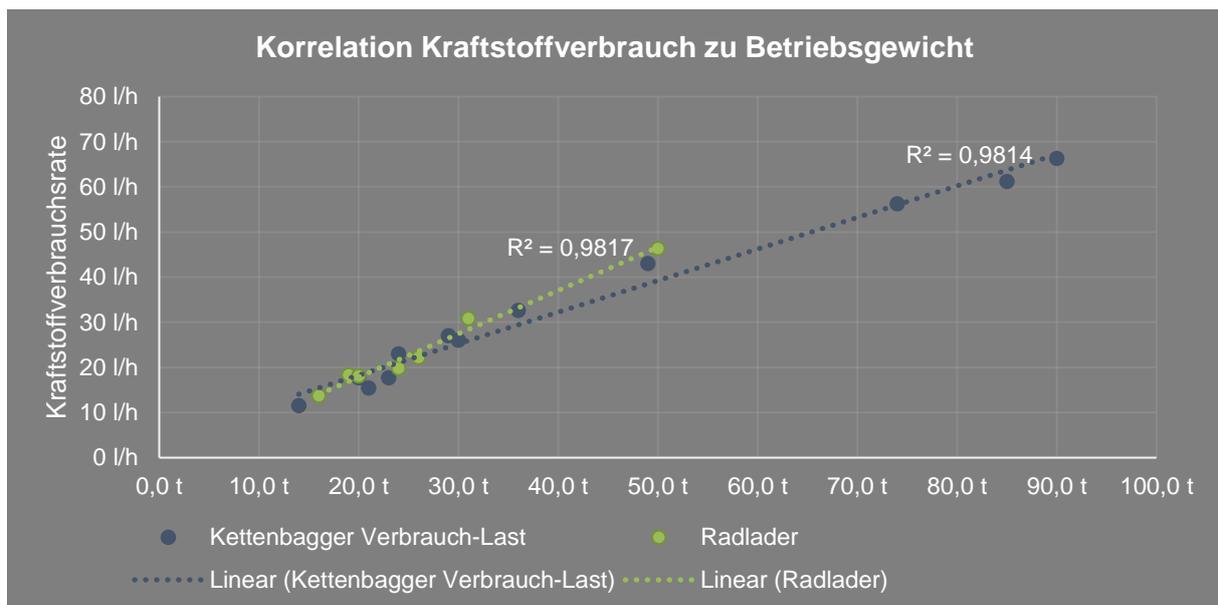


Abbildung 4-5: Korrelation zwischen Kraftstoffverbrauch und Betriebsgewicht

Als Variationsfaktor fließt dabei die Maschinengröße ein. Hiermit ist die Verteilung von Maschinen mit unterschiedlichen Betriebsgewichten gemeint. Sofern nur beispielsweise Großgeräte Daten gesendet haben, sind diese mit anderen Jahren nicht vergleichbar. Aus diesem Grund ist ein Betriebsgewichtsfaktor zu bilden, der diese Variation in der baugrößenbedingten, unterschiedlichen Verbrauchsrate ausgleicht. Zur Berücksichtigung dieser Parameter sind die Verbräuche in Verhältnis zum Betriebsgewicht zu setzen. Als Ergebnis dieser Berechnung geht eine lineare Steigerung der Verbrauchsrate in Abhängigkeit des Betriebsgewichts einher

(siehe Abbildung 4-5). Sofern das gemittelte Betriebsgewicht für das betrachtete Baujahr mit dem Gewicht aus dem Referenzjahr ins Verhältnis gesetzt wird, ist eine Korrektur für den Verbrauch möglich.

In der Tabelle 4-7 sind die jeweiligen Verbräuche für die Baujahre dargestellt. Die Ergebnisse beinhalten eine durchgeführte Korrektur für die durchschnittlichen Betriebsgewichte, die die Baujahre aufweisen. Es ist ersichtlich, dass die Mobilbagger und Radlader mit den Baujahren 2015 und 2016 eine deutlich geringere Verbrauchsrate mit einer Reduzierung von bis zu 26,2% aufweisen als die Referenzmaschinen aus dem Jahr 2010 bzw. 2011. Der Grund hierfür liegt vermutlich in der neuesten Motorengeneration. Beim Radlader erfolgte zusätzlich die Neuentwicklung eines kraftstoffsparenden Getriebes, welches seit dem Baujahr 2013 flächendeckend in das Produktportfolio integriert wurde.

Beim Kettenbagger ist eine ähnliche Tendenz nicht zu erkennen. Die Verbräuche sind dort bei den Baujahren im Vergleich zum Referenzjahr um bis zu 10,8 % gestiegen. Erst mit dem Baujahr 2016 konnten die Verbrauchsrate mit einer Integration der neuesten Modellgeneration über das gesamte Produktportfolio gesenkt werden.

Dezidierte Rückschlüsse zu Mehrverbräuchen, basierend auf einer aufwändigeren Abgasnachbehandlung sind nicht möglich bzw. nur mit sehr großem Aufwand verbunden. Dies würde sich derart gestalten, dass jeder einzelnen Maschine die Abgasstufe zuzuordnen ist. Des Weiteren sind vereinzelt Maschinen mit Dieselpartikelfiltern nachgerüstet worden, aber diese Information ist nicht im Flottensystem hinterlegt. Eine Vergleichbarkeit ist somit nicht gegeben und kann daher nicht weiter in die Analysen einfließen.

Tabelle 4-7: Vergleich Baujahre

Baujahr	Mobilbagger		Kettenbagger		Radlader	
	Gewicht	Verbrauch	Gewicht	Verbrauch	Gewicht	Verbrauch
2010	-	-	27,9 t	100,0 %	23,6 t	100,0 %
2011	17,8 t	100,0 %	28,1 t	103,1 %	23,1 t	102,6 %
2012	16,5 t	97,1 %	27,8 t	101,2 %	24,9 t	88,1 %
2013	15,9 t	99,9 %	25,1 t	97,9 %	23,7 t	82,5 %
2014	16,7 t	97,9 %	26,8 t	110,8 %	23,9 t	82,8 %
2015	16,4 t	91,2 %	27,1 t	109,3 %	22,9 t	76,5 %
2016	16,6 t	86,5 %	27,9 t	98,1 %	21,6 t	73,8 %

Die letzte Auswertung für den jährlichen Kraftstoffbericht bezieht sich auf den durchschnittlichen Kraftstoffverbrauch einzelner Modelltypen. Hierdurch ist eine repräsentative Zuweisung des Verbrauchs möglich. Diese Daten sind aus Geheimhaltungsgründen nur für die interne

Nutzung anwendbar und dienen als Orientierungshilfe, inwieweit mit den In-Situ-Tests eine Abbildung der tatsächlichen Verbrauchsrate aus der Praxis erfolgt.

4.1.2 Flottenstatusbericht

Mit dem Flottenstatusbericht geht eine weitere Betrachtung zum Maschineneinsatz einher. Der Bericht beinhaltet Daten über die gesamte Einsatzdauer der Maschine, die um Angaben über die gefahrenen Kilometer ergänzt werden. Es wird also nicht ein isolierter Zeitraum betrachtet, sondern die Aufzeichnung der Maschinendaten ab der ersten Betriebsstunde. Im Vergleich zum Kraftstoffbericht gibt es allerdings keine Angaben über den Verbrauch oder Stunden in den Betriebszuständen Leerlauf und Last. Folglich sind keine Rückschlüsse über die Leerlaufzeiten und -anteile über die gesamte Einsatzdauer möglich.

Die Anzahl an Maschinen ist für diesen Bericht höher, da Kleingeräte mit diesem Bericht zusätzlich erfasst werden (siehe Tabelle 4-8). Die Auswertung bei den Kleingeräten bezieht sich nur auf die Betriebsstunden sowie gefahrenen Kilometer und nicht auf den Verbrauch.

Ein Aufzeichnungsbeginn kann für diese Berichtsart nicht definiert werden, da die gesamte Betriebsdauer verarbeitet und aufbereitet wird. Die älteste Maschine stammt aus dem Baujahr 1992 und ist mit der Telematiklösung des Herstellers nachgerüstet worden. Eine ansatzweise standardmäßige Verbreitung der Flottensysteme ist bei Maschinen ab dem Baujahr 2010 zu erkennen. In diesem Jahr beträgt die Anzahl an mit Flottensystemen ausgerüsteten Maschinen über 500 Stück. In dem Zeitraum zwischen 2004 und 2009 beläuft sich diese zwischen 20 und 200 Maschinen. Seit 2012 sind jährlich über 1.200 bis 1.700 Maschinen mit einem Telematiksystem ausgerüstet worden. Ein Rückschluss über den Anteil an den insgesamt verkauften Maschinen ist jedoch nicht möglich.

Tabelle 4-8: Zeitraum, Aufbau, Datenbasis und Grenzwerte Flottenstatusbericht

Zeitraum	Beginn	Ende
	-	22.12.2016
Aufbau	Kategorie	
	Modell	
	Baujahr	
	Seriennummer	
	Datum – letzter Bericht	
	Betriebsstunden	
	Kilometerzähler	
	Gesamtkraftstoffverbrauch	

Datenbasis		Betriebsgewicht		Rohdaten
		Maschine	Anzahl	
Mobilbagger	2.537	13,0 t	37,0 t	34.843
Kettenbagger	3.657	1,0 t	90,0 t	49.728
Radlader	3.356	5,0 t	100,0 t	45.789

Grenzwerte		Stunden	Stunden/Jahr	Verbrauch
Unterer Grenzwert		100,00	23,00	2,00 l/h
Oberer Grenzwert		n. def.	6.000,00	120,00 l/h

4.1.2.1 Jährliche Betriebsstunden

Zur näheren Auswertung auf den Maschineneinsatz sind die durchschnittlichen Betriebsstunden zu betrachten. Der Vorteil beim Flottenstatusbericht besteht in der zusätzlichen Betrachtung von kleinen Maschinen, wie den Mini- und Kompaktbagger sowie dem Kleinlader.

Tabelle 4-9: Datenbasis Betriebsstunden

Maschine	Gewicht	Anzahl
Minibagger	1 - 3 t	141
Kompaktbagger	3 - 9 t	142
Mobilbagger	13 - 24 t	2.537
Kettenbagger	11 - 40 t	3.148
Großbagger	> 40 t	226
Kleinlader	5 - 7 t	655
Radlader-klein	8 - 17 t	439
Radlader-mittel	18 - 36 t	2.172
Radlader-groß	> 36 t	90

Die detaillierte Datenbasis ist in der Tabelle 4-9 dargestellt. Zur näheren Auswertung auf den Maschineneinsatz sind die durchschnittlichen Betriebsstunden zu betrachten. Im Vergleich zu den vorherigen Auswertungen findet eine betriebsgewichtsabhängige Unterteilung der Radlader in drei weiteren Stufen statt. Das auf diesen Daten generierte Ergebnis zeigt auf, dass mit steigendem Betriebsgewicht die Anzahl an den durchschnittlichen Betriebsstunden pro Jahr steigt (siehe Abbildung 4-6). Die Stundenzahl zwischen Klein- und Großgeräten steigt beim Hydraulikbagger um den Faktor 4 sowie beim Radlader um den Faktor 3.

Ein Abgleich zu den durchschnittlichen Betriebsstunden aus dem jährlichen Kraftstoffbericht zeigt ein deckungsgleiches Ergebnis auf. Die Ausnahme hierzu bildet der Mobilbagger. Nach dem Flottenstatusbericht beträgt die jährliche Einsatzdauer 662,41 Stunden. Dem steht aus

dem jährlichen Kraftstoffbericht eine Stundenzahl von durchschnittlich 909,80 Stunden gegenüber. Eine erweiterte Analyse mit einer Filterung nach Baujahren, Modellen etc. führt zu keiner Erklärung dieser Abweichung. Als praxisnaher Wert sind 909,80 Stunden anzusetzen, welche deckungsgleich mit dem Ergebnis der Flottendaten des Hersteller „B“ sind.

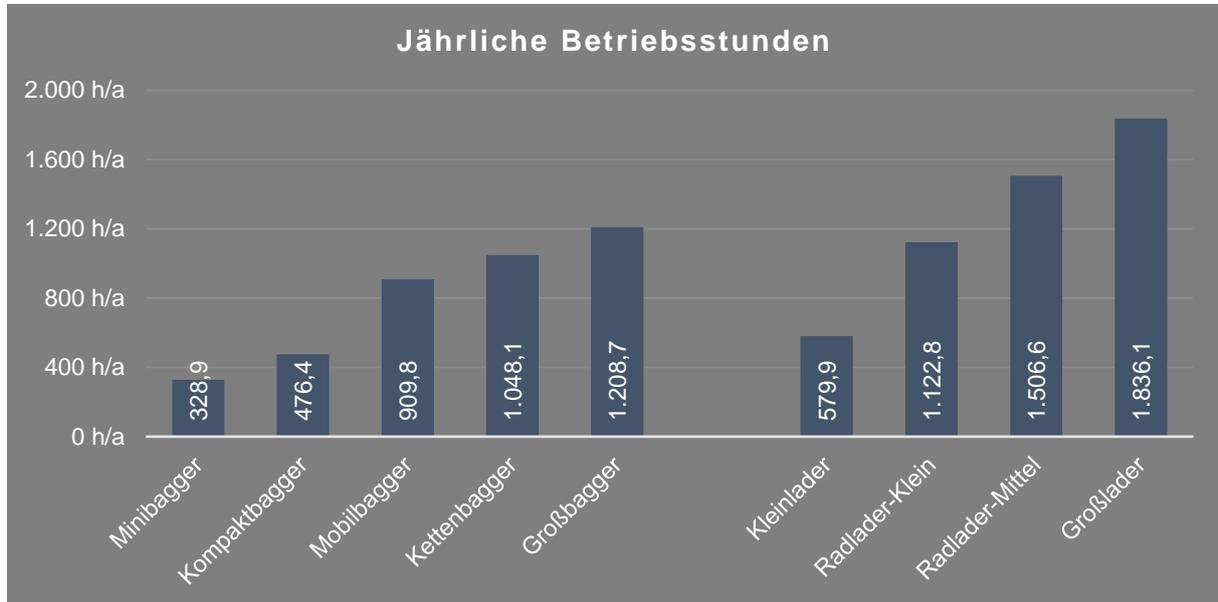


Abbildung 4-6: Jährliche Betriebsstunden Hydraulikbagger und Radlader

Basierend auf dem Ergebnis der Abbildung 4-6 ist die anfängliche Auswertung der Zulassungsstatistik in Relation zum Kraftstoffverbrauch (Abbildung 3-2) neu auszuwerten.

4.1.2.2 Finale Bewertung der Relevanz von Maschinentypen

Die Auswertung der Zulassungsstatistik beinhaltet die Anzahl der Maschinen sowie eine typische, gemittelte Verbrauchsrate, welche um die jährlichen Betriebsstunden zu erweitern ist. Als Ergebnis ist eine belastbare Aussage zur Relevanz der einzelnen Maschinentypen auf den Kraftstoffverbrauch möglich.

$$f_{U,100i} = \frac{f_{U_i}}{\sum_i f_{U_i}} \quad (4-3)$$

mit:

$$f_{U_i} = \frac{n_{M_i} \times \bar{x}_{V_i}}{\sum_i (n_{M_i} \times \bar{x}_{V_i})} \times \frac{\bar{x}_{Std,M_i}}{\bar{x}_{Std,M}} \quad (4-4)$$

In der Zulassungsstatistik ist nicht zwischen Ketten- und Großbagger oder verschiedenen Radladergrößen differenziert worden. Daher sind die aufgeteilten Maschinentypen aus der Tabelle 4-9 zusammenzuführen und als Mittelwert auszuweisen. Dies erfolgt mit der Anzahl an Maschinen aus Tabelle 4-9 und den gemittelten jährlichen Betriebsstunden aus Abbildung 4-6. Für den Kettenbagger beträgt das Ergebnis 1.058,9 Stunden und für den Radlader 1.455,2 Stunden. In die Berechnung ist für den Mobilbagger der Stundenwert mit 909,8 Stunden angenommen. Ferner fehlt zur vollständigen Berechnung der Daten aus der Zulassungsstatistik

eine Angabe zu den Stunden der Kompaktlader. Als Annahme werden die jährlichen Stunden der Minibagger festgesetzt.

Eine Beispielrechnung zu den Funktionen (4-3) und (4-4) für einen Minibagger kann dem Anhang 5 entnommen werden.

Tabelle 4-10: Umrechnung Zulassungsstatistik

Maschinentyp	Anteil Anzahl	Anteil Verbrauch	Anteil Betriebsstunden
Minibagger	55,0 %	15,1 %	5,7 %
Kompaktbagger	6,1 %	4,2 %	2,3 %
Mobilbagger	16,7 %	32,0 %	33,2 %
Kettenbagger	22,2 %	48,7 %	58,9 %
Kompaktlader	4,8 %	1,5 %	0,5 %
Kleinlader	66,7 %	51,5 %	30,2 %
Radlader	28,6 %	47,1 %	69,3 %

Die Ergebnisse unter der Inbezugnahme der durchschnittlichen Betriebsstunden auf die Zulassungsstatistik sind in der Tabelle 4-10 dargestellt. Wie vorher in den aufgestellten Hypothesen in Kapitel 3.1 schon vermutet wurde, liegt mit dieser Auswertung eine eindeutige Bestätigung dieser vor. Der Anteil des Minibaggers hinsichtlich der Anzahl sinkt durch Berücksichtigung der Verbräuche und Betriebsstunden von 55,0 % auf 5,7 %. Der Kettenbagger, welcher von der Anzahl nur 22,2 % der Maschinen beim Hydraulikbagger ausmacht, stellt bei der Berechnung der Verbräuche und Betriebsstunden einen Anteil von 63,8 % auf die Gesamtverbräuche dar. Gleiches gilt für den Radlader mit einer Steigerung der Anteile von 28,6 % bei der Anzahl auf 71,0 % bei der Betrachtung von Verbrauch und Betriebsstunden. Der Kleinlader sinkt von der ersten Berechnung vom Verbrauch mit 51,5 % auf 28,3 % bei der Berücksichtigung der Betriebsstunden, da für diesen Maschinentyp deutlich weniger Stunden anfallen. Als vernachlässigbar auf den Kraftstoffverbrauch sind weiterhin die Mini- und Kompaktbagger sowie Kompaktlader einzustufen.

4.1.2.3 Fahrstrecken

Als zusätzlicher Faktor wird beim Flottenstatusbericht die gefahrene Strecke aufgezeichnet. In Kombination mit den Betriebsstunden ist ein Rückschluss auf die durchschnittliche Geschwindigkeit möglich. Die einzelnen Ergebnisse sind in der Tabelle 4-11 aufgeführt. Die jährliche zurückgelegte Strecke ist typisch für die jeweiligen Maschinentypen. Bei der durchschnittlichen Geschwindigkeit ist anzumerken, dass sich diese auf die Gesamtbetriebsstunden inklusive Leerlaufanteil bezieht. Daher ist eine Umrechnung auf die typischen Fahranteile vorzunehmen.

Die Umrechnungsfaktoren entsprechen den Fahranteilen aus dem Praxiseinsatz und sind bekannt aus den noch folgenden Flottenauswertungen des anderen Herstellers.

Tabelle 4-11: Durchschnittliche Geschwindigkeit Hydraulikbagger und Radlader

	Mobilbagger	Kettenbagger	Radlader
Durchschnittliche jährliche Kilometer	2.952,70 km	166,90 km	9.568,02 km
Durchschnittliche Geschwindigkeit	2,18 km/h	0,06 km/h	2,75 km/h
Fahranteile	20,0 %	10,0 %	50,0 %
Umrechnung	10,90 km/h	0,60 km/h	5,50 km/h

4.1.3 Monatlicher Kraftstoffbericht

Der monatliche Kraftstoffbericht weist die gleiche Daten- und Auswertungsstruktur wie der jährliche Kraftstoffbericht auf (siehe Tabelle 4-12). Der Zeitraum bezieht sich auf Anfang August 2014 bis Ende Juli 2015.

Tabelle 4-12: Zeitraum, Aufbau, Datenbasis und Grenzwerte Monatlicher Kraftstoffbericht

Zeitraum	Beginn	Ende
	1.8.2014	31.7.2015

Aufbau	Kategorie	Detailauswertungen		
	Modell			
	Baujahr			
	Leerlauf	Verbrauch [l]	Stunden	Verbrauch [l/h]
	Last	Verbrauch [l]	Stunden	Verbrauch [l/h]
	Kumuliert	Verbrauch [l]	Stunden	Verbrauch [l/h]
	Leerlaufanteil			
	Lastanteil			

Datenbasis

Maschine	Maschinen	Monate	Rohdaten
Mobilbagger	2.157	20.212	323.408
Kettenbagger	2.360	21.658	346.544
Radlader	1.723	16.600	265.616

Grenzwerte	Stunden	Leerlaufanteil
Unterer Grenzwert	10,00	10,0%
Oberer Grenzwert	700,00	99,0%

Mit dem monatlichen Kraftstoffbericht können saisonale Besonderheiten herausgearbeitet werden. In erster Linie ist dies für den Leerlauf interessant. Weitere Faktoren, wie der Kraftstoffverbrauch unter Last, können saisonal nur schwierig erfasst werden. Hierfür fehlen weitere Einflüsse, die der typischen, saisonalen Schwankung in der Bautätigkeit unterliegen.

Die Auswertung der Leerlaufzeiten ist in Bezug auf einen saisonalen Verlauf in der Abbildung 4-7 dargestellt. Hieraus geht hervor, dass eine Schwankung sowohl im Verbrauch als auch von der Leerlaufzeit in der Winterperiode auftritt. Zum einen ist ein eindeutiges Hoch für die Winterperiode erkennbar. Der Leerlaufanteil im Jahresmittel beträgt 33,23 %, wohingegen im Januar der Anteil auf 36,48 % ansteigt. Zum anderen ist ein kausaler Zusammenhang zwischen Leerlaufanteil und Kraftstoffverbrauch festzustellen. In der Winterperiode vom Dezember bis Februar ist der Leerlaufanteil am höchsten, was die Kraftstoffverbrauchsrate widerspiegelt, die in diesem Zeitraum den geringsten Wert aufweist.

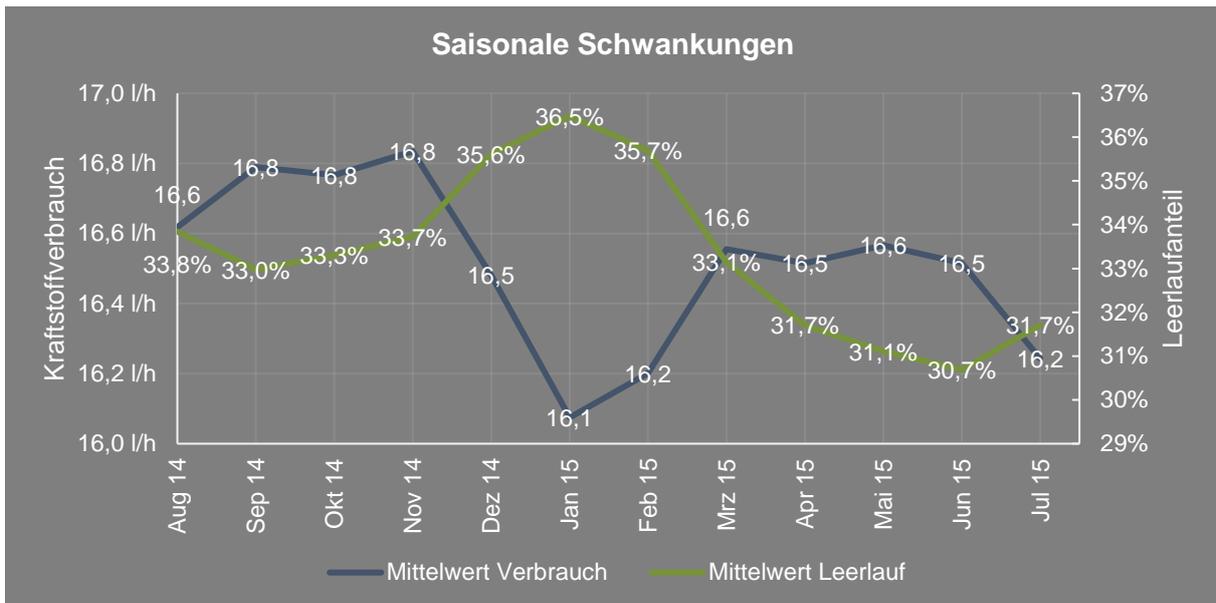


Abbildung 4-7: Saisonale Schwankungen für Leerlaufzeiten

Es findet eine weitere Betrachtung beim monatlichen Kraftstoffbericht statt. Dies ist in Bezug auf eine Korrelation zwischen Temperatur und Kraftstoffverbrauch zu untersuchen, was in ein zu entwickelndes Modell integriert werden soll. Eine weitergehende Analyse erfolgt hierzu in Kapitel 4.3.2.

4.1.4 Lademengenbericht

Der Lademengenbericht ermöglicht Rückschlüsse auf die Arbeitsleistung der Maschine. Eine in der Maschine implementierte Wiegeeinrichtung erfasst das Gewicht des geladenen Materials und sendet diese Daten an das Telematiksystem. Am gebräuchlichsten sind die Wiegeeinrichtungen beim Radlader. In der Auswertung findet daher eine Betrachtung nur auf diese Maschinenklasse statt (siehe Tabelle 4-13).

Tabelle 4-13: Zeitraum, Aufbau, Datenbasis und Grenzwerte Lademengenbericht

Zeitraum	Beginn	Ende			
	1.12.2015	30.11.2016			
Aufbau	Kategorie				
	Modell				
	Lademengen				
	Zyklen				
	Leerlaufstunden				
	Laststunden				
	Kraftstoffverbrauch				
Datenbasis			Betriebsgewicht		
	Maschine	Maschinen	Min	Max	Rohdaten
	Radlader	304	19,0 t	100,0 t	5.402
Grenzwerte			Zyklen	Stunden	
	Unterer Grenzwert		325,00	45,00 h	
	Oberer Grenzwert		160.000,00	4.000,00 h	

Die Gesamtsummen der Datenbasis für den Lademengenbericht sind in der Tabelle 4-14 dargestellt. Die 304 Radlader haben in diesem Einsatzzeitraum 353.365,7 Stunden absolviert und 58,89 Mio. t Material bewegt. Dies entspricht pro Maschine einer durchschnittlichen Ladeleistung von 166,67 t pro Stunde beziehungsweise 7,11 t pro Zyklus. Die Maschinen weisen dabei ein durchschnittliches Betriebsgewicht von 25,8 t auf.

Tabelle 4-14: Übersicht Ergebnisse Lademengenbericht

Maschinen	Lademenge	Zyklen	Stunden	Kraftstoff
304	58.893.717,0 t	8.286.498,0	353.365,7 h	5.850.921,57 l

Aufgrund der erfassten Anzahl an Zyklen und der gewogenen Schaufelfüllung ist ein Rückschluss auf die durchschnittliche Lademenge pro Arbeitsspiel möglich. Die Abbildung 4-8 führt die Ergebnisse in Abhängigkeit der Betriebsgewichte auf. Der Radlader mit einem Betriebsgewicht von 100,0 t ist nicht aufgeführt, da für diese Maschine die Anzahl der Zyklen nicht erfasst wurde.

Die marktrelevanteste Maschine mit einem Einsatzgewicht von 24,0 t setzt beispielsweise im Mittel pro Arbeitsspiel 5,8 t um. Ebenso ist festzustellen, dass die Lademengen näherungsweise linear zum Betriebsgewicht steigen. Mithilfe dieser Auswertung sind zudem direkte Vorgaben für einen definierten Lastzyklus in Bezug auf die Produktivität möglich.

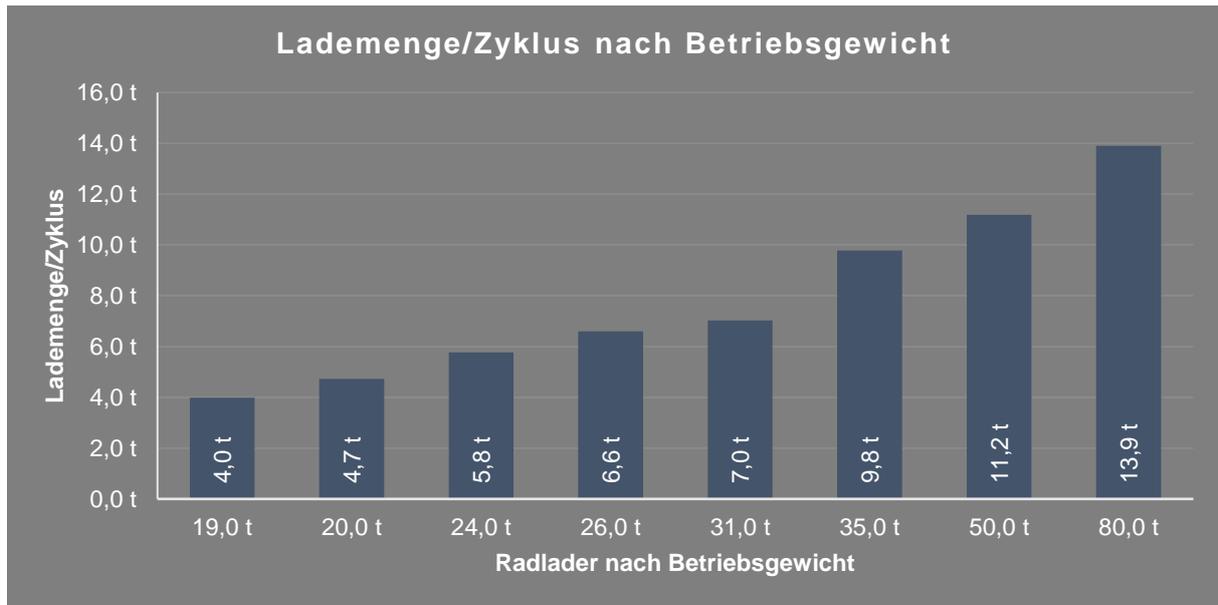


Abbildung 4-8: Lademenge/Zyklus für Radlader

Aufgrund der bekannten Ladeleistung kann eine Analyse in Bezug auf den Verbrauch und die Stunden aufgestellt werden. Es soll herausgearbeitet werden, inwieweit sich diese Parameter auf die Betriebsgewichte auswirken. Als Hypothese ist aufzustellen, dass der Betrieb sich bei steigender Maschinengröße als günstiger darstellen sollte.

Die Bezugseinheit zur Ladeleistung (Verbrauch und Stunden) ist jeweils auf den Lastanteil anzusetzen, da, wie bei den vorherigen Auswertungen, der Leerlaufanteil eine Variable darstellt.

Die Ergebnisse sind in der Abbildung 4-9 dargestellt, wobei die blaue Linie die Ladeleistung pro Laststunde und die grünen Säulen die Ladeleistung pro Lastverbrauch aufzeigen. Die aufgeführten Baugrößen umfassen die Betriebsgewichte bis 50,0 t. Radlader mit einem Gewicht von mehr als 80,0 t sind nicht aufgeführt, da die Daten in Bezug auf die Ladeleistung statistische Ausreißer darstellen. Dies liegt vermutlich an der geringen Anzahl von drei Maschinen.

Anhand der blauen Linie aus der Abbildung 4-9 ist festzustellen, dass mit einem höheren Betriebsgewicht die Ladeleistung der Maschine näherungsweise linear steigt. Zwischen einem Betriebsgewicht von 19,0 t und 50,0 t steigt die Ladeleistung von 120,8 t/h auf 397,8 t/h.

Im Gegensatz dazu stellt sich die Ladeleistung zum Lastverbrauch auf. Zwischen den Betriebsgewichten von 19,0 t auf 26,0 t steigt die Ladeleistung, jedoch reduziert sich diese bei den Maschinengrößen ab 31,0 t. Somit wird mit der Auswertung deutlich, dass die Ladeleistung in Bezug auf die Total Cost of Ownership nicht steigt. Mit einer größeren Maschine ist der Betrieb nicht günstiger, allerdings steigen baugrößenbedingt die Lademengen.

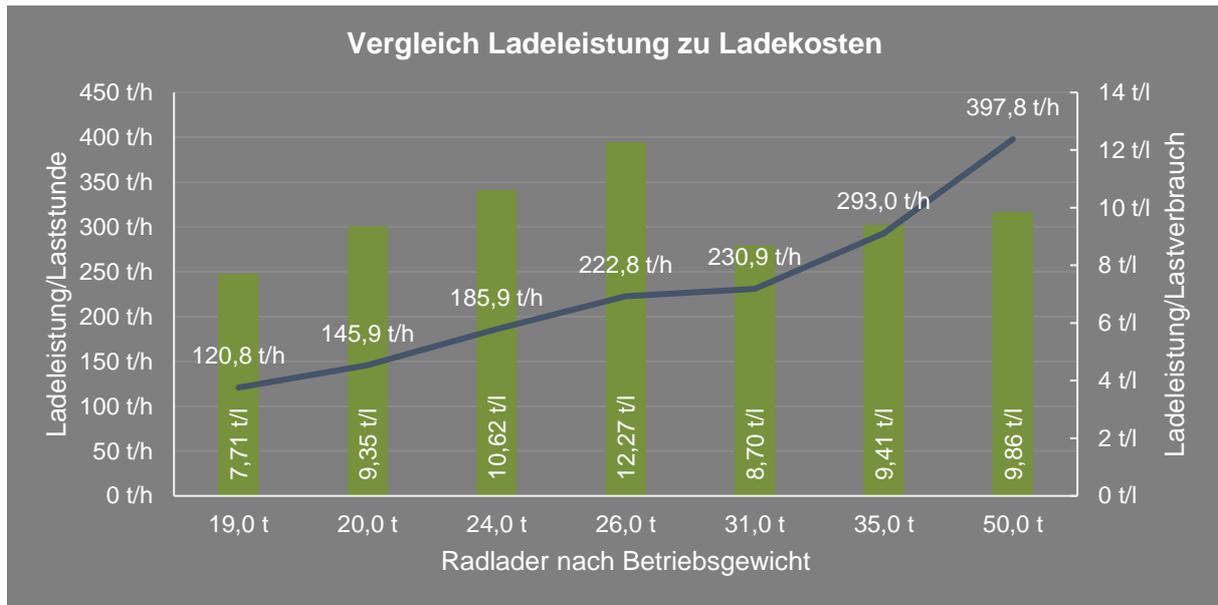


Abbildung 4-9: Vergleich Ladeleistung zu Ladekosten

Zur Gesamtbetrachtung der Total Cost of Ownership sind die Anschaffungskosten der Maschine noch zu ergänzen. Ein Abgleich zu den Anschaffungskosten zeigt eine lineare Steigung der Maschinenpreise bei den Radladern mit einem Betriebsgewicht zwischen 19,0 t und 50,0 t auf. Die Datenbasis bilden die Onlinepreise der Firma Zeppelin.⁷⁰ Somit ist von einer konstanten Kostenverteilung bei den verschiedenen Maschinengrößen auszugehen.

In dieser Kostenbetrachtung sind die Personalkosten ausgeklammert. Aufgrund der baugrößenbedingten Mehrleistung bei größeren Maschinen lässt sich ableiten, dass hiermit die Personalkosten sinken. Somit stellen sich die Großmaschinen wirtschaftlich als besser dar. Eine gesonderte Beispielrechnung ist hierfür nicht aufgeführt, da viele Faktoren, wie beispielsweise die Größe eines Steinbruchs, in der Baugrößenauswahl mit zu betrachten sind.

Als weitere Auswertung ist die Erfassung der Zyklusanzahl und der Arbeitsstunden unter Last zu der Anzahl an Arbeitsspielen pro Arbeitsstunde möglich. Die in der Tabelle 4-15 aufgeführten Ergebnisse zeigen eine relativ konstante Anzahl an Arbeitsspielen pro Arbeitsstunde auf. Im Mittel werden von allen betrachteten Maschinen mit einem Betriebsgewicht von 19,0 t bis 50,0 t 31,7 Arbeitsspiele in einer Arbeitsstunde absolviert. Mit diesem Mittelwert geht eine durchschnittliche Dauer von 1:53 Minute pro Arbeitsspiel einher. Aufgrund der Laststunden sind Leerlaufzeiten nicht mit einzurechnen.

Tabelle 4-15: Zyklen pro Arbeitsstunde

Betriebsgewicht	19,0 t	20,0 t	24,0 t	26,0 t	31,0 t	35,0 t	50,0 t	Mittelwert
Zyklen/Laststunde	30,67	30,63	31,84	33,46	27,68	29,77	37,36	31,71

⁷⁰ Vgl. [73] Zeppelin Baumaschinen GmbH: Radlader Konfigurator, 2018

Die durchschnittliche Dauer ist allerdings auf einen gemittelten Wert vom „Kleinen Ladespiel“ und „Großen Ladespiel“ zu beziehen. Erkenntnisse zu der Anzahl an Schaltvorgängen oder den Fahrstrecken pro Schaltvorgang liegen nicht vor. Somit kann ein Anteil zwischen diesen beiden Ladespielen nicht berechnet werden. Dennoch ist die Gesamtdauer als relativ lang zu bezeichnen.

Die nicht repräsentativen Bauprozessanalysen führen zu einem Ergebnis von 40,0 Sekunden für ein „Kleines Ladespiel“ und 80,0 Sekunden für ein „Großes Ladespiel“. FILLA führt auf, dass die Lastzeiten in seinen Studien mit 25,0 Sekunden datiert sind.⁷¹ Der Liebherr-Normtest sieht eine Dauer von 35,0 Sekunden für ein kleines Ladespiel vor.⁷²

Aus welchem Grund die Zykluszeiten aus dem Flottensystem deutlich länger ausfallen, ist nicht bekannt.

4.1.5 Zusammenfassung Hersteller „A“

Mit den Flottendaten vom Hersteller „A“ sind umfangreiche Rückschlüsse auf den Maschineneinsatz möglich. Dies betrifft im wesentlichen folgende Punkte:

- Relevante Betriebsgewichte hinsichtlich Anzahl und Verbrauch
- Motorauslastungsgrad
- Leerlaufanteile
- Baujahrabhängige Verbräuche
- Betriebsstunden pro Jahr nach Maschinentyp
- Saisonale Schwankungen
- Ladeleistungen nach Betriebsgewicht

Weitere Aspekte sind jedoch in Bezug auf einen Lastzyklus unbekannt. Das sind folgende:

- Europaweiter Vergleich von Baumaschinen
- Quantifizierung von Einflussfaktoren (Motorauslastung, Ländervergleich Topografie)
- Anzahl Schaltvorgänge und zurückgelegte Strecke je Zyklus

Mit den Daten vom Hersteller „B“ sollen im Folgenden die noch unbekanntesten Aspekte aufbereitet und analysiert werden.

⁷¹ Vgl. [11] Filla: Quantifying Operability of Working Machines, 2011, S. 20

⁷² Vgl. [43] Liebherr-Werk Bischofshofen GmbH: Radlader L550-L586 xPower, 2018, S. 37

4.2 Flottenauswertung Hersteller „B“

Die Flottenauswertung des Herstellers „B“ bezieht sich auf einen monatlichen Bericht für die Mobil- und Kettenbagger sowie Radlader. Die Datenbasis ist dabei umfangreicher als bei den Flottendaten des Herstellers „A“, da zusätzlich Daten über die Maschinenauslastung und weiteren Tätigkeiten erfasst werden. Die generierten Daten beinhalten einen Zeitraum mit einer Dauer von zwei Jahren. Die betrachteten Betriebsgewichte beziehen sich nur auf die marktrelevantesten Betriebsgewichte der jeweiligen Maschinentypen (siehe Tabelle 4-16). Beim Kettenbagger liegen für jedes Betriebsgewicht zwei unterschiedliche Modelltypen vor. In Summe werden insgesamt 2.401 Maschinen mit einem Einsatzzeitraum von 48.036 Monaten ausgewertet. Die Anzahl der Daten bezieht sich auf die gefilterten Rohdaten, die mithilfe der Standardnormalverteilung und Grubbs-Test sowie auf definierte untere und obere Grenzwerte gefiltert wurden.

Tabelle 4-16: Zeitraum, Aufbau, Datenbasis, Grenzwerte Flottenauswertung Hersteller "B"

Zeitraum	Beginn	Ende
	1.5.2014	30.4.2016

Aufbau	Kategorie	Maschine
	Monat	Hydraulikbagger, Radlader
Land	Hydraulikbagger, Radlader	
Modell	Hydraulikbagger, Radlader	
Typ	Hydraulikbagger, Radlader	
Betriebsstunden	Hydraulikbagger, Radlader	
Monatliche Arbeitstage	Hydraulikbagger, Radlader	
Monatliche Arbeitsstunden	Hydraulikbagger, Radlader	
Monatliche Arbeitsstunden - Last	Hydraulikbagger, Radlader	
Monatliche Arbeitsstunden - Leerlauf	Hydraulikbagger, Radlader	
Monatlicher Kraftstoffverbrauch	Hydraulikbagger, Radlader	
Kraftstoffverbrauchsrate	Hydraulikbagger, Radlader	
Auslastung - Sehr Leicht	Hydraulikbagger, Radlader	
Auslastung - Leicht	Hydraulikbagger, Radlader	
Auslastung - Schwer	Hydraulikbagger, Radlader	
Auslastung - Sehr Schwer	Hydraulikbagger, Radlader	
Stunden - Graben	Hydraulikbagger	
Stunden - Fahren	Hydraulikbagger	
Stunden - Abbruchhammer	Hydraulikbagger	
Stunden - Heben	Hydraulikbagger	
Stunden - Anbaugeräte	Hydraulikbagger	
Stunden - Entlastung	Hydraulikbagger, Radlader	
Stunden - Eco	Hydraulikbagger, Radlader	
Stunden - Power	Hydraulikbagger, Radlader	
Schaltvorgänge	Radlader	
Fahrdistanz	Radlader	

Datenbasis

Maschine	Maschinen	Monate	Betriebsgewichte	Rohdaten
Mobilbagger	982	16.323	14,0 t – 16,0 t – 18,0 t	768.936
Kettenbagger	777	23.764	21,0 t – 24,0 t – 36,0 t	977.886
Radlader	642	7.949	14,0 t – 18,0 t – 24,0 t	288.331

Grenzwerte	Stunden/ Monat	Leerlaufan- teile	Monate pro Land
Unterer Grenzwert	10	1,00 %	50
Oberer Grenzwert	700	95,00 %	n. def.

Die aufgeführten Grenzwerte aus der Tabelle 4-16 stellen dabei nur einen Auszug dar. Beispielsweise sind für jeden Modelltypen die Kraftstoffverbrauchsdaten auf Normalverteilung einzeln zu prüfen und in Ergänzung Grenzwerte für die Verbrauchsrate festzulegen. Dies kommt aus Übersichtsgründen in der o.g. Tabelle nicht zur Anwendung.

Der methodische Verlauf sieht eine grobe Ebene in Form von allgemeinen und maschinenbasierten Auswertungen, von Sonderbereichen wie Leerlaufschwankungen bis hin zu länderspezifischen Analysen mit einer Modellentwicklung zur Einzelfaktorquantifizierung, vor.

4.2.1 Allgemeine Auswertungen

Eine erste Gesamtauswertung zeigt die durchschnittlichen Werte sowie die Summen der jeweiligen Faktoren in Abhängigkeit von den Maschinenklassen auf (siehe Tabelle 4-17). Die großen Abweichungen hinsichtlich des Gesamtverbrauchs sind anhand der Unterschiede bei der Anzahl an Monatsberichten zu begründen (siehe Datenbasis Tabelle 4-16).

Hinsichtlich der Auslastungsgrade sind die Mobil- und Kettenbagger in einem vergleichbaren Verhältnis. Auffällig ist bei den Radladern der sehr hohe Anteil mit fast 87,0 % an einer sehr leichten Auslastung. Dieser Sachverhalt wird bei einer noch folgenden Auswertung näher erläutert (siehe Kapitel 4.3.1.1).

Ein Vergleich zwischen den Tätigkeiten der Mobil- und Kettenbagger weist Differenzen auf. Der Grabanteil fällt beim Kettenbagger höher aus, wohingegen der Fahranteil beim Mobilbagger größer ist. Der Abbruchhammerbetrieb liegt beim Mobilbaggerbetrieb im Promillebereich, währenddessen der Kettenbagger einen Anteil von 6,6 % aufweist.

Die durchschnittlichen monatlichen Betriebsstunden stellen ein ähnliches Ergebnis wie die Auswertung beim Hersteller „A“ dar. Der Mobilbagger weist mit 87,1 h die geringste Stundenzahl auf. Der Kettenbagger hat im Vergleich dazu mit 110,0 Stunden im Monat eine deutliche höhere Stundenzahl. Der Radlader hat mit durchschnittlich 120,6 Stunden im Monat die längste Dauer bei den monatlichen Betriebsstunden.

Tabelle 4-17: Gesamtauswertung Flottenauswertung Hersteller "B"

		Mobilbagger	Kettenbagger	Radlader
	Verbrauch	8,5 l/h	16,5 l/h	14,2 l/h
	Gesamtverbrauch	12.177.602,4 l	44.625.995,5 l	14.149.944,6 l
	Stunden - Gesamt	1.422.231,5 h	2.613.878,5 h	964.096,1 h
	Stunden - Leerlauf	488.550,1 h	778.130,5 h	269.036,5 h
	Leerlaufanteil	34,1%	30,1%	29,0%
Auslastung	Sehr Leicht	47,9%	44,8%	86,9%
	Leicht	32,4%	37,6%	9,6%
	Schwer	15,6%	15,2%	2,9%
	Sehr Schwer	4,1%	2,4%	0,6%
Tätigkeit	Graben	9,1%	12,0%	-
	Fahren	19,0%	12,2%	-
	Abbruchhammer	0,0%	6,6%	-
	Monatliche Stunden	87,1 h	110,0 h	121,3 h

In der Tabelle sind nicht die Daten für die unterschiedlichen Leistungsstufen in Form von ECO- oder Power-Modus aufgeführt. Hinsichtlich der Datenkonsistenz stellen diese keine Normalverteilung dar (siehe Abbildung 4-14). Beim Mobilbagger ist beispielsweise auffällig, dass die monatlichen Stunden im Abbruchhammer-Modus 68,8 % betragen, die tatsächliche Tätigkeit mit einem Abbruchhammer aber 0,0004 % beträgt. Ferner ergeben bei allen drei Maschinentypen die Summen der Arbeitsmodi nicht 100 % der Arbeitszeit. Der Vollständigkeit halber seien aber die Anteile der wichtigsten Arbeitsmodi in Form von ECO- und Powermodus für den Mobilbagger (E: 12,2 %/P: 16,6 %), Kettenbagger (E: 39,2 %/P: 47,7 %) sowie beim Radlader (E: 24,2 %/P: 47,2 %) genannt.

4.2.2 Maschinenbasierte Auswertungen

Eine detaillierte Auswertung der einzelnen Maschinentypen führt beim Mobilbagger zu keinen näheren Erkenntnissen. Die drei Betriebsgewichte (15,0 t, 16,0 t und 18,0 t) weisen in Bezug auf den Maschineneinsatz keine signifikanten Unterschiede auf.

Beim Kettenbagger sind im Gegensatz dazu baugrößenbedingte Unterschiede in den Tätigkeiten festzustellen (siehe Abbildung 4-10). Die Primärachse weist die Anteile der Tätigkeiten in Prozent aus, wohingegen auf der Sekundärachse die monatlichen Betriebsstunden aufgeführt sind. Die Anzahl der Einsatzstunden steigt mit einer zunehmenden Maschinengröße von 21,0 t Typ 1 mit 98,8 h bis zu 36,0 t Typ 1 auf 126,8 h pro Monat. Im Vergleich dazu sinkt die Tätigkeit „Fahren“, wohingegen der Einsatz „Heben“ sowie „Abbruchhammer“ mit höheren Betriebsgewichten steigt. Der Anteil der Grabtätigkeiten stellt sich bei allen Modelltypen mit Werten zwischen 11 und 14 % als konstant dar.

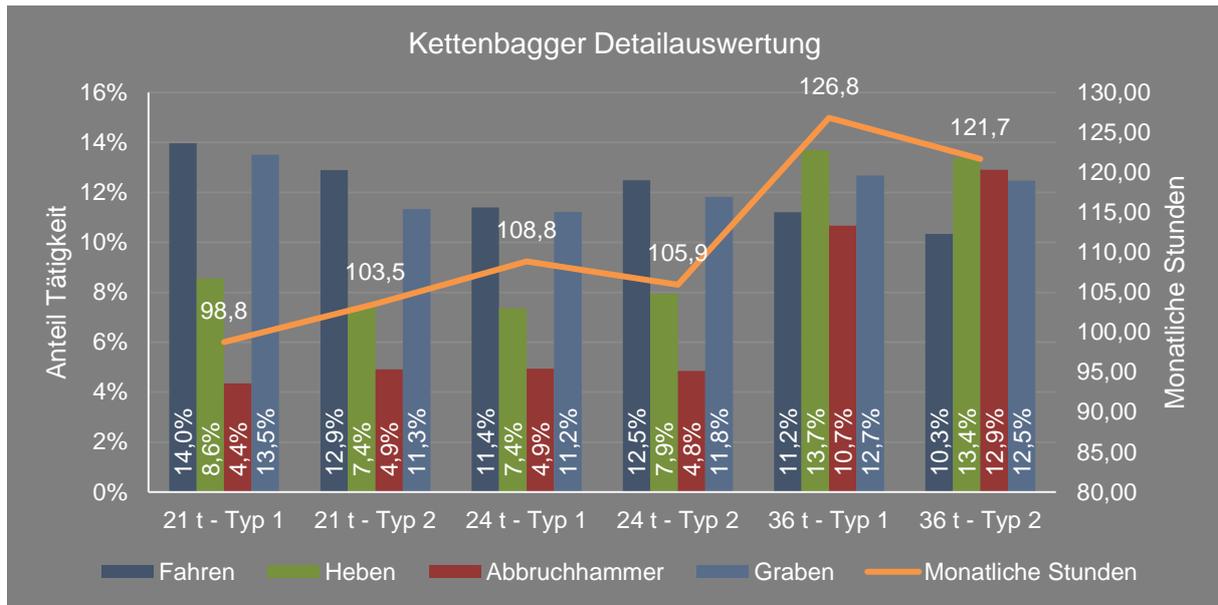


Abbildung 4-10: Tätigkeiten Kettenbagger

Aufgrund der hohen Anteile des Abbruchhammers beim 36-t-Bagger ist zu diskutieren, inwieweit dieses Anbaugerät bei einem definierten Lastzyklus zu berücksichtigen ist. Als Vorwegnahme zum Kapitel 5 - Lastzyklusdefinition ist dort in einem Stufenmodell die Berücksichtigung von Anbaugeräten vorgesehen.

Aus der Tabelle 4-18 gehen die Ergebnisse für die unterschiedlichen Modelltypen der Radlader hervor. Hinsichtlich der ausgewiesenen Parameter stellen sich die Modelltypen mit einem Betriebsgewicht von 14,0 bis 24,0 t als nahezu identisch dar. Dies betrifft sowohl die Anzahl der Schaltvorgänge pro Laststunde sowie die Fahrstrecke pro Laststunde etc. Signifikante Unterschiede sind nur bei der Fahrstrecke pro Kraftstoff zu beobachten, die aber mit den baugrößenbedingten Mehrverbräuchen zu begründen sind. Eine Ausweisung der Produktivität in Form von bewegter Masse erfolgt beim Hersteller „B“ nicht.

Tabelle 4-18: Auswertung Radlader

	14,0 t	18,0 t	24,0 t
Verbrauch [l/h]	8,73	12,59	18,53
Power Modus	-	45%	51%
Schaltvorgänge pro Laststunde	105,64	104,13	103,06
Fahrstrecke pro Laststunde [km/h]	6,00	6,14	6,73
Fahrstrecke pro Schaltvorgang [m]	70,04	64,43	69,66
Fahrstrecke pro Kraftstoff [km/l]	0,45	0,35	0,27

Aus o.g. Tabelle ergibt sich ein Fehler bei der Multiplikation der Schaltvorgänge pro Laststunde mit der Fahrstrecke pro Schaltvorgang. Die Summe müsste zum Ergebnis der Fahrstrecke pro Laststunde führen. Jedoch fehlt bei 200 Monatsberichten die Angabe über die Fahrstrecke.

Die Mittelwerte beziehen sich auf die gesamte Datenbasis, sodass es zu einer Abweichung bei oben genannter Multiplikation der Werte kommt.

Die Werte für die Fahrstrecke pro Schaltvorgang belaufen sich auf etwa 70,0 Meter. Hiermit sind Rückschlüsse zu den Tätigkeiten der Maschine möglich. Bestünde der Einsatz des Radladers aus einer überwiegenden Tätigkeit des „Kleinen Ladespiels“, müsste die Fahrstrecke pro Schaltvorgang deutlich kleiner als 70,0 m ausfallen. Bezogen auf diesen Referenzwert aus den Flottendaten absolvieren die Maschinen im Mittel ein Arbeitsspiel, was aus kurzen und langen Fahrstrecken besteht. Mit den aus dem Entwurf der ISO 11152 definierten Tätigkeiten und Fahrstrecken ergeben sich basierend auf den Werten der Flottendaten folgende Anteile:

Tabelle 4-19: Berechnung Anteile Ladespiele

Parameter	Kleines Ladespiel	Großes Ladespiel	Zielwert
Fahrstrecke	15,0 m	140,0 m	70,0 m
Verhältnis	56,0 %	44,0 %	

4.2.3 Leerlaufschwankungen

Die Auswertung aus dem Flottensystem von Hersteller „A“ ergab eine saisonale Schwankung im Jahresverlauf. Aufgrund der höheren Anzahl an Monatsberichten beim Hersteller „B“ erfolgte eine weitere Validierung, die in der Abbildung 4-11 sowohl für die Ketten- und Mobilbagger als auch für die Radlader dargestellt ist. Für alle drei Maschinentypen lässt sich ein Maximum für die Winterperioden feststellen. Die Datenbasis für diese Auswertung stellen dabei 48.036 Monatsberichte dar.

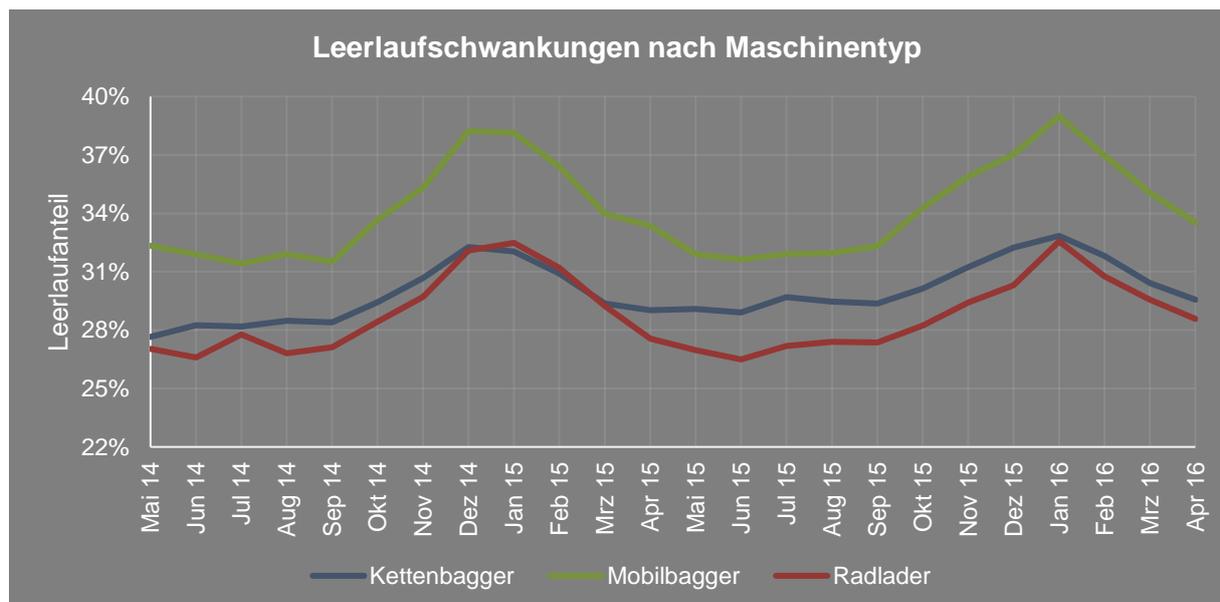


Abbildung 4-11: Leerlaufschwankungen Flottenmanagement "B"

Mit den Auswertungen bezüglich der Leerlaufschwankungen geht die Fragestellung einher, welche Ursache der höhere Leerlaufanteil hat. Eine mögliche Hypothese besteht in dem vom Fahrer abhängigen Leerlaufanteil. Eine dezidiertere Betrachtung zum Fahrer als Einflussfaktor hinsichtlich des Leerlaufs erfolgt in Kapitel 4.4. Eine erste Grundlage kann allerdings mit der Abhängigkeit von Leerlaufanteilen nach Klimazonen erfolgen. Die Datenbasis aus den Flottendaten mit einer europaweiten Verteilung der Maschinen ermöglicht hierzu Rückschlüsse. Als Hypothese ist zu formulieren, dass der Leerlaufanteil bei einem gemäßigten Klima eine geringe saisonale Schwankung aufweist.

Die Klassifizierung und Differenzierung nach den Klimazonen geht aus der Tabelle 4-20 hervor. Zur Vereinfachung sind den Ländern einer einzelnen Klimazone zugewiesen, auch wenn das Land sich in mehreren Klimazonen befindet. Die Auswahl richtet sich dann nach dem flächenmäßig größten Anteil einer Klimazone. Eine Abbildung zu der Verteilung der unterschiedlichen Zonen geht aus dem Anhang 6 hervor.

Tabelle 4-20: Einordnung der Länder nach Klimazonen

Klimazone	Einordnung Länder
Boreales Klima (BK)	Finnland, Norwegen, Schweden
Gemäßigt maritimes Klima (GMK)	Belgien, Dänemark, Deutschland, Frankreich, Großbritannien, Irland, Luxemburg, Niederlande, Österreich, Schweiz
Gemäßigt kontinentales Klima (GKK)	Litauen, Polen, Rumänien, Tschechien, Ungarn
Mediterranes Klima (MK)	Bulgarien, Kroatien, Italien, Portugal, Spanien

Das Ergebnis der Auswertung ist in der Abbildung 4-12 dargestellt. Es wird ersichtlich, dass ein Kausalzusammenhang zwischen den verschiedenen Klimazonen in Bezug auf die Leerlaufschwankungen besteht. In Ländern mit mediterranem Klima, wie z.B. Spanien, sind die Temperaturen in der Winterperiode (Dezember bis Februar) mit durchschnittlich 12,98°C relativ hoch. Im Vergleich dazu sinkt in Ländern in der borealen Klimazone, wie Finnland, die Temperatur im Winter auf durchschnittlich – 8,82°C.⁷³

⁷³ Eigene Berechnung der Temperaturen in der Winterperiode (siehe Tabelle 4-26)

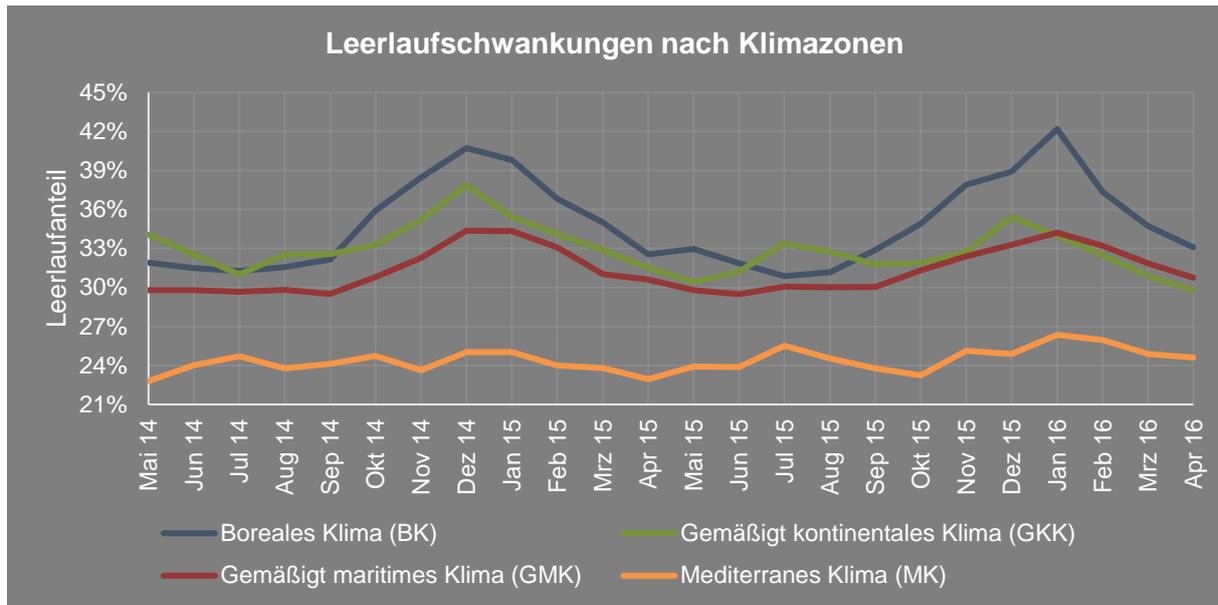


Abbildung 4-12: Leerlaufschwankungen nach Klimazonen

In den mediterranen Ländern ist kaum eine Schwankung im Jahresverlauf hinsichtlich der Leerlaufzeiten zu verzeichnen. Ferner fallen die durchschnittlichen Leerlaufzeiten deutlich geringer aus als in den anderen Klimazonen. Die Länder mit einer kalten Winterperiode weisen zudem einen deutlichen Ausschlag bei den Leerlaufanteilen nach oben aus.

Zur mathematischen Bestimmung der Abweichung wäre eine Multivarianzanalyse möglich, diese ist jedoch aufgrund der graphischen Indikation nicht weiter erforderlich, da diese nicht zu einem anderen Ergebnis führen würde und eine mathematische Bestimmtheit für die Auswertung keinen weiteren Erkenntnisgewinn generiert.

Die formulierte Hypothese lässt sich mit dieser Auswertung bestätigen und führt zu dem Ergebnis, dass die Anteile abhängig von dem Klima in den jeweiligen Ländern sind. Der Fahrer bestimmt letztendlich den Leerlaufanteil, sodass sich hieraus das Fahrerverhalten ableiten lässt. Als weiteren Forschungsbedarf könnten Anreize und Technologien erforscht werden, die eine Reduzierung der fahrerbezogenen Leerlaufpeaks in Abhängigkeit der Winterperioden zum Ziel haben.

4.2.4 Europäischer Vergleich zum Maschineneinsatz

Mit der Zuordnung der Maschinen nach Ländern ist des Weiteren ein Vergleich zwischen den verschiedenen Ländern in Europa möglich. Um mögliche Ausreißer auszuschließen, ist der Grenzwert an Mindestberichtsmonaten für die Betrachtung eines Landes auf 50 festzulegen. Eine aussagekräftige Gegenüberstellung zwischen den Ländern ist dabei nur sinnvoll, wenn die identischen Betriebsgewichte und Maschinentypen miteinander verglichen werden. Ein pauschaler Vergleich einer mittleren Verbrauchsrate ist nicht aussagekräftig, da jedes Land

einen unterschiedlichen Anteil bei der Betriebsgewichtverteilung aufweist. Beispielsweise beträgt für Großbritannien der Anteil an 36,0-t Baggern mit einem entsprechend hohen Verbrauch 51,5 %, währenddessen Frankreich nur einen Anteil von 21,7 % aufweist. Ein Vergleich dieser Länder mit einer einfachen Ausweisung der Verbrauchsrate ist somit nicht aussagekräftig. Hierfür sind weitere Berechnungen notwendig, die in dieser vereinfachten Auswertung noch nicht vorgenommen werden. Dies erfolgt im weiteren Verlauf mit der Modellentwicklung. In der Abbildung 4-13 ist ein Vergleich zwischen den Ländern exemplarisch für die 14,0-t-Mobilbagger dargestellt. Die Anforderungen an mindestens 50 Monatsberichten erfüllen 18 Länder, welche in der Abbildung farblich hervorgehoben sind. Die jeweiligen Unterschiede belaufen sich in der Auswertung auf die Kraftstoffverbrauchsrate und Leerlaufanteile. Der Durchschnittswert aller Maschinen für das Betriebsgewicht dient als Referenzwert. Die Abweichungen der Werte von den Ländern in Bezug auf den Referenzwert sind in vier Stufen eingeteilt und farblich unterschiedlich gestaltet.

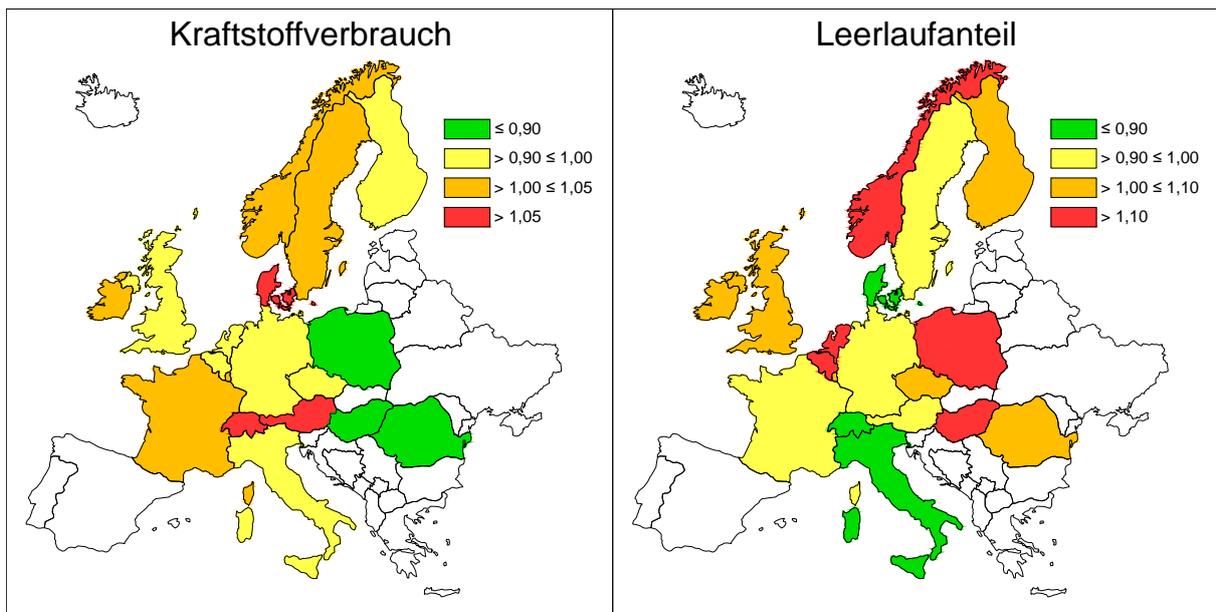


Abbildung 4-13: EU-Vergleich 14-t-Mobilbagger

Hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs geht aus der Abbildung 4-13 hervor, dass die Länder Polen, Ungarn und Rumänien die geringste durchschnittliche Kraftstoffverbrauchsrate aufweisen. Die Länder mit der höchsten Verbrauchsrate sind u.a. die Schweiz und Dänemark.

Aus welchen Gründen die Kraftstoffverbrauchsrate länderbedingt abweichen, ist nicht bekannt. Als erster und einfachster Indikator ist der Leerlaufanteil zu nennen. Dieser kann zu

großen Unterschieden in der kombinierten Verbrauchsrate, bestehend aus Last- und Leerlaufanteil führen. Eine Beispielrechnung ist hierzu in Kapitel 4.4 Leerlauf aufgeführt.

Die Leerlaufanteile zeigen auf, dass die genannten Länder mit einer sehr niedrigen Verbrauchsrate wie Polen, Ungarn und Rumänien einen sehr hohen Leerlaufanteil aufweisen. Gleiches gilt für die Länder Dänemark und Schweiz, die sich durch einen hohen Verbrauch aber sehr niedrige Leerlaufzeiten kennzeichnen.

Für die genannten Länder stellt sich eine Korrelation der Kraftstoffverbräuche und der Leerlaufanteile dar. Diese ist jedoch nicht für alle Länder zutreffend (bspw. weist Italien einen niedrigen Verbrauchswert und niedrigen Leerlaufanteil auf) und kann nicht als allgemeingültig angesehen werden. Dies soll im weiteren Verlauf näher betrachtet und differenziert werden, um detaillierte Rückschlüsse auf den Maschineneinsatz und der daraus resultierenden Verbrauchsrate zu erhalten.

Sämtliche Tätigkeiten können länderbezogen in Verbindung mit einer saisonalen Betrachtung ausgewertet werden. Dies ist jedoch im Einzelfall auf den jeweiligen Modelltyp zu beschränken. Hierdurch stellt sich eine Vielfalt an Varianten für die Auswertung dar, die im Umfang dieser Arbeit nicht darstellbar ist. Der weitere Fokus ist daher auf die Modellentwicklung gelegt, welche im Folgenden erläutert wird.

4.3 Modellentwicklung

Mit den erfassten Werten aus dem Flottenmanagementsystem sind detaillierte Rückschlüsse auf die Einsatzart möglich. Jedoch ist unbekannt, inwiefern sich welche Tätigkeiten auf den Kraftstoffverbrauch auswirken. Zudem ist ein Ländervergleich mit einer einfachen Ausweisung der Kraftstoffverbrauchsrate nicht aussagekräftig. Für eine weitere Verifizierung ergeben sich folgende Forschungsfragen und Zielstellungen:

Forschungsfragen:

- Welche Auswirkung haben die einzelnen erfassten Tätigkeiten und besteht ein kausaler Zusammenhang zwischen diesen und dem Kraftstoffverbrauch?
- Ist ein Ländervergleich möglich, der genauere Rückschlüsse auf die Einsatzart ermöglicht?

Zielstellung:

- Bestimmung von internen und externen Faktoren zur detaillierten Betrachtung der Einsatzart und Verifizierung von Kausalitäten

Die internen Faktoren gehen aus dem Flottensystem hervor und betreffen die ausgewiesenen Werte auf den Maschineneinsatz, wie Fahrstrecke, Auslastungsgrad und Anbaugeräte. Die

externen Faktoren sind Einflüsse aus der Umgebung, die sich auf den Kraftstoffverbrauch auswirken. Dies sind beispielsweise die Temperatur- oder Bodenverhältnisse. Mithilfe der Betrachtung von internen und externen Faktoren sollen detaillierte Rückschlüsse zu länderspezifischen Besonderheiten hervorgehoben werden und zu einem aussagekräftigen Ergebnis des Kraftstoffverbrauchs führen.

Ebenfalls ist als externer Faktor der Fahrer zu nennen. Im Kapitel 2.4.1 ist dargelegt, welchen Einfluss der Fahrer sowohl auf die Arbeitsleistung als auch auf den Kraftstoffverbrauch aufweist. Aus den aufgestellten Recherchen lässt sich eindeutig ableiten, dass der Fahrer den maßgeblichen Faktor im gesamten Prozesszyklus darstellt. Es stellt sich jedoch die Frage, wie gut oder schlecht der Fahrer ist. Im Vergleich zu den Baumaschinen besteht für LKW die Möglichkeit automatisierte Fahrerbewertungen, basierend auf Flottendaten, zu generieren. Diese lassen detaillierte Rückschlüsse zum Arbeitsprozess bis zur Bewertung von Einzeltätigkeiten zu. Als Beispiel sind die Bewertung der Kraftstoffverbrauchsrate, der Schaltvorgänge und Brems- und Beschleunigungsvorgänge zu nennen.⁷⁴

Bei Baumaschinen stellt sich die Fahrerbewertung als wesentlich komplexer dar. Die Rahmenbedingungen auf der Baustelle können deutlich stärker abweichen als dies bei LKW, welche größtenteils auf befestigten Oberflächen fahren, der Fall ist. Eine direkte, fahrerbezogene Auswertung ist mit den vorliegenden Daten daher nicht möglich.

In dem Modell sind sämtliche weitere Einflüsse zu erfassen, sodass als einzige Unbekannte der Fahrer als Faktor aussteht. Mit dem dadurch erzeugten Ergebnis soll ein indirekter Rückschluss auf den Fahrer möglich werden.

Als Übersicht für die Modellentwicklung ist untenstehend stichpunktartig die methodische Vorgehensweise aufgeführt und wird in den folgenden Unterkapiteln näher erläutert.

- Korrelationsanalyse der einzelnen Faktoren/Tätigkeiten
- Auswahl der Faktoren/Tätigkeiten auf Bestimmtheitsmaße
- Mathematische Bestimmung auf den Einfluss beim Kraftstoffverbrauch
- Analyse und mathematische Bestimmung der externen Faktoren
- Berechnung der internen und externen Faktoren
- Modellberechnung

⁷⁴ Vgl. [27] Daimler FleetBoard: Fahrzeugmanagement-Benutzerhandbuch, 2008, S. 4-4 ff.

4.3.1 Interne Faktoren mit Einzelfaktorbetrachtung

Die internen Faktoren betreffen die in der Tabelle 4-16 aufgeführten Tätigkeiten, welche in dem Flottensystem dargestellt sind.

Methodisch ist eine Korrelation der Tätigkeiten auf den Kraftstoffverbrauch zu untersuchen. In Bezug auf die Datenkonsistenz weisen einzelne Faktoren keine Normalverteilung oder mathematisch falsche Ergebnisse auf. Beispielsweise stellen bestimmte Arbeitsmodi einen größeren Anteil an der Gesamtarbeitszeit als 100 % dar, was nicht möglich ist.

Aufgrund der verschiedenen Betriebsgewichte und unterschiedlichen Einsätze ist innerhalb der Maschinenklasse jeder einzelne Maschinentyp separat zu analysieren. In Summe sind daher 204 Einzelfaktorbetrachtungen in Bezug auf die Kraftstoffkorrelation aufzustellen. Eine pauschale Zusammenlegung der einzelnen Maschinentypen würde zu weiteren Abweichungen führen, die bei den Flottendaten ohnehin festzustellen sind (siehe folgende Auswertung).

Zur mathematischen Auswertung werden die lineare Regression und lineare Korrelation angewandt. Ein wichtiger Indikator ist hierfür das Bestimmtheitsmaß R^2 , dessen Berechnungsformel nachfolgend in der Gleichung (4-5) dargestellt ist.

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \right)^2 \quad (4-5)$$

Für die lineare Regression ist eine Steigungsformel für die Trendlinie mit $f = a + b \times x$ aus den Gleichungen (4-6) und (4-7) zu berechnen.

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \times (y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4-6)$$

$$a = \bar{y} - b \times \bar{x} \quad (4-7)$$

Das Bestimmtheitsmaß beziehungsweise der Pearson-Korrelationskoeffizient gibt an, welche Abweichung die lineare Regression zu den betrachteten Datenpunkten aufweist. Hat dieser ein Wert von 1,0 besteht ein eindeutiger linearer Zusammenhang, da alle Punkte sich auf einer Linie befinden. Bei den Auswertungen werden die Anteile der Tätigkeiten immer auf den Kraftstoffverbrauch bezogen. Je nach Bestimmtheitsmaß ist somit ein Rückschluss der Tätigkeit auf den Verbrauch möglich.

Im nachfolgenden seien nur die wichtigsten Erkenntnisse und Besonderheiten aus der Einzelfaktoranalyse genannt, da eine detaillierte Auswertung der in Summe 204 untersuchten Berechnungen aus Umfangsgründen nicht beschrieben wird.

Generell ist festzustellen, dass die Korrelationen stark streuen, von nahezu eindeutigen Datenwolken und Bestimmtheitsmaßen zu sehr großen Abweichungen und keiner Normalverteilung. Das Bestimmtheitsmaß R^2 weist Spannweiten bei den Ergebnissen in Abhängigkeit der Tätigkeit von 0,000036 bis 0,8207 auf.

Als Beispiele für die Auswertung sind zwei verschiedene Punktwolken in der Abbildung 4-14 für einen Mobilbaggertyp mit einem Datensatz von 12.256 Monatsberichten dargestellt. Aus Platzgründen sind die Achsen nicht beschriftet. Auf der x-Achse befindet sich der Kraftstoffverbrauch, auf der y-Achse der Anteil der Faktoren in Prozent.

Bei der Betrachtung der Leerlaufanteile ist eine eindeutige Punktwolke festzustellen, welche einen linearen Zusammenhang zwischen sinkenden Leerlaufanteil und steigenden Kraftstoffverbrauch aufzeigt. Die zweite Punktwolke zeigt die Korrelation für den Power-Modus in Bezug auf den Kraftstoffverbrauch auf. Eine lineare Korrelation ist nicht festzustellen. Ferner wird ersichtlich, dass die Daten stark streuen und sich zwei Teile mit einem sehr niedrigen und sehr hohen Anteil an Stunden im Power-Modus ergeben. Dies deutet auf keine Normalverteilung der Daten hin, wodurch belastbare Rückschlüsse für diesen Faktor auszuschließen sind. Auf Rückfrage beim Hersteller, wie diese Daten ermittelt werden und weshalb es dort zu Abweichungen kommt, gibt es keine Erklärung.

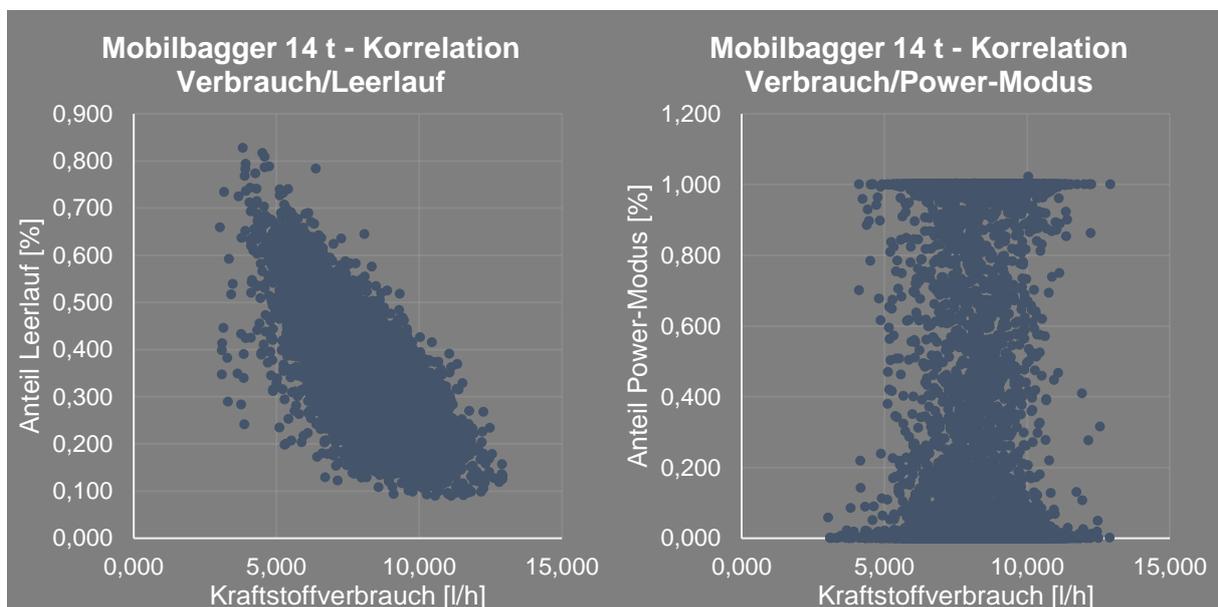


Abbildung 4-14: Beispiel Punktwolken

Das o.g. triviale Beispiel für die Korrelation zwischen Leerlaufanteil und Kraftstoffverbrauch gilt es für alle Tätigkeiten zu untersuchen. In der Tabelle 4-21 sind die Faktoren mit den höchsten Bestimmtheitsmaßen aufgeführt. Zur besseren Darstellung sind die Korrelationskoeffizienten der einzelnen Maschinentypen als Mittelwert für die jeweilige Maschinenklasse zusammengefasst. In der jeweils linken Spalte der Maschinenklasse ist der Mittelwert für den Anteil der

Tätigkeit an der Gesamtarbeitszeit [%] aufgeführt. Für den Radlader stellen sich in Abweichung die Tätigkeiten „Fahren“ in [km/h] und Schaltvorgänge in Vorgänge pro Stunde dar.

Tabelle 4-21: Ergebnis Bestimmtheitsmaß auf Kraftstoffverbrauch

Faktor	Mobilbagger		Kettenbagger		Radlader	
	Mittelwert	R^2	Mittelwert	R^2	Mittelwert	R^2
Auslastung	0,6591	0,4995	0,6992	0,5608	0,7102	0,4300
Leerlauf	0,3409	0,4995	0,3008	0,5608	0,2898	0,4300
Sehr Leicht	0,4789	0,6574	0,4478	0,7366	0,8691	0,0000
Leicht	0,3242	0,1757	0,3761	0,3485	0,3242	0,5119
Schwer	0,1561	0,5280	0,1517	0,4416	0,0294	0,3282
Sehr Schwer	0,0408	0,1610	0,0243	0,1267	0,0057	0,0919
Graben	0,0914	0,2182	0,1199	0,3766	-	-
Schwenken	0,0225	0,0784	0,0134	0,0226	-	-
Heben	0,2769	0,0828	0,0928	0,4936	-	-
Fahren	0,2905	0,0572	0,1219	0,0507	6,3292	0,0970
Schaltvorgänge	-	-	-	-	74,1373	0,3772

Als grober Indikator ist festzustellen, dass sich häufig die Korrelation als besser darstellt, sofern der Anteil der Tätigkeit an der Gesamtarbeitszeit höher ist. So stellt sich i.d.R. eine bessere Korrelation bei den Tätigkeiten „Sehr Leicht“ bis „Schwer“ dar, als bei der Tätigkeit „Sehr Schwer“. Es wird vermutet, dass die Faktoren mit geringem Anteil empfindlicher hinsichtlich Ausreißer trotz Normalverteilung sind.

Als aufschlussreich mit einer hohen Korrelation sind die vier Faktoren zum Auslastungsgrad der Maschine identifiziert worden, welche sich in den Stufen „Sehr Leicht“, „Leicht“, „Schwer“ und „Sehr Schwer“ unterscheiden. Diesen kommt bei der Modellentwicklung eine besondere Bedeutung hinzu, da mithilfe der Methode kleinster Quadrate ein Lastfaktor hieraus gebildet wird (siehe Kapitel 4.3.2).

Des Weiteren lässt sich feststellen, dass die Grabanteile höher und die Schwenkanteile niedriger beim Kettenbagger im Vergleich zum Mobilbagger ausfallen. Die Schwenkanteile fallen beim Kettenbagger mit 2,25 % und beim Mobilbagger mit 1,34 % sehr niedrig aus. Bei den nicht repräsentativen Bauprozessanalysen sind Schwenkanteile von 20,0 % festzustellen. Der Grund hierfür liegt darin, dass nur eine ausschließliche Schwenkbewegung der Tätigkeit zugewiesen wird. Sobald der Ausleger oder das Anbauwerkzeug angesteuert wird, fällt dies im Flottensystem nicht mehr zum Bereich „Schwenken“.

Beim Radlader lässt sich eine geringe Korrelation zwischen der Anzahl der Schaltvorgänge pro Stunde erkennen, wohingegen die absolvierte Fahrstrecke fast keinen Zusammenhang zum Kraftstoffverbrauch aufweist.

4.3.1.1 Fehleranalyse

Generell ist zu konstatieren, dass sich aus der Auswertung keine eindeutigen Ergebnisse oder Gesetzmäßigkeiten ableiten lassen. Dies wird insbesondere beim Radlader deutlich, dessen Anteil am Faktor „Sehr Leicht“ über 85 % beträgt. Eine erweiterte Analyse in Bezug auf die Korrelation des Faktors auf den Leerlauf ergab eine sehr gute Korrelation. Dies bedeutet mit hoher Wahrscheinlichkeit eine ähnliche Zuordnung der Faktoren „Leerlauf“ und „Sehr Leicht“. Beim Radlader beträgt jedoch der durchschnittliche Leerlaufanteil 28,98 %, dem ein Anteil von 86,91 % im Bereich „Sehr Leicht“ gegenübersteht.

Hieraus lässt sich die Fragestellung ableiten, wie der Softwarealgorithmus zur Zuordnung der einzelnen Lastzustände funktioniert. Auf Nachfrage beim Hersteller erfolgt dies unterschiedlich nach Maschinenklasse in Bezug auf die Kraftstoffverbrauchsrate oder den Hydrauliköldruck. Ein Hydrauliköldruck wird im Flottensystem nicht ausgewiesen, sodass hierzu keine Überprüfung erfolgen kann.

Zur Fehleranalyse wird der Zusammenhang zwischen Verbrauchsrate und Lastzustand näher untersucht. Je nach Höhe des Kraftstoffverbrauchs erfolgt eine Zuordnung zum jeweiligen Lastzustand von „Sehr Leicht“ bis „Sehr Schwer“. In Abhängigkeit vom Maschinentyp fallen diese unterschiedlich aus. Aus Geheimhaltungsgründen ist eine Veröffentlichung dieser Daten nicht zulässig, jedoch sind in der Tabelle 4-22 zur Veranschaulichung näherungsweise ähnliche Werte dargestellt.

Tabelle 4-22: Zuordnung Kraftstoffverbrauchsrate zum Lastzustand

	Sehr Leicht	Leicht	Schwer	Sehr Schwer
Radlader Typ 2	≤ 5,0 l/h	5,0 l/h ≤ 30,0 l/h	30,0 l/h ≤ 45,0 l/h	> 45,0 l/h

Zur Überprüfung sind Mittelwerte aus den Verbrauchsspannweiten zu bilden. Multipliziert man diese Mittelwerte der Lastzustände mit den jeweiligen Lastanteilen, wird ein Durchschnittsverbrauch ausgewiesen, der der durchschnittlichen Kraftstoffverbrauchsrate entsprechen sollte. Beim 24-t-Radlader beträgt beispielsweise die Verbrauchsrate 18,52 l/h. Der rechnerische Wert aus den Lastzuständen fällt mit 7,31 l/h rund 60 % geringer aus. Dies trifft beim Radlader bei zwei von drei betrachteten Modelltypen auf. Eine Erklärung gibt es herstellerseitig hierfür nicht, ebenso ist eine detaillierte Betrachtung aufgrund von Firmeninterna nicht möglich.

Trotz dieser Dateninvalidität und heterogenen Streuung, die sich auf den Lastzustand des Radladers beschränken, ist weitergehend zu untersuchen, inwieweit sich welcher Faktor auf

den Verbrauch auswirkt und ob diese Daten für den Aufbau eines Prognosemodells geeignet sind.

4.3.1.2 Aufbau Modell

Bevor die Einzelfaktorberechnung näher erläutert wird, ist zuvor der Aufbau des Modells zu beschreiben. Ziel des Modells ist es, die Einflüsse der einzelnen Tätigkeiten zu quantifizieren, um einen länderspezifischen Rückschluss auf die Einsatzart zu erhalten.

Eine Vergleichbarkeit ist mit den einzelnen Werten nicht möglich, da zum einen deren Einfluss unbestimmt ist und zum anderen diese in Abhängigkeit der Modelltypen unterschiedlich ausfallen. Als Beispiel fällt im Land Norwegen für einen 21-t-Kettenbagger der Leerlaufanteil um 10 % niedriger im Vergleich zum europäischen Durchschnitt aus. Um diesen Faktor zu berücksichtigen ist die Kraftstoffverbrauchsrate, um einen beispielhaft berechneten Faktor von 0,95 abzumindern. Damit ist eine Vergleichbarkeit zwischen den einzelnen Ländern gewährleistet.

Dies erfolgt methodisch durch eine Korrelationsanalyse mit einer Funktionsableitung. Diese ist für jeden Modelltyp und jede Tätigkeit vorzunehmen. Die Vergleichbarkeit wird durch eine Faktorisierung bewerkstelligt. Mit der Faktorisierung ist gemeint, dass jeder Einzelwert auf den Mittelwert bezogen wird. Hierdurch verlaufen alle Faktoren durch den Punkt 1,1. Dieser stellt den Mittelwert der Tätigkeit auf den Kraftstoffverbrauch dar. Erst eine Abweichung der betrachteten Tätigkeit zum jeweiligen Mittelwert ist durch eine lineare Funktion zu beschreiben. In Abweichung zur vorher beschriebenen linearen Regression ergibt sich aus Gleichung (4-8) die Berechnung des Bestimmtheitsmaßes. Trotz der veränderten Datenbasis durch die Faktorisierung fällt das Ergebnis zum Bestimmtheitsmaß identisch zur vorherigen Berechnung aus.

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (x_{Fi} - \bar{x}_F)(y_{Fi} - \bar{y}_F)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{Fi} - \bar{x}_F)^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_{Fi} - \bar{y}_F)^2}} \right)^2 \text{ mit } x_{Fi} = \frac{x_i}{\bar{x}} \text{ und } y_{Fi} = \frac{y_i}{\bar{y}} \quad (4-8)$$

Mit der Faktorisierung geht der Vorteil einher, dass die abgeleiteten Funktionen sich auf das Steigungsmaß und den Achsenabschnitt untersuchen lassen. Das Steigungsmaß beschreibt dabei die Auswirkung auf den Kraftstoffverbrauch. Die zu berechnende Standardabweichung zwischen den Tätigkeiten und abgeleiteten Funktionen der verschiedenen Maschinentypen kann als weiterer Indikator für die Aussagekraft der Ergebnisse dienen.

Es sind ebenfalls 204 Berechnungen zur Bestimmung der linearen Regression aufzustellen, die im Einzelnen nicht vorgestellt, sondern nur zusammengefasst im Folgenden erläutert werden.

In der Abbildung 4-15 sind exemplarisch acht verschiedene Einzelfaktoren für einen 36-t Kettenbagger Typ 4 dargestellt. Die Linien sind die berechneten linearen Regressionen aus den Datenwolken. Aufgrund der oben erläuterten Methodik zur Faktorisierung der Daten verlaufen

diese alle durch den Punkt (x,y) 1,1. Bei starken Streuungen und keiner bzw. einer sehr geringen Korrelation kommt es bei einzelnen Faktoren vor, dass die berechnete Funktion nicht den Punkt 1,1 durchläuft. Die Abweichungen belaufen sich auf bis zu 2 % und sind ein weiterer Indikator, inwieweit der einzelne Faktor für das Modell geeignet ist.

4.3.1.3 Ergebnisse Korrelationsanalyse

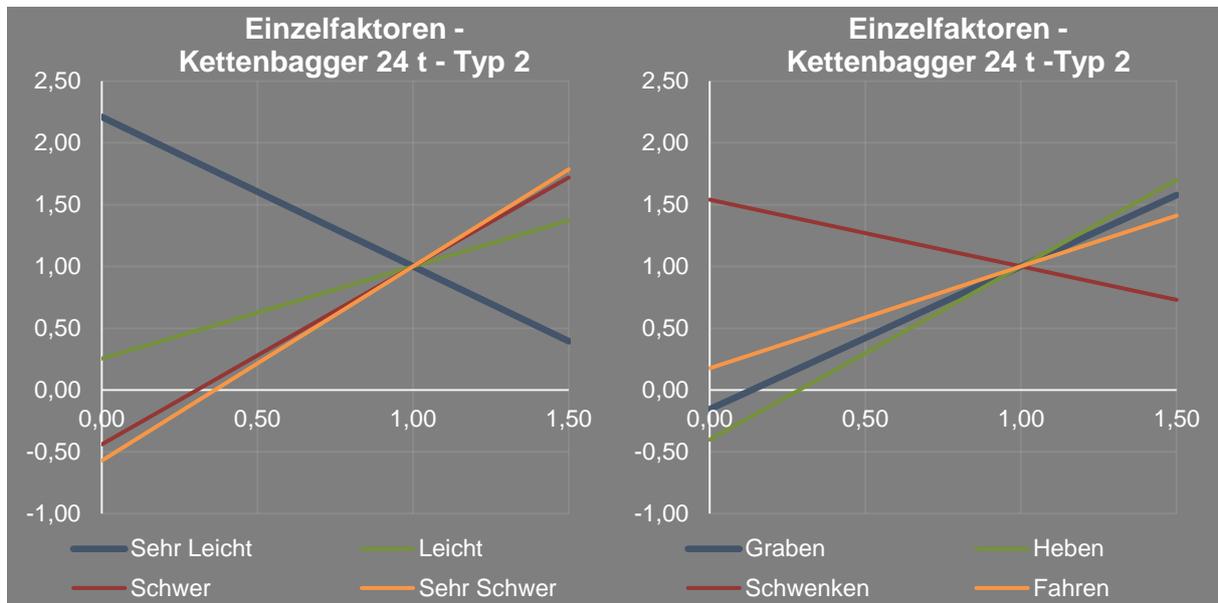


Abbildung 4-15: Einzelfaktorauswertungen Kettenbagger

Auf dem linken Diagramm in der Abbildung 4-15 ist ersichtlich, dass das Steigungsmaß sich unterschiedlich darstellt. Mit einem hohen Anteil an einer „Sehr Leichten“ Auslastung sinkt aufgrund des negativen Steigungsmaßes der Kraftstoffverbrauch. Wie zu erwarten ist, steigt der Verbrauch bei einer „leichten“ Auslastung geringfügiger im Vergleich zu den Faktoren „Schwer“ und „Sehr Schwer“.

Im Vergleich dazu sind im rechten Diagramm vier ausgewählte Faktoren aufgeführt. Die Tätigkeit „Schwenken“ zeigt als einzige Tätigkeit eine geringfügig sinkende Steigung auf. Allerdings ist der Korrelationskoeffizient sehr niedrig, sodass eine eindeutige Aussage nicht zu treffen ist. Wahrscheinlicher ist in diesem Fall eine geringfügige Auswirkung auf den Kraftstoffverbrauch und somit ein vernachlässigbarer Faktor. Dies soll jedoch keine Aussage zum Wirkungsgrad der Maschine darstellen, da im Bereich der Hybridisierung von Baggern ein Element der Rekuperation die Schwenkenergie ist. Die weiteren Faktoren stellen ein ähnliches Ausmaß hinsichtlich der Steigerung der Anteile mit einem einhergehenden höheren Kraftstoffverbrauch dar.

Zur Vollständigkeit sind in der folgenden Tabelle die Auswirkung aller Faktoren sowie eine Zuordnung zur Relevanz auf den Kraftstoffverbrauch aufgeführt.

Tabelle 4-23: Übersicht Faktoren

Faktor	Mobilbagger		Kettenbagger		Radlader	
	Mittelwert	R ²	Mittelwert	R ²	Mittelwert	R ²
Auslastung	/	+	/	+	/	+
Leerlauf	\	+	\	+	\	+
Sehr Leicht	\	+	\	++	\	+
Leicht	/	o	/	+	//	+
Schwer	//	+	//	+	//	+
Sehr Schwer	//	o	//	o	//	o
Power Modus	N.N.	N.N.	N.N.	N.N.	/	o
Graben	/	o	//	+	n.v.	n.v.
Schwenken	\	-	\	-	n.v.	n.v.
Heben	/	-	//	+	n.v.	n.v.
Senken	\	-	-	-	n.v.	n.v.
ATT	/	-	//	-	n.v.	n.v.
Brecher	/	-	\	-	n.v.	n.v.
Fahren	/	-	/	-	/	o
Schaltvorgänge	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	//	o

Legende: / steigt // steigt stark – stagniert \ fällt \\ fällt stark ++ sehr gute Korр. + gute Korр. o durchschn. Korр. - schlechte Korр. n.v. nicht vorhanden N.N. nicht normalverteilt

4.3.2 Modellentwicklung

Das Modell hat zum Ziel, mithilfe der o.g. Faktoren und deren berechneter Auswirkung auf den Kraftstoffverbrauch genauere Rückschlüsse auf den tatsächlichen Maschineneinsatz in den jeweiligen Ländern zu erhalten.

Die internen Faktoren sind bestimmt, jedoch ist eine entsprechende Streuung bei den Daten festzustellen. Jeder Faktor, der im Modell berücksichtigt wird, führt demzufolge zu einer weiteren Unsicherheit und Streuung. Aus diesem Grund sind die Faktoren bzw. Tätigkeiten, sofern möglich, zusammenzufassen.

Dies ist bei den Lastzuständen („Sehr Leicht“ bis „Sehr Schwer“) der Fall. In Addition ergeben diese immer in Summe 100 % der monatlichen Arbeitszeit. Aus dem o.g. Grund sind diese vier Faktoren zusammenzuführen und als Lastfaktor auszuweisen. Für die Zusammenführung der Faktoren ist eine Bestimmung der Verbrauchsrate für den jeweiligen Lastzustand vorzunehmen. In der Tabelle 4-22 sind diese beispielhaft für einen Radlader aufgeführt. Die Berechnung zeigt auf, dass diese Faktoren fehlerhaft sind und es herstellenseitig hierzu keine Information

gibt. Aus diesen Gründen ist eine eigene mathematische Berechnung der lastabhängigen Verbrauchsrate nach der Methode der kleinsten Quadrate erforderlich.

Berechnet man aus den Lastzuständen den Lastfaktor, so ist festzustellen, dass sich bei dem Lastfaktor die größte Korrelation auf den Kraftstoffverbrauch erzielen lässt. Die in der Tabelle 4-24 aufgeführten Ergebnisse zeigen dies auf. Die in der Tabelle dargestellten Modelltypen sind exemplarisch ausgewählte Ergebnisse. Die summierte oder gemittelte Ausweisung der Korrelationen aller Maschinentypen würde zu widersprüchlichen Aussagen führen, da innerhalb der Modelltypen differenzierte lastabhängige Verbrauchsraten vorliegen. Dieser Sachverhalt ist ausführlich im Kapitel 4.3.1.1 erläutert.

Tabelle 4-24: Korrelationskoeffizienten Lastzustände und Lastfaktor

Modelltyp	Sehr Leicht	Leicht	Schwer	Sehr Schwer	Lastfaktor
Mobilbagger - 16,0 t	0,708	0,195	0,637	0,196	0,781
Kettenbagger - 24,0 t Typ 2	0,787	0,457	0,434	0,169	0,795
Radlader - 14,0 t	0,689	0,681	0,148	0,031	0,714

Die Ergebnisse der Berechnungsmethodik sind die laststufenabhängigen Verbrauchswerte. Zur besseren Übersicht sind in der Tabelle 4-25 die einzelnen Modelltypen unter dem Maschinentyp und die Verbrauchswerte als Faktor zusammengefasst. Der Referenzfaktor bezieht sich auf die Laststufe „Sehr Leicht“. Demzufolge geht als Beispiel beim Kettenbagger mit einer Laststufe „Sehr Schwer“ ein 9,47-fach erhöhter Verbrauch im Vergleich zur Stufe „Sehr Leicht“ einher.

Mit der vorgenommenen Berechnungsmethodik ist die Formulierung einer Nebenbedingung, die einen steigenden Verbrauch mit steigendem Faktor berücksichtigt, nicht möglich. Dennoch zeigen die Ergebnisse aus der Tabelle 4-25 in der Regel diese Nebenbedingung auf Basis der Datenverteilung auf. Eine Ausnahme hierzu bildet der Radlader. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass bei zwei von drei Typen Unstimmigkeiten bei den Lastzuständen zu verzeichnen sind.

Tabelle 4-25: Ergebnisse Lastfaktorberechnung

Maschinentyp	Sehr Leicht	Leicht	Schwer	Sehr Schwer
Kettenbagger	1,00	7,22	8,88	9,47
Mobilbagger	1,00	4,70	7,14	8,98
Radlader	1,00	7,26	8,03	5,62

Die internen Faktoren für das Modell sind hiermit bestimmt. In der nächsten Stufe erfolgt die Festlegung der Auswirkungsgrade für die externen Faktoren Witterung und Bodenverhältnisse.

Bei der Witterung stellt sich die Frage, ob die klimatischen Rahmenbedingungen zu Mehrverbräuchen führen. Bei der aufzustellenden Betrachtung kann nicht berücksichtigt werden, welche Ursache ein möglicher Mehr-/Minderverbrauch hat. Einerseits spielt die Außentemperatur eine Rolle beim Kraftstoffverbrauch eines Verbrennungsmotors. Beim NEFZ ist beispielsweise die Umgebungsluft mit 20-30°C im Prüfstandsraum höher als jede durchschnittliche Jahresmitteltemperatur eines europäischen Landes (siehe Tabelle 4-26).⁷⁵ Ferner schalten sich spezielle Abgasnachbehandlungen beim PKW ab gewissen Temperaturen ab, sodass temperaturabhängige Veränderungen im Verbrauch festzustellen sind. Ebenso spielt der Sauerstoffgehalt, der ebenfalls mit der Temperatur sowie mit der Höhenlage variiert, eine Rolle bei der Verbrennung des Kraftstoff-Luftgemischs. KOTTE stellt beispielsweise bei einem Einsatz von Maschinen über 2.000 m ü.NN einen Abfall der Motorleistung von 10 % fest.⁷⁶

Mit der Änderung der Außentemperatur können sich ebenfalls, in Abhängigkeit der Bodenart, die Lösekräfte massiv unterscheiden. Als Beispiel weist ein bindiger Boden, der dauerhaft Frost ausgesetzt ist, felsähnliche Lösekräfte auf, währenddessen dieser bei sommerlichen Temperaturen deutlich leichter lösbar ist.

Diese Vielzahl an Variationen und Einflussfaktoren, resultierend aus den Außentemperaturen, sind in dieser Komplexität nicht aus den vorliegenden Flottendaten untersuchbar. Hierzu wären mindestens Angaben zu den aktiven Abgasnachbehandlungssystemen, Hydraulikdrücken sowie Baustellenrahmenbedingungen notwendig, welche nicht vorliegen.

Als triviales Beispiel ist jedoch zu untersuchen, ob ein kausaler Zusammenhang zwischen dem Kraftstoffverbrauch und der Außentemperatur besteht, und sofern dies zutreffend ist, in welchem Maße sich dies auswirkt.

4.3.2.1 Bestimmung eines Temperaturkorrekturfaktors

Die Datenbasis besteht aus den Flottendaten von Hersteller „A“, wobei für die Temperaturbetrachtung die Berichtsart „Monatlicher Kraftstoffbericht“ zum Tragen kommt. Die genaue Anzahl an ausgewerteten Daten geht aus der Tabelle 4-12 hervor und umfasst 6.240 Maschinen sowie 58.470 Monate.

Es stellt sich die Frage, wie aus einer tätigkeitsbezogenen, variablen Kraftstoffverbrauchsrate ein Kausalzusammenhang zur Außentemperatur hergestellt werden kann. Dies ist mit dem Zustand „Last“ nicht zu verifizieren, da dieser folglich lastabhängig variiert. Im Gegensatz dazu

⁷⁵ Vgl. [8] Borgeest: Manipulation von Abgaswerten, 2016, S. 11

⁷⁶ Vgl. [36] Kotte: Ermittlung der Nutzförderleistung von Hydraulikbaggern, 1997, S. 28

wird dem Zustand „Leerlauf“ jedoch eine konstante Verbrauchsrate unterstellt, die unabhängig von internen Faktoren ist. In dem „Monatlichen Kraftstoffbericht“ werden diese zwei Lastzustände verbrauchsmäßig erfasst.

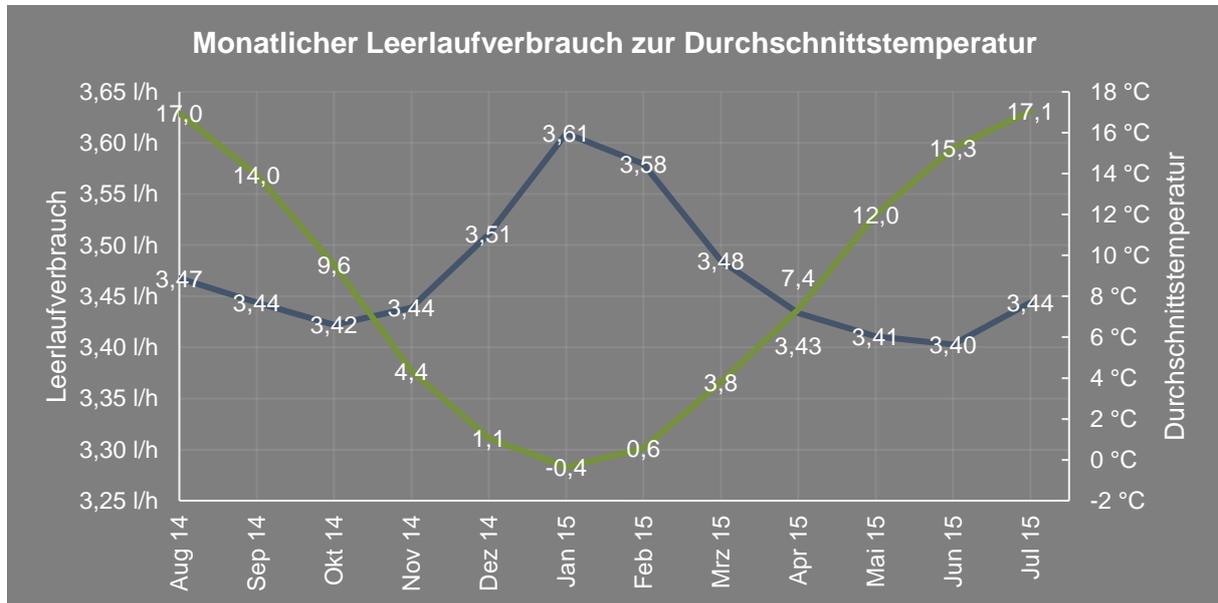


Abbildung 4-16: Vergleich monatlicher Leerlaufverbrauch zu Durchschnittstemperaturen

Methodisch sind die Leerlaufverbräuche der Maschinen monatsbasiert als Mittelwert auszuweisen und mit den Durchschnittstemperaturen in Kontext zu bringen. Das Ergebnis hierzu ist in der Abbildung 4-16 aufgeführt. Aus der Abbildung wird deutlich, dass ein deutlicher Zusammenhang zwischen der Außentemperatur und dem Leerlaufverbrauch besteht. Die grüne Linie stellt die Durchschnittstemperatur in Deutschland dar. Mit der blauen Linie ist die Leerlaufverbrauchsrate aufgeführt. Der Verlauf der beiden Linien zeigt, dass bei einer geringeren Außentemperatur der Kraftstoffverbrauch im Leerlauf ansteigt. In der Winterperiode ist im kältesten Monat (Januar) der höchste Verbrauch festzustellen.

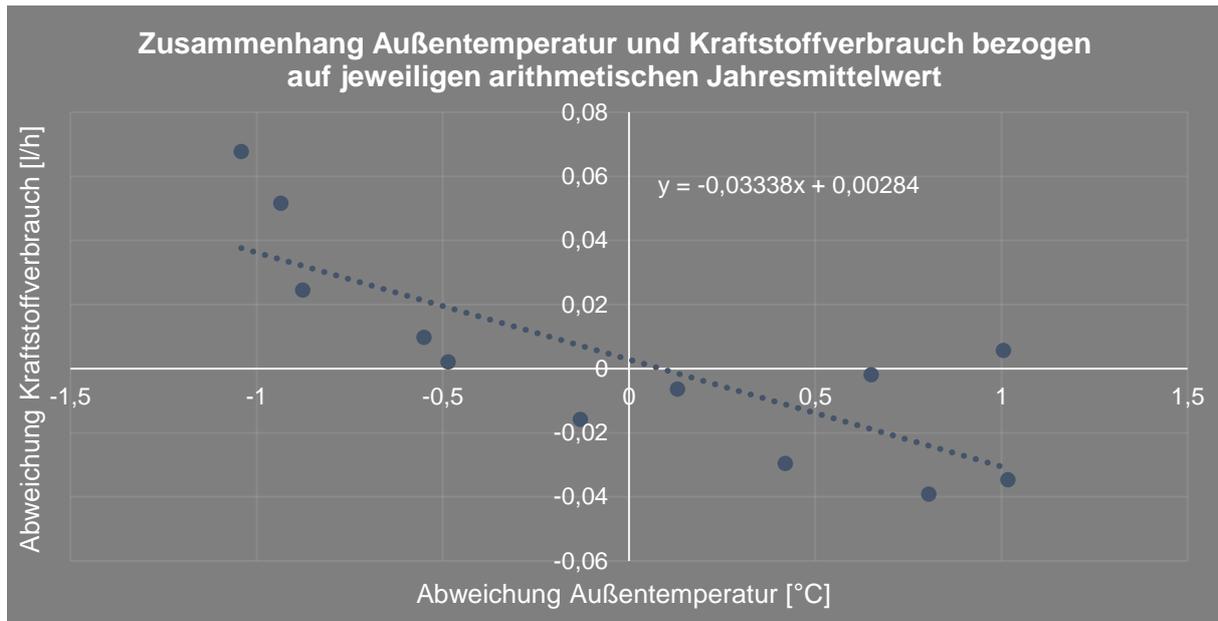


Abbildung 4-17: Zusammenhang Außentemperatur zum Kraftstoffverbrauch

Für das Modell ist zu berechnen, inwieweit sich die unterschiedlichen Temperaturen auf den Kraftstoffverbrauch auswirken. Zur Bestimmung dieses Verhältnisses ist mathematisch zu quantifizieren, wie stark sich dieser Sachverhalt auswirkt. Es wird hierbei angenommen, dass sich die Außentemperatur auf den Kraftstoffverbrauch linear verhält. In der Abbildung 4-17 sind die Daten hierfür dargestellt. Auf der y-Achse sind die Abweichungen für den Kraftstoff aufgezeichnet. Auf der x-Achse ist das Temperaturdelta in Abweichung zum Mittelwert dargestellt. Der Werte im II. Quadranten beschreiben somit kältere Temperaturen, die Werte im IV. Quadranten wärme Temperaturen. Es wird ein linearer Zusammenhang deutlich, der aufzeigt, dass der Kraftstoffverbrauch bei höheren Temperaturen geringer ausfällt als bei niedrigen Temperaturen. Die Ableitung dieser Daten als Funktion weist ein Bestimmtheitsmaß von 0,6235 auf. Für die Berechnung ins Modell ist die Funktion allerdings fehlerhaft, da diese nicht durch den Nullpunkt verläuft. Hierbei würde der Basiswert bei dieser Funktion um die Abweichung auf der y-Achse korrigiert werden.

Aus diesem Grund ist eine lineare Regression vorzunehmen, die durch den Nullpunkt verläuft. Aufgrund der Verschiebung des y-Achsenabschnitts auf den Nullpunkt ändert sich die Funktion (4-9) auf das folgende Steigungsmaß:

$$f_{E_1} = -0,0333792955683067x \quad (4-9)$$

Die Funktion (4-10) beschreibt, wie die Durchschnittstemperaturen in den EU-Ländern auf Basis der jährlichen Temperatur in Deutschland zu korrigieren sind. In der Formel ist $\Delta\bar{x}_{L_k,Temp}$ als das länderspezifische Temperaturdelta im Vergleich zur Basis Deutschland anzusehen.

$$f_{E_1,L_k} = f_{E_1} \times \Delta\bar{x}_{L_k,Temp} \quad (4-10)$$

Die Datenbasis der Flottendaten von Hersteller „A“ beschränkt sich ausschließlich auf den deutschen Raum. Das Modell besteht allerdings aus der europaweiten Verteilung von Maschinen, wodurch Korrekturfaktoren für die einzelnen Länder notwendig sind.

Ein exakter Maschinenstandort basierend auf GPS ist nicht gegeben. So kann für die Temperatur nur ein landestypischer Mittelwert angenommen werden, der als Korrekturfaktor dient. Die Ergebnisse hierzu sind in der Tabelle 4-26 aufgeführt. Die Datenbasis basiert auf den Durchschnittstemperatur vom Deutschen Wetterdienst.

Tabelle 4-26: Ergebnis länderspezifische Temperaturkorrektur

Land	Durchschnittstemperatur	Delta - Absolut	Korrekturfaktor
Deutschland	8,46°C		
Belgien	9,80°C	-1,34°C	0,045
Bulgarien	11,50°C	-3,04°C	0,102
Dänemark	7,60°C	0,86°C	-0,029
Finnland	2,70°C	5,76°C	-0,192
Frankreich	16,80°C	-8,34°C	0,278
Großbritannien	10,60°C	-2,14°C	0,071
Irland	10,00°C	-1,54°C	0,051
Italien	15,55°C	-7,09°C	0,237
Kroatien	14,80°C	-6,34°C	0,212
Luxemburg	9,08°C	-0,63°C	0,021
Niederlande	9,18°C	-0,72°C	0,024
Norwegen	3,50°C	4,96°C	-0,166
Österreich	6,15°C	2,31°C	-0,077
Polen	8,15°C	0,31°C	-0,010
Portugal	17,30°C	-8,84°C	0,295
Rumänien	10,30°C	-1,84°C	0,061
Schweden	4,05°C	4,41°C	-0,147
Schweiz	9,80°C	-1,34°C	0,045
Spanien	17,85°C	-9,39°C	0,313
Tschechische Republik	8,65°C	-0,19°C	0,006
Ungarn	10,20°C	-1,74°C	0,058

4.3.2.2 Bestimmung eines Bodenkorrekturfaktors

Der zweite externe Faktor betrifft den Boden in Form der notwendigen Lösekraft zum Laden. Die Lösekraft wirkt sich dabei massiv auf den Arbeitsprozess, aber auch auf die Energieeffizienz aus. Dieser Faktor beeinflusst den Arbeitsprozess hinsichtlich der Maschinengröße, des Arbeitsverfahrens, der Ladeleistung usw. als aufzuführende Hauptfaktoren. Dies lässt sich weiter in Auflockerungsfaktoren, Reißkräfte etc. unterteilen, ist aber der Kategorie der Arbeitsvorbereitung zuzuordnen, was im Rahmen dieser Arbeit nicht weiterverfolgt wird.

Als isolierte Leistung für einen Lastzyklus ist das Lösen und Laden des Bodens zu nennen. Dies wirkt sich sowohl von der Arbeitsdauer als auch von der benötigten Hydraulikkraft auf den Kraftstoffverbrauch aus. Wie bei der Temperatur stellt sich beim Boden ebenfalls die Frage, welche ländertypischen Unterschiede sich bei der Bodenart darstellen.

Zur Bewertung ist in erster Linie das Antreffen von Fels als maßgeblicher Faktor zu bezeichnen. Dies lässt sich sowohl in der flächenmäßigen Ausdehnung von Fels als auch in der Tiefe an der Erdoberfläche differenzieren.

Die Daten hierfür sind vom Geozentrum Hannover zur Verfügung gestellt worden und basieren auf einer europaweiten Bodendatenbank.⁷⁷ Es sind folgende Parameter für die einzelnen Länder enthalten:

- Flächenverteilung unterschiedlicher Bodenarten (Oberfläche und in 2,00 m Tiefe)
- Felsanteil (Oberfläche bis 1,50 m Tiefe)

Bei der Flächenverteilung wird in der Datenbank zwischen fünf verschiedenen Bodenarten differenziert. Die Unterscheidung basiert auf der Korngrößenverteilung und weist eine Spannweite von „sehr fein“ bis „grobkörnig“ auf. Als Beispiel für die Datenbasis sind diese Informationen exemplarisch für Deutschland in der Tabelle 4-27 aufgeführt. Die Rohdaten beinhalten die Angaben der Bodenarten in Quadratmeter. Um einen Vergleich zwischen den europäischen Ländern aufstellen zu können, erfolgt eine Umrechnung der Bodenarten in Prozent. Der Anteil mit „keiner Information“ fällt bei der 2,0 m tiefen Schicht mit über 50,10 % deutlich größer aus als bei der Oberfläche mit 2,59 %. Als Hypothese ist zudem aufzustellen, dass mit zunehmender Schichttiefe der Anteil vom feinkörnigen Boden ab- und der Anteil grobkörniger Böden zunimmt. Zu dieser Hypothese stehen die exemplarischen Daten in der Tabelle im Widerspruch. Im Mittel beträgt für alle betrachteten Länder der Anteil „keine Information“ über 55 %. Auf Grund des hohen Anteils an „keine Information“ sowie der widersprüchlichen Daten wird die 2,0 m Schicht nicht betrachtet, und es findet keine Verrechnung oder Interpolation zwischen den Werten „Oberfläche“ und „2,0 m Tiefe“ statt.

Tabelle 4-27: Exemplarische Daten Bodendatenbank

Bodenart	keine Info	Grob	Mittel	Mittel-Fein	Fein	Sehr Fein
Oberfläche	2,59	28,69	39,48	25,97	3,26	0,00
2,00 m Tiefe	50,10	7,97	10,07	18,63	13,22	0,00
Fels	keine Info	nicht vorh.	80-150 cm	40-80cm	0-40 cm	
Anteil	8,34	85,43	2,77	3,42	0,05	

⁷⁷ Eigene Berechnung (basiert auf Daten des European Soil Data Centre (ESDAC), schriftliche Mitteilung)

Zur Generierung des Bodenwerts ist ein Wert für die Lösbarkeit des Bodens festzulegen. Rechnerisch sind die Flächen- und Tiefenangaben mit einen Lösefaktor zu multiplizieren, um einen Aufwand für den landestypischen Bodenwert zu erzielen. Dies betrifft zum einen die verschiedenen Bodenarten an der Oberfläche sowie zum anderen den Fels. Dabei fällt der Aufwandswert für den Fels deutlich höher aus. Die einzelnen angenommenen Lösefaktoren für die jeweiligen Bodenarten und den Fels sind in der Tabelle 4-28 dargestellt.

Tabelle 4-28: Lösefaktoren nach Bodenarten

Bodenart	Grob	Mittel	Mittel-Fein	Fein	Sehr Fein	Fels
Lösefaktor [fm ³ /lm ³]	0,89	0,84	0,84	0,79	0,80	0,60

Ein zusätzlicher Abbaufaktor für die Tiefe ist nicht zu berücksichtigen, da die angegebene Tiefe nur einen Wert von 1,50 m aufweist. Erst bei tieferen Arbeiten wirkt sich dies nach HÜSTER auf die Arbeitsleistung aus.⁷⁸ Allerdings sind die unterschiedlichen Tiefenangaben für das Antreffen von Fels zu berücksichtigen. Daher erfolgt eine Verrechnung der Felsanteile in Abhängigkeit der Tiefe mit den gemittelten Lösefaktoren aus der Oberfläche. Ab der Schichttiefe, bei der Fels anzutreffen ist, ist der kritischere Wert für den Lösefaktor vom Fels zu wählen.

Für beide Angaben (Flächenverteilung, Felsanteil) sind die Werte „ohne Information“ auf die restlichen Anteile zu interpolieren. Hinsichtlich der Datenkonsistenz sei genannt, dass es Länder mit einem hohen Anteil „ohne Information“ gibt. Als extremster Ausreißer ist Kroatien zu nennen, welches einen Wert für den Fels von über 99 % aufweist. Daneben gibt es vier weitere Länder mit einem Anteil von 15 bis 30 % „ohne Information“.

Basierend auf der beschriebenen Methodik ergibt sich die Formel (4-11) zur Bewertung der Bodenkennwerte:

$$B_{L_k, \text{korr.}} = s_1 \times s_2 \times s_3 \times s_4 \quad (4-11)$$

mit $s_1 = a_{s_1} \times f_0 \quad (4-12)$

$$s_2 = a_{s_2} \times (f_0 \times d_{01} + f_1 \times d_{f1}) \quad (4-13)$$

$$s_3 = a_{s_3} \times (f_0 \times d_{02} + f_2 \times d_{f2}) \quad (4-14)$$

$$s_4 = a_{s_4} \times (f_0 \times d_{03} + f_3 \times d_{f3}) \quad (4-15)$$

$$f_0 = b_1 \times f_{01} + b_2 \times f_{02} + b_3 \times f_{03} + b_4 \times f_{04} + b_5 \times f_{05} + b_6 \times f_{06} \quad (4-16)$$

⁷⁸ Vgl. [15] Hüster: Leistungsberechnung der Baumaschinen, 2003, S. 45

Die Ergebnisse der Berechnung sind in der Abbildung 4-18 dargestellt. Die Balkendiagramme stellen die positiven und negativen Abweichungen im Vergleich zum arithmetischen Mittelwert dar. Der arithmetische Mittelwert wird genutzt, da kein Referenzwert vorliegt und hiermit ein Vergleich zwischen den Ländern möglich ist. Die negativen Werte zeigen einen härteren Boden auf, wohingegen die positiven Werte für einen weicheren Boden mit geringem Felsanteil stehen.

Die Aussagekraft der Ergebnisse ist mit der vorhandenen Datenbasis in Frage zu stellen. Von den 21 betrachteten Ländern weisen zwölf Länder einen Anteil von über 90,0 % mit keinem Felsanteil auf, davon sechs Länder mit 100,0 %. Dies führt dazu, dass in Gänze eine Plausibilität aus den Berechnungen nicht hervorgeht.

Als Hypothese ist aufzustellen, dass beispielsweise die Schweiz oder Norwegen aufgrund der Vielzahl an Bergen an der Erdoberfläche über einen anstehenden Fels verfügen. Diese Länder werden nach der Abbildung 4-18 aber gegensätzlich eingestuft, sodass Norwegen über den geringsten Felsanteil in Europa verfügen sollte.

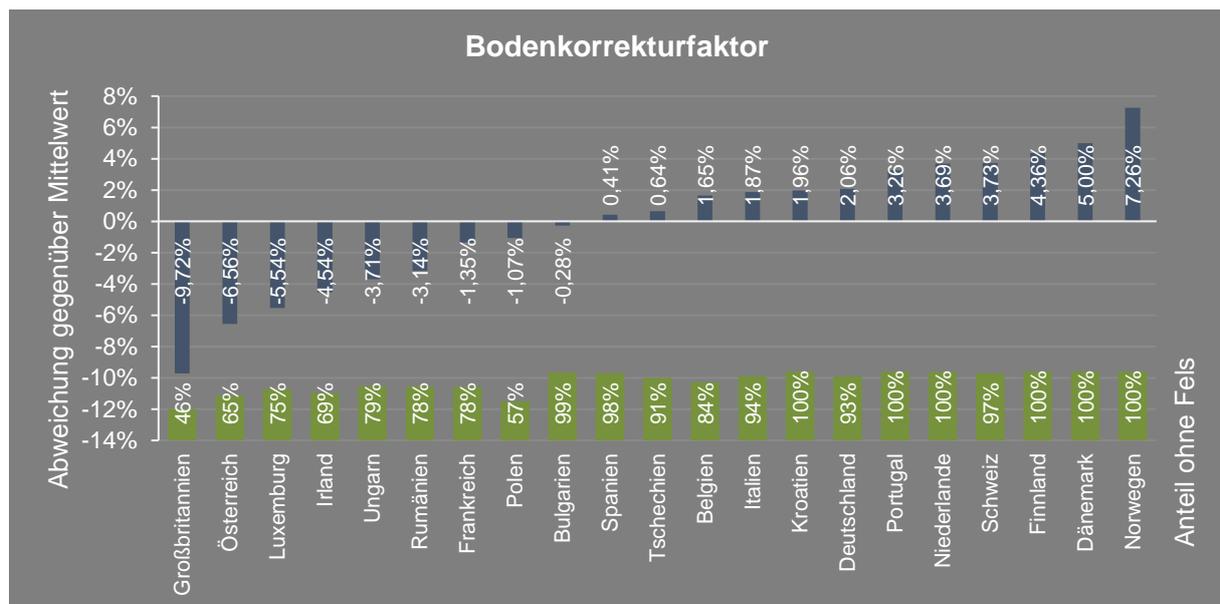


Abbildung 4-18: Ergebnis Bodenkorrekturfaktor

Um dennoch die Plausibilität der Daten zu prüfen, wird eine Filterung der Länder vorgenommen, welche einen unverhältnismäßig hohen Anteil an keiner Information beim Fels von über 95,0 % aufweisen (siehe Abbildung 4-18). Hierdurch entfallen in der Betrachtung neun Länder.

In der Abbildung 4-19 sind die gefilterten Bodenkorrekturfaktoren ausgewiesen. Der Bezugswert ist hier ebenfalls das arithmetische Mittel. Dies stellt mit dem Vergleich zu geologischen Karten und Daten eine deutliche bessere Plausibilität dar. Für das Modell werden daher diese Daten zur weiteren Betrachtungsebene für die aufgeführten Länder in der Abbildung genutzt.

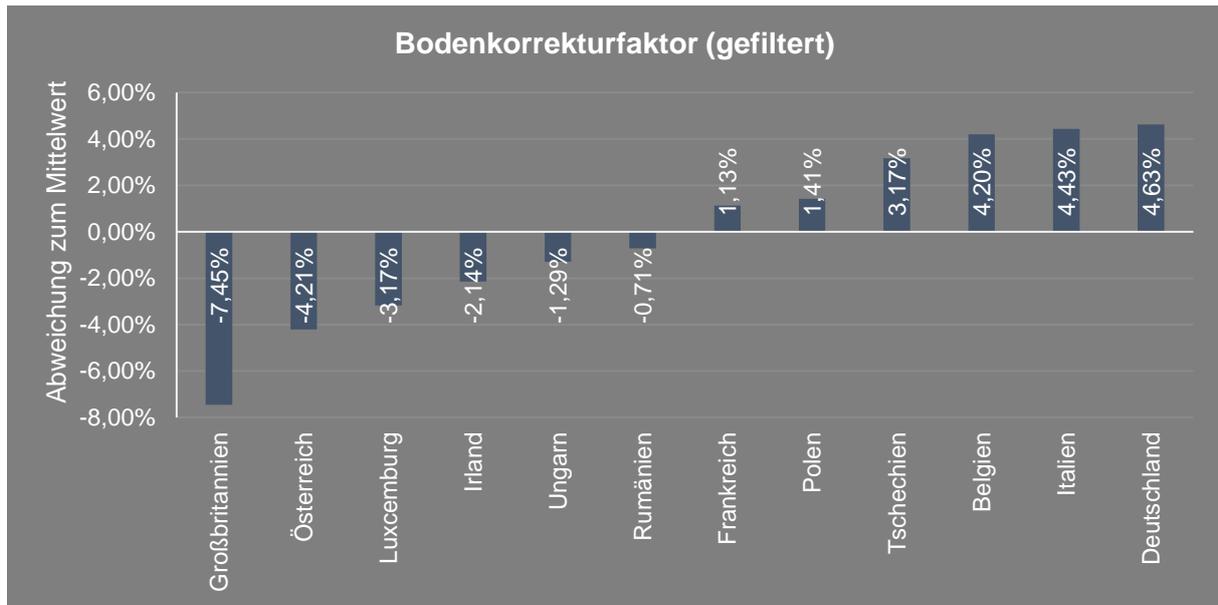


Abbildung 4-19: Ergebnis gefilterte Bodenkorrekturfaktoren

Um eine Berechnung mithilfe einer Faktorisierung vorzunehmen, ist ein Ausgangswert als Bezugswert zu definieren. Beim Temperaturfaktor ist dies Deutschland, weshalb dies zur einfacheren Umsetzung für den Boden ebenfalls vorgenommen wird.

$$f_{E_2, L_k} = \frac{B_{LDE, korr.}}{B_{L_k, korr.}} \quad (4-17)$$

Generell ist festzustellen, dass die Daten aus der Bodendatenbank keine ausreichende Datenkonsistenz aufweisen, um eine pauschale Ableitung zu den länderspezifischen Bodenabbaufaktoren zu berechnen. Weder weitere Recherchen beim Geozentrum Hannover noch im Joint Research Center in Italien konnten die Widersprüche klären.

Ein aussagekräftigeres Modell ist in einigen Jahren umsetzbar, da z.B. Großdrehbohrgeräte automatisiert die Widerstände im Boden aufzeichnen. Als Beispiel ist ein Forschungsprojekt der Fa. Bauer Spezialtiefbau zu nennen, welches aktuell Bohrprofile und Bodenwiderstände aufzeichnet. Bis hierzu repräsentative Ergebnisse erzielt werden, ist lt. Herrn Prof. Bauer noch ein Zeitraum von drei bis vier Jahren erforderlich.⁷⁹

4.3.3 Zusammenführende Berechnungen

Nachfolgend wird die Berechnungsmethodik zur Zusammenführung der Tätigkeiten und Einzelfaktoren, welche in den vorangegangenen Kapiteln 4.3.1 und 4.3.2 ermittelt wurden, zum Länderkorrekturfaktor dargestellt. Dabei werden einzelne Rechenschritte zum besseren Verständnis im Kontext der Gesamtberechnung noch einmal aufgeführt.

⁷⁹ Persönliche Mitteilung, Prof. Thomas Bauer, VDBUM-Seminar 2016, 25.02.2016

Die detaillierten Erläuterungen zu den Indizes sind, wie im Kapitel 1.3 beschrieben, im Anhang 2 aufgeführt. Zur kurzen Übersicht sind die Hauptindizes und Laufvariablen in der Tabelle 4-29 dargestellt.

Tabelle 4-29: Erläuterung Indizes

Hauptindizes				Laufvariablen		
<i>V</i>	<i>T</i>	<i>L</i>	<i>M</i>	<i>i</i>	<i>j</i>	<i>k, l</i>
Verbrauch	Tätigkeit	Land	Modell	Variable Modelltyp	Variable Tätigkeit	Variablen Land

Aus den Formeln (4-18) und (4-19) geht die Berechnung für die Faktorisierung einher. Die Tätigkeit des jeweiligen Monats wird auf den Gesamtmittelwert bezogen und damit faktorisiert. In der Formel ist für t_i noch ein Index für die Seriennummern und den betrachteten Monat hinzuzufügen. Zur besseren Übersicht wird dies allerdings nicht dargestellt.

Mit der Umrechnung und der berücksichtigten Korrelation auf den Kraftstoffverbrauch wird als Ergebnis ein Wert von z.B. 1,16 ausgewiesen. Es wird deutlich, dass der Wert für diese Tätigkeit in diesem Land das 1,16-fache im Vergleich zum arithmetischen Mittel beträgt.

$$t_i(V_{M_i}) = \frac{V_{M_i}}{\bar{V}_{M_i}} \quad (4-18)$$

$$y_i(T_{j,M_i}) = \frac{T_{j,M_i}}{\bar{T}_{j,M_i}} \quad (4-19)$$

Tabelle 4-30: Beispielrechnung zu Formeln (4-18) und (4-19)

$V_{M_{WL,16}}$	$\bar{V}_{M_{WL,16}}$	$t_{V,M_{WL,16}}$	$T_{Idle,M_{WL,16}}$	$\bar{T}_{Idle,M_{WL,16}}$	$y_{Idle,M_{WL,16}}$
8,16 [l/h]	8,73 [l/h]	0,93 [-]	39,42 [%]	34,12 [%]	1,16 [-]

Das Bestimmtheitsmaß R^2 der Tätigkeiten auf den Kraftstoffverbrauch wird mithilfe der Formel (4-20) berechnet. Die Bestimmung erfolgt, indem die Tätigkeiten mit dem Index y_i auf den Kraftstoffverbrauch t_i bezogen werden. Die Berechnung erfolgt in Abhängigkeit der Modelltypen (z.B. 16,0 t, 18,0 t) und nicht innerhalb der übergeordneten Ebene der Maschinentypen (z.B. Großlader), da seitens der Telematiksysteme einzelne, modelltypabhängige Softwarealgorithmen existieren. Sofern eine ausreichende Korrelation vorhanden ist, werden die Tätigkeiten in das Modell integriert. Eine Übersicht der Berechnungen geht aus der Tabelle 4-21 und Tabelle 4-23 hervor. Für das aufgeführte Beispiel aus der Tabelle 4-31 mit dem 16,0-t-Radlader sind 714 Rechenschritte zu tätigen. Aufgrund der hohen Anzahl an Rechenschritten sind nur die Summen dargestellt.

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \right)^2 \quad (4-20)$$

Tabelle 4-31: Beispielrechnung zur Formel (4-20)

$\sum_{i=1}^n (t_{V,MWL,16} - \bar{t}_{V,MWL,16}) \times (y_{Idle,MWL,16} - \bar{y}_{Idle,MWL,16})$	$\sqrt{\sum_{i=1}^n (t_{V,MWL,16} - \bar{t}_{V,MWL,16})^2}$	$\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_{Idle,MWL,16} - \bar{y}_{Idle,MWL,16})^2}$	R^2
19,474 [-]	5,607 [-]	4,876 [-]	0,507 [-]

Bei einer hohen Korrelation wird aufgrund der resultierenden Datenwolken (siehe Abbildung 4-14) eine lineare Funktion unterstellt. Diese Funktion kann mathematisch bestimmt werden. Zur Formelbestimmung wird die Methode kleinster Quadrate angewandt, welche in der Formel (4-21) aufgeführt ist. Dabei wird der y-Achsenabschnitt b_i sowie das Steigungsmaß a_i berechnet. Mit der durchgeführten Faktorisierung ergibt sich das gleiche Bezugssystem für alle Tätigkeiten, sodass deren unterschiedlicher Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch vergleichbar wird (siehe Abbildung 4-15).

$$f_i(x_{L_k}) = a_i + b_i \times x_{L_k} \quad (4-21)$$

mit
$$b_i(T_{j,M_i}) = \frac{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t}) \times (y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2} \quad (4-22)$$

$$a_i(T_{j,M_i}) = \bar{y} - b_i \times \bar{t} \quad (4-23)$$

Tabelle 4-32: Beispielrechnung zur Formel (4-21)

$\sum (t_{V,MWL,16} - \bar{t}_{V,MWL,16}) \times (y_{Idle,MWL,16} - \bar{y}_{Idle,MWL,16})$	$\sum (t_{V,MWL,16} - \bar{t}_{V,MWL,16})^2$	$b_{Idle,MWL,16}$	
-49,74 [-]	41,12 [-]	-1,210	
$\bar{y}_{Idle,MWL,16}$	$b_{Idle,MWL,16}$	$\bar{t}_{V,MWL,16}$	$a_{Idle,MWL,16}$
1,00 [-]	-1,210	1,00 [-]	2,210
$f_i(x_{L_k}) = 2,210 - 1,210 x_{L_k}$			

Das Ziel der Berechnungen ist eine länderspezifische Herausarbeitung von Unterschieden in der Nutzung der Baumaschine. Aus diesem Grund ist dies für die Berechnung und der daraus resultierenden Formel (4-24) modell- als auch länderspezifisch zu differenzieren.

$$f_i = f_i(x_{L_k}) \quad (4-24)$$

mit
$$x_{L_k}(T_{j,M_i}) = \frac{\bar{T}_{j,M_i,L_k}}{\sum_l \bar{T}_{j,M_i,L_l}} \quad (4-25)$$

Tabelle 4-33: Beispielrechnung zur Formel (4-24)

$\bar{T}_{Idle,M_{WL,16}L_{DK}}$	$\sum_{EU} \bar{T}_{Idle,M_{WL,16},L_{EU}}$	$x_{L_{DK}}(T_{Idle,M_{WL,16}})$
32,43 [%]	34,12 [%]	0,95 [-]
$f_{Idle,M_{WL,16}}$	$f_{Idle,M_{WL,16},L_{DK}}$	
2,210 – 1,210 x_{L_k}	1,06 [-]	

Nach obenstehender Berechnung werden die Tätigkeiten mit der Umrechnung direkt faktorisiert. In Summe sind alle zu berücksichtigenden Tätigkeiten zusammenzufassen und mit dem länderspezifischen, modellabhängigen Mittelwert der Kraftstoffverbrauchsrate zu dividieren. Aus dieser Berechnung aus Formel (4-26) geht der korrigierte Verbrauch hervor.

$$V_{intern,korr.}(M_i, L_k) = \frac{\bar{V}_{M_i L_k}}{\sum_i f_i} \quad (4-26)$$

Tabelle 4-34: Beispielrechnung zur Formel (4-26)

$\bar{V}_{M_{WL,16},L_{DK}}$	$\sum_{Tätigkeiten} f_{Tätigkeiten,M_{WL,16}}$	$V_{intern,korr.}(M_{WL,16}, L_{DK})$
9,69 [l/h]	1,11 [-]	8,75 [l/h]

Die berücksichtigten Tätigkeiten aus den Flottendaten sind nach obenstehender Berechnung vollständig erfasst. Zur Gesamtberechnung fehlen die externen Faktoren Temperatur und Boden. Diese sind ebenfalls in eine Formel für das Modell zu implementieren.

$$V_{extern,korr.}(M_i, L_k) = V_{intern,korr.}(M_i, L_k) \times f_{E_1,L_k} \times f_{E_2,L_k} \quad (4-27)$$

mit $f_{E_1,L_k} = f_{E_1} \times \Delta \bar{x}_{L_k,Temp}$ (4-28)

$$f_{E_2,L_k} = \frac{B_{L_{DE},korr.}}{B_{L_k,korr.}} \quad (4-29)$$

Tabelle 4-35: Beispielrechnung zur Formel (4-27)

$V_{intern,korr.}(M_{WL,16}, L_{DK})$	$f_{E_1,L_{DK}}$	$f_{E_2,L_{DK}}$	$V_{extern,korr.}(M_{WL,16}, L_{DK})$
8,75 [l/h]	0,97 [-]	-	8,49 [l/h]

4.3.4 Ergebnis

Aus Umfangsgründen sind als Ergebnis für die Modellberechnung nur die Daten für den Mobilbagger mit den Modelltyp 14,0 t in der Abbildung 4-20 aufgeführt. Es sind jeweils die Mittelwerte für die länderspezifische, durchschnittliche Kraftstoffverbrauchsrate sowie die Korrektur

für die interne und externe Modellberechnung aufgeführt. Die Sortierung erfolgt nach der korrigierten, internen Modellberechnung. Als wesentliche Erkenntnis geht aus der Abbildung hervor, dass der Kraftstoffverbrauch für die Länder Polen, Rumänien, Ungarn und Tschechien nach oben korrigiert wird. Aufgrund des leichten Maschineneinsatzes fällt die Verbrauchsrate ohne Berücksichtigung des Modells mit Verbräuchen von 6,66 l/h bis 7,71 l/h niedrig aus. Dies wird entsprechend mit dem Modell korrigiert. Gegensätzlich stellt sich dies für Irland, Italien und Schweden mit einem schweren Maschineneinsatz dar. Nach der Modellberechnung ist demzufolge für die letztgenannten Länder das Fahrerniveau als höchstes Level anzusehen.

Für die anderen Maschinentypen in Form der Kettenbagger und Radlader sind ähnliche Tendenzen hinsichtlich eines Länderrankings erkennbar.

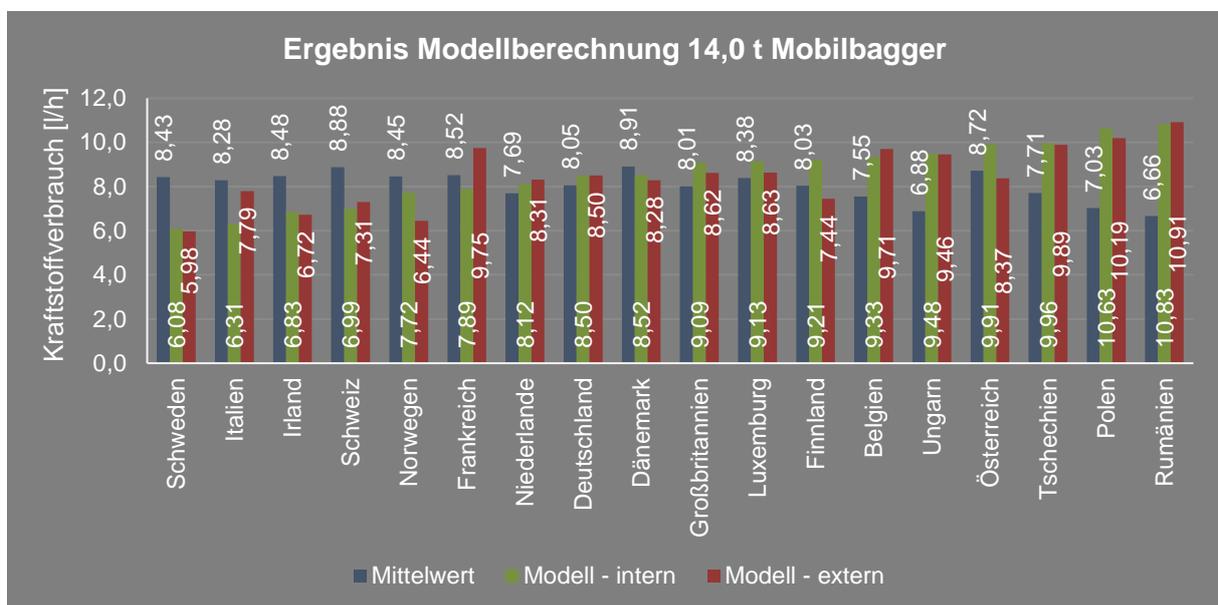


Abbildung 4-20: Ergebnis Modellberechnung 14,0 t Mobilbagger

Für die aufgestellte Modellentwicklung ist in Summe zu konstatieren, dass hiermit Möglichkeiten zur Berücksichtigung von Einzeltätigkeiten im Gesamtkontext der Effizienzbewertung bestehen. Die Datenbasis besteht aus den Telemetriedaten der Flottenmanagementsysteme, welche hinsichtlich der Datenquantität als repräsentativ einzuordnen sind. Die Datenkonsistenz weist allerdings einen Optimierungsbedarf in Bezug auf die Korrelation sowie in Einzelfällen auf die Normalverteilung auf. Aufgrund dieser Datenbasis ist eine gewisse Ausreißerempfindlichkeit festzustellen. Methodisch ist versucht worden, diese durch Fehleranalyse sowie der rechnerischen Zusammenfassung von Lastzuständen zu eliminieren. Eine Fehleranfälligkeit aufgrund der ausbaufähigen Datenkonsistenz ist dennoch zu verzeichnen. Mit der Modellentwicklung gehen jedoch wesentliche Erkenntnisse zur Einflussnahme von Tätigkeiten auf den Kraftstoffverbrauch sowie ein Länderranking einher.

4.4 Leerlauf

Der Leerlaufanteil wirkt sich maßgeblich auf die Bilanzierung der Kraftstoffverbrauchsrate aus. Als Beispiel sei für ein 24-t-Kettenbagger folgende Berechnung aufgeführt. Die Maschine verbraucht, nach den vorherigen Auswertungen, im Mittel unter Last 23,00 l/h und im Leerlauf 3,30 l/h. In der Praxis treten große Schwankungen seitens des Leerlaufanteils auf. Als Vergleich sei ein Anteil mit 15 % und 40 % genannt. Der ausgewiesene Verbrauch (Kombination aus Last- und Leerlaufverbrauch) würde mit 40 % Leerlauf 15,12 l/h betragen, wohingegen bei 15 % Leerlauf der kombinierte Verbrauch auf 20,05 l/h steigt. Es wird deutlich, dass massive Unterschiede bei unterschiedlichen Leerlaufanteilen auftreten können. Mit den Auswertungen aus den Flottendaten kann der aktuelle Ist-Stand bei den Leerlaufanteilen in einen definierten Lastzyklus integriert werden.

In Bezug auf die Prozesseffizienz stellt sich die Frage, ob es schon derzeitige Technologien gibt, die sich auf die Leerlaufanteile auswirken, aber noch nicht flächendeckend von den Anwendern genutzt werden. Dies betrifft vor allem Technologien wie eine Abschaltautomatik oder Standheizung.

Eine Abschaltautomatik ist eine in die Baumaschine integrierte Zeitschaltuhr. Sofern die Maschine sich über einen definierten Zeitraum im Leerlauf befindet, wird der Motor automatisch ausgeschaltet. Die Mindestdauer beim aktuellen Stand der Technik sieht drei Minuten im Leerlauf vor. Hiermit sollen Motorkomponenten, wie z.B. einen Turbolader, nicht beschädigt werden.⁸⁰

Eine weitere Feststellung aus den vorherigen Auswertungen betrifft die saisonale Schwankung bei den Leerlaufzeiten. Der Einzug der Abschaltautomatik führt in Teilen zu Widerständen bei den Maschinenfahrern, da mit dem Ausschalten des Motors die Klimatisierung der Fahrerkabine entfällt. Eine interne Auswertung eines Herstellers in einem Steinbruch führte auf, dass in einer Winterperiode die Abschaltautomatik bei 20 Muldenkippern über 700-mal unterdrückt wurde.⁸¹

4.4.1 Berechnung Leerlaufereignisse und -zeiten

Jedoch stellt sich die Frage, welche Leerlaufanteile bauprozess- und welche fahrerbedingt sind. TABERT differenziert zwischen produktionsbedingtem, systemischem und abnormalem Leerlauf. Der produktionsbedingte Leerlauf weist eine Dauer von <10 Minuten auf, dessen Ursache aus dem Namen hervorgeht. Unter systemischem Leerlauf versteht TABERT organisationsbedingten Leerlauf mit einer Dauer von 10-60 Minuten. Der abnormale Leerlauf ist dem

⁸⁰ Persönliche Mitteilung, Hendrik Flohr, Komatsu, Steinexpo 2015; 03.09.2014

⁸¹ Persönliche Mitteilung, Bernhard Tabert, Zeppelin Baumaschinen, VDBUM Seminar 2015; 27.02.2015

Fahrer zuzuordnen und weist eine Dauer von 10-120 Minuten auf.⁸² Um detaillierte Rückschlüsse zu diesen Faktoren zu erhalten, erfolgt die Analyse von Flottenberichten. Diese bestehen aus einzelnen Leerlaufereignissen sowie tagesbezogenen Leerlaufzeiten. Mit den einzelnen Leerlaufereignissen wird jeder Leerlauf mit einer Dauer von > 1,00 Minute mit Protokollierung von Datum, Uhrzeit, Dauer und Standort der Maschine erfasst. Diese detaillierte Auswertung wird aufgrund der Datenmenge nicht für alle Maschinen vorgenommen, sondern nur auf Kundenanforderung. Im Gegensatz dazu stehen die tagesbezogenen Leerlaufzeiten für alle Maschinen zur Verfügung und weisen die tägliche Dauer auf.

Im Kapitel 4.1.3 ist eine saisonale Schwankung beim Maschineneinsatz festgestellt worden. Aus diesem Grund umfasst die Auswertung der Leerlaufzeiten eine differenzierte Betrachtung für die Monate Januar, Juni und September. Aufgrund der Vielzahl an Daten erfolgt die Beschränkung auf diese drei Monate, welche ein jeweiliges Maximum und Minimum in den Leerlaufzeiten darstellen.

Die Anzahl der Rohdaten zu den einzelnen Maschinenkategorien geht aus der Tabelle 4-36 hervor. Die aufgeführten Daten sind bereits auf Ausreißer untersucht worden, wobei der Grenzwert für die tägliche Maximaldauer an Leerlauf auf 12,0 Stunden angenommen wurde. Auffällig ist beim Kettenbagger, dass es im Vergleich zu den beiden anderen Maschinenklassen nur eine geringe Anzahl an Leerlaufereignissen gibt. Ebenso ist bei den Leerlaufzeiten beim Kettenbagger eine geringere Anzahl zu verzeichnen, obwohl die Anzahl an Maschinen fast gleich hoch ist wie die der Mobilbagger und Radlader. Gründe hierfür sind nicht bekannt.

Tabelle 4-36: Rohdaten Leerlauf

Art	Leerlaufereignisse		Leerlaufzeiten	
	Anzahl	Anzahl Maschinen	Anzahl	Anzahl Maschinen
Kettenbagger	1.678	10	31.523	2.489
Mobilbagger	106.716	227	109.968	2.650
Radlader	38.970	172	101.770	2.357

Methodisch erfolgt die Auswertung zweistufig. Die erste Stufe besteht aus der detaillierten Analyse der Leerlaufereignisse und -zeiten. Die Dauer des Leerlaufs lässt einen Rückschluss auf einen systemischen, produktionsbedingten oder abnormalen Leerlauf zu. In zweiter Stufe wird herausgearbeitet, welche Einsparpotentiale sich hieraus ableiten lassen.

Nachteilig bei der Auswertung ist, dass es keinen Bezug zur täglichen Gesamtnutzungsdauer gibt und demzufolge eine Beurteilung über die Leerlaufanteile nicht möglich ist.

⁸² Vgl. [55] Tabert: CAT Flottenmanagement, 2015, S. 168

Aufgrund der geringen Anzahl an Maschinen für die Leerlaufereignisse im Vergleich zu den Leerlaufzeiten ist zur besseren Zuordnung die jeweilige Dauer der Ereignisse und Zeiten in der Tabelle 4-37 aufgeführt.

Tabelle 4-37: Zwischenergebnisse Leerlaufereignisse und -zeiten

Maschinentyp	Dauer Ereignisse [h]	Dauer Zeiten [h]	Anteil Ereignisse/Zeiten
Kettenbagger	351,25	58.122,93	0,60 %
Mobilbagger	5.129,37	174.415,64	2,94 %
Radlader	3.086,72	202.152,97	1,53 %

Als erster Berechnungsschritt erfolgt eine Analyse zur durchschnittlichen Dauer der täglichen Gesamtleerlaufzeiten in Abhängigkeit der Monate. Als Beispiel sind in der Abbildung 4-21 die Ergebnisse für den Mobilbagger dargestellt. Kongruent zu den Erkenntnissen aus Kapitel 4.2.3 stellt sich die saisonale Schwankung dar. Für den Monat Januar (blaue Line) ist der Anteil an einer geringen Leerlaufdauer <120 Minuten deutlich geringer, wohingegen der Anteil mit >400 Minuten im Vergleich zu den Monaten Juni und September erheblich höher ausfällt.

Für die anderen beiden Maschinentypen (Kettenbagger und Radlader) fallen die Ergebnisse in ähnlicher Form aus und werden aufgrund der hohen Kongruenz aus Umfangsgründen nicht aufgeführt.

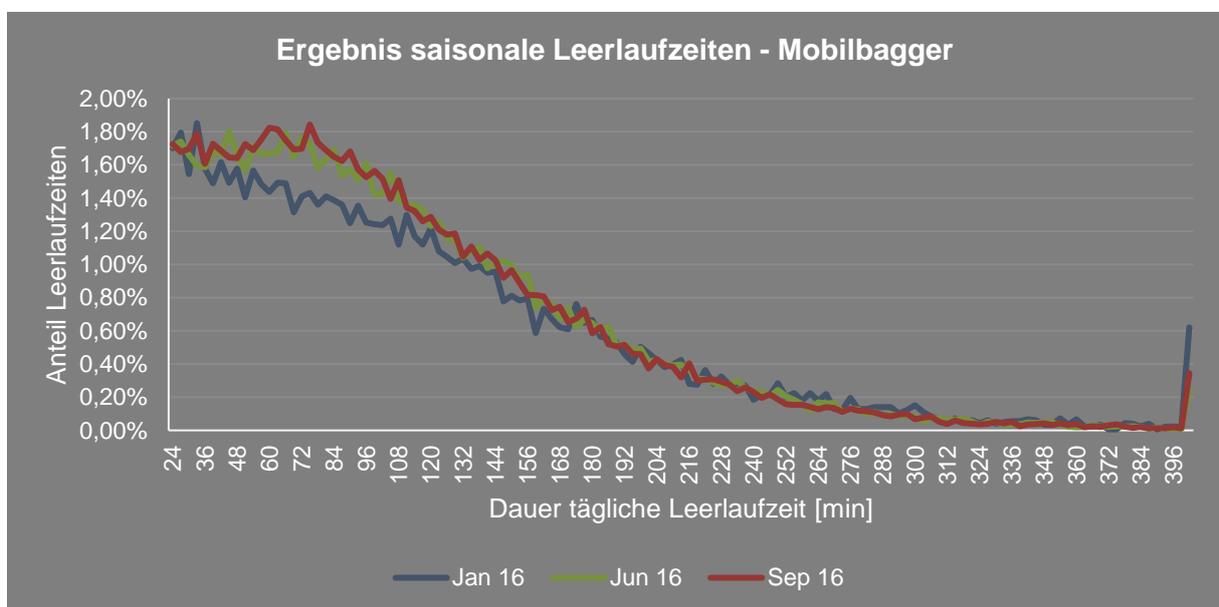


Abbildung 4-21: Ergebnis saisonale Leerlaufzeiten - Mobilbagger

Eine dezidiertere Betrachtung geht mit den Leerlaufereignissen einher. Es werden die einzelnen Leerlaufereignisse mit einer Dauer von > 1,00 Minute mit Datum, Uhrzeit sowie Standort der Maschine aufgeführt. Somit sind detaillierte Aussagen sowohl zu der Anzahl als auch zu der Dauer und eine ursachenbezogene Analyse möglich.

Zur Bestimmung der Anteile sind diese monatsbasiert den jeweiligen Leerlaufarten (produktionsbedingt <10 min, systemisch und abnormal >10 min) zuzuordnen.

Die Ergebnisse hierzu führt die Abbildung 4-22 auf. Es sind, aufgrund des Umfangs der Arbeit, die Werte exemplarisch für den Radlader aufgeführt. Beim Mobilbagger fallen die Ergebnisse simultan aus, wohingegen beim Kettenbagger aufgrund der geringen Anzahl an Maschinen und Ereignisse (siehe Tabelle 4-36) keine repräsentativen Ergebnisse erzielbar sind. Die Addition der produktionsbedingten sowie systemischen und abnormalen Anteile der einzelnen Monate ergibt jeweils in Summe 100,00 %.

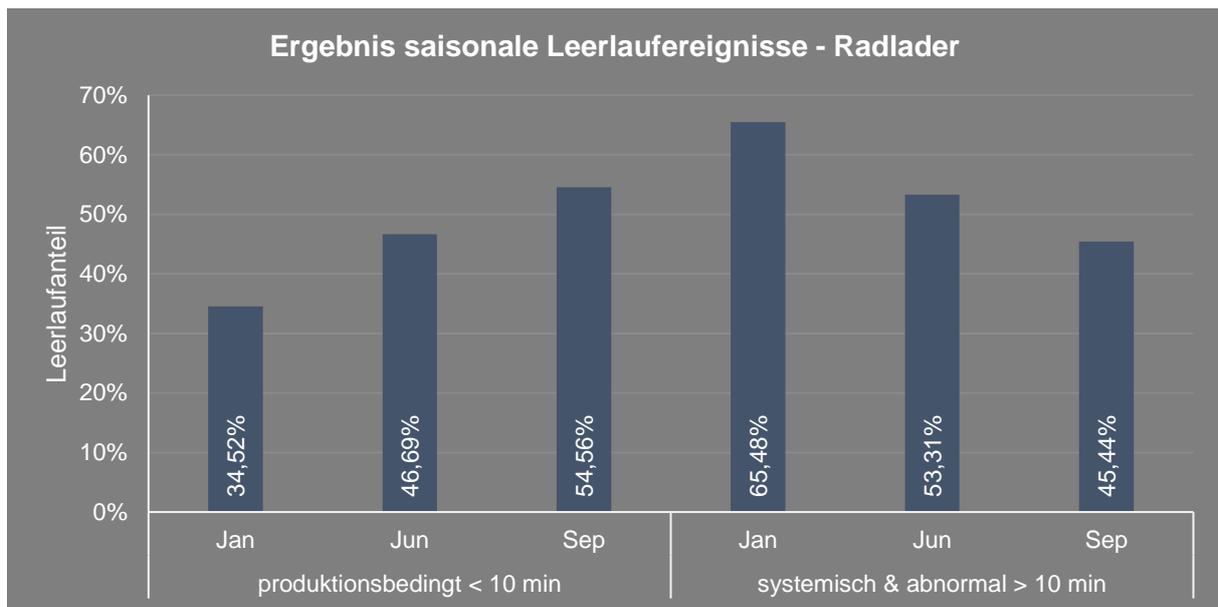


Abbildung 4-22: Ergebnis saisonale Leerlaufereignisse - Radlader

Bei dieser Auswertung wird noch deutlicher, dass die Einzelereignisse für einen systemischen und abnormalen Leerlauf im Januar deutlich höher ausfallen. Diesen Leerlaufarten ist ein organisatorischer Grund oder der Fahrer als Ursache zuzuordnen. Den Fahrereinfluss sieht man deutlich in der Winterperiode, da dieser beispielsweise in der Fahrerkabine nicht frieren möchte und die Heizung über längere Zeit nur mit laufendem Motor funktioniert. Im Vergleich zum September mit 45,4 % steigt der Anteil an systemischem und abnormalen Leerlauf mit einer Einzeldauer der Leerlaufereignisse auf 65,4 % im Januar.

Als wesentliche Erkenntnis ist zu formulieren, dass die saisonalen Schwankungen im Leerlauf eindeutig dem Fahrer zuzuordnen sind. Diese wird von der vorherigen Hypothese gestützt, (basierend aus Abbildung 4-12) bei der saisonale Schwankungen im mediterranen Klima nicht zu verzeichnen sind.

4.4.2 Gesamteinsparpotentiale

Zur Berechnung der Gesamteinsparpotentiale durch verringerten Leerlauf sind die Anteile der Leerlaufarten für das Gesamtjahresmittel zu quantifizieren. Hierzu wird die Dauer der drei betrachteten Monate addiert und den jeweiligen Anteilen zugewiesen. Die aufsummierten Monate werden dabei als repräsentatives Jahresmittel angenommen.

Für den Kettenbagger liegen, wie vorhin schon erläutert, keine ausreichend repräsentativen Ergebnisse für die Leerlaufereignisse vor. Der Maschineneinsatz des Kettenbaggers ist in Gänze nicht mit dem Mobilbagger zu vergleichen und die Verteilung hinsichtlich der Betriebsgewichte entspricht eher dem Radlader. Aus diesen Gründen wird angenommen, dass die Leerlaufereignisse mit einer Interpolation dieser beiden Typen näherungsweise bestimmt werden kann.

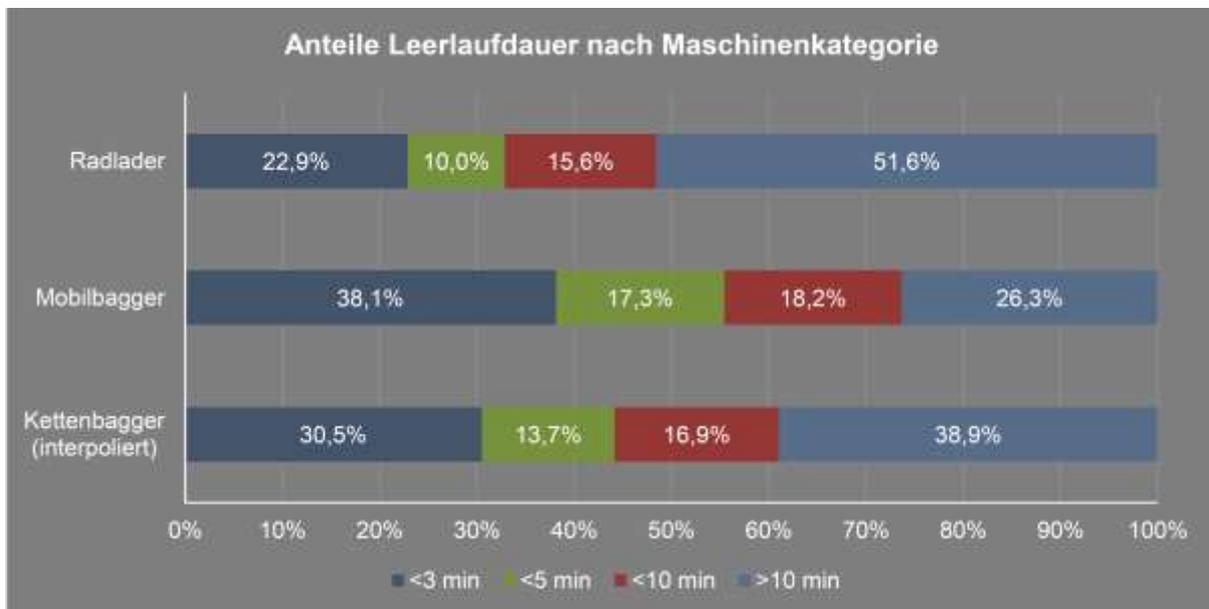


Abbildung 4-23: Anteile Leerlaufdauer nach Maschinenkategorie

Die Ergebnisse zu den Anteilen der einzelnen Maschinenkategorien sind in der Abbildung 4-23 aufgeführt. Der Radlader weist mit über 51,56 % ein hohes Maß an einem systemischen und abnormalen Leerlauf (> 10 min) auf. Im Gegensatz dazu stellt der Mobilbagger mit 73,67 % einen sehr hohen Anteil an produktionsbedingtem Leerlauf (< 10 min) dar.

Ein pauschaler Rückschluss der Leerlaufzeiten auf unproduktive Arbeitszeiten ist nicht möglich. Beispielsweise kann der Maschinist notwendige Hilfsarbeiten erledigt oder die gesetzlich vorgeschriebenen Pausenzeiten eingehalten haben, währenddessen die Maschine weiter im Leerlauf betrieben wurde.

Zur Quantifizierung des Gesamteinsparpotentials sind die Stunden des systemischen und abnormalen Leerlaufs als nicht notwendig zuzuordnen. Als wesentlicher und direkt bestimmbarer Kostenfaktor ist die Kraftstoffverbrauchsrate für den Leerlauf einzubeziehen. Die Werte gehen

aus den Flottenauswertungen, basierend auf dem jährlichen Kraftstoffbericht, hervor (siehe Tabelle 4-5).

Tabelle 4-38: Hochrechnung Gesamteinsparpotential

Typ	Stunden	Anteile	Anteil Stunden	Verbrauch	Anteil Diesel
Radlader	918.284,4	51,56%	473.476,81 h	4,12 l/h	1.950.724,46 l
Mobilbagger	731.723,8	26,33%	192.668,83 h	2,51 l/h	483.598,76 l
Kettenbagger	790.130,3	38,95%	307.723,49 h	3,69 l/h	1.135.499,68 l
Summen	2.440.238,5		973.869,13 h		3.569.822,91 l

Die Ergebnisse zu der Berechnung sind in der Tabelle 4-38 aufgeführt. Die einzusparenden Anteile ergeben sich aus der Abbildung 4-23. Demzufolge können in Deutschland jährlich 973.869 Stunden Leerlauf sowie 3.569.822 Liter Diesel nur durch fahrerbezogenen Leerlauf eingespart werden. Die Werte betreffen nur die Maschinen für den Hersteller in Deutschland. Bei einer Hochrechnung mit einem angenommenen Marktanteil von 30 % erhöhen sich die Werte auf 3.246.230 Stunden im Leerlauf sowie 11.899.406 Liter Diesel.

Zur Betrachtung weiterer Kostenfaktoren sind die betriebsstundenabhängigen Servicekosten mit einzubeziehen. Angesetzt werden Full-Service-Kosten mit einem Wert von 6,00 €/h. Diese werden mit jeder anfallenden Betriebsstunde abgerechnet, unabhängig vom Lastzustand. Somit stellen die Leerlaufanteile einen zusätzlichen Kostenfaktor für die Servicekosten dar, welche in der Hochrechnung des Gesamteinsparpotentials zu berücksichtigen sind. Mit diesen Annahmen fallen in Deutschland jährlich 19,48 Mio. € an unnötigen Servicekosten an.

Als weitere Betrachtung sind die Gesamtkosten auf die durchschnittliche Betriebsgröße der Unternehmen in der Bauwirtschaft zu beziehen. Die Bauunternehmen im Tiefbau beschäftigen im Mittel ca. 10,6 Mitarbeiter. Es wird angenommen, dass durchschnittlich 3,16 Maschinen im Einsatz sind. Aus den vorangegangenen Auswertungen zur Maschinenverteilung mit einer Berücksichtigung der jährlichen Einsatzdauer sind 864,42 Stunden für alle Maschinentypen angesetzt. Bei einer Annahme eines Leerlaufanteils von 30,0 % und vermeidbarem Leerlauf in Höhe von 40,0 % ergeben sich pro Maschine 103,73 Stunden an vermeidbarem Leerlauf. Eine Hochrechnung auf die durchschnittliche Betriebsgröße mit 3,16 Maschinen stellen in Summe 327,79 Stunden an vermeidbarem Leerlauf pro Betrieb auf. Bei einer Berechnung mit 3,0 l/h (1,00 €/l) und Servicekosten in Höhe von 6,00 €/h stellt sich pro Betrieb eine Einsparung von rund 2.950 € im Jahr auf. Personalkosten sind hierbei nicht berücksichtigt.

4.5 Weitere Anwendungsfelder und Forschungsbedarf

Zur Steigerung der Gesamtenergieeffizienz im Baustelleneinsatz ist zu untersuchen, welche weiteren Erkenntnisse aus den Leerlaufereignissen gewonnen werden können. Als zu analysierender Faktor, der in vorrangigen Untersuchungen noch nicht berücksichtigt wurde, ist der Maschinenstandort beim Leerlauf zu nennen.

Bei den betrachteten Telematikdaten wird bei jedem einzeln aufgezeichneten Leerlaufereignis der Standort ebenfalls aufgezeichnet. Basierend auf diesen kombinierten Daten sind Rückschlüsse zum standortabhängigen Maschineneinsatz möglich.

Methodisch sind die Standortdaten in ein Geoinformationssystem (kurz GIS) zu übertragen. Die Daten weisen den Rechts- und Hochwert nach UTM aus. Aufgrund der sich häufig veränderten Baustelleneinrichtungen und Arbeitsorte der Maschinen sind für den typischen Erd- und Kanalbau mit diesen Angaben nur geringfügige Erkenntnisse zu gewinnen. Allerdings stellen dauerhafte Rahmenbedingungen, wie diese in einem Kieswerk oder Steinbruch anzutreffen sind, große Potentiale zur Beurteilung der Betriebsabläufe dar.



Abbildung 4-24: Ergebnis ausgewiesener Standort für Leerlauf⁸³

Die Auswertung dieser Methodik ist immer im Kontext auf das Baufeld zu beziehen und kann pauschal nicht für alle betrachteten Maschinen in Summe ausgewertet werden. Mit diesen Daten kann daher nur ein Mehrwert generiert werden, sofern die Rahmenbedingungen, die Einsatzart und die Arbeitsaufgabe bekannt sind. Als exemplarisches Beispiel ist das Ergebnis für ein Kieswerk in der Abbildung 4-24 aufgeführt. Dort sind die einzelnen Leerlaufereignisse bezogen auf ein Satellitenbild zu erkennen. Eine Interpretation der Daten ist nur mit einer Berücksichtigung der tatsächlichen Rahmenbedingungen vor Ort möglich. Beispielsweise könn-

⁸³ Eigene Auswertung mit Kartenmaterial von [62] Google: Kartendaten: Google, DigitalGlobe

ten sich Baustellen- oder Pausencontainer verschoben haben oder das Satellitenbild ist veraltet und stellt die aktuelle Position nicht dar. Der Einsatzberatung kommt daher mit diesen Daten eine besondere Bedeutung zu.

Die Aufbereitung der Daten kann jedoch mithilfe eines Geoinformationssystems erweitert und gefiltert werden. Beispielsweise ist eine Gewichtung nach Anzahl der Ereignisse oder eine Verrechnung nach Anzahl und Dauer des Leerlaufs möglich.

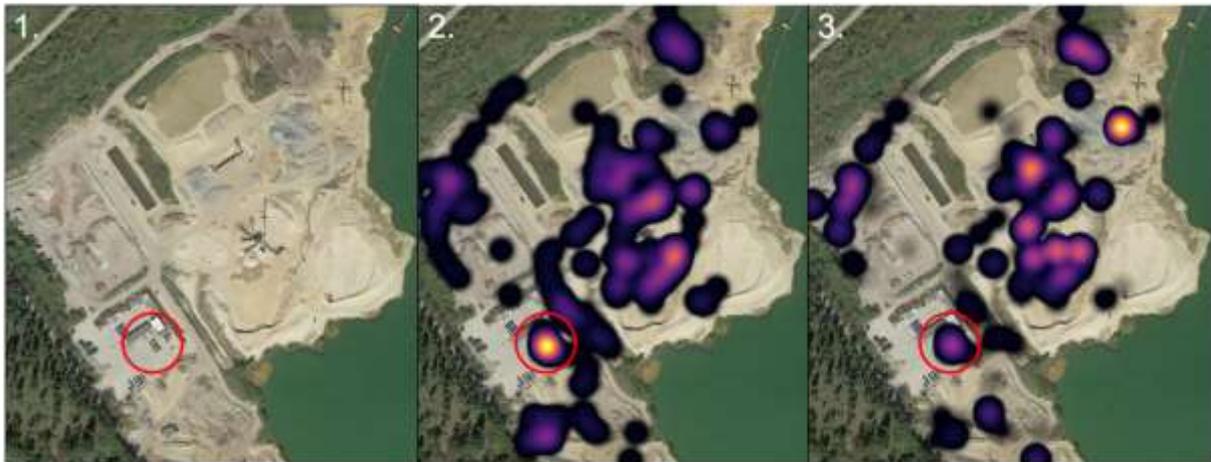


Abbildung 4-25: Ergebnis Leerlaufauswertung als Heatmap⁸⁴

Die Abbildung 4-25 zeigt das Satellitenbild eines Kieswerks mit drei verschiedenen Varianten auf. Unter dem Punkt „1“ ist das Kieswerk an sich zu erkennen, wobei der rote Kreis die Position der Maschinen vor dem Pausencontainer aufzeigt. Unter Punkt „2“ sind die Leerlaufereignisse als Heatmap aufgeführt. Je heller der Bereich dargestellt ist, desto häufiger fand ein Leerlauf in diesem Bereich statt. Aus dieser Auswertung geht hervor, dass von der Anzahl die meisten Leerlaufereignisse vor dem Pausencontainer stattfinden. Unter dem Punkt „3“ ist die Auswertung erweitert. Der Fokus liegt auf eine weitere Betrachtung der zeitlichen Dauer. Im Vergleich zur reinen Anzahl verschiebt sich beim Fokus auf die Zeit der höchste Leerlauf auf ein Haufwerk im Kieswerk.

Es wird durch dieses Beispiel nochmal deutlicher, dass bei der Verbesserung der Prozesseffizienz dies einzelfallabhängig zu betrachten ist. Eine Pauschalisierung ist nicht möglich, da die Maschinen teilweise wochen- bis monatsweise die Baustellen wechseln. Gleiches gilt für Maschinen, die stationär in einem Steinbruch arbeiten, da hier ebenfalls die Orte und Tätigkeiten variieren können.

Es soll jedoch herausgestellt werden, welches Instrument zur Verbesserung der Abläufe hiermit geschaffen wird. Es sind eindeutige Rückschlüsse zur Fahrer- und Prozessoptimierung möglich, die eine ganzheitliche, digitale Einsatzberatung auf der Baustelle ermöglichen. Die Potentiale und der weitere Forschungsbedarf stellen sich daher als sehr groß dar.

⁸⁴ Eigene Auswertung mit Kartenmaterial von [63] Google: Kartendaten: Google, DigitalGlobe

4.6 Ausweisung der Energieeffizienz

Basierend auf den Flottenauswertungen stellt sich die Frage, inwieweit mit den Telematikdaten eine Ausweisung der Energieeffizienz für Baumaschinen erfolgen kann.

Bevor diese digitalen Daten zur Verfügung standen, gab es von den Herstellern Anhalts-Werte zum Kraftstoffverbrauch in deren Broschüren. Als Beispiel sei von Liebherr das Erdbewegungsbuch sowie von CAT das Performance Handbook genannt. Dort wird sowohl bei Liebherr als auch bei CAT der Verbrauch für verschiedene Lastzustände von Niedrig, Mittel bis Hart ausgewiesen. Das Buch von Liebherr ist letztmalig im Jahr 2002 erschienen, wohingegen CAT das Handbook jährlich veröffentlicht.

Aufgrund der mittlerweile vielzählig vorhandenen Telematikdaten veröffentlicht Liebherr die Daten aus dem Flottenmanagement in einem sogenannten Spritsparrechner, welcher webbasiert zugänglich ist. Es wird die durchschnittliche Kraftstoffverbrauchsrate basierend auf den Gesamtdaten aller Maschinen ausgewiesen (siehe Abbildung 4-26).



Abbildung 4-26: Beispiel Liebherr Spritsparrechner für Radlader L566 XPower⁸⁵

Diese Art der Energieeffizienzausweisung stellt die einfachste Art der Ausweisung dar. Rückschlüsse auf den Maschineneinsatz oder die Produktivität sind hiermit nicht möglich. Ferner erfolgt auf der Internetpräsenz nur eine grobe Erläuterung zur Verteilung der Datenbasis.⁸⁶ Inwieweit diese realistisch, belastbar und aussagekräftig sind, kann nicht beurteilt werden.

⁸⁵ [67] Liebherr Hydraulikbagger GmbH: Spritsparrechner für Radlader L566 XPower

⁸⁶ Auszug aus [68] Liebherr Hydraulikbagger GmbH: Efficiencyplus – Datenbasis:

„Die auf dieser Micro Site angezeigten Kraftstoffverbräuche und Betriebsstunden stellen einen Durchschnitt der in LiDAT enthaltenen Daten pro Maschinentyp dar. Maschinen mit weniger als 100 Betriebsstunden bzw. weniger als 100 Liter Gesamtverbrauch werden nicht berücksichtigt. Planierraupen werden erst ab einer Workload von 70% oder mehr berücksichtigt. Raupenkrane, Hydroseilbagger sowie Ramm- und Bohrgeräte werden erst ab einer Workload von 10% berücksichtigt.“

Der tatsächliche Verbrauch einer Maschine ist abhängig von der Konfiguration der Maschine, den Anbauwerkzeugen, dem technischen Zustand der Maschine, den Einsatzbedingungen, der Bodenbeschaffenheit, dem Fahrer und vielen weiteren Faktoren. Abweichungen vom dargestellten Durchschnittsverbrauch sind aufgrund dessen möglich und stellen keinen Mangel dar.“

Daher gilt es zu diskutieren, inwieweit ein unabhängiger und belastbarer Vergleich nur mit der Inbezugnahme von Flottendaten möglich ist. Hierfür wäre ein Standard bei der Datenauswertung zu schaffen. Sofern diese Problematik gelöst wäre, stellt sich dennoch die Frage, inwieweit die Arbeitsabläufe der Maschinen vergleichbar sind.

Eine Belastbarkeit bei der Ausweisung der Energieeffizienz kann daher mit einer alleinigen Betrachtung der Flottendaten nicht vorgenommen werden. Die umfangreichen Daten können allerdings als sinnvoller Richtwert für Praxistests genutzt werden, die eine realistische Abschätzung zum Maschineneinsatz gewährleisten können.

4.7 Zusammenfassung Flottenmanagementauswertung

Es ist festzustellen, dass mit den Flottendaten detaillierte Rückschlüsse zum Maschineneinsatz möglich sind. In erster Stufe sind damit belastbare Aussagen zur Identifikation von relevanten Maschinentypen auf den Kraftstoffverbrauch möglich. In zweiter Stufe sind für den Maschineneinsatz detaillierte Angaben zur Kraftstoffverbrauchsrate, Auslastung, Leerlaufanteil, Fahranteile- und Fahrwege, Lademengen usw. möglich. Hieraus lassen sich direkte Rückschlüsse zur Gestaltung der definierten Lastzyklen ableiten.

Zur Quantifizierung der Einflüsse auf den Kraftstoffverbrauch erfolgt eine Modellentwicklung. Mit dieser sollen die Tätigkeiten sowie externe Einflussfaktoren, wie Temperatur und Boden, bestimmt sowie länderspezifische Variablen berechnet werden. Die Datenbasis der Flottendaten weist trotz Analyse auf Normalverteilung und Filterung von Ausreißern bei vielen Tätigkeiten eine geringe Korrelation auf. Hierdurch besteht eine Ausreißerempfindlichkeit auf die Gesamtmodellberechnung. Dennoch gehen mit dem Modell tiefgehende Erkenntnisse zum Maschineneinsatz sowie auf den Einfluss von Tätigkeiten auf den Kraftstoffverbrauch einher.

Eine umfangreiche Datenbasis liegt für die Leerlaufanteile vor, was in einem eigenständigen Kapitel detailliert betrachtet wird. Die Auswertungen führen auf, dass der Fahrer mit einem Anteil zwischen 26,3 bis 51,6 % der maßgebliche Verursacher vom Leerlauf ist. Ferner sind mit der Nutzung von Geoinformationssystemen auf den Einsatzort spezifische Ursachenanalysen möglich.

Trotz der detaillierten Erkenntnisse aus den Flottenmanagementsystemen ist eine Ausweisung der Verbrauchsrate aus den Telematik-Daten nicht zu forcieren. Eine Vergleichbarkeit kann nicht gewährleistet werden, sodass ein In-Situ-Test vorzuziehen ist.

5 Lastzyklusdefinition

Die Lastzyklusdefinition ist basierend auf den Erkenntnissen aus den bestehenden, branchen-nahen Definitionen und abgeleiteten Handlungsfeldern, den Ansätzen zur Definition im Bereich der Baumaschinen sowie aus den Flottenauswertungen zusammenzustellen. Die Hauptforschungsfrage, die im Rahmen dieses Kapitels beantwortet werden soll, ist folgende:

F 4

Wie ist ein definierter Lastzyklus zu gestalten?

Als wichtigste Erkenntnis aus den Flottenauswertungen und Bauprozessanalysen ist die schwierige Vergleichbarkeit aufgrund der vielfältigen Rahmenbedingungen zu bezeichnen. Als Beispiel ist die Auswertung der Flottendaten (Abbildung 4-15) zu nennen. Die Anteile der Tätigkeiten variieren stark zwischen verschiedenen Betriebsgewichten. Hinzu kommen die Baustellenrahmenbedingungen, unterschiedlichen Bodenlösekräfte sowie der Fahrer als zusätzlicher Einflussfaktor.

In Stufe I. der Lastzyklusdefinition ist zur besseren Vergleichbarkeit eine pauschale Annahme, basierend auf den Tätigkeitsanalysen der Telematiksysteme, zu treffen. Dies entspricht einem Standardprofil, welches beispielsweise zur Veröffentlichung der Werte anzuwenden wäre. Beim Hydraulikbagger entspricht das Standardprofil dem Einsatz des Baggers als Grabgerät ohne die Inbezugnahme von weiteren Anbaugeräten. In den folgenden Unterkapiteln erfolgt hierzu eine detailliertere Beschreibung.

In Stufe II. erfolgt eine individuelle Betrachtung je nach Maschineneinsatz. Bei dieser Ausweisung ist vorgesehen, weitere Tätigkeiten für die Effizienzbewertung zu betrachten. Ebenfalls soll hier eine spezifische Anpassung an den jeweiligen Einsatzprofilen des Anwenders möglich sein. Hiermit ist gemeint, dass der Anwender sich die Tätigkeiten mit den jeweiligen Anteilen nach seinem Baustelleneinsatz zusammenstellen kann. Dies erfolgt aus dem Grund, dass ein Einsatzprofil eines Baggers beispielsweise bei einem Kanalbau stark abweicht von einem klassischen Erdbau oder im Abbruchbereich.

Übergeordnet ist aus diesem Stufenmodell als oberste Prämisse eine reproduzierbare Testmethodik zu definieren. Es ist bei einem reproduzierbaren Praxistest ein Kompromiss zu finden zwischen pauschalen Annahmen für ein Arbeitsspiel und individuellen Rahmenbedingungen. Zwar können verschiedenste Parameter bei einem Praxistest als Variable einfließen, jedoch erhöht sich aufgrund einer reproduzierbaren Anzahl an Testdurchläufen der Testaufwand ggf. drastisch. Wie ein Kompromiss aus Pauschalisierung und individuellen Parametern aussehen kann, wird in den folgenden Unterkapiteln näher erläutert.

Die detaillierten Rahmenbedingungen für den Testdurchlauf sowie ein Prüfprotokoll sind im Anhang 7 und Anhang 8 aufgeführt.

Ferner steht noch ein Ergebnis zur Berücksichtigung von Großmaschinen aus. Aus Kapitel 4.1.1.2 geht eine Tendenz in Richtung einer Berücksichtigung dieser Maschinen einher. Aus den weiteren Auswertungen, insbesondere aus Kapitel 4.1.2, wird deutlich, dass die Großmaschinen vorzugsweise im schweren Erdbau und in der Gewinnungsindustrie zum Einsatz kommen. Nach der Betrachtung von Stufe I. spiegelt sich dieser Einsatz für Großmaschinen deutlich wider. Ferner werden diese als Leistungsmaschine mit einem Standardprofil eingesetzt. Für Großmaschinen ist daher eine zweistufige Betrachtung als nachrangiger zu betrachten als für kleinere Betriebsgewichte. Aus diesem Grund sind Großmaschinen sowohl beim Hydraulikbagger als auch beim Radlader in die Lastzyklusdefinition zu integrieren. Wichtig bei der Definition ist die Anpassung an die betriebsgewichtsabhängigen Abmessungen und daraus abzuleitenden Vorgaben.

5.1 Hydraulikbagger

Für den Hydraulikbagger sind als maßgebliche Maschinentypen der Mobil- und Kettenbagger im Kapitel 3 identifiziert worden. Eine Differenzierung zwischen den Betriebsgewichten erfolgt analog zum Entwurf der ISO 11152. Diese richten sich dort nach dem Nenninhalt des Baggerlöffels und sind im Anhang 9 dargestellt.

Die Tätigkeiten bestehen nach der ersten Stufe aus den Hauptanwendungen „Laden“, „Planieren“, „Fahren“ und „Leerlauf“.

Beim Zyklus „Laden“ steht der Bagger auf einer überhöhten Position. Die Positionshöhe wird beispielsweise durch einen Damm dargestellt, dessen Höhe sich nach dem Betriebsgewicht orientiert und gleichzeitig als Grabtiefe dient. Der Löffel ist von der Startposition aus einzuklappen und anschließend der Ausleger auf die betriebsgewichtsabhängige und definierte Soll-Höhe anzuheben. Es erfolgt das Schwenken des Oberwagens um 90° sowie das Ausklappen des Löffels. Abschließend ist der Löffel zurück zu schwenken und in die Ausgangsposition abzusenken.

Für die Tätigkeit „Planieren“ steht der Bagger auf einem standfesten Untergrund. Der Ausleger, Löffelstiel und Löffel sind bis auf die Maximalposition auszufahren. Der Zyklus selbst ist vom Bewegungsablauf ein simultanes Einschwenken des Löffelstiels sowie Anheben des Auslegers. Dabei ist der Löffel möglichst eben über den Untergrund zu bewegen. Das Heranziehen wird beendet, sobald der Löffelstiel eine lotrechte Position zum ebenen Untergrund aufweist. Danach ist der Löffel in die Ausgangssituation zu fahren. Die Länge des Planiervorgangs wird von der betriebsgewichtabhängigen Geometrie des Auslegers und Löffelstiels bestimmt.

Mit dem Zyklus „Leerlauf“ geht kein Arbeitsspiel der Maschine einher. Der Verbrauch im Leerlauf ist über eine Dauer von 10 Minuten zu messen.

Der Zyklus „Fahren“ ist differenziert für den Ketten- und Mobilbagger zu betrachten. Die Strecke hat in beiden Fällen eine maximale Längsneigung von 3,0 % aufzuweisen und muss tragfähig sowie gut verdichtet sein. Beim Kettenbagger beträgt die Strecke 25,0 Meter, wohingegen beim Mobilbagger die Strecke eine Länge von 200,0 Metern aufweist. Die längere Fahrstrecke ist idealerweise als kreisförmige Strecke zu modellieren. Bei der Fahrweise ist auf eine möglichst konstante Einhaltung der Maximalgeschwindigkeit zu achten.

Die Anteile der Tätigkeiten sind in der Tabelle 5-1 dargestellt und variieren je nach Maschinentyp. Der Leerlaufanteil ist beim Kettenbagger mit 25,0 % niedriger ausgewiesen als beim Mobilbagger (30,0 %). Die Auswertungen beider Hersteller haben hier eine Varianz aufgezeigt, sodass sich diese Unterschiede in der Definition wiederfinden.

Tabelle 5-1: Übersicht Anteile Hydraulikbagger

Maschinentyp	Laden	Planieren	Fahren	Leerlauf
Kettenbagger	50,0 %	15,0 %	10,0 %	25,0 %
Mobilbagger	40,0 %	10,0 %	20,0 %	30,0 %

Zu der untergeordneten Ebene gehören Tätigkeiten, die in Stufe II. auszuweisen sind. Hierzu zählen weitere Anbaugeräte wie Greifer, Anbauverdichter, Tiltrotatoren, Bodenrecycler oder Hydraulikhammer. Aufgrund der Vielzahl an zu untersuchenden Geräten und unterschiedlichen Branchenzuordnungen (z.B. Kanalbau, Abbruch), wird ein prozentualer Anteil der Tätigkeit nicht ausgewiesen. Dies kann individuell basierend auf dem Stufenmodell vom Anwender auf dessen Einsatzprofil festgelegt werden.

5.2 Radlader

Beim Radlader sind die Maschinen mit der größten Relevanz auf den Kraftstoffverbrauch die Klein- und Großlader. Im Vergleich zum Hydraulikbagger unterscheiden sich die Tätigkeiten in größerer Vielfalt, sodass in den folgenden Unterkapiteln die Zyklen differenziert nach Maschinentyp betrachtet werden.

5.2.1 Großlader

Beim Großlader ist zwischen den Zyklen „Kleines Ladespiel“, „Großes Ladespiel“, „Fahren“ und „Leerlauf“ zu differenzieren. Diese sind für Maschinen mit einem Betriebsgewicht ab 8,0 t vorgesehen.

Das „Kleine Ladespiel“ sieht die Beladung von Material auf einen LKW oder Dumper vor. Vom Ablauf her sticht der Radlader ins Haufwerk und nimmt das Material (vorzugsweise einen Kies 16/32) auf. Danach erfolgt eine rückwärtige Fahrt in einem Bogen sowie das Vorwärtsfahren zum LKW mit anschließender Entladung der Schaufel. Abschließend erfolgen die rückwärtige Verfahrung sowie das Vorsetzen des Radladers in die Ausgangsposition. Als vorgegebene Parameter beträgt der Winkel zwischen den beiden Bögen beim Vor- und Rückwärtsfahren zwischen 45°-60°. Ferner beträgt bei einem 24,0 t Radlader die Höhe zum Entladen 3,50 m sowie die Fahrstrecke 15,0 m. Für kleinere und größere Modelltypen sind die Fahrstrecken entsprechend der Geometrie auszulegen.

Die Effizienz des Lastzyklus' wird maßgeblich vom Einstechen in das Haufwerk bestimmt. Daher ist die Schaufelfüllstrategie aufzuzeichnen.

Im Vergleich zum „Kleinen Ladespiel“ fällt beim „Großen Ladespiel“ die Fahrstrecke länger aus. Diese beträgt 200,0 m und simuliert die Beschickung eines Reihendoseurs. Aus diesem Grund ist der letzte Teil der Fahrstrecke als Rampe auszubilden. Diese weist eine Neigung von 25,0 % mit einer Höhe von 3,0 m auf. Der Ablauf des Zyklus' erfolgt deckungsgleich zum „Kleinen Ladespiel“.

Der Zyklus „Fahren“ beinhaltet eine Fahrtätigkeit auf einer Strecke mit einer Länge von mindestens 180,0 m. Der Fahruntergrund muss tragfähig sowie eben sein und darf eine Längsneigung von maximal 3,0 % aufweisen. Die Fahrstrecke ist so zu modellieren, dass eine konstante Fahrweise und Geschwindigkeitseinhaltung möglich ist.

Die Tätigkeit „Leerlauf“ besteht wie beim Hydraulikbagger aus einer Dauer von 10,0 Minuten bei einem Motor auf Betriebstemperatur. Sofern der Radlader über einen zweistufigen Leerlauf mit einer niedrigeren Drehzahl verfügt, ist die Messung für die jeweils geringere Drehzahl durchzuführen.

Die Anteile der Tätigkeiten gehen aus der Tabelle 5-2 hervor.

Tabelle 5-2: Anteile Lastzyklen Großlader

Maschinentyp	Kleines Ladespiel	Großes Ladespiel	Fahren	Leerlauf
Großlader	30,0 %	25,0 %	15,0 %	30,0 %

5.2.2 Kleinlader

Für die Kleinlader sind keine Auswertungen aus Flottendaten sowie keine Definitionen aus Normentwürfen von ähnlichen Zyklen vorhanden. Der Arbeitseinsatz der Maschine besteht in der Regel aus klassischen Hilfstätigkeiten auf der Baustelle. Im Vergleich dazu generiert ein Großlader eine wertschöpfende, ständige Gewinnung von Material. Basierend auf den Bauprozessanalysen sowie einer Abfrage zum Arbeitseinsatz bei diversen Bauunternehmen sind dies beispielsweise Be- und Entladeprozesse sowie das Verfahren von Material. Aus diesem Grund setzen sich die definierten Lastzyklen für den Kleinlader aus den Tätigkeiten „Heben“, „Kleines Ladespiel“, „Fahren“ sowie „Leerlauf“ zusammen.

Der Vorteil bei einer separaten Betrachtung der Zyklen „Heben“ und „Fahren“ besteht darin, dass der Nutzer sich nach der Zyklus-Ausweisung in Stufe II. die Anteile nach seinen eigenen Rahmenbedingungen zusammenstellen kann.

Der Lastzyklus „Heben“ beinhaltet das Anheben einer definierten Last, welches $\frac{3}{4}$ der Nutzlast für eine Ladegabel entspricht. Das Gewicht ist mit einer Anzahl von zehn Wiederholungen auf eine festgelegte Höhe anzuheben und abzusenken. Die festgelegte Höhe entspricht der maximalen Gabelhöhe addiert um das Maß des definierten Gewichts. Die Durchführung erfolgt mit Vollgas beim Anheben der Last, wohingegen das Absenken ohne Gasanteil auskommt.

Das „Kleine Ladespiel“ weist beim Kleinlader eine verringerte Fahrstrecke vom 10,0 m statt 15,0 m wie beim Großlader auf. Ebenso fällt die definierte Höhe zum Abkippen des Materials mit 2,0 m geringer aus. Ferner ist eine zweite Variante festzulegen, welches das Transportieren von Material via Gabel vorsieht. Die Fahrstrecke ist identisch, jedoch beträgt die Höhe zum Ablegen des Materials 1,5 m.

Die Zyklen „Fahren“ und „Leerlauf“ sind analog zum festgelegten Ablauf beim Großlader. Die Anteile der Tätigkeiten gehen aus der Tabelle 5-3 hervor.

Tabelle 5-3: Anteile Lastzyklen Kleinlader

Maschinentyp	Heben	Kleines Ladespiel	Fahren	Leerlauf
Kleinlader	15,0 %	25,0 %	30,0 %	30,0 %

5.3 Festzustellende Parameter

Die Parameter, die im Rahmen der Praxistests zu protokollieren sind, betreffen folgende Faktoren:

- Witterungsbedingungen (Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Witterung)
- Untergrund & Gefälle
- Datum und Uhrzeit
- Vorgegebene Testdauer [Sek.]
- Tatsächliche Testdauer [Sek.]
- Anzahl der Lastzyklen
- Fahrer
- Produktivität [m³/t]
- Maschinenparameter (Baujahr, Betriebsstunden, Motor, Motorleistung, Reifenluftdruck, Motortemperatur, Kraftstofftemperatur, Hydrauliköltemperatur, Fahrmodus, Fahrstufe, Gang, Belüftung Kabine, Heizung, Klimaanlage, hydraulische Einstellung)
- Anbaugeräte (Baujahr, Gewicht, Abmessungen, Volumen, Leistung)

Beim Radlader ist zu berücksichtigen, dass die Reproduzierbarkeit der Testdurchläufe deutlich von der Fahrweise in das Haufwerk abhängig ist. Zum einen kann mit wenig Geschwindigkeit in das Haufwerk gefahren werden, was mehr Erfahrung seitens des Baumaschinenführers voraussetzt. Zum anderen kann mit hoher Geschwindigkeit der Ladevorgang gestartet werden. Die verschiedenen Fahrstile in das Haufwerk sind ebenso zu protokollieren.

6 Validierung der definierten Lastzyklen mithilfe von Praxistests

Die praktische Überprüfung der theoretisch erarbeiteten Erkenntnisse sowie die Lastzyklusüberprüfung erfolgt mit einer vierstufigen Validierung basierend auf Praxistests.

Die beschriebene Lastzyklusdefinition stellt viele Parameter zur Bestimmung des Bewegungsumfangs der Maschinen dar. Es ist jedoch in Frage zu stellen, ob die bis hierhin beschriebene Definition ausreichend zur Generierung aussagekräftiger und reproduzierbarer Ergebnisse ist. Für die Messung eines definierten Lastzyklus im Rahmen eines In-Situ-Tests liegen bis dato keine praktischen Erfahrungen vor.

Aus diesem Grund ist es wichtig, ergebnisoffen zu forschen. Die aufgestellten Lastzyklusdefinitionen sind daher ausdrücklich als grobe Rahmenbedingungen zu verstehen. Daher gilt es, diese nicht als stringente Definition anzusehen, sondern mit einer Vielfalt an Variationen und Varianten die individuellen Einflussfaktoren zu identifizieren und quantifizieren.

F 5

Ist eine praxisnahe, reproduzierbare Ausweisung der Energieeffizienz für Baumaschinen möglich und welche Methoden sind hierfür zu entwickeln?

Hieraus lassen sich folgende Forschungsfragen ableiten:

- Sind die aufgestellten Definitionen ausreichend, um die Anforderungen einer Energieeffizienzausweisung zu erfüllen?
- Wie können die Einflussfaktoren methodisch bestimmt und isoliert auf deren Einfluss analysiert werden?

Ziel des Kapitels ist es, die aufgestellten Erkenntnisse und formulierten Hypothesen in der Praxis zu überprüfen sowie Methoden zu entwickeln und zu quantifizieren.

6.1 Rahmenbedingungen und Vorgehensweise

6.1.1 Testgelände

Die ersten beiden Testreihen wurden auf dem Übungsgelände für Baugerätefahrer des Berufsförderungswerks der Bauindustrie gGmbH in Vertretung des Ausbildungszentrums Essen umgesetzt. Das Übungsgelände weist eine Fläche von ca. 30.000 qm auf und verfügt über Montagehallen (siehe Abbildung 6-1). Der dort anstehende Boden ist größtenteils ein Schluff. Die Fahrwege sind teilweise betoniert, bestehen aus einer 60 cm starken Schicht aus Recyclingboden (RC) 60-120 oder sind unbefestigt.

Für den dortigen Übungsbetrieb werden der anstehende Schluff oder RC 60-120, welcher stark mit Schluff vermischt ist, verwendet. Beide Bodenarten weisen keine homogenen Eigenschaften auf, sodass für die Testreihe zusätzlich mit einem Kies 16/32 zu testen ist.



Abbildung 6-1: Übungsgelände Ausbildungszentrum Essen⁸⁷

Die dritte Testreihe wurde im Hafengelände der Stadtwerke Essen umgesetzt. Das Areal beträgt dort 14.000 qm. Vorteilhaft bei diesem Testgelände war der befestigte Untergrund in Form einer Pflasterfläche und die Nutzung von unterschiedlichen Schüttgütern, die von einem Baustoffunternehmen zur Verfügung gestellt wurden. In der Abbildung 6-2 ist die Testfläche mit einer grünen Schraffur dargestellt.



Abbildung 6-2: Hafengelände Essen⁸⁸

⁸⁷ [64] Google: Kartendaten: Google, DigitalGlobe

⁸⁸ [65] Google: Kartendaten: Google, DigitalGlobe

Für die vierte Testreihe ist kein Satellitenbild aufgeführt, da es hierzu keine gesonderten Erkenntnisse gibt. Die Testreihe ist auf einem Betriebsgelände der Firma MTS Maschinentechnik Schrode AG am Stützpunkt in Bünde umgesetzt worden.

6.1.2 Fahrer

Ziel der Praxistests ist es unter anderem herauszuarbeiten, ob die Ausweisung der Energieeffizienz unabhängig vom Fahrvermögen des Baumaschinisten möglich ist. Daher ist eine sehr heterogene Gruppe an Fahrern ausgewählt worden, die aus Werksfahrern der Firma Zeppelin sowie Ausbildern, Meister und Umschüler des Berufsförderungswerks besteht. In Summe standen für die Testreihen 15 verschiedene Fahrer zur Verfügung. Pro Testreihe variierte die Anzahl zwischen vier bis sechs verschiedenen Fahrern.

6.1.3 Messtechnik

Zur Ermittlung der Kraftstoffverbräuche ist das direkte Messverfahren genutzt worden. Mit diesem Verfahren werden die Differenzen der Kraftstoffvolumenströme der Vor- und Rücklaufleitung ermittelt (siehe Abbildung 6-3).

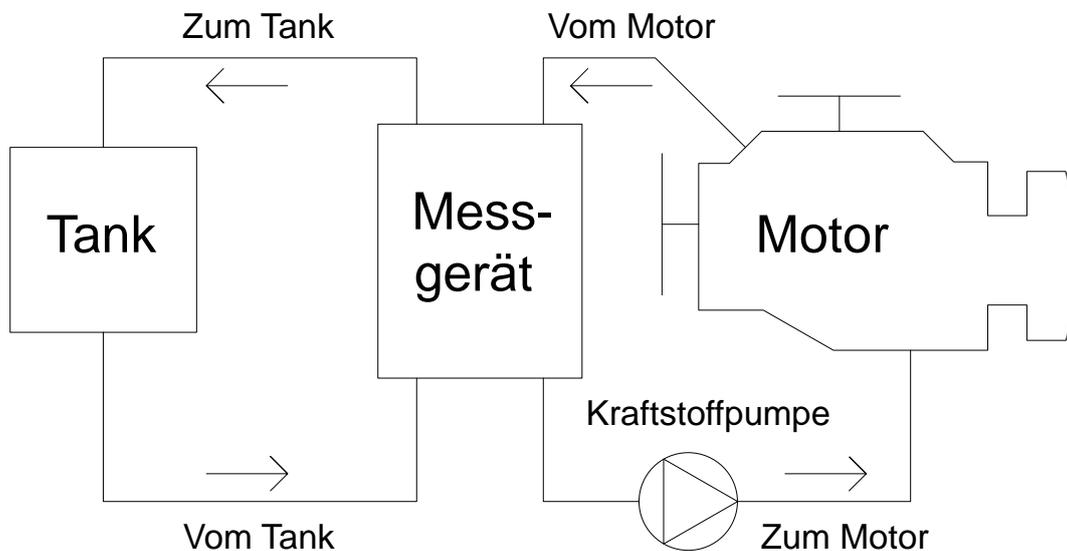


Abbildung 6-3: Anschlussschema Kraftstoffmessgerät

Zum Einsatz kommt ein Messgerät der Firma AIC mit der Typenbezeichnung „Uniflowmaster 6004“. Dieses Messgerät ist für Verbrennungsmotoren mit einer Leistung von 50 bis 515 kW geeignet und weist eine Messtoleranz von $\pm 1,00\%$ auf. Die anschließbare Peripherie an dem Messgerät ermöglicht die direkte Ermittlung des Totalverbrauchs sowie eine sekundengenaue Aufzeichnung der Kraftstoffverbrauchsrate.

6.1.4 Aufbau und Vorgehensweise

Ein Testdurchlauf beinhaltet in der Regel eine Anzahl von 10 Wiederholungen der Arbeitsaufgabe, wie z.B. Heben, Planieren etc. Je nach Dauer der Arbeitsaufgabe kann die Anzahl der Wiederholungen variieren. Das Große Ladespiel benötigt beispielsweise eine sehr lange Dauer, sodass die Anzahl entsprechend reduziert wird. Jeder Fahrer hat mindestens zwei Testdurchläufe zu absolvieren.

Zur Bestimmung der Abweichung zwischen den verschiedenen Testdurchläufen mit unterschiedlichen Fahrern wird dies mithilfe der relativen Standardabweichung ausgewiesen. Die relative Standardabweichung beschreibt dabei die Abweichung in Prozent. Zur Bestimmung ist das Maß der Standardabweichung durch den Mittelwert zu dividieren. Die allgemeine Formel (6-1) hierfür sieht wie folgt aus:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \mu)^2}{n}} \quad (6-1)$$

Wie im Kapitel 2.4 herausgearbeitet, stellen sich die Einflussfaktoren auf ein Arbeitsspiel als sehr vielfältig dar. Als mathematischen Grenzwert für einen reproduzierbaren In-Situ-Test wird eine relative Standardabweichung < 5,0 % definiert. Fallen die Abweichungen höher aus, besteht ein Optimierungsbedarf hinsichtlich der Aussagekraft. Der ausgewiesene Wert in den Auswertungen bezieht sich dabei immer auf die Kraftstoffverbrauchsrate, sofern nicht anders angegeben.

Die Kapitel sind so aufgebaut, dass die unterschiedlichen Lastzyklen sowie deren Varianten methodisch nach Aufbau, Durchführung und Ergebnis differenziert werden. In der Zusammenfassung erfolgt die Auswahl der relevanten Varianten mit einer Zusammenstellung der geeigneten Lastzyklen. Je nach Modelltyp erfolgen anschließend gesonderte Analysen in Bezug auf Einzelfaktoren, wie z.B. Fahruntergrund oder Mehrverbrauch durch einen Dieselpartikelfilter.

Es ist nochmal gesondert zu betonen, dass der Fokus bei der Lastzyklusentwicklung auf der Entwicklung liegt. Es gibt näherungsweise Entwürfe zu einer Definition von definierten Lastzyklen, die in der Theorie schon einen Optimierungsbedarf darstellen. Daher ist der Forschungskern in diesem Kapitel auf die Entwicklung gelegt, womit einhergeht, dass ergebnisoffen geforscht wird. Mit dem In-Situ-Test wird ein neues Forschungsgebiet erschlossen, wofür diverse Varianten und Variationen zur Validierung erforderlich sind.

6.2 I. Testreihe

Die erste Testreihe dient zur Überprüfung, inwieweit die in Kapitel 5 herausgearbeiteten Methoden und Handlungsfelder sich tatsächlich für eine reproduzierbare Ausweisung der Energieeffizienz eignen. Hiermit geht eine entsprechende Vielzahl an Varianten für die Testreihe einher, die auf deren Anwendbarkeit zu analysieren sind.

Als Maschine stand ein Kettenbagger mit der Typenbezeichnung CAT 320B zur Verfügung. Der Bagger stammt aus dem Jahr 2000, weist zu dem damaligen Testzeitpunkt 5.900 Betriebsstunden auf und verfügt über einen Verstellausleger sowie einen Tief- und Grabenräumlöffel.

In Abweichung zu der Lastzyklusdefinition in Kapitel 5 erfolgt die Betrachtung von zwei weiteren Tätigkeiten in Form eines definierten Gewichts und Grabenaushubs. Die Bewertung der Produktivität ist im Rahmen dieser Testreihe als problematisch anzusehen, da die Maschine nicht über ein integriertes Wiegesystem verfügt und ein Transportgerät sowie eine externe Wiegeeinrichtung nicht zur Verfügung stand.

Im Folgenden wird nur auf den Lastzyklus „Laden“ eingegangen, da hieraus die wesentlichen Erkenntnisse aus der I. Testreihe einhergehen. In Summe sind für die I. Testreihe 48 Testdurchläufe aufgestellt worden.

6.2.1 Lastzyklus „Laden“

Aufbau und Definition

Die Tätigkeit Laden entspricht der vorangegangenen Lastzyklusdefinition. Die Maschine steht überhöht und lädt das Material von A nach B, wobei der Schwenkwinkel 90° beträgt. Sowohl vom Bewegungsumfang als auch von der zeitlichen Vorgabe werden keine Definitionen vorgenommen.

Durchführung

Bei der Durchführung sind verschiedene Varianten umgesetzt worden. Diese betreffen unterschiedliche Böden (Schluff, RC, ohne Boden), Beschaffenheiten (verdichtet, aufgelockert) sowie Anbaugeräte (Tieflöffel, Grabenräumlöffel).

Ergebnis

Für die Varianten mit Erdbewegung ist festzustellen, dass die Messung der Produktivität ohne definierte Kubaturen, durch Sattelkipper oder Schuttcontainer, schwer zu messen ist. Die Unterschiede in der Verbrauchsrate zwischen dem Tief- und Grabenräumlöffel fallen mit einer Abweichung von 1,77 % marginal aus. Um die einzelnen Varianten im Gesamtkontext zu vergleichen, werden die Ergebnisse erst im Kapitel 6.2.4 in der Tabelle 6-1 aufgeführt.

6.2.2 Lastzyklus „Laden - definiertes Gewicht“

Aufbau und Definition

Der Aufbau entspricht dem eines klassischen Ladespiels. Es ist jedoch ein definiertes Gewicht in Form eines Betonwürfels mit den Abmessungen (l x b x h) von 1,0 x 1,0 x 1,0 m und einer Wichte von 2,3 t zu nutzen.

Durchführung

Die Durchführung erfolgt analog zum klassischen Ladespiel. Das Gewicht wird dabei aus der Ausgangsposition auf eine definierte Soll-Höhe angehoben und in die Endposition abgeladen.

Ergebnis

Wird das Gewicht nur angehoben und durch Schwenken seitlich versetzt, stellen sich die Verbräuche als gering dar. Daher erfolgt die Betrachtung einer zweiten Variante, bei der der Schwenkradius für die Ausgangs- und Endposition variiert. Hierdurch erfolgt eine Betätigung des Löffelstiels, welches gleichzeitig zu einer Verbrauchssteigerung führt. In Summe ist jedoch festzustellen, dass ein Lastzyklus mit einem definierten Gewicht nicht aussagekräftig ist. Die Rahmenbedingungen sind als zu idealisiert anzusehen und die Belastungen weichen zu stark vom tatsächlichen Einsatz ab.

6.2.3 Lastzyklus „Laden - Grabenaushub“

Aufbau und Definition

Der Zyklus beinhaltet einen Testgraben mit einer Länge von 20 m, die Breite entspricht der Grabgefäßbreite, welche mit einer Schneidbreite von 1.000 mm als üblich für das Baggerbetriebsgewicht anzusetzen ist. Die Grabentiefe beim betrachteten Bagger beträgt 2,0 m. Das Material ist von der Fahrerkabine aus auf der linken Seite mit einem Abstand von 1,0 m zum Graben zu entladen.

Durchführung

Die Durchführung ist auf dem Übungsgelände nur mit dem anstehenden Schluff-Boden möglich gewesen. Dieser Boden ist stark witterungsabhängig, mit einem hohen Lösefaktor bei dauerhaft trockener Witterung bis teilweise fließfähige Eigenschaften bei konstanten Regen. Daher sind bei den Durchgängen große Unterschiede beim Laden des Bodens aufgetreten, da teilweise ein sehr harter Boden anzutreffen war, welcher mit der Löffelschneide schwer zu laden war.

Ergebnis

Aufgrund der Heterogenität des Bodens ist dieses Testverfahren als sehr schwierig einzustufen. Selbst wenn dieser Faktor ausgeklammert werden könnte, ist die Varianz bei diesem Zyklus durch einen variablen Schwenkwinkel, der unterschiedlichen Löffelfüllgrade sowie dem gehobenen Anspruch an das Fahrvermögen als sehr groß zu bezeichnen. Aufgrund dieser vielfältigen Unbestimmtheiten ist dieser Zyklus nicht für einen repräsentativen Test geeignet.

6.2.4 Erkenntnisse und abzuleitende Handlungsfelder

Die Ergebnisse der I. Testreihe sind zusammenführend in der Tabelle 6-1 dargestellt. Bei den Verbrauchsraten stellen sich die Varianten „Aufgelockert“ und „Anstehend“ als nahezu gleich auf. Die höchste Verbrauchsrate führt die Variante „Testgraben“ auf, die in der Durchführung einen maschinenintensiven Einsatz durch die Grab-, Schwenk- und Fahrtätigkeiten aufweist. Hervorzuheben ist bei der Variante „Ohne Boden“, dass die Verbräuche sich nicht drastisch von den anderen Varianten unterscheiden. In den folgenden Testreihen ist daher dezidierter zu analysieren, welches Testverfahren hierfür geeignet ist.

Weiter ist zu beobachten, dass die Variationen im Bereich Zeit verbesserungswürdig sind. Hierbei ist zu beachten, dass eine Zykluszeit genau mess- und steuerbar sein sollte. Im Vergleich dazu ist die Steuerung der Zielzeiten oder die Definition von Zwischenzielen für die Variante „Testgraben“ sehr schwer darstellbar. Dies ist ein weiterer Grund, weshalb diese Variante nicht weiterverfolgt wird.

Tabelle 6-1: Ergebnisse I. Testreihe Lastzyklus „Laden“

Variante Laden	Verbrauch	Abweichung- Verbrauch	Zeit	Abweichung- Zeit
Boden-Aufgelockert	17,98 l/h	6,68 %	21,74 Sek.	12,93 %
Boden-Anstehend	17,78 l/h	6,17 %	25,07 Sek.	8,53 %
Ohne Boden	16,14 l/h	6,98 %	18,52 Sek.	9,68 %
Def. Gewicht	14,06 l/h	9,44 %	15,46 Sek.	5,96 %
Testgraben	19,41 l/h	7,58 %	23,85 Sek.	7,89 %

Die Versuche aus der I. Testreihe zeigen auf, dass für einen reproduzierbaren Praxistest eindeutige und starre Rahmenbedingungen zu treffen sind. Dies betrifft sowohl den Bewegungsablauf der Maschine als auch eine zeitliche Definition.

Diese beiden wesentlichen Erkenntnisse führen dazu, dass bei den folgenden Testreihen der Bewegungsablauf des Arbeitsspiels mithilfe von Stativen exakt vorgegeben wird. Somit sollen

die einzelnen Abläufe vorzugsweise nacheinander und nicht gleichzeitig stattfinden, wie z.B. das Schwenken und Anheben des Auslegers.

Ebenso ist eine zeitliche Definition bei den Arbeitsspielen vorzunehmen. Dies erfolgt durch eine visuelle Eigenkontrolle durch den Baumaschinenfahrer. Hierfür ist eine Applikation programmiert worden, die eine visuelle Kontrolle mithilfe eines Tablets in der Fahrerkabine ermöglicht. Mit der Benutzeroberfläche können bis zu fünf verschiedene Testphasen zeitlich definiert sowie die Anzahl der Durchläufe bestimmt werden (siehe Abbildung 6-4).



Abbildung 6-4: Applikation zur Vereinheitlichung der Testdauer

Beim Betätigen der Schaltfläche „Start“ sieht der Maschinenführer, in welcher Phase er sich befindet, wie viel Zeit für die Phase verbleibt und wie viele Durchläufe noch ausstehen. Ein Durchlauf umfasst dabei jeweils alle zeitlich festgelegten Phasen. Zudem gibt es einen Start-Countdown, damit der Fahrer zu Beginn des Zyklus die Hände an die Steuerung legen kann.

Wichtig bei der Umsetzung der Tests mit der Applikation ist dabei, dass nicht jeder Arbeitsschritt des Lastzyklus einer Phase zugewiesen wird. Diese können sehr kurz sein (z.B. Tieflöffel ausklappen mit einer Dauer von 2,0 Sekunden) und nicht mehr vom Maschinenführer kontrolliert werden, da zeitgleich noch die Maschine zu bedienen ist. Bei den Praxistests haben sich Gruppierungen von mehreren Arbeitsschritten mit einer Gesamtdauer von mindestens 5,0 Sekunden bewährt.

6.3 II. Testreihe

Für die II. Testreihe sind alle in der Lastzyklusdefinition aufgeführten Maschinentypen betrachtet worden. Die Maschinen sind freundlicherweise von der Firma Zeppelin Baumaschinen für die Testreihe zur Verfügung gestellt worden. Bei der Maschinenauswahl fand ein Fokus auf die relevantesten Betriebsgewichte statt. In Summe sind 315 Testdurchläufe für alle vier Maschinentypen umgesetzt worden. Zur besseren Differenzierung erfolgt eine Unterteilung der Maschinentypen in den folgenden Unterkapiteln.

6.3.1 Mobilbagger

Der Mobilbagger ist ein 18,0 t Kettenbagger mit der Bezeichnung CAT M316D aus dem Baujahr 2014. Die Maschine wies zum damaligen Testzeitraum im Oktober 2014 400,00 Betriebsstunden auf. Der Motor ist ein C6.6 Acert mit einer Leistung von 123 kW, welcher die Abgasstufe IIIA erfüllt und daher keinen Dieselpartikelfilter benötigt. Die Maschine verfügt des Weiteren über einen ECO- und Power-Modus. Ferner sind diverse Parameter, wie z.B. Schwenkaggressivität und Bremsverhalten einstellbar, aber auf der Werkeinstellung belassen worden. In Summe wurden mit der Maschine 91 Testdurchläufe absolviert, wovon im Folgenden die wichtigsten Erkenntnisse näher erläutert werden sollen.

6.3.1.1 Lastzyklus „Laden - Kies“

Bei der I. Testreihe stellte sich die Messung der Produktivität in Form des Bodens ohne eine externe Wiegeeinrichtung als diffizil dar. Um dies Problem mithilfe einfacher Lösungsansätze zu beheben, ist ein Container aufzustellen. Dieser wird beladen und aufgrund der bekannten Länge und Breite ist mithilfe einer Höhenmessung das Volumen deutlich einfacher zu bestimmen.

Aufbau und Definition

Der Bagger steht auf einem 2,0 m hohen Damm und führt ein klassisches Ladespiel durch. Der Bewegungsablauf wird durch Stative vorgegeben und erfolgt nachgeschaltet. Eine gleichzeitige Ansteuerung der Hydraulik, wie beispielsweise simultanes Schwenken und Heben, findet nicht statt. Ferner ist in der Fahrerkabine ein Tablet montiert, mit der die o.g. Applikation für die Zeitvorgabe genutzt wird. Als Boden wird für die Messreihe ein Kies 16/32 verwendet. Die Tests sind mit den beiden Leistungsstufen (ECO/Power) sowie unterschiedliche Motorstufen durchzuführen.

Durchführung

Die Durchführung des Ladespiels geht aus der Abbildung 6-5 hervor. Im ersten Schritt nimmt der Löffel das Material auf, indem der Löffelstiel und der Löffel eingefahren werden. Im zweiten

Schritt erfolgt das Anheben auf Soll-Höhe sowie die Schwenkbewegung um 90°. Danach erfolgt im Schritt 3 das Absenken und Entleeren des Löffels sowie abschließend im vierten Schritt das Zurückschwenken in die Ausgangsposition.

Wichtig bei der Durchführung mit dem Mobilbagger ist, dass nicht das Auslegeroberteil angesteuert wird, sondern nur der Grundausleger.



Abbildung 6-5: Ablauf Lastzyklus „Laden - Kies“

Ergebnis

Auffällig bei der Auswertung ist, dass der ECO-Modus nicht zu einer Kraftstoffeinsparung geführt hat. Die hydraulische Leistung des Baggers wurde so stark reduziert, dass die vorgegebene Zykluszeit nicht mehr eingehalten werden konnte. Somit hat der Zyklus länger gedauert und der Verbrauch stellte sich in Summe als höher sowie die Produktivität niedriger dar. Der beste Kompromiss aus Leistung und Verbrauch weist der Power-Modus mit Motorstufe 7 und einer durchschnittlichen Verbrauchsrate von 13,30 l/h auf.

In Summe ist festzustellen, dass sich der Testaufwand mit den Containern als relativ groß darstellt. Dies ist sowohl in Bezug auf die Vor- und Nachbereitung der Tests zu konstatieren als auch hinsichtlich der Reproduzierbarkeit, welche optimierungsbedürftig für den Testaufbau ist. Die Abweichungen stellen sich im Mittel mit über 10,0 % als hoch dar. Bei der Beladung variiert durch die Entnahme des Materials aus dem Container jeder Durchgang, sowohl in der Tiefe als auch durch die Auslegerlänge. Des Weiteren schränken die Volumina der Container die Anzahl der Gesamtdurchläufe auf 3 Stück ein. Anschließend ist eine Umlagerung des Materials wieder erforderlich, was mit entsprechendem Zeitaufwand verbunden ist.

6.3.1.2 Lastzyklus „Laden - ohne Boden“

Aufbau und Definition

Der Aufbau beim Lastzyklus „Laden - ohne Boden“ stellt sich als analog zum Lastzyklus „Laden - Kies“ dar. Der Unterschied geht, wie aus der Überschrift abzuleiten ist, aus einer Umsetzung ohne Ladetätigkeit eines Bodens einher. Es sind ebenso verschiedene Variationen hinsichtlich der Leistungsmodi und Motorstufen vorzunehmen.

Durchführung

Aufgrund der fehlenden Ladetätigkeit wird der Löffelstiel für den Ladeprozess nicht angesteuert. Der Grund hierfür ist die Reproduzierbarkeit, da sich ein identisches und fahrerunabhängiges Ansteuern des Löffelstiels mit dem Einklappen des Löffels als schwierig darstellt. Ebenso wird nach Erreichen der Entladeposition der Ausleger nicht abgesenkt. Wie beim vorherigen Lastzyklus ist es wichtig, dass nur der Grundausleger und nicht der Verstellausleger angesteuert wird.

Ergebnis

In Summe sind 30 Testdurchläufe mit vier verschiedenen Varianten umgesetzt worden. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 6-2 aufgeführt. Den besten Kompromiss stellt hinsichtlich der Einhaltung der definierten Zeiten (Leistung) und dem Verbrauch der Power-Modus mit Motorstufe 7 von 10 dar. Beim Lastzyklus mit dem Kiesmaterial weist die Einstellung ECO mit Motorstufe 7 eine zu geringe hydraulische Leistung auf. Daher ist diese nicht für die Ausweisung der Energieeffizienz zu nutzen.

Tabelle 6-2: Ergebnis CAT M316D Lastzyklus „Laden - ohne Boden“

Variante	Leistungsstufe	Motorstufe	Verbrauchsrate	Zykluszeit	Abweichung
1	Power	10	13,57 l/h	7,80 Sek.	3,40%
2	Power	7	11,45 l/h	8,15 Sek.	2,83%
3	ECO	10	12,59 l/h	8,59 Sek.	2,30%
4	ECO	7	9,99 l/h	8,82 Sek.	4,31%

Die Abweichungen stellen sich in Gänze mit < 4,00 % als gering dar. Dies ist ein Indikator, dass sich die entwickelten Maßnahmen in Form der aufeinanderfolgenden Abläufe und Zeitvorgaben zur Eigenkontrolle positiv auf ein repräsentatives Ergebnis auswirken.

6.3.1.3 Lastzyklus „Planieren“

Aufbau und Definition

Der Lastzyklus „Planieren“ ist grundsätzlich ohne eine Erdbewegung vorgesehen. Bei der I. Testreihe ist ein praxisnaher Wert hinsichtlich der Verbrauchsrate sowohl mit als auch ohne

eine Erdbewegung erzielt worden. Der Kraftstoffverbrauch wird bei diesem Lastzyklus im Wesentlichen von der Zykluszeit bestimmt. Die Länge der Planierstrecke beträgt für den Mobilbagger 4,30 m. Zur Ausführung kommen ebenfalls verschiedene Leistungs- und Motorstufen sowie Zykluszeiten.

Durchführung

Vor der Durchführung ist die Position des Auslegers zu kontrollieren. Die Zylinder am Ausleger sind inklusive Verstellausleger auf das Maximum auszufahren. Durch den Verstellausleger hat der Bagger eine längere Reichweite als beim Monoblock, was zu berücksichtigen ist. Der Löffelzylinder ist vollständig einzufahren. Von dieser Position wird der Löffel durch das Einfahren des Löffelstiels sowie durch simultanes Anheben des Grundauslegers zum Bagger bewegt. Dabei ist der Löffel möglichst eben über den Boden zu steuern. Sofern der Löffelstiel eine lotrechte Position zum Boden aufweist, erfolgt das Bewegen des Löffels in die Ausgangsposition.

Ergebnis

Für diesen Lastzyklus sind vier Varianten und insgesamt 26 Durchläufe durchgeführt worden. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 6-3 aufgeführt. Bei der ersten Variante sind dabei die definierten Zeiten auf eine Zykluszeit von 8,00 Sekunden festgelegt worden. Die Einhaltung der Zeit führt bei dieser Variation zu einer höheren Abweichung. Im Vergleich dazu liegt die Abweichung bei einer vorgegebenen Zeit von 10,00 Sekunden bei circa 2,00 %.

Tabelle 6-3: Ergebnis CAT M316D Lastzyklus „Planieren“

Variante	Leistungsstufe	Motorstufe	Verbrauchsrate	Zykluszeit	Abweichung
1	Power	10	18,45 l/h	7,88 Sek.	5,98%
2	Power	7	14,32 l/h	9,91 Sek.	2,02%
3	ECO	10	15,46 l/h	9,82 Sek.	1,94%
4	ECO	7	13,51 l/h	9,88 Sek.	1,58%

6.3.1.4 Lastzyklus „Fahren“

Aufbau und Definition

Die Fahrstrecke für den Lastzyklus weist eine Bogenform auf, bei der sich an den jeweiligen Enden ein Wendehammer befindet. Die Streckenlänge auf dem Recyclinguntergrund beträgt 215,00 m. Als Variationen werden verschiedene Leistungs- und Motorstufen sowie Gangstufen in Form von der Einstellung Schnell- und Kriechgang vorgenommen.

Durchführung

Bei der Durchführung ist darauf zu achten, dass die Maschine möglichst konstant bewegt wird. Dementsprechend ist die Geschwindigkeit, sofern möglich, stetig zu halten und nicht durch

permanentes Beschleunigen oder Bremsen zu verfälschen. Die Festlegung einer definierten Zeit ist nicht möglich, da die Geschwindigkeit (und daraus resultierend die Zeit) der Maschine von den Motor- und Gangstufen maßgeblich bestimmt wird.

Ergebnis

Der Lastzyklus „Fahren“ beinhaltet drei verschiedene Varianten mit neun Testdurchläufen. In der Tabelle 6-4 ist die Leistungsstufe nicht aufgeführt. Dies erfolgt aus dem Grund, dass sich ein ECO- und Power-Modus nicht auf den Verbrauch beim Fahrantrieb auswirkt. Die Einstellung regelt die hydraulische Pumpenleistung und ist daher irrelevant für den Zyklus „Fahren“.

Tabelle 6-4: Ergebnis CAT M316D Lastzyklus „Fahren“

Variante	Gangstufe	Motorstufe	Verbrauchsrate	Geschwindigkeit	Abweichung
1	Schnellgang	10	23,26 l/h	15,78 km/h	1,66%
2	Schnellgang	7	21,37 l/h	15,10 km/h	1,83%
3	Kriechgang	7	16,33 l/h	7,92 km/h	0,03%

Aus der Tabelle wird ersichtlich, dass die Geschwindigkeit mit der Gangstufe „Kriechgang“ deutlich abnimmt. Die Zurücklegung von längeren Strecken stellt sich unter dem Zeit- und Verbrauchsaspekt als unwirtschaftlich dar. Die wirtschaftlichste Variante auf der Teststrecke geht mit der Variante mit der Motorstufe 7 einher.

Die durchgeführten Tests stellen mit einer Abweichung von < 2,0 % eine sehr hohe Reproduzierbarkeit dar.

6.3.1.5 Zusammenstellung

Bei der Zusammenstellung der Zyklen fehlt noch der Lastzyklus „Leerlauf“. Dieser besteht aus der Messung der Verbrauchsrate im Leerlauf und wird aufgrund der Simplizität nicht in ein gesondertes Unterkapitel aufgeführt. Der Leerlaufverbrauch beträgt beim CAT M316D 2,70 l/h.

Bei der Auswahl an Varianten kommt der ECO-Modus nicht zum Tragen, da dieser in der Praxis nur selten zur Anwendung kommt (siehe Untersuchung Kapitel 4.2.1).

In der Tabelle 6-5 sind die Ergebnisse der ausgewählten Lastzyklen aufgeführt. Zur besseren Einordnung sind die Daten aus dem Performance Handbook, aus dem Flottenmanagement und vom Bordcomputer des getesteten Baggers noch ergänzt.

Tabelle 6-5: Zusammenstellung CAT M316D

Lastzyklen	Variante	Anteil	Verbrauch	Abweichung
Graben	Power - S7	40%	11,45 l/h	2,83%
Planieren	Power - S7	10%	14,32 l/h	2,02%
Fahren	S7 - Schnellgang	20%	21,37 l/h	1,83%
Leerlauf	950 U/min	30%	2,70 l/h	-
Kombiniert			11,10 l/h	

Daten CAT Performance Handbook 46, S. 25-19:

	Low	Medium	High
M316D	7,9-11,8 l/h	11,8-17,1 l/h	17,1-20,3 l/h

Daten Flottenmanagement:

	Anzahl	Betriebsstd.	Kraftstoff	Verbrauch
18,0 t Mobilbagger	422	411.501,10 h	3.884.623,63 l	9,44 l

Daten Bordcomputer:

Durchschnitt: **10,42 l/h**

Obwohl die ausgewählten Zyklen keine Erdbewegung beinhalten, ist die kombinierte Verbrauchsrate mit 11,10 l/h höher als dies die Daten aus dem Flottenmanagement und Bordcomputer ergeben. Dies stellt einen Indikator für eine praxisnahe Ausweisung ohne Erdbewegung dar. Ferner betragen die Abweichungen bei allen Varianten unter 3,00 %, was ein hohes Maß an Reproduzierbarkeit der Ergebnisse aufzeigt. Ebenso zeigen die geringfügigen Abweichungen auf, dass ein praxisnaher Test unabhängig vom Fahrvermögen sein kann.

6.3.1.6 Erweiterte Untersuchung zum Fahruntergrund*Aufbau und Definition*

Aus Kapitel 2.4.2 geht aus einer internen Testreihe eines Herstellers die Erkenntnis einher, dass sich der Untergrund maßgeblich auf den Maschineneinsatz auswirken kann. Die Unterschiede betragen bei der Geschwindigkeit bis zu 39,65 % sowie bei der Produktivität bis zu 15,79 %. Aus diesem Grund gilt es zu eruieren, inwieweit sich die auf dem Testgelände anzutreffenden Untergründe auf den Maschineneinsatz auswirken.

Auf dem Testgelände befindet sich eine Betonplatte sowie modellierte Fahruntergründe aus Recycling-Material und Schluff. Die Teststrecke ist aufgrund der Betonplatte in ihrer Länge limitiert und ist für alle Varianten zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit auf eine Länge mit 26,00 m festzulegen. Die Maschine wird innerhalb der 26,0 m beschleunigt und abgebremst und fährt abwechselnd vor und zurück. Als Varianten werden verschiedene Leistungs-, Motor- und Gangstufen genutzt.

Durchführung

Um ein reproduzierbares Ergebnis zu erzielen, ist es wichtig, dass die Bremspunkte exakt getroffen werden. Zum Testzeitpunkt war der Schluff durch mehrere Regenschauer stark durchnässt und weist einen erhöhten Fahrwiderstand auf. Bodenproben zur Bestimmung von exakten Bodenkennwerten wurden nicht entnommen.

Ergebnis

Aus dem Fahrzyklus ist bekannt, dass die Motor- sowie Gangstufe maßgeblich die Geschwindigkeit sowie den Kraftstoffverbrauch beeinflussen. In der Tabelle 6-6 sind daher nur die Zyklen mit den exakt gleichen Maschineneinstellungen aufgeführt. In diesem Fall betrifft dies die Motorstufe 7 sowie die Gangstufe „Schnellgang“.

Aus der Tabelle wird deutlich, dass der Beton die geringsten Fahrwiderstände aufweist. Die erhöhten Rollwiderstände beim Recycling-Boden führen zu einer Erhöhung der Zykluszeiten und Verbräuche bzw. zu einer Reduzierung der Geschwindigkeit und Produktivität in Höhe von gemittelt ca. 6 %.

Im Vergleich dazu fallen die Werte für den Schluff bezogen auf den Betonuntergrund deutlich höher aus. Im Bereich der Rollwiderstände ist eine Steigerung von 12 % zu verzeichnen. Beim Totalverbrauch sowie bei der Produktivität betragen diese über 20 %.

Tabelle 6-6: Ergebnis Analyse Fahruntergrund

Parameter	Beton (B)	Recycling (RC)	Delta B-RC	Schluff (S)	Delta B-S
Zeit	55 Sek.	58 Sek.	1,06	62 Sek.	1,12
Zykluszeit	18,37 Sek.	19,43 Sek.	1,06	20,53 Sek.	1,12
Total	0,302 l	0,324 l	1,07	0,382 l	1,26
Verbrauch	19,73 l/h	19,99 l/h	1,01	22,33 l/h	1,13
Strecke	156,00 m	156,00 m	1,00	156,00 m	1,00
Geschwindigkeit	10,19 km/h	9,64 km/h	0,95	9,12 km/h	0,89
Produktivität	516,56 m/l	482,32 m/l	0,93	408,38 m/l	0,79

Das Ergebnis deckt sich näherungsweise mit dem internen Herstellertest. Der Schluff war zum Testzeitpunkt stark durchnässt, vermutlich aber nicht in einem so schlechten Zustand wie bei der Herstellertestreihe.

Für die Testreihe kann zusammengefasst werden, dass der Recyclingboden mit einer Abweichung von rund 6 % näherungsweise an optimale Testbedingungen, wie dies bei einer Asphalt- oder Betonoberfläche der Fall wäre, anknüpfen kann. Ferner zeigt sich ein geringes Maß an Witterungsabhängigkeit auf.

6.3.2 Kettenbagger

Beim Kettenbagger handelt es sich um einen CAT 324E, welcher ein Betriebsgewicht von 26,2 t aufweist. Die Maschine stammt aus dem Jahr 2012 und hat zum damaligen Testzeitpunkt 2.895 Betriebsstunden absolviert. Der Motor ist ein CAT C7.1 Acert, leistet 151 kW, erfüllt die Abgasstufe IIIB und hat einen Dieselpartikelfilter. Die Maschine verfügt über drei Leistungsstufen ECO, Standard und Power. Zur Validierung des Kettenbaggers sind in Summe 83 Testreihen aufgestellt worden. Im Folgenden werden nur die relevantesten Varianten vorgestellt. Es entfällt hierdurch beispielsweise die Messreihe mit einem definierten Gewicht, da keine weiteren Erkenntnisse zur I. Testreihe gewonnen werden konnten.



Abbildung 6-6: Kettenbagger CAT 324E

6.3.2.1 Lastzyklus „Laden“

Aufbau und Definition

Der Lastzyklus „Laden“ ist vom Ablauf her analog zum Mobilbagger. Zur besseren Darstellung werden die beiden Varianten „Ohne Boden“ und „Kies“ zusammengefasst. Der Aufbau variiert im Vergleich zum Mobilbagger in Form der festgelegten Soll-Höhe der Stative und des Radius' bezogen auf die Drehkranzmitte. Des Weiteren wird eine weitere Variante beim Leistungsmodus mit dem Profil Standard als Ergänzung zu den Modi ECO und Power für die Messreihe umgesetzt. Ebenso findet eine Variation bei den definierten Zeiten statt.

Durchführung

Aufgrund der Ansteuerung des Löffelstiels und dem Absenken des Grundauslegers beim Entladen bei der Variante „Kies“ fallen die Zykluszeiten bei der Umsetzung deutlich länger aus als bei der Variante „Ohne Boden“. Es ist zu erwähnen, dass das Entladen aufgrund der Containerabmessungen sehr präzise erfolgen muss und hierdurch das Arbeitsspiel verlangsamt wird. Ansonsten verhält sich die Durchführung analog zum Mobilbagger.

Ergebnis

Für den Kettenbagger sind in Summe 33 Durchläufe für das Ladespiel vorgenommen worden. Die in der Tabelle 6-7 dargestellten Varianten stellen 18 Durchläufe dar. Die anderen Durchläufe beinhalten weitere Variationen hinsichtlich definierter Zeiten, Motorstufen etc., werden aber hinsichtlich des niedrigen Mehrwerts in Bezug auf den Erkenntnisgewinn nicht dargestellt.

Eine direkte Vergleichbarkeit ist nur bei den Varianten „Ohne Boden 1“ und „Ohne Boden 3“ möglich, da die vorgegebenen Zeiten identisch sind. Wie bei der Durchführung schon aufgeführt, ist die Zykluszeit für die Variante Kies mit 24,31 Sekunden erheblich länger als die der Variante „Ohne Boden“.

Analog zum Mobilbagger stellt sich das Ergebnis ein, dass auch ohne eine Erdbewegung näherungsweise die Verbrauchsraten erzielt werden können. Bei der Zusammenstellung der Lastzyklen wird diese Thematik ausgiebiger diskutiert.

Tabelle 6-7: Ergebnis CAT 324E Lastzyklus „Laden“

Variante	Leistungsstufe	Motorstufe	Verbrauchsrate	Zykluszeit	Delta
Kies	Power	10	21,70 l/h	24,31 Sek.	6,31%
Ohne Boden 1	Power	10	19,84 l/h	8,73 Sek.	4,81%
Ohne Boden 2	Standard	10	16,58 l/h	9,71 Sek.	3,40%
Ohne Boden 3	ECO	10	16,28 l/h	8,72 Sek.	3,09%

6.3.2.2 Lastzyklus „Planieren“

Aufbau und Definition

Im Vergleich zum Mobilbagger verfügt der Kettenbagger über einen Monoblockausleger. Die Geometrien für die zu planierende Linie können hierdurch variieren. Divergierend zum Mobilbagger beträgt die Länge der Strecke 4,00 m statt 4,30 m. Es sind Variationen hinsichtlich der definierten Zeiten sowie Leistungs- und Fahrstufen zu treffen.

Durchführung

Bei der Durchführung ist darauf zu achten, dass der Löffel möglichst eben über den Boden geführt wird. Während der Testreihe ergab sich eine Besonderheit durch das Freibrennen des Partikelfilters. Die Erkenntnisse zum Thema Partikelfilter werden in einem gesonderten Unterkapitel ausführlicher behandelt. Des Weiteren ist der Kettenbagger vor dem Mobilbagger getestet worden. Bei den ersten Testdurchläufen waren verhältnismäßig hohe Abweichungen zu verzeichnen. Diese konnte aber mit einer vermehrten Anzahl an Durchgängen vermindert werden. Es soll jedoch herausgestellt werden, dass die Testabläufe besondere Rahmenbedingungen darstellen, welche eine gewisse Trainingszeit erfordern.

Ergebnis

Die Tätigkeit Planieren beinhaltet 36 Testdurchläufe, wovon in der Tabelle 6-8 die Ergebnisse von 16 Durchläufen aufgeführt sind. Die verbleibenden 20 Durchläufe beinhalten weitere Varianten im Bereich vorgegebener Zeit etc. In der Tabelle sind die Variationen hinsichtlich der Leistungsstufe mit einer vorgegebenen Zykluszeit von 9,00 Sekunden dargestellt. Der Power-Modus stellt hierbei mit 28,12 l/h eine deutliche höhere Verbrauchsrate als die anderen beiden Varianten dar. Trotz der geringeren hydraulischen Leistung sind die Zielzeiten mit den Leistungsstufen Standard und ECO ebenso erzielbar.

Tabelle 6-8: Ergebnis CAT 324E Lastzyklus „Planieren“

Variante	Leistungsstufe	Motorstufe	Verbrauchsrate	Zykluszeit	Abweichung
1	Power	10	28,12 l/h	8,96 Sek.	5,40%
2	Standard	10	23,49 l/h	8,86 Sek.	1,43%
3	ECO	10	22,10 l/h	8,40 Sek.	6,37%

6.3.2.3 Lastzyklus „Fahren“*Aufbau und Definition*

Der Lastzyklus „Fahren“ besteht beim Kettenbagger aus einer 25,0 m langen Strecke, welche vor- und rückwärts zu befahren ist. Als Untergrund steht ein Recycling-Boden sowie Schluff zur Verfügung. Als Variation können verschiedene Leistungs-, Motor- und Gangstufen genutzt werden.

Durchführung

Hinsichtlich der Durchführbarkeit ergibt eine zeitliche Definition keinen Sinn. Wie beim Mobilbagger wird die zu erreichende Zeit maßgeblich von der Motor- und Gangstufe bestimmt.

Ergebnis

Aufgrund der hohen Reproduzierbarkeit sind 8 Testdurchläufe vorgenommen worden, deren Ergebnisse in der Tabelle 6-9 aufgeführt sind. Die Werte beziehen sich dabei jeweils auf einen Recycling-Boden als Untergrund. Trotz Kettenfahrwerk, welches unabhängiger hinsichtlich des Untergrunds sein sollte, steigt bei einer Stichprobe auf einem Schluff die Verbrauchsrate um 10 % bei gleicher Geschwindigkeit.

Tabelle 6-9: Ergebnis CAT 324E Lastzyklus „Fahren“

Variante	Gangstufe	Motorstufe	Verbrauchsrate	Geschwindigkeit	Abweichung
1	Schnellgang	10	28,62 l/h	5,26 km/h	0,35%
2	Kriechgang	10	22,85 l/h	3,17 km/h	2,14%

6.3.2.4 Zusammenstellung

Für die Zusammenstellung der Zyklen ist der Verbrauch für den Leerlauf ausstehend. Die Messung hierzu kommt zu einem Ergebnis von 2,862 l/h bei einer Drehzahl des Motors im Leerlauf von 900 U/min.

Die Zusammenstellung der Varianten erfolgt nach den kraftstoffintensivsten Einstellungen (Power), da dieser Modus in der Praxis am häufigsten eingesetzt wird. Die Auswahl der Lastzyklen ist in der Tabelle 6-10 aufgeführt.

Die kombinierte Verbrauchsrate aus den verschiedenen Tätigkeiten beträgt 17,72 l/h. Dies entspricht den Werten aus der Praxis in Form des Flottenmanagements sowie der Daten aus dem Bordcomputer. Ebenso entspricht die Arbeitsbelastung aus dem Lastzyklus dem des abgeleiteten Motorauslastungsgrades, welcher beim Kettenbagger im oberen Bereich der mittleren Auslastung festzustellen ist (siehe Abbildung 4-4).

Die Abweichungen befinden sich mit circa 5,00 % im Rahmen der vorab festgelegten Grenzen. Allerdings weisen Messreihen beispielsweise mit der Standard-Einstellung eine deutliche kleinere Abweichung mit rund 3,00 % auf. Beim Mobilbagger sind ebenso kleinere Abweichungen zu verzeichnen. Vom zeitlichen Ablauf ist der Kettenbagger vor dem Mobilbagger getestet worden. Als Hypothese ist daher zu formulieren, dass die Abweichungen aufgrund fehlender Trainingseinheiten bei der heterogenen Gruppe der Maschinisten entstanden sind und bei den ersten Messreihen zu höheren Abweichungen geführt haben.

Tabelle 6-10: Zusammenstellung CAT 324E

Lastzyklus	Variante	Anteil	Verbrauch	Abweichung
Laden	P10	50%	19,84 l/h	4,81%
Planieren	P10	15%	28,12 l/h	5,40%
Fahren	S10-Schnellgang	10%	28,62 l/h	0,35%
Leerlauf	900 U/min	25%	2,86 l/h	-
Kombiniert			17,72 l/h	

Daten CAT Performance Handbook 46, S. 25-17:

	Low	Medium	High
324E	7,0-14,5 l/h	14,5-21,5 l/h	21,5-29,0 l/h

Daten Flottenmanagement:

	Anzahl	Betriebsstd.	Kraftstoff	Verbrauch
24,0 t Kettenbagger	354	386.542,50 h	6.621.603,64 l	17,13 l/h

Daten Bordcomputer:

Durchschnittliche Kraftstoffverbrauchsrate **17,00 l/h**

6.3.2.5 Messabgleich Durchflussmessgerät und Bordcomputer

Beim Kettenbagger bestand für eine Messreihe die Möglichkeit, mithilfe eines Diagnose-Rechners die Daten des Bordcomputers auszulesen. Mithilfe der Auslesung der erfassten Daten des Bordcomputers können die Werte vom Bordcomputer mit dem Durchflussmessgerät verglichen werden. Der Bordcomputer misst dabei nicht den tatsächlichen Kraftstoffverbrauch, sondern berechnet anhand der Einspritzdrücke den Kraftstoffverbrauch. Im Gegensatz dazu misst das Durchflussmessgerät den tatsächlichen Verbrauch zwischen dem Vor- und Rücklauf der Kraftstoffleitungen. Die Messgenauigkeit beim verwendeten Gerät beträgt 1,00 %. Die Messgenauigkeiten vom Bordcomputer sind nicht bekannt.

Eine Auslesung des erfassten Verbrauchs des Bordcomputers in Form von absoluten Werten ist nicht möglich. Zur Verfügung steht ein PDF-Dokument, in dem auf einem Graphen der Kraftstoffverbrauch über die Zykluszeit dargestellt ist.

Mit dem Durchflussmessgerät kann mithilfe einer Software der Kraftstoffverbrauch mit einem Intervall von 1,00 Sekunde erfasst werden. Somit kann ein absoluter Wert aber auch ein Graph mit einem 1,00-Sekunden-Intervall editiert werden.

Die beiden Graphen sind in einem CAD-Programm zusammen zu tragen, sodass ein direkter Vergleich der ermittelten Kraftstoffverbräuche möglich ist. In der Abbildung 6-7 sind beispielsweise die Kraftstoffverbräuche von vier Lastzyklen der Tätigkeit „Planieren“ dargestellt.

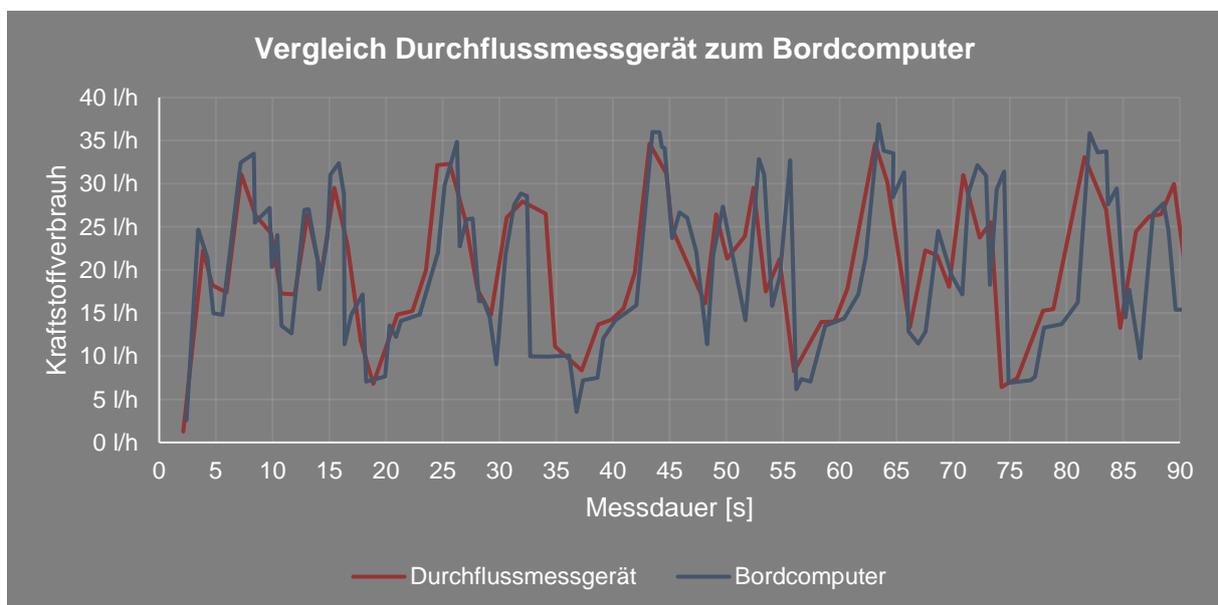


Abbildung 6-7: Kraftstoffverbrauch-Vergleich

Mit der Abbildung können die Kraftstoffverbräuche des Bordcomputers und des Durchflussmessgeräts visuell in Form von Graphen verglichen werden. Die letzte Unbekannte ist der absolute Kraftstoffverbrauch des Bordcomputers. Die Bestimmung erfolgte mithilfe der Fläche

in der CAD-Zeichnung, indem die Fläche mit einer Integralfunktion zu einem absoluten Wert berechnet wird. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 6-11 dargestellt. Es sei darauf hingewiesen, dass die dargestellten Ergebnisse des Bordcomputers keine ausgelesenen Ergebnisse eines Computers sind. Die Werte sind nach größtmöglicher Genauigkeit mithilfe der Integralrechnung zeichnerisch generiert worden. Beim Durchflussmessgerät ergab sich zwischen dem ausgelesenen Wert und dem zeichnerisch bestimmten Wert eine Abweichung von 1,0 %.

Auffällig bei den Ergebnissen ist, dass sämtliche Verbrauchswerte des Messgerätes von dem Bordcomputer unterschritten werden. Die Abweichung beträgt dabei im Mittel 4,43 %.

Tabelle 6-11: Vergleich Kraftstoffverbrauch: Durchflussmessgerät - Bordcomputer

Testreihe	1-1	1-2	2-1	2-2	4-1	4-2
Wert AIC	0,729 l	0,727 l	0,749 l	0,747 l	0,513 l	0,523 l
Wert BC	0,707 l	0,680 l	0,720 l	0,710 l	0,501 l	0,498 l
Abweichung	3,09 %	6,99 %	3,98 %	5,15 %	2,37 %	5,03 %
Gemittelte Abweichung	4,43 %					

6.3.2.6 Mehrverbrauch Dieselpartikelfilter

Während eines Testdurchlaufs hat sich die Regeneration des Dieselpartikelfilters eingeschaltet. Mit der Regeneration ist dabei das Freibrennen des Partikelfilters gemeint. Dies ist notwendig, da sich mit der Zeit im Filter Ruß- und Feinpartikel ablagern. Durch eine erhöhte Abgastemperatur ist daher in einem regelmäßigen Intervall diese Ablagerung zu entfernen, um ein Verstopfen des Filters zu unterbinden.

Es stellt sich jedoch die Frage, wie viel mehr an Kraftstoff benötigt wird, um dieses Filtersystem zu betreiben. Des Weiteren ist die Fragestellung zu beantworten, ob die baujahrbedingten Mehrverbräuche beim Kettenbagger, hervorgehend aus der Tabelle 4-7, aus dem Partikelfilter resultieren.

Der Testdurchlauf betrifft die Maschineneinstellung ECO mit der Motorstufe 10. Diese wurde dreimal absolviert, wobei die mittlere Kraftstoffverbrauchsrate 22,10 l/h beträgt. Beim Regenerierungsprozess des Partikelfilters beträgt die Kraftstoffverbrauchsrate 30,38 l/h, was einem Mehrverbrauch von 37,43 % entspricht. Dies ist allerdings nur ein temporärer Mehrverbrauch, der sich auf die Regenerationsphase beschränkt. Daher gilt es abzuschätzen, wie lange dieser Prozess andauert und in welchem Intervall dieser auftritt.

Zur besseren Abschätzung fand eine Rücksprache mit einem Hersteller von Dieselpartikelfiltern für Baumaschinen statt. Als kritische Annahme ist ein Intervall einer 30-minütigen Regeneration für alle 50 Betriebsstunden angesetzt, welcher im folgenden Rechenbeispiel für eine Gesamtnutzungsdauer von 10.000 h aufgeführt ist.

Tabelle 6-12: Rechenbeispiel Mehrverbrauch Dieselpartikelfilter

Betriebsstunden	Intervall	Anzahl	Dauer	Gesamt	Verbrauchsrate	Kraftstoff
10.000 h	50 h	200 Stück	0,5 h	100 h	8 l/h	800 l
Betriebsstunden	Verbrauchsrate				Gesamtkraftstoffverbrauch	
10.000 h	17,13 l/h				171.300 l	
					Mehrverbrauch	0,47%

Aus o.g. Rechenexempel geht ein Mehrverbrauch von 0,47 % einher. Dieser ist als nachrangig einzuordnen, da andere Faktoren, sei es die Maschineneinstellung (ECO- oder Power-Modus) oder fahrerbedingt, eine deutlich größere Tragweite hinsichtlich des Verbrauchs darstellen.

Ein identisches Ergebnis mit einem Mehrverbrauch von <1,0 % stellt der Traktorenhersteller John Deere im Rahmen einer Studie nach dem DLG-Power-Mix fest. Die Studie bestand aus Messungen mit einer Einsatzdauer von 260 Stunden. Der Regenerationsintervall beläuft sich auf 25 Stunden mit einer durchschnittlichen Dauer von 40 Minuten.⁸⁹

Die aufgestellte Berechnung bezieht sich ausschließlich auf die Betrachtung des Kraftstoffverbrauchs. Je nach Maschine und Partikelfilterstand kann es vorkommen, dass die Funktion der Maschine eingeschränkt ist. Für den Vorgang des Freibrennens ist die Maschine abzustellen, demzufolge unproduktiv und stellt durch den Ausfall der Maschine und des Fahrers einen erheblichen Kostenfaktor dar. Dies ist jedoch stark modellabhängig und von der Reinigungsstrategie (häufiges Freibrennen oder Abwarten bis Filter vollständig einmal freigebrannt wird) abhängig. Eine Ableitung von Annahmen oder Ansätzen kann hieraus nicht erfolgen. Daher wird dieser Sachverhalt im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

⁸⁹ Vgl. [47] Neunaber, Wilmer: Es geht auch ohne AdBlue, 2011, S. 17

6.3.3 Kleinlader

Der Kleinlader ist ein CAT 907H2 mit einem Betriebsgewicht von 5,81 t aus dem Baujahr 2013 und hatte zum damaligen Testzeitpunkt 25 Betriebsstunden absolviert. Der Motor weist eine Leistung von 52 kW auf und erfüllt die Abgasstufe IIIA. Ein Dieselpartikelfilter zur Abgasnachbehandlung ist nicht vorhanden.



Abbildung 6-8: Kleinlader CAT 907H2

Verschiedene Leistungsstufen in Form eines Power- oder ECO-Modus sind nicht vorhanden. Als Anbaugeräte stehen für den Kleinlader eine Klappschaufel ($0,70 \text{ m}^3$) sowie eine Stapelrichtung zur Verfügung. In Summe wurden 31 Messreihen mit der Maschine umgesetzt.

6.3.3.1 Lastzyklus „Heben“

Aufbau und Definition

Der Lastzyklus „Heben“ ist auf einem tragfähigen Untergrund durchzuführen. Auf dem Übungsgelände wurde dies auf einer Betonplatte umgesetzt. Die Soll-Höhe ist mithilfe von zwei Stativen, an denen ein gut sichtbares Absperrband befestigt wird, kenntlich gemacht.

Das Gewicht wird bei der Durchführung von der Hubhydraulik auf die Soll-Höhe angehoben (Arbeitsschritt 1) und wieder auf die Ausgangsposition abgesenkt (Arbeitsschritt 2).

Durchführung

Trotz definierter Zeiten sind anfänglich hohe Varianzen aufgetreten. Dieses lag an den undefinierten Parametern der Motordrehzahl und der Hydrauliksteuerung. Hierzu sind zwei verschiedene Varianten entwickelt worden, die diese beiden freien Variablen einschränken sollen.

Bei der ersten Variante wird beim Anheben des Gewichtes das Gaspedal bis zum Anschlag durchgedrückt und beim Absenken ohne Gas gearbeitet. Der Joystick für die Hydrauliksteuerung wird ebenso bis zum Anschlag betätigt. Das Absenken ohne Gas resultiert aus einer zu schnellen Absenkgeschwindigkeit, die nicht mehr genau zu steuern ist, sodass Beschädigungen an der Maschine oder auf der Betonplatte auftreten können.

Die zweite Variante wird mit einer konstanten Motordrehzahl auf Halbgas umgesetzt, bei der ebenso die Hydrauliksteuerung mit maximaler Geschwindigkeit zu betätigen ist.

Ergebnis

Tabelle 6-13: Ergebnis CAT 907H2 Lastzyklus „Heben“

Variante	Anheben/Absenken	Verbrauchsrate	Zykluszeit	Abweichung
1	Vollgas/Ohne Gas	6,03 l/h	13,87 Sek.	1,80%
2	Halbgas	5,74 l/h	13,69 Sek.	7,90%

Wie aus der oben dargestellten Tabelle 6-13 ersichtlich wird, weisen die beiden Varianten ähnliche Kraftstoffverbräuche sowie fast identische Zeiten auf. Bei der Variante 1 gibt es allerdings wesentlich geringere Abweichungen als bei der Variante 2.

Gesicherte Erkenntnisse liegen für die Abweichungen nicht vor. Als Vermutung wird aufgestellt, dass die höhere Abweichung aufgrund des nicht fest arretierten Holzkeils zustande kommt. Der Holzkeil dient dazu, das Spiel des Gaspedals zu limitieren, sodass der Motor auf einer konstanten Drehzahl betrieben werden kann. Eine Limitierung über eine pauschal festgelegte Drehzahl war nicht möglich, da die Maschine nicht über einen Drehzahlmesser verfügt und somit eine Kontrollmöglichkeit entfällt. Die Abweichung könnte aufgrund der Anzahl der Durchläufe zustande kommen, da sich die Position des nicht festarretierten Holzkeils nach einem Durchgang verändern kann.

6.3.3.2 Lastzyklus „Kleines Ladespiel“

Aufbau und Definition

Die Fahrwege sind durch Markierspray kenntlich zu machen. Die Soll-Höhe für die Entladung wird mithilfe von zwei Stativen und einem Absperrband vorgegeben. Ebenso sind zeitliche Definitionen für die beiden Varianten zu treffen sowie der Start und das Ende der Hub- und Absenkvorgänge. Ein homogener Boden, wie ein Kies, stand zum Testzeitpunkt nicht zur Verfügung.

Durchführung

Der Untergrund besteht aus einem verdichteten Recycling-Material, welches jedoch mit dem Schluff-Boden vermischt ist. Gleiches gilt für das Haufwerk aus Recycling-Material. Bei der Durchführung der ersten Variante zeigt sich, dass ein reproduzierbares, gleichmäßiges Beladen der Schaufel, insbesondere mit verschiedenen Fahrern und unterschiedlichem Fahrvermögen, aufgrund der widrigen Rahmenbedingungen nicht möglich ist.

Die zweite Variante betrifft eine Umsetzung mit einem definierten Gewicht. Der Einfachheit halber ist hierbei auf das Be- und Entladen des definierten Gewichts verzichtet worden. Bei

dem Be- und Entladen des Gewichtes ist die Maschine sehr genau zu manövrieren, um die Gabelzinken der Stapleinrichtung unter das Gewicht zu positionieren. Für einen reproduzierbaren Lastzyklus stellt sich dies als sehr schwierig dar. Daher ist lediglich das Gewicht abzusetzen und wieder anzuheben.

Ergebnis

Aus der Tabelle 6-14 gehen die Ergebnisse des Lastzyklus' „Kleines Ladespiel“ hervor. Wie bei der Durchführung schon beschrieben, stellen sich die Abweichungen bei der ersten Variante aufgrund unterschiedlicher Schaufelfüllgraden als sehr groß dar.

Die Varianz ist bei der zweiten Variante wesentlich geringer und weist mit einer Abweichung von 1,98 % eine Toleranz auf, die den Anforderungen für einen reproduzierbaren Lastzyklus entspricht.

Tabelle 6-14: Ergebnis CAT 907H2 Lastzyklus „Kleines Ladespiel“

Variante	Anbaugerät	Last	Verbrauchsrate	Zykluszeit	Abweichung
1	Klappschaufel	RC-Material	6,25 l/h	41,66 Sek.	26,28%
2	Stapeleinrichtung	def. Gewicht	5,83 l/h	36,67 Sek.	1,98%

6.3.3.3 Lastzyklus „Fahren“

Aufbau und Definition

Zum Testzeitpunkt stand als Fahrstrecke nur ein Untergrund in Form vom Schluff zur Verfügung. Der Untergrund war allerdings trocken sowie tragfähig und ist vor Testbeginn abgezogen und verdichtet worden. Die Fahrstrecke mit einer Länge von 120,00 m stellt eine lange Gerade dar, mit einem Wendehammer am jeweiligen Ende.

Als Variation sind die Fahrten vorwärts und rückwärts sowie unbeladen und mit einem definierten Gewicht vorzunehmen.

Durchführung

Trotz der entsprechenden Vorbereitung und Modellierung der Strecke stellt sich die Durchführung als schwierig dar. Die Unebenheiten sorgen dafür, dass ein konstantes Halten der Geschwindigkeit schwierig ist. Aufgrund der Rahmenbedingungen ist die Festlegung von Brems- und Beschleunigungspunkten ebenfalls schwierig.

Ergebnis

Die Ergebnisse sind in der Tabelle 6-15 dargestellt. Ein Unterschied bei den Varianten „Vorwärts/Rückwärts“ ist nicht messbar. Zwischen den Varianten „Ohne Last“ und „Definiertem Gewicht“ resultiert ein Verbrauchsdelta von 0,21 l/h, welches auf der durchschnittlichen Verbrauchsrate einer Differenz von 2,28 % entspricht und als vernachlässigbar einzustufen ist.

Die Abweichungen fallen bei beiden Varianten mit rund 5 % im Rahmen der festgelegten Grenzen aus. Für einen trivialen Fahrzyklus ist dies dennoch als hoch einzuordnen, was anhand der nicht vollständig definierbaren Rahmenbedingungen der Teststrecke zu begründen ist.

Tabelle 6-15: Ergebnis CAT 907H2 Lastzyklus „Fahren“

Variante	Last	Verbrauchsrate	Zykluszeit	Abweichung
1	Ohne Last	9,01 l/h	126,00 Sek.	5,60%
2	def. Gewicht	9,22 l/h	133,50 Sek.	5,15%

6.3.3.4 Zusammenstellung

Zur Zusammenstellung fehlt noch der Verbrauch im Leerlauf. Bei einer Messdauer von 10,0 Minuten ist eine Verbrauchsrate von 1,50 l/h festzustellen.

Für den Kleinlader sind zur Lastzyklusdefinition zwei Varianten in der Tabelle 6-16 als Ergebnis zusammengestellt. Die Variante 1 beinhaltet die Tätigkeiten „Heben“, „Fahren“ und „Leerlauf“, wohingegen die Variante 2 als zusätzlichen Zyklus das „Kleine Ladespiel“ berücksichtigt. Bei Variante 1 beträgt die kombinierte Verbrauchsrate 5,75 l/h und bei der Variante 2 5,50 l/h, was einer Differenz von 4,35 % entspricht.

In Anlehnung an die Auswertung der Motorauslastung aus Kapitel 4.1.1.4 ist ein Kleinlader als Hilfsgerät von der Motorauslastung in einem Bereich zwischen Gering und Mittel einzuordnen. Dies würde einer Verbrauchsrate nach Abgleich zum Performance Handbook von circa 4,50 l/h entsprechen. Mit einer Verbrauchsrate von 5,50 l/h aus den Lastzyklen fällt diese höher aus. Demzufolge besteht ein geringfügiger Optimierungsbedarf hinsichtlich der Testbedingungen in Richtung einer weniger harten Testweise.

Tabelle 6-16: Zusammenstellung CAT 907H2

Variante 1

Lastzyklen	Variante	Anteil	Verbrauch	Abweichung
Heben	Vollgas/Ohne Gas	30%	5,38 l/h	2,10%
Fahren	def. Gewicht	40%	9,22 l/h	5,15%
Leerlauf		30%	1,50 l/h	
Kombiniert			5,75 l/h	

Variante 2

Lastzyklen	Variante	Anteil	Verbrauch	Abweichung
Heben	Vollgas/Ohne Gas	10%	5,38 l/h	2,10%
Kl. Ladespiel	def. Gewicht	30%	5,83 l/h	1,98%
Fahren	def. Gewicht	30%	9,22 l/h	5,15%
Leerlauf		30%	1,50 l/h	
Kombiniert			5,50 l/h	

Daten CAT Performance Handbook 45, S. 25-37:

	Low	Medium	High
907H2	0,0-4,2 l/h	4,2-7,9 l/h	7,9-12,1 l/h

6.3.4 Großlader

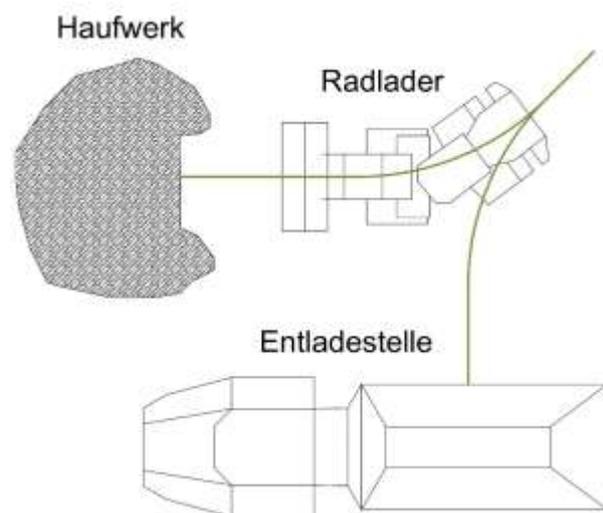
Der Großlader ist ein CAT 966K mit einer 4,20 m³ großen Schaufel. Der Radlader stammt aus dem Baujahr 2012 und weist zum Testzeitpunkt 3.350 Betriebsstunden auf. Der Radlader hat ein Betriebsgewicht von 24,0 t und verfügt über einen 219 kW starken Motor, welcher die Stufe IIIA erfüllt. Über einen Dieselpartikelfilter sowie verschiedene Leistungs- oder Motorstufen verfügt der Radlader nicht. Für die Maschine sind 107 Messreihen umgesetzt worden.

In dem Radlader ist eine geeichte Wiegeeinrichtung der Firma Pfreundt vom Typ WK 50 verbaut. Dies ermöglicht zusätzlich die Bewertung der Produktivität. Das Verwiegen wird dabei bewerkstelligt, indem der Hubrahmen mit einer konstanten Geschwindigkeit angehoben wird und dabei einen definierten Messbereich durchfährt. Damit die Messung erfolgreich durchgeführt werden kann, ist diese auf einen tragfähigen Untergrund durchzuführen. Welche Auswirkungen dies auf den Arbeitsablauf hat, wird im späteren Verlauf diskutiert.

Beim Großladertest kommt der Schaufelfüllstrategie eine besondere Bedeutung zu. Diese bestimmt maßgeblich die Produktivität sowie den Kraftstoffverbrauch. Zum Einsatz in dieser Testreihe kommt die „Harte Fahrweise“. Eine dezidierte Untersuchung zu unterschiedlichen Schaufelfüllstrategien erfolgt im Kapitel 6.4.1.

6.3.4.1 Lastzyklus „Kleines Ladespiel“

Aufbau und Definition



Das „Kleine Ladespiel“ entspricht vom Arbeitsablauf einer LKW-Beladung. Aufgrund der Fahrwege, die in der Vogelperspektive wie ein „Y“ aussehen, bezeichnet man dies als Y-Ladespiel. Dabei sticht der Radlader in das Haufwerk, nimmt Material auf, fährt rückwärts in einem Bogen zurück und in einem gegensätzlichen Bogen zur Entladestelle. Nach der Entladung fährt dieser im gleichen Bogen zurück und in Vorwärtsrichtung und einem gegensätzlichen Bogen wieder in die Ausgangsposition. Sämtliche Wege vom Ab-

Abbildung 6-9: Lastzyklus „Kleines Ladespiel“

stand zum Haufwerk, über den Bogenwinkel bis hin zum Wendepunkt und der Entladestelle sind mit einem Markierspray zu definieren. Neben der Festlegung der Fahrwege ist die Entladehöhe mit Stativen zu regulieren. Ferner ist die Schaufelfüllstrategie zu protokollieren.

Durchführung

Ein Sattelkipper mit einer ausreichenden Größe für einen 24,0 t Radlader stand für den Test nicht zur Verfügung. Ebenso ist zur Vermeidung einer Materialdurchmischung vom 0/32 Kies dieser in seiner Position zu belassen und kein zweites Haufwerk zu erstellen. Hiermit geht einher, dass die Entnahmestelle gleichzeitig der Entladestelle entspricht. Um dennoch die Lenkkräfte eines Y-Ladespiels nachzustellen, ist das Entladen des Materials zurück ins Haufwerk mit einem zusätzlichen Bogen zu versehen. Vorteilhaft bei dieser Variante ist, dass sich die Fahrwege ins Haufwerk durch eine Entnahme des Materials nicht verändern.

Die Tests sind mit mehreren Durchläufen zu absolvieren. Die Wiegeeinrichtung beeinflusst den Ablauf in Form der Wiegung, die zu Leerzeiten führt. Problematisch hierbei ist jedoch, dass es häufig zu Fehlwiegungen gekommen ist. Diese verfälschen die Ergebnisse im Gesamtkraftstoffverbrauch, da vereinzelt mehrere Wiegungen notwendig waren, bevor eine korrekte Wiegung erfolgt ist.

Die Wahl der Gangart ist ebenso zu definieren. Würde beispielsweise die Automatik auf Gang 2-4 eingestellt, steht der 1. Gang nicht zur Verfügung. Aufgrund des geringeren Drehmoments im 2. Gang fällt der Schaufelfüllgrad geringer aus. Diesen Sachverhalt gilt es bei der Durchführung zu berücksichtigen und zu protokollieren.

Als Schaufelfüllstrategie kommt die „Harte Fahrweise“ zum Einsatz. Dabei sticht der Radlader mit hoher Geschwindigkeit ins Haufwerk. Anschließend wird nur die Schaufel gekippt und der Befüllvorgang ist beendet. Aufgrund der einfachen Umsetzung und des geringeren Anspruchs an das Fahrvermögen geht mit dieser Strategie eine höhere Reproduzierbarkeit einher.⁹⁰

Um ein kleines Ladespiel bei einer Volllast ohne den Leerlaufanteil der Wiegung durchführen zu können, ist eine weitere Variante entwickelt worden. Es wird dabei kein Material aufgenommen, sondern mit der Schaufel gegen das Haufwerk gefahren. Dabei wird mit Vollgas gegen das Haufwerk gefahren, ohne dass an den Rädern Schlupf auftritt. Die Dauer für diesen Vorgang entspricht der Kraftstoffverbrauchsrate eines Befüllvorgangs mit Material. Der Ablauf des Ladespiels fällt ansonsten identisch mit der Variante „Boden“ aus.

Eine Variante mit einem definierten Gewicht ist schwer umzusetzen. Das Problem stellt sich in der Be- bzw. Entladung dar. Beispielsweise könnten die beim Fahrtstest genutzten Stahlbrammen hierfür verwendet werden. Allerdings sind diese weder leicht aufzunehmen noch vor einer Zerstörung bei einer Fallhöhe von 3,50 m im dauerhaften Testbetrieb zu bewahren. Daher schließt sich ein Einsatz aus.

⁹⁰ Vgl. [74] Entwurf zur ISO 11152, 2011, S. 25

Ergebnis

In Summe sind für das „Kleine Ladespiel“ 27 gewertete Durchläufe umgesetzt worden. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 6-17 dargestellt, wobei die zwei aufgeführten Varianten 13 Durchläufe beinhalten.

Tabelle 6-17: Ergebnis CAT 966K Lastzyklus „Kleines Ladespiel“

Variante	Material	Verbrauchsrate	Produktivität	Zykluszeit	Abweichung
1	Kies	23,86 l/h	12,30 t/l	56,51 Sek.	5,15%
2	Ohne	35,85 l/h	18,72 t/l	36,17 Sek.	6,89%

Auffällig bei den oben aufgeführten Varianten sind die Differenzen bei der Zykluszeit. Die Dauer bei der Variante mit Materialbewegung fällt bei der durchschnittlichen Zykluszeit um 20,34 Sekunden bzw. 56,23 % länger aus. Obwohl ein tragfähiger Untergrund vorhanden war, ist eine Verwiegung während des Fahrbetriebs nicht möglich gewesen. Es sind häufig Fehlwiegungen aufgetreten, die einen Abbruch des Durchlaufs zur Folge hatten. Die längere Zeit ist daher für die Wiegung der Schaufel im Stillstand erforderlich. Dies ist aufgrund der Reproduzierbarkeit ohne eine zusätzliche hydraulische Unterstützung in Form des Gaspedals festgelegt worden, da dies je nach Betätigung zu weiteren Verfälschungen führen kann.

Als Hypothese ist aufzustellen, dass sich mit einer Betrachtung ohne Erdbewegung die Reproduzierbarkeit besser darstellt, da das Aufnehmen von Material mit einem Radlader ein gewisses Leistungsniveau erfordert. Der Maschinist muss dabei den Widerstand im Haufwerk erkennen, Schlupf an den Rädern vermeiden sowie die Hydraulik ansteuern, um ein fortwährendes Befüllen der Schaufel zu gewährleisten. Die Ergebnisse stellen sich von der Abweichung hierzu als gegensätzlich dar. Die Variante ohne eine Erdbewegung weist eine höhere Abweichung als die Variante mit der Aufnahme von Kiesmaterial auf. Eine mögliche Begründung hierfür kann der deutlich schnellere Arbeitsablauf mit einer deutlich kürzeren Zykluszeit sein.

Ferner ist die Verbrauchsrate beim Lastzyklus ohne Erdbewegung mit 35,85 l/h als sehr hoch einzuordnen. Der Auslastungsgrad der Maschine würde hiermit weit über den Werten aus der Praxis liegen. Wie beim Hydraulikbagger ist hiermit nachgewiesen, dass bei Baumaschinen ein realitätsnaher Verbrauch nicht zwingend eine Erdbewegung erfordert.

Dennoch ist beim Radlader die Variante mit einer Erdbewegung vorzuziehen, da der Zyklusablauf mit einer Verwiegung von Material die Praxis widerspiegelt und deutlich realistischere Verbräuche erzielt.

6.3.4.2 Lastzyklus „Großes Ladespiel“

Aufbau und Definition

Der Ablauf beim „Großen Ladespiel“ ist nahezu identisch mit dem kleinen Ladespiel. Der Unterschied liegt in der längeren Fahrstrecke sowie in der Rampe, die vor dem Entladen des Materials zu befahren ist. Der Aufbau des Lastzyklus geht aus der Abbildung 6-10 hervor. Eine Höhenvorgabe zum Abkippen des Materials wird ebenfalls über Stative gewährleistet.

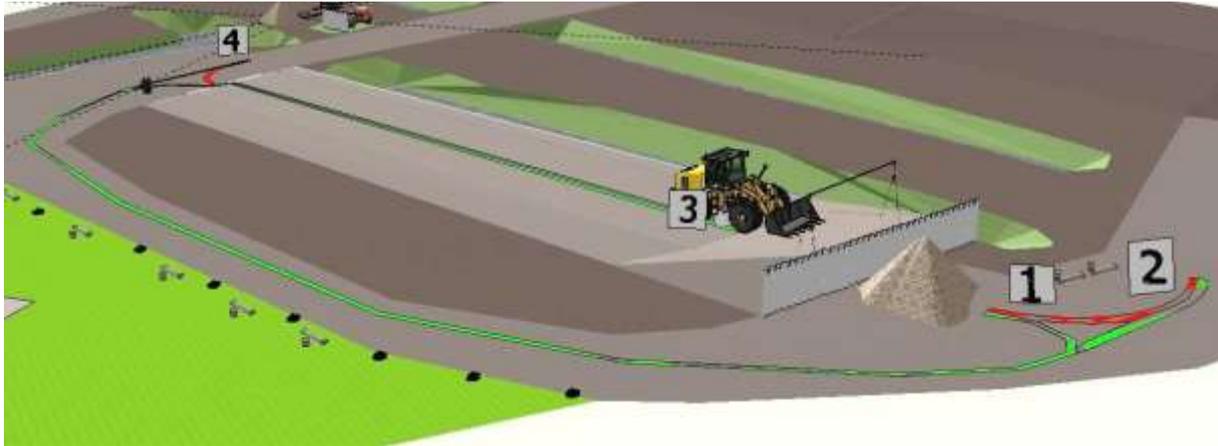


Abbildung 6-10: Aufbau Lastzyklus "Großes Ladespiel"

Durchführung

Analog zum kleinen Ladespiel sind ebenfalls zwei Varianten mit und ohne eine Erdbewegung durchzuführen. Das Wiegen des Materials ist direkt nach dem Befüllen der Schaufel durchzuführen.

Hinsichtlich der Durchführung stellt sich die geringe Breite der Rampe mit 4,0 m als nachteilig für den Arbeitsablauf dar. Aufgrund der Baugröße der Maschine ist ein genaues Manövrieren zum Entladepunkt erforderlich, was den Arbeitsablauf beeinträchtigt.

Ergebnis

Die Ergebnisse für das „Große Ladespiel“ sind der Tabelle 6-18 zu entnehmen. Wie beim „Kleinen Ladespiel“ fällt bei der Variante ohne eine Erdbewegung die Verbrauchsrate höher aus. Aufgrund der Wiegung des Materials verlängert sich die Zykluszeit bei der Variante 1 im Mittel um 24,33 Sekunden. Die Abweichung fällt mit 3,35 % im Gegensatz zum „Kleinen Ladespiel“ bei der Variante 2 kleiner aus. Eine Diskussion hierzu findet in der Zusammenstellung statt.

Tabelle 6-18: Ergebnis CAT 966K Lastzyklus „Großes Ladespiel“

Variante	Material	Verbrauchsrate	Produktivität	Zykluszeit	Abweichung
1	Kies	26,73 l/h	6,03 t/l	126,00 Sek.	6,12%
2	Ohne	30,94 l/h	7,69 t/l	101,67 Sek.	3,35%

Eine ausführlichere Betrachtung, inwieweit die Verbräuche sich mit und ohne Last darstellen, ist im folgenden Kapitel umgesetzt.

6.3.4.3 Lastzyklus „Fahren“

Aufbau und Definition

Die Fahrstrecke ist identisch mit der des Mobilbaggers. Diese weist eine Bogenform auf, wobei sich an den jeweiligen Enden ein Wendehammer befindet. Der Fahruntergrund besteht aus einem RC-Material, welches mit einem Walzenzug planiert und verdichtet ist. Die Gesamtlänge beträgt 230,0 m. Als Variation ist mit und ohne ein definiertes Gewicht zu testen. Weitere Einstellungen können maschinenseitig nur bei der Gangwahl vorgenommen werden, was aber beim Radlader für den Fahrtstest nicht zielführend ist. Als definiertes Gewicht kommen Stahlbrammen mit einer Masse von 6,0 t zum Einsatz. Die Gangwahl ist auf 2F-4F festgelegt.

Durchführung

Damit bei der Durchführung möglichst reproduzierbare Ergebnisse erzielt werden, sind die Brems- und Beschleunigungspunkte zu definieren. Ebenso ist eine möglichst konstante Fahrweise mit einem Fokus auf dem Halten der Maximalgeschwindigkeit erforderlich.

Ergebnis

Die Ergebnisse mit den beiden Varianten „Ohne Last“ und „6,0 t“ sind in der Tabelle 6-19 aufgeführt. Bei der Einhaltung der definierten Zeiten und hinsichtlich der Abweichungen stellen sich die Varianten als nahezu identisch dar. Das Mehrgewicht von 6,0 t in Form der Stahlbrammen führt zu einer Steigerung der Verbrauchsrate von 28,37 l/h auf 34,13 l/h. Bei der Zusammenstellung der Zyklen erfolgt hierzu eine Diskussion, inwieweit dies relevant ist.

Tabelle 6-19: Ergebnis CAT 966K Lastzyklus „Fahren“

Variante	Last	Verbrauchsrate	Produktivität	Zykluszeit	Abweichung
1	Ohne Last	28,37 l/h	559,09 m/l	104,91 Sek.	4,66%
2	6,0 t	34,13 l/h	461,60 m/l	105,37 Sek.	4,53%

Die durchschnittliche Geschwindigkeit beträgt 4,41 km/h. Die geringe Geschwindigkeit ist aufgrund der Wendehammer zu begründen, die eine entsprechende Verlangsamung in der Geschwindigkeit und genaues Manövrieren erfordern. Als Handlungsansatz gilt es, wie beim Mobilbagger, eine Teststrecke zu modellieren, die eine möglichst konstante Fahrweise und dauerhafte Einhaltung der Geschwindigkeit ermöglicht.

6.3.4.4 Zusammenstellung

Für die Zusammenstellung der Zyklen fehlt der Verbrauch für den Lastzyklus „Leerlauf“. Die betrachtete Maschine verfügt über einen zweistufigen Leerlauf. Nach einer Dauer von drei

Minuten reduziert sich die Drehzahl im Leerlauf von 800 U/min auf 650 U/min. Hierdurch sinkt die Verbrauchsrate von 3,91 l/h auf 3,00 l/h. Als auszuweisender Wert ist der Leerlauf mit einer Drehzahl bei 650 U/min zu wählen, da dieser zeitlich nicht variabel ist.

Die Auswahl der Lastzyklen für den Großlader ist noch weiter zu diskutieren. Bei den Ladespielen stellen die Varianten ohne eine Erdbewegung höhere Verbräuche dar. Im Gegensatz dazu ist beim Lastzyklus „Fahren“ der Verbrauch höher, sofern mit einer definierten Last von 6,0 t in Form der Stahlbrammen getestet wird. Im Gegensatz dazu führen insbesondere beim „Kleinen Ladespiel“ die permanent auftretenden Beschleunigungs- und Bremsvorgänge zu einem Mehrverbrauch, bei der eine zusätzliche Last als Gewichtungsfaktor auf den Verbrauch an Bedeutung verliert.

Dennoch gilt es abzuwägen, ob die Testbedingungen bei einer Zykluszeit von gemittelt 36,17 Sekunden die Praxis widerspiegeln. Die Zeiten aus Kapitel 4.1.4 weisen eine Dauer von durchschnittlich 1:53 Minute auf. Hieraus ist abzuleiten, dass in der Praxis eine Verwiegung häufiger vorkommt und die Variante mit 36,17 Sekunden eine Maximalbelastung darstellt. Aus diesem Grund sind für die Zusammenstellung die Varianten mit einer Erdbewegung und einer längeren Zykluszeit gewählt.

Als Fahrzyklus ist die Variante ohne eine Last zu wählen, da ein Verfahren der Maschine in der Regel ohne Last stattfindet. Sofern sich Material in der Schaufel befindet, handelt es sich vorwiegend um ein Ladespiel.

Tabelle 6-20: Zusammenstellung CAT 966K

Zusammenstellung Lastzyklen

Lastzyklen	Variante	Anteil	Verbrauch	Abweichung
Kleines Ladespiel	Kies	30%	23,86 l/h	5,15%
Großes Ladespiel	Kies	25%	26,73 l/h	6,12%
Fahren	Ohne Last	15%	28,37 l/h	4,66%
Leerlauf	650 U/min	30%	3,00 l/h	-
Kombiniert			19,00 l/h	

Daten CAT Performance Handbook 46, S. 25-39:

	Low	Medium	High
966K	10,1-14,6 l/h	14,6-17,9 l/h	17,9-22,4 l/h

Daten Flottenmanagement:

	Anzahl	Betriebsstd.	Kraftstoff	Verbrauch
24,0 t Radlader	747	1.054.450,30 h	15.762.215,18 l	14,95 l/h

Daten Bordcomputer:

Durchschnittliche Kraftstoffverbrauchsrate Testmaschine **26,24 l/h**

Die ausgewählten Lastzyklen sowie weitere Referenzwerte sind in der Tabelle 6-20 dargestellt. Der kombinierte Verbrauch aus den zusammengestellten Lastzyklen mit den jeweiligen Anteilen beträgt 19,00 l/h. Im Vergleich dazu geht aus dem Performance Handbook bei einem baugleichen Radlader ein Maximalverbrauch von 22,4 l/h hervor. Sowohl in der Testreihe als auch beim Bordcomputer sind deutlich höhere Werte erzielt worden. Daher sind für diesen Maschinentyp die Referenzwerte aus dem Performance Handbook als falsch einzuordnen. Laut dem Performance Handbook sind dies die Telematikdaten aller weltweit im Einsatz befindlichen Maschinen.⁹¹ Es handelt sich bei den Werten um eine gemittelte Verbrauchsrate und nicht um den Maximalverbrauch, wie er bei den anderen Maschinentypen ausgewiesen wird.

Die Referenzwerte aus dem Flottenmanagement weisen eine Datenbasis von 747 Maschinen mit einer ähnlichen Baugröße hin. Die durchschnittliche Verbrauchsrate liegt bei 14,95 l/h. Es gilt hier zu erwähnen, dass in dieser Gesamtbetrachtung neuere Maschinenmodelle, welche einen deutlichen niedrigen Verbrauch aufweisen, integriert sind. Einen genaueren Referenzwert stellen Maschinen aus dem gleichen Baujahr wie die getestete Maschine auf, welche bei einer Anzahl mit 186 Stück eine Verbrauchsrate von 16,93 l/h aufweisen.

Die durchgeführte Testreihe und die entwickelten Methoden stellen mit einer Abweichung von rund 5,0 % einen repräsentativen Test dar. Dies liegt u.a. an der Schaufelfüllstrategie, welche mit einer harten Fahrweise ein hohes Maß an Reproduzierbarkeit aufweist. Eine detailliertere Betrachtung der Schaufelfüllstrategien und verschiedener Schüttgüter mit deren Auswirkung auf die Produktivität und Reproduzierbarkeit folgen in der III. Testreihe.

6.3.5 Erkenntnisse und Handlungsfelder II. Testreihe

Als wichtigste Erkenntnis geht aus der II. Testreihe hervor, dass ein praxisnaher und reproduzierbarer In-Situ-Test für Hydraulikbagger und Radlader möglich ist. Die Abweichung der Testreihen beträgt im Mittel <5,0 %, sodass mit der aufgestellten Testmethodik sogar der Fahrer als Einflussfaktor eingegrenzt werden kann.

Beim Hydraulikbagger hat sich eine Durchführung ohne eine Erdbewegung bewährt. Die Messung der Produktivität stellt sich dabei als schwierig dar, da hierfür weitere Gerätschaften wie ein LKW und vorzugsweise eine LKW-Waage erforderlich sind. Bei einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für eine Messreihe stellt sich dieser Aufwand als unwirtschaftlich dar.

Für die Radlader gibt es aufgrund der integrierten Wiegetechnik diese Problemstellung nicht. Allerdings kommt es durch die Verwiegung des Materials zu längeren Zykluszeiten. Ebenso können Fehlmessungen auftreten, die nachträglich aus den Ergebnissen rechnerisch auszuklammern sind.

⁹¹ Vgl. [25] Caterpillar Inc.: Caterpillar Performance Handbook 46, 2016, S. 25-39

Trotz der guten Ergebnisse besteht noch ein weiterer Handlungsbedarf für die Optimierung der Rahmenbedingungen. Dies betrifft mehrere Faktoren im Bereich der Testdauer, der Fahrstrecke sowie beim Haufwerk für den Radlader.

Als Testdauer ist pro Maschine mit einer Einsatzzeit von einer Woche kalkuliert worden. Die Anzahl an Fahrern und Variationen sowie das Testprozedere an sich erfordert eine Vorlaufphase, bevor reproduzierbare Ergebnisse erzielt werden. Ebenso ist zu betonen, dass ein Großteil der Fahrer Umschüler sind, welche noch keine jahrelange Erfahrung mit einer Baumaschine aufweisen. Daher ist vor der tatsächlichen Testdurchführung den Maschinisten eine ausreichende Zeit für die Abläufe und Anforderungen einzuräumen.

Als Fahrstrecke sind verschiedene Untergründe genutzt worden, mit denen reproduzierbare Ergebnisse möglich sind. Aufgrund der örtlichen Gegebenheiten des Übungsgeländes war die Herstellung einer Rundstrecke mit einem einheitlichen Untergrund nicht möglich. Die notwendigen Wendehammer, die kleine Wendekreise mit niedrigen Geschwindigkeiten erfordern, haben höhere Abweichungen, als dies bei einem trivialen Fahrtstest der Fall ist, erzielt. Um eine optimale Reproduzierbarkeit zu generieren, ist auf einer Rundstrecke zu testen, die eine konstante Geschwindigkeit ermöglicht.

Für die Messreihe sind 100,0 t Kies 16/32 zur Verfügung gestellt worden. Die Menge ist allerdings so gering, dass ein ausreichend dimensioniertes zweites Haufwerk für den Radlader-Test nicht umsetzbar ist. Die Entladestelle entsprach daher immer der Entnahmestelle. Für das Y-Arbeitsspiel des Radladers ist der Ablauf leicht variiert worden. Des Weiteren variiert der Neigungswinkel des Haufwerks, da die Material-Entladung die Kubatur des Haufwerks verändern kann.

Zusätzliche Forschungsfelder stellen sich nach der II. Testreihe sowohl beim Hydraulikbagger als auch beim Radlader dar. Für den Radlader gilt es noch zu untersuchen, inwieweit sich unterschiedliche Schüttgüter und Schaufelfüllstrategien bei einem Lastzyklus auswirken. Beim Hydraulikbagger fehlt noch eine Betrachtung von unterschiedlichen Anbaugeräten, da durch vollhydraulische Schnellwechsler das Arbeitsspektrum sowie der Trend, den Bagger als Universalgerät zu nutzen, deutlich zugenommen hat.

Ferner ist nach Vorstellung der Ergebnisse bei diversen Herstellern die Fragestellung offen, ob eine starre Festlegung der definierten Zeiten ausreichend für die Ausweisung der Energieeffizienz ist. Daher erfolgt bei der III. Testreihe ein Fokus auf eine zeitliche Varianz zur Bestimmung der Maximaleffizienz.

6.4 III. Testreihe

Die Ziele der III. Testreihe lassen sich aus den oben beschriebenen Handlungs- und Forschungsfeldern für den Radlader ableiten. Die Testreihe fand im Zeitraum vom 04.10.16 bis 14.10.16 auf dem Hafengelände der Stadtwerke Essen statt (siehe Abbildung 6-2).

Als Testgerät stand ein 24,0 t Radlader vom Typ CAT 966K XE zur Verfügung. Die Maschine stammt aus dem Baujahr 2014 mit 3.404 Betriebsstunden und verfügt über einen 243 kW starken Motor. Als Anbaugerät kommt eine 4,20 m³ große Schaufel mit Zähnen zum Einsatz und der Radlader verfügt über eine Wiegeeinrichtung der Firma Pfreundt vom Typ WK50-S.

Im Vergleich zum Radlader aus der vorherigen Messreihe hat der Radlader mit der Kennung XE einen anderen Antriebsstrang. Das Getriebe besteht aus einem stufenlosen System, womit etwaige Verluste durch einen Gangwechsel entfallen. Der Hersteller weist bei diesem Antriebsstrang einen Verbrauchsvorteil von bis zu 25 % aus.⁹²

Im Detail ist zuerst der Ablauf eines Ladespiels näher zu betrachten. Im Rahmen der Messreihe ist für ein „Kleines Ladespiel“ die Verbrauchsrate sowie der Totalverbrauch aufgezeichnet worden. Für diesen Lastzyklus ergibt sich daraus resultierend folgendes Diagramm (siehe Abbildung 6-11).

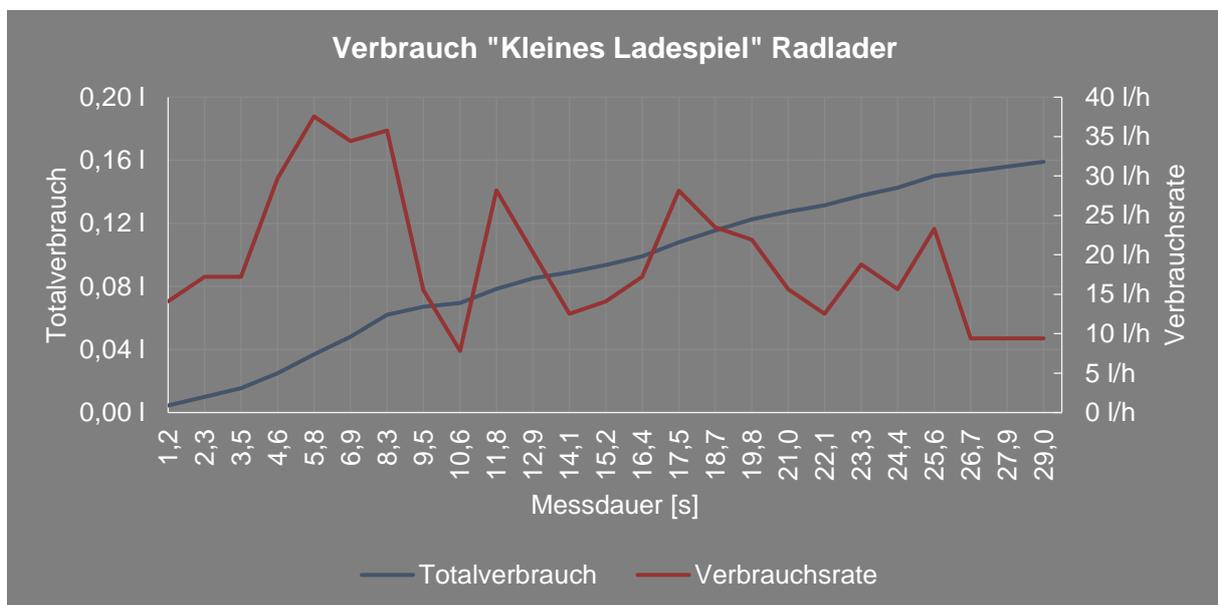


Abbildung 6-11: „Kleines Ladespiel“ mit Verbrauchsrate und Totalverbrauch

Aus der Abbildung ist zu erkennen, dass beim „Kleinen Ladespiel“ der Arbeitsprozess mit dem höchsten Verbrauch das Befüllen der Schaufel darstellt. Dies ist sowohl anhand der Verbrauchsrate, welche in den ersten Sekunden dauerhaft über 30,0 l/h ansteigt, als auch anhand

⁹² Vgl. [73] Zeppelin Baumaschinen: Neuer Cat Radlader 966K XE mit innovativem Antriebskonzept, 2012, S. 3

des Steigungswinkels beim Totalverbrauch ersichtlich. In den Sekunden der Befüllung wird maßgeblich die Effizienz des Ladespiels beeinträchtigt. Als Ergebnis aus den Messreihen geht des Weiteren einher, dass der Ladevorgang über 40 % des Gesamtverbrauchs beim „Kleinen Ladespiel“ darstellt. Die weiteren Spitzen in der Verbrauchsrate sind jeweils anhand der Beschleunigungsvorgänge beim Lastzyklus zu begründen.

Hieraus lässt sich die Fragestellung ableiten, welche Schaufelfüllstrategie tatsächlich effizient ist, welches Material sich am besten für eine Testreihe eignet und ob ein Lastzyklus mit einer zeitlichen Varianz zu neuen Erkenntnissen führt. Im Folgenden werden die einzelnen Untersuchungsreihen in den jeweiligen Unterkapiteln näher erläutert.

6.4.1 Schaufelfüllstrategien

Als Ausgangsbasis für die Schaufelfüllstrategien dient eine Studie von FILLA, welcher hierzu mithilfe der Diskrete-Elemente-Methode simulativ eine Bewertung vornimmt. FILLA unterscheidet zwischen vier verschiedenen Strategien.⁹³ Dies sind der „Käsehobel“, „Harte Fahrweise“, „Parabol“ sowie „Stufen“, welche in der Abbildung 6-12 aufgeführt sind. Beim „Käsehobel“ wird die Schaufel parallel zum Neigungswinkel des Haufwerks geführt, um diese zu beladen. Der Vorgang wird beendet, wenn die Schaufel eine Höhe von 2,50 m erreicht hat. Die „Harte Fahrweise“ sieht ein Einstecken in das Haufwerk mit hoher Geschwindigkeit und anschließendem Einkippen der Schaufel vor. Die Höhe nach Beendigung des Ladevorgangs beträgt 1,00 m. Die Strategien „Parabol“ und „Stufen“ enden beide jeweils mit einer Schaufelhöhe von 1,25 m. Der Ablauf des Ladevorgangs lässt sich dabei aus den Namen ableiten. Bei der Strategie „Stufen“ ist zu betonen, dass die Stufen durch die Anhebung der Schaufel erfolgen, wenn der Widerstand im Haufwerk zu hoch wird.

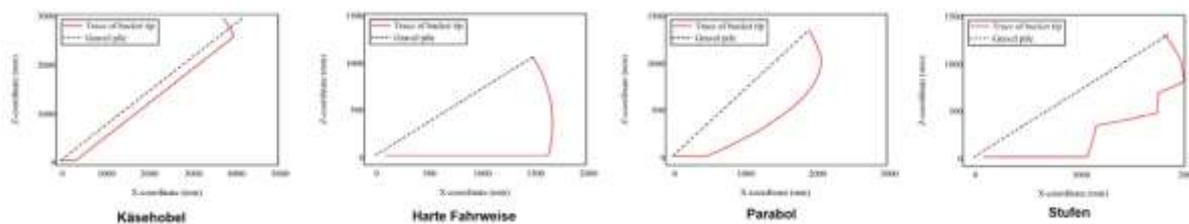


Abbildung 6-12: Übersicht Schaufelfüllstrategien⁹⁴

Als Ergebnis führt FILLA auf, dass die Schaufelfüllstrategie „Käsehobel“ die energieeffizienteste ist. Die Strategie „Harte Fahrweise“ stellt sich hinsichtlich der Reproduzierbarkeit am

⁹³ Vgl. [31] Filla: Evaluating the efficiency of wheel loader bucket designs and bucket filling strategies with non-coupled DEM simulations and simple performance indicator, 2015, S. 279-281

⁹⁴ Vgl. Ebd., S. 279-281

besten dar, weist aber die schlechteste Bilanz auf. Die „Parabol“-Fahrweise sortiert sich zwischen den beiden genannten ein, wohingegen die Strategie „Stufen“ in der Simulation aufgrund eines fehlenden Fahrermodells optimierungsbedürftig ist.⁹⁵

Die Ergebnisse der Studie beziehen sich ausschließlich auf eine rechnerische Simulation. Hieraus lässt sich die Fragestellung ableiten, inwieweit die Ergebnisse in der Praxis auftreten und ob sich ebenso verschiedene Reproduzierbarkeitsgrade darstellen. Diese Fragestellung soll mit der Messreihe beantwortet werden.

Aufbau und Definition

Der Testablauf gestaltet sich in derart, dass eine ausschließliche Betrachtung auf das Befüllen der Schaufel stattfindet. Dabei sind sowohl der zeitliche Ablauf als auch die Entfernung zum Haufwerk definiert. Der Abstand zum Haufwerk beträgt 3,0 m. Nach dem Befüllen der Schaufel ist der Testdurchlauf beendet und es findet anschließend eine Verwiegung des Materials statt. Um ein maximale Lademenge zu gewährleisten, ist die niedrigste Fahrstufe auszuwählen. Zur Anwendung kommen die vier genannten Schaufelfüllstrategien.

Durchführung

Für die Durchführung standen ein Werksfahrer sowie vier Umschüler zur Verfügung. Die Umschüler weisen dabei unterschiedliche Leistungsniveaus auf, wobei in Summe zu konstatieren ist, dass im Vergleich zum Werksfahrer ein erheblicher Leistungsunterschied herrscht. In den vorherigen Testreihen ist ein derartiges Leistungsgefälle zwischen Umschülern und Testfahrer nicht erkennbar gewesen.

Ergebnis

Trotz diverser Methoden zur Einschränkung des Leistungsniveaus, in Form von definierten Strecken, Höhen und Zeiten, stellen sich die Abweichungen im Vergleich zu den vorangegangenen Testreihen als größer dar. Dies liegt vor allem an einer isolierten Betrachtung eines Arbeitsprozesses, der in Abhängigkeit der Schaufelfüllstrategie ein hohes Maß an Fahrvermögen erfordert. Ebenso tragen die unterschiedlichen Leistungsniveaus der Fahrer hierzu bei.

Tabelle 6-21: Ergebnis Schaufelfüllstrategien

Parameter	Käsehobel	Harte Fahrweise	Parabol	Stufen
Dauer	8,88 sek	8,15 sek	9,84 sek	10,18 sek
Lademenge	7,47 t	6,40 t	7,32 t	7,65 t
Verbrauch	0,068 l	0,056 l	0,077 l	0,079 l
Verbrauchsrate	28,32 l/h	24,61 l/h	28,02 l/h	27,96 l/h
Produktivität	109,80 t/l	114,90 t/l	95,56 t/l	108,53 t/l
Abweichung	12,94%	6,43%	9,64%	9,93%

⁹⁵ Vgl. Ebd., S. 290

Die Ergebnisse der unterschiedlichen Schaufelfüllstrategien sind in der Tabelle 6-21 aufgeführt. Die dargestellte Auswertung umfasst 121 gewertete Testdurchläufe. Als effizienteste Strategie bei einer beschränkten Betrachtung auf den Schaufelfüllvorgang stellt sich die „Harte Fahrweise“ dar. Diese benötigt sowohl die geringste Zeit (8,15 Sek.), den geringsten Verbrauch (0,056 l) und weist die geringste Abweichung (6,43 %) auf. Danach folgt der „Käsehobel“, welcher hinsichtlich der Zeit nur geringfügig länger dauert, aber einen höheren Verbrauch (0,068 l) und eine deutlich höhere Abweichung (12,94 %) aufweist. Die Strategien „Parabol“ und „Stufen“ weisen beide eine durchschnittliche Zeit von circa 10,0 Sekunden auf. Die Abweichungen bei den beiden Varianten fallen mit 9,64 % und 9,93 % ebenfalls hoch aus. Bei den drei letztgenannten Varianten ist der Anspruch an das Fahrvermögen höher, welches sich direkt in der Höhe der Abweichung widerspiegelt. Auffällig ist, dass die „Harte Fahrweise“ die geringste Lademenge mit 6,40 t aufweist. Im Gegensatz dazu bewegen sich die anderen Varianten im Bereich von 7,32 t – 7,65 t.

Zur näheren Betrachtung der Unterschiede in Bezug auf den Schaufelfüllstrategien dient Abbildung 6-13. Die Abbildungen zeigen auf der x-Achse die Dauer der vier Schaufelfüllstrategien auf. Auf der y-Achse ist jeweils der Verbrauch als Totalverbrauch [l] sowie als Verbrauchsrate [l/h] aufgeführt.

Beim Totalverbrauch stellen sich die vier Varianten als nahezu identisch vom Anstieg dar. Es ist erkennbar, dass der Verbrauch maßgeblich von der Dauer der Variante bestimmt wird.

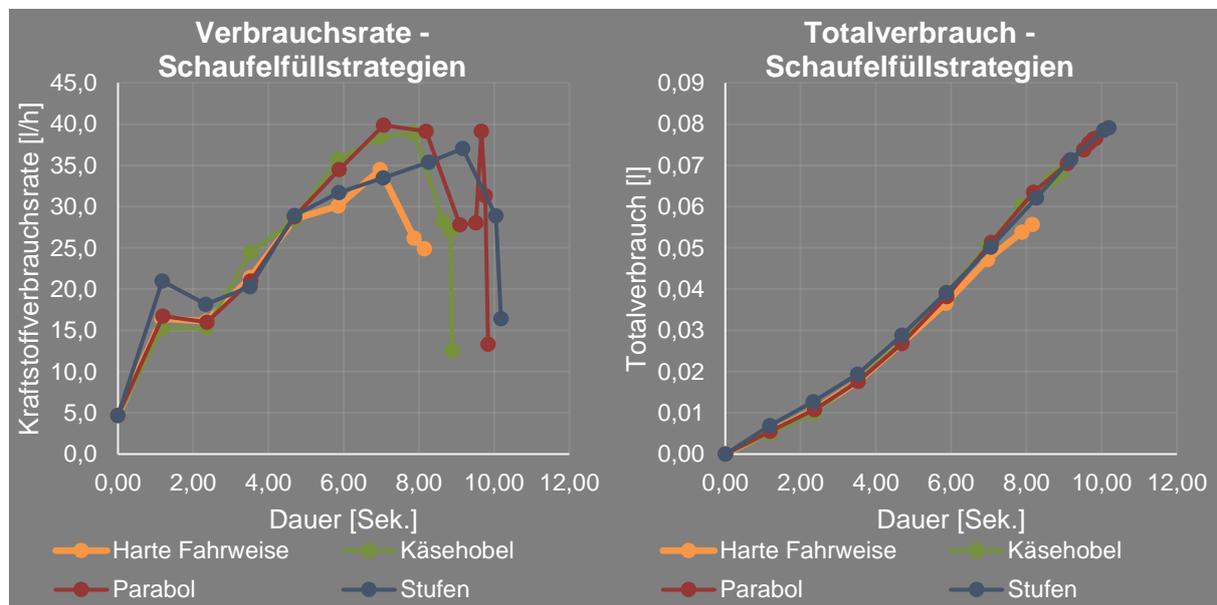


Abbildung 6-13: Schaufelfüllstrategie nach Verbrauchsrate und Totalverbrauch

Die Ergebnisse aus der Tabelle 6-21 beschränken sich nur auf den Schaufelfüllvorgang und sind daher als isolierte Betrachtung zu verstehen. Beim „Käsehobel“ ist beispielsweise vorteilhaft, dass der Hubrahmen nach dem Befüllen fast die Entladehöhe erreicht hat. Bei allen weiteren Varianten ist dieser noch anzuheben, welches zu einem Mehrverbrauch führt. Daher ist

eine Extrapolation auf das gesamte Ladespiel mit einer Verfahrung des Materials zur Entladestelle aufzustellen.

Die Extrapolation wird für das „Kleine Ladespiel“ vorgenommen, da dies als kritischer in Bezug auf Mehr- oder Mindermengen beim Befüllvorgang aufgrund der kürzeren Fahrwege im Vergleich zum „Großen Ladespiel“ anzusehen ist. Aus den weiteren Messreihen der III. Testreihe ist bekannt, dass für das Verfahren des Materials mit einem Y-Fahrweg von 10,0 m dies 20,0 Sekunden andauert und ein Totalverbrauch von 0,100 l anfällt. Der Vorteil vom Käsehobel bei dieser Betrachtung in Form des höheren Hubrahmens wird nicht eingerechnet, sondern pauschal für alle Varianten als gleich angesetzt.

Die Ergebnisse für die Extrapolation auf einen gesamten Ladezyklus führt die Tabelle 6-22 auf. Bei der isolierten Betrachtung auf die Schaufelbefüllung ist ein großer Unterschied im Verbrauch bei der „Harten Fahrweise“ im Vergleich zu den anderen Strategien festzustellen. Der Unterschied bei der isolierten Betrachtung des Ladevorgangs beträgt bei der Verbrauchsrate rund 4,0 l/h in Bezug auf die anderen Varianten. Dieser fällt bei der Gesamtbetrachtung deutlich geringer aus und beträgt 1,03 – 1,40 l/h. Bei der Produktivität fällt das Ergebnis im Vergleich zur isolierten Betrachtung gegensätzlich aus. Die „Harte Fahrweise“ weist die schlechteste Produktivität auf, da die geringste Lademenge aufgenommen und verfahren wird. Je länger die Fahrstrecken danach andauern, desto schlechter fällt das Ergebnis aus. Bei der kritischeren Annahme mit kurzen Fahrwegen durch ein „Kleines Ladespiel“ ist die Effizienz als schlecht anzusehen. Der „Käsehobel“ weist trotz der Nicht-Betrachtung des höheren Hubrahmens die beste Produktivität auf.

Als effizienteste Strategie stellt sich der „Käsehobel“ mit einer Produktivität von 44,46 t/l dar. Aufgrund der absolut betrachteten höchsten Lademenge folgt danach die Variante „Stufen“, welche eine identische Verbrauchsrate zur Variante „Parabol“ aufweist.

Tabelle 6-22: Ergebnis Extrapolation aus Lastzyklus „Kleines Ladespiel“

Parameter	Käsehobel	Harte Fahrweise	Parabol	Stufen
Dauer	28,88 Sek.	28,15 Sek.	29,84 Sek.	30,18 Sek.
Verbrauch	0,168 l	0,156 l	0,177 l	0,179 l
Verbrauchsrate	20,95 l/h	19,91 l/h	21,31 l/h	21,36 l/h
Lademenge	7,47 t	6,40 t	7,32 t	7,65 t
Produktivität	44,46 t/l	41,10 t/l	41,45 t/l	42,71 t/l

Zur weiteren Betrachtung wäre es vorteilhaft, sofern der Radlader über eine 3D-Steuerung bzw. in einfachster Form über eine Sensorik verfügt, welche die Schaufelbewegung aufzeichnet. Hiermit wäre eine Aufzeichnung der Schaufelbewegung möglich. Dies ist beim getesteten Radlader nicht der Fall.

Sämtliche Schaufelfüllstrategien sind mit unterschiedlichen Schüttgütern verifiziert worden. Weitere Erkenntnisgewinne in Bezug auf der Schaufelfüllstrategie sind nicht feststellbar. Die messbaren Unterschiede im Bereich der Schüttgüter werden im folgenden Kapitel näher erläutert.

6.4.2 Schüttgüter

In Bezug auf die Schüttgüter gilt es zu untersuchen, welche Unterschiede in Form vom Widerstand, Produktivität und Reproduzierbarkeit bei verschiedenen Schüttgütern zum Tragen kommen. Als zu erforschende Faktoren sind der Verbrauch sowie der Reproduzierbarkeitsgrad zu bezeichnen. Ferner kommt die im vorherigen Unterkapitel beschriebene Untersuchungsmethodik mit verschiedenen Schaufelfüllstrategien zum Tragen.

Aufbau und Definition

Hinsichtlich des Aufbaus und der Definition des Testablaufs findet keine Unterscheidung zum Ablauf für die Schaufelfüllstrategien statt. Für die Betrachtung der Schüttgüter kommen ebenfalls unterschiedliche Schaufelfüllstrategien zum Einsatz.

Durchführung

Für die Testreihe werden drei verschiedene Arten von Schüttgütern verwendet. Zum einen zwei Sorten von homogenem Material in Form von Feinsand 0-1 und Kies 16-32 sowie zum anderen als heterogenes Material ein Recyclingbaustoff 0-120. Wie aus dem Aufbau und der Definition für die Schaufelfüllstrategien hervorgeht, ist die Durchführung mit definierten Fahr- und Hubwegen sowie festgeschriebenen Zeiten umzusetzen.

Ergebnis

Die Ergebnisse für die drei verschiedenen Bodenarten sind in der Tabelle 6-23 aufgeführt. Die Anzahl der gewerteten Testdurchläufe betrifft ebenso 121 Stück, wobei die vier verschiedenen Schaufelfüllstrategien in der Betrachtung enthalten sind und keine weitere Differenzierung vorgenommen wird.

Bei sämtlichen Parametern ist eine hohe Deckungsgleichheit der Ergebnisse beim Feinsand 0-1 und Kies 16-32 festzustellen. Nennenswerte Abweichungen beschränken sich auf eine geringfügige Abweichung bei der Dauer (+7,30 %) und Lademenge (+4,28 %). Im Gegensatz dazu weist der Recyclingboden sowohl in der Zeit, beim Verbrauch sowie in der Lademenge ein schlechteres Ergebnis als der Feinsand und Kies auf. Dies liegt vermutlich an dem weitgestuften, inhomogenen Material, welches eine Fraktionsgröße von bis zu 120 mm aufweist und demzufolge höhere Widerstände beim Ladevorgang erzeugt.

Tabelle 6-23: Ergebnis Schüttgüter

Parameter	Feinsand 0-1	Kies 16-32	Recycling 0-120
Dauer	8,52 Sek.	7,94 Sek.	9,29 Sek.
Verbrauch	0,058 l	0,057 l	0,073 l
Verbrauchsrate	24,34 l/h	25,81 l/h	28,10 l/h
Lademenge	7,79 t	7,47 t	7,32 t
Produktivität	135,24 t/l	131,28 t/l	100,97 t/l

Die Abbildung 6-14 zeigt, wie bei der Schaufelfüllstrategie, auf der x-Achse die Zeit sowie auf der y-Achse den Totalverbrauch [l] bzw. die Kraftstoffverbrauchsrate [l/h] auf. Aus der Abbildung Verbrauchsrate ist erkennbar, dass sich die Kurve beim Feinsand und Kies als nahezu identisch darstellen. Beim Recyclingboden stellt sich dies als konträr dar. Beim Einstechen ins Haufwerk ist ein höherer Widerstand zu verzeichnen. Der Prozess dauert ebenso länger an und die maximale Verbrauchsrate fällt deutlich höher aus als beim Feinsand und Kies. Beim Totalverbrauch sind aufgrund der Darstellung ähnliche Tendenzen erkennbar, aber bei weitem nicht so ausgeprägt. Das entscheidende Kriterium auf den Verbrauch stellt hier die Zeit als Faktor dar, welches eine indirekte Ableitung aus dem Fahrwiderstand des Bodens ist.

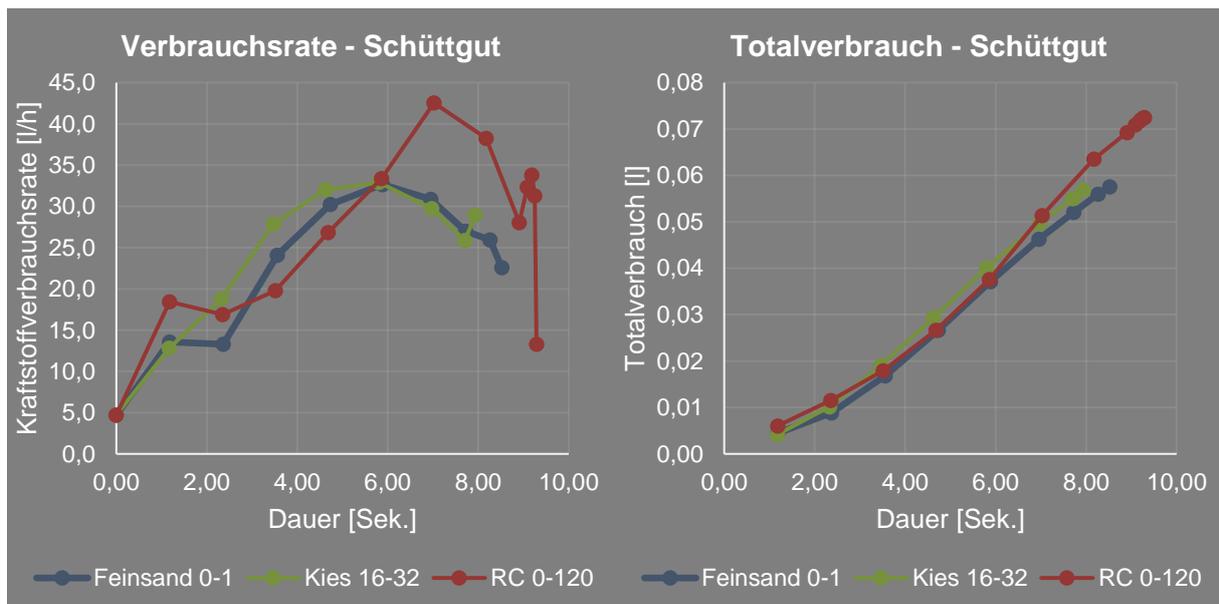


Abbildung 6-14: Schüttgüter nach Verbrauchsrate und Totalverbrauch

6.4.3 Verbrauchsmessung mit zeitlicher Variation

Als weitere Variation für den Radlader ist neben den Schaufelfüllstrategien und Schüttgütern eine zeitliche Variation vorzunehmen. Dies erfolgt nach Rücksprache mit diversen Herstellern, welche eine pauschale zeitliche Definition als eine zu oberflächliche Annahme ansehen. Aufgrund der größeren Relevanz, aber auch, um den zeitlichen Aufwand aufgrund der Variationsvielfalt gering zu halten, findet ein ausschließlicher Fokus auf das „Kleine Ladespiel“ statt.

Aus der ersten Auswertung aus der Abbildung 6-11 geht hervor, dass der Ladevorgang die geringste Zeit, aber den höchsten Verbrauch zur Folge hat. Für eine vorzunehmende zeitliche Variation stellt sich die Frage, welche Arbeitsprozesse in die zeitliche Variation mit einzubinden sind oder ob der gesamte Lastzyklus zeitlich variiert wird. Im Rahmen der Testreihe ist der Ladevorgang zeitlich zu fixieren, sodass nur eine zeitliche Variation in Form der Materialverfahung stattfindet.

Aufbau und Definition

Mithilfe der eigens programmierten App sind die Zeiten für den Lastzyklus „Kleines Ladespiel“ festzulegen. Wie beschrieben, wird der Ladevorgang zeitlich fixiert, wohingegen die Verfahung variabel gestaltet wird. Als zeitliche Vorgabe für das „Kleine Ladespiel“ werden drei Zeitintervalle mit einer Zyklusdauer von jeweils 25,00, 30,00 und 35,00 Sekunden festgelegt. Im Gegensatz zur II. Testreihe ist im Rahmen der III. Testreihe ein Fokus auf die Maximalbelastung gelegt. Wie bei den vorherigen Testreihen sind die Fahrwege, Wendepunkte und Abkipphöhen durch Markierspray und Stative definiert. Ein Testdurchlauf beinhaltet drei Arbeitsspiele.

Durchführung

Die Durchführung erfolgt mit unterschiedlichen Materialien und Schaufelfüllstrategien. Basierend auf den Erkenntnissen aus den Versuchsreihen der III. Testreihe ist eine Einschränkung in der Variationsvielfalt in derart getroffen, dass als Schaufelfüllstrategie nur die „Harte Fahrweise“ und der „Käsehobel“ sowie beim Schüttgut nur Sand und Recyclingboden zum Tragen kommen. Im Gegensatz zur II. Testreihe ist das Ladespiel nicht von der Verwiegung des Materials beeinflusst gewesen, sodass kurze Zykluszeiten mit einer Erfassung der Produktivität möglich sind.

Ergebnis

In Summe sind mit dieser Testmethodik 180 Lastzyklen respektive 60 Testdurchläufe mit fünf verschiedenen Fahrern durchgeführt worden. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 6-24 aufgeführt. Anhand der Tabelle ist ersichtlich, dass die Zeitvorgaben sehr gut eingehalten werden und es nur geringfügige Abweichungen gibt. Des Weiteren fällt die Lademenge bei allen zeitlichen Varianten ebenso konstant aus.

Tabelle 6-24: Ergebnis „Kleines Ladespiel“ mit zeitlicher Variation

Parameter	Def. Zeit 25,0 Sek.	Def. Zeit 30,0 Sek.	Def. Zeit 35,0 Sek.
Dauer	25,90 sek.	30,23 sek.	35,10 sek.
Verbrauch	0,143 l	0,143 l	0,152 l
Verbrauchsrate	19,81 l/h	17,06 l/h	15,55 l/h
Lademenge	7,70 t	7,69 t	7,78 t
Produktivität 1	54,01 t/l	53,66 t/l	51,32 t/l
Produktivität 2	1070,23 t/h	915,71 t/h	797,86 t/h

Die Verbrauchsrate fällt bei der Variante „Def. Zeit 25,0 Sek.“ mit 19,81 l/h am höchsten aus. Der Mehrverbrauch zur Variante „Def. Zeit 35,0 Sek.“ beträgt 27,45 %, jedoch fällt aufgrund der kürzeren Zykluszeit die Produktivität [t/h] um 34,14 % höher aus.

Der Radlader aus der II. Testreihe weist mit ähnlichen Zykluszeiten eine Verbrauchsrate von 35,85 l/h auf. Im Bereich der Maximalbelastung verbraucht die Maschine aus der III. Testreihe mit dem XE-Getriebe im Schnitt 17,06 l/h, sodass der Verbrauch um über 50 % reduziert wird.

Aus der Ergebnisanalyse lässt sich die Fragestellung ableiten, welche Faktoren für den Kunden entscheidend sind. Zur Diskussion ist außerdem zu stellen, inwieweit ein Arbeitszyklus mit einer definierten Zeit von 25,0 Sekunden tatsächlich vom Fahrer über einen gesamten Arbeitstag gehalten werden kann. Die Daten aus dem Flottensystem zeigen mit einer Dauer von 1:53 Minute eine deutlich höhere Zykluszeit auf (siehe Kapitel 4.1.4). Diese Zeit besteht jedoch aus einem gemittelten Anteil vom „Kleinen Ladespiel“ und „Großen Ladespiel“ mit deutlich längeren Fahrzeiten.

Bei der Detailauswertung tritt ferner ein weiterer Sachverhalt auf, was im Folgenden näher zu diskutieren ist. In der Abbildung 6-15 ist das Ergebnis für einen gesamten Testdurchlauf mit drei Durchgängen aufgeführt. Auf der x-Achse ist die Zeit in Sekunden und auf der y-Achse der Totalverbrauch in Liter dargestellt. Die drei Linien betreffen die drei zeitlichen Varianten mit einer Dauer von 25,00, 30,00 und 35,00 Sekunden je Lastzyklus bzw. 75,00, 90,00 und 105,00 auf den Testdurchlauf mit drei Zyklen. Die dargestellten Werte beinhalten 14 Testdurchläufe vom Werksfahrer der Firma Zeppelin, welcher die Maschine auf einem maximalen Level seitens des Fahrvermögens bedient.

Aus den Endpunkten der drei zeitlichen Varianten geht der Verbrauch sowie die Testdauer hervor. Aufgrund der Verteilung der Endpunkte ist erkennbar, dass die Ableitung einer Funktion möglich ist. Diese Funktion stellt sich als Polynom 2. Grades dar und ermöglicht den Rückschluss auf eine Maximaleffizienz der Maschine. Die rechnerische Bestimmung des Scheitelpunktes durch eine Funktionsableitung ergibt einen minimalen Verbrauch bei 92,85 Sekunden, was einer Zykluszeit von 30,95 Sekunden entspricht. Der Totalverbrauch entspricht rechnerisch demnach 0,491 l, womit eine durchschnittliche Verbrauchsrate von 19,05 l/h einhergeht. Anhand der Tabelle 6-24 ist erkennbar, dass die Lademenge bei unterschiedlichen Zeiten konstant bleibt, sodass mit dieser Bestimmung eine Minimalbestimmung des Verbrauchs möglich ist.

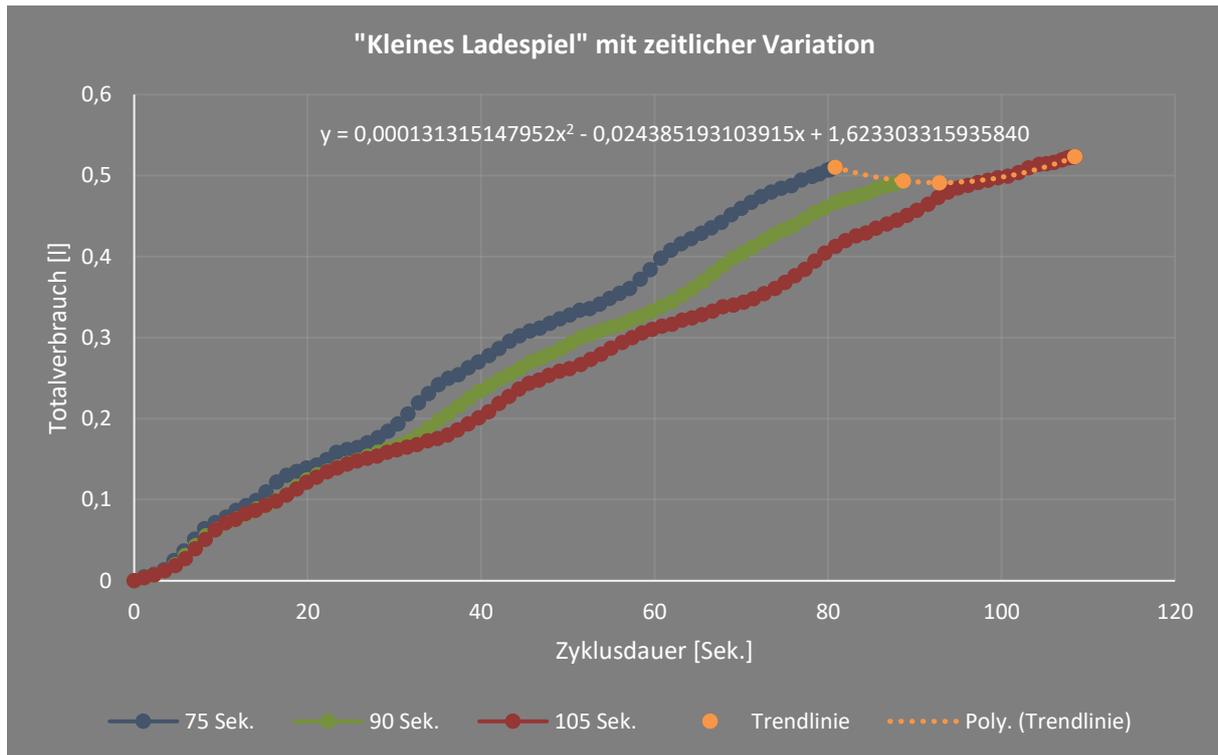


Abbildung 6-15: Ergebnis „Kleines Ladespiel“ mit zeitlicher Variation

Die statistische Validität für diesen methodischen Ansatz ist noch weitergehend zu überprüfen, da beim erfahrenen Maschinisten in Form des Werksfahrers die Ableitung der Endpunkte als Polynom am ausgeprägtesten ist. Bei den anderen Fahrern, welche nicht über eine ausreichende Erfahrung und Sicherheit im Umgang mit der Maschine verfügen, ist eine Streuung erkennbar. Weitere Variationen und Varianten sind im Rahmen der zwei Testwochen nicht möglich gewesen, da die Datenauswertung mit 32.099 einzelnen Messwerten aufwändig ist. Eine Ableitung von Tendenzen im Testablauf sind dadurch erst nachgeschaltet erkennbar, sodass dementsprechend nicht entgegengesteuert werden kann.

Die Methode zur Bestimmung der Maximaleffizienz einer Maschine basierend auf einer zeitlichen Variation stellt einen Ansatz dar, welcher eine verbindliche Aussage zur Effizienz der Maschine ermöglicht, ohne zu starre Vorgaben vorzunehmen. Den Bedenken und Sorgen der Maschinenhersteller vor einer zu starken Pauschalisierung kann hiermit entgegengesteuert werden, sodass eine maschinenindividuelle Ausweisung der Maximaleffizienz möglich ist.

6.5 IV. Testreihe

Die IV. Testreihe hat zum Ziel, unterschiedliche Anbaugeräte und damit einhergehend ein erweitertes Aufgabenspektrum für den Hydraulikbagger in einem definierten Lastzyklus zu integrieren.

Als Testgerät kommt ein Liebherr A920 Mobilbagger mit Verstellausleger zum Einsatz. Die Maschine stammt aus dem Baujahr 2016 und hat zum Testzeitpunkt 973 Betriebsstunden absolviert. Der Motor weist eine Leistung von 129 kW auf, erfüllt die Abgasstufe IV und verfügt über keinen Dieselpartikelfilter, sondern über eine SCR-Technik. Der Bagger ist mit einem vollhydraulischen Schnellwechsler von Oilquick vom Typ 70/55 ausgestattet.

Zum Einsatz für die Testreihe kommen als Anbaugeräte ein Tieflöffel, Tiltrotator, Anbauverdichter, Hydraulikhammer sowie Bodenrecycler.

Aufbau und Definition

Der Tiltrotator absolviert den gleichen Lastzyklus in Form der Grab- und Planiertätigkeit. Das Anbaugerät verfügt über ein Drehwerk (Rotierbewegung) sowie über Zylinder (Tiltbewegung), sodass mit einem Tiltrotator der Löffel deutlich flexibler eingesetzt werden kann. Anstatt auf die Achse des Auslegers als Arbeitsrichtung angewiesen zu sein, können durch den Tiltrotator auch klassische Handarbeiten wie das Freilegen eines Kabels mit einem Bagger erledigt werden. Diese Flexibilität ist allerdings im Rahmen eines definierten Lastzyklus nicht messbar, sondern individuell im Baustellenprozess als Steigerungsrate der Produktivität zu bewerten. Daher erfolgt aus Vergleichbarkeitsgründen zum Tieflöffel eine Betrachtung des Tiltrotators auf die Zyklen Graben und Planieren. Zum Einsatz kommt ein Tiltrotator der Firma MTS mit der Bezeichnung TR26 aus dem Baujahr 2017. Das Mehrgewicht im Vergleich zum Tieflöffel beträgt 835 kg.

Ein Anbauverdichter ermöglicht mit einem Hydraulikbagger dynamische Verdichtungsarbeiten. Mit einem Hydraulikmotor wird eine Unwucht auf einer Grundplatte angetrieben, welche in Vibration versetzt wird. Im Vergleich zu konventionellen Verdichtungsgeräten lässt sich mit einem Anbauverdichter durch die statische Auflast des Baggers eine höhere Tiefenwirkung erzielen. Als Lastzyklus wird lose geschütteter Boden ebenerdig zum Bagger schachbrettartig verdichtet. Das Anbaugerät ist vom Hersteller MTS mit der Bezeichnung V7 X3. Der Verdichter weist ein Gewicht von 1.250 kg sowie eine Schlagkraft von 68 kN auf.

Der Hydraulikhammer wird für das Lösen von harten Materialien wie Fels oder Beton genutzt. Der Meißel wird dabei von einem Schlagwerk beschleunigt, um das Material aufzuspalten. Für den Lastzyklus kommen auf einer ebenerdigen Fläche Betonbruchstücke zum Einsatz. Der Hydraulikhammer ist von der Firma Epiroc und vom Typ MB1200. Dieser verfügt über ein Gewicht von 1.200 kg und eine hydraulische Antriebsleistung von 42 kW.

Ein Bodenrecycler wird für die Aufbereitung von Böden genutzt. Das typische Anwendungsfeld betrifft bindige Böden, welche mit einem Bindemittel in einem einbau- und verdichtbaren Zustand aufbereitet werden. Mithilfe der rotierenden Siebwellen wird das Boden-Bindemittelgemisch in der Schaufel durchmischt und homogenisiert. Der Lastzyklus lässt sich hieraus ableiten, der die Aufnahme und Durchmischung des Bodens vorsieht. Zum Einsatz kommt ein Bodenrecycler der Firma MTS mit der Typenbezeichnung B180-F80C. Der Recycler weist ein Gewicht von 2.050 kg sowie eine Schneidbreite von 1.800 mm auf.

Durchführung

Für die Durchführung ist zu erwähnen, dass das Kraftstoffmessgerät aufgrund eines Defekts nicht zur Verfügung stand. Zur Verifizierung der Kraftstoffverbrauchsrate ist der Bordcomputer des Liebherr Baggers zu nutzen. Um eine Aussagekraft zu gewährleisten, erfolgt eine Ausliterung des Kraftstofftanks mit einem Abgleich zum dargestellten Wert des Bordcomputers. Die Abweichung zwischen der Ausliterung und dem Bordcomputer beträgt 3,1 %.

Das beschriebene Testprozedere ist bei den Geräten mit einer hydraulischen Funktion (außer dem Tiltrotator) zu ergänzen durch ein Betreiben in der Luft. Hierdurch ist ein Abgleich möglich, inwieweit der Realeinsatz einen höheren Verbrauch verursacht oder ob mit einem einfacheren Handling ein realistischer Verbrauch erzielbar ist.

Bei der Durchführung für den Lastzyklus „Laden“ sind deutliche Unterschiede zwischen den Anbaugeräten mit Tieflöffel und Tieflöffel an dem Tiltrotator zu verzeichnen. Der Bagger schwankt aufgrund des Mehrgewichts vom Tiltrotator deutlich mehr. Dies führt dazu, dass die Zykluszeiten deutlich länger als ohne den Tiltrotator ausfallen. Zur besseren Vergleichbarkeit sind die identischen Zeiten nur mit dem Tieflöffel umgesetzt worden.

Ergebnis

Die Ergebnisse für die IV. Testreihe sind in der Tabelle 6-25 aufgeführt. Die dargestellten Ergebnisse für den Tieflöffel und Tiltrotator beziehen sich auf den Lastzyklus „Planieren“. Beim Tiltrotator wird der identische Tieflöffel für den Lastzyklus genutzt. Der Mehrverbrauch aufgrund des zusätzlichen Gewichts des Tiltrotators mit 835 kg beträgt 9,49 %. Für den nicht aufgeführten Lastzyklus „Laden“ ist bezüglich des Mehrverbrauchs auf den Totalverbrauch ein ähnliches Ergebnis festzustellen.

Tabelle 6-25: Ergebnis IV. Testreihe

Parameter	Tieflöffel (Planieren)	Tiltrotator (Planieren)	Anbauver- dichter	Boden- recycler	Hydraulik- hammer
Verbrauchsrate (Luft)	-	-	26,52 l/h	13,07 l/h	14,70 l/h
Abweichung	-	-	1,35 %	0,63 %	0,62 %
Anzahl Zyklen	10,00	10,00	4,00	3,00	5,00
Dauer	98,04 Sek.	97,45 Sek.	38,40 Sek.	45,19 Sek.	58,30 Sek.
Verbrauchsrate (Realeinsatz)	13,85 l/h	12,65 l/h	28,14 l/h	23,90 l/h	18,54 l/h
Abweichung	0,51 %	0,56 %	3,39 %	1,22 %	3,49 %
Produktivität	71,59 m/l	78,86 m/l	14,67 qm/l	17,40 m ³ /l	-

Für den Anbauverdichter ist keine große Steigerungsrate des Verbrauchs zwischen der Variante „Luft“ (26,52 l/h) und „Realeinsatz“ (28,14 l/h) festzustellen. Der Unterschied fällt gering aus, da im Realeinsatz der Anbauverdichter nur mit der statischen Auflast des Auslegers belastet wird. Die Abweichung zwischen den Durchläufen fällt mit 3,39 % beim „Realeinsatz“ gering aus, sodass ein reproduzierbarer Test vorliegt.

Im Vergleich dazu fällt beim Bodenrecycler der Mehrverbrauch bei den Varianten „Luft“ und „Realeinsatz“ mit 82,86 % deutlich höher aus. Der Grund hierfür liegt in dem wesentlich anderen Arbeitsablauf. Die Variante „Luft“ sieht nur eine Rotation der Siebwellen vor. Im Vergleich dazu ist beim „Realeinsatz“ der Bodenrecycler mit Material zu befüllen, die Schaufel anzuheben und das Material durch den Recycler zu separieren. Trotz des weiteren Einflussfaktors Boden fallen die Abweichungen mit 1,22 % gering aus.

Der Verbrauch beim Hydraulikhammer fällt im Realeinsatz mit 26,12 % ebenfalls höher aus. Beim Realeinsatz wird der Ausleger entsprechend angesteuert, was zum Mehrverbrauch führt. Die Abweichungen fallen mit 3,49 % höher als bei der Variante „Luft“ aus. Im Kontext der Verwendung von Beton als Abbruchmaterial sind die Abweichungen als geeignet für einen reproduzierbaren Test einzustufen.

Für die IV. Testreihe ist zu konstatieren, dass für die Anbaugeräte der Realeinsatz nur eine praxisnahe Ausweisung der Kraftstoffverbrauchsrate ermöglicht. Es ist dabei zu betonen, dass mit den Anbaugeräten spezielle Arbeitsaufgaben einhergehen. Je nach Anbaugerät ist der Mehrwert ausschließlich erst bei der Prozesseffizienz messbar. Als Beispiel hierfür ist der Tiltrotator zu nennen, der bei der Energieeffizienz eine schlechtere Kraftstoffbilanz zur Folge hat. Erst bei Berücksichtigung des Baustellenprozesses ist ein Mehrwert messbar.

Eine Vergleichbarkeit zwischen den Baggern und ein Rückschluss auf die hydraulische Leistung des Baggers ist mit der aufgestellten Methodik zur Bewertung der Energieeffizienz möglich.

6.6 Wesentliche Erkenntnisse der Testreihen und abschließende Handlungsfelder

Die wesentlichen Erkenntnisse aus den vier Testreihen sollen im Folgenden zusammengefasst werden.

Als wichtigste Erkenntnis geht aus den Testreihen hervor, dass ein reproduzierbarer, praxisnaher, definierter Lastzyklus für Baumaschinen möglich ist. Die Abweichung beträgt im Mittel bei einer stringenten Definition <5,0 %. Wichtig dabei ist, dass die Arbeitsabläufe sowohl im Bewegungsumfang als auch aus zeitlicher Sicht festgelegt werden. Um diese Abläufe und Testbedingungen zu verinnerlichen, ist für die Testfahrer eine ausreichende Vorbereitungszeit einzuräumen. Trotz der heterogenen Gruppe an Fahrern in Form von Umschülern, Meistern und Werksfahrern kann hierdurch der Fahrereinfluss nahezu egalisiert werden.

Für den Hydraulikbagger ist die Messung der Produktivität nur durch einen hohen Testaufwand in Form von weiteren Geräten (LKW/Dumper und Wiegeeinrichtungen) möglich. Diese waren wirtschaftlich im Rahmen dieser Arbeit nicht umsetzbar. Als Alternative sind Varianten mit Containern zur Beladung mit einer vereinfachten Abschätzung der bewegten Volumina sowie ein Lastzyklus ohne eine Erdbewegung entwickelt worden. Als wesentliche Erkenntnis geht hervor, dass ohne eine Erdbewegung ein praxisnaher Verbrauch realisierbar ist.

Des Weiteren ist aufgrund der Testreihen bekannt, welchen Einfluss der Untergrund auf den Kraftstoffverbrauch und die Geschwindigkeit hat. Der verwendete Recyclingboden weist im eingebauten, planierten und verdichteten Zustand mit einer Abweichung von rund 6 % näherungsweise ähnliche Reibungswiderstände wie ein Betonuntergrund auf. Ferner ist bekannt, dass der Bordcomputer beim getesteten Kettenbagger im Mittel um 4,43 % einen niedrigeren Verbrauch als das Messgerät ausweist.

Die Messung der Produktivität gestaltet sich beim Radlader aufgrund der Verwendung von Wiegeeinrichtungen als deutlich einfacher. Hierdurch sind detaillierte Erkenntnisse zur Arbeitsleistung der Maschine bekannt. Beim Radlader ist mit einem Anteil von 40 % am Lastzyklus „Kleines Ladespiel“ der Ladevorgang des Bodens der maßgebliche Faktor auf den Verbrauch und der Arbeitsleistung der Maschine. Die im Detail untersuchten Schaufelfüllstrategien führen zum Ergebnis, dass der „Käsehobel“ die effizienteste Fahrweise darstellt, wohingegen eine „Harte Fahrweise“ die am wenigsten effizienteste Strategie ist, aber die beste Reproduzierbarkeit aufweist. In Bezug auf die Schüttgüter stellen ein Feinsand und Kies einen ähnlichen Widerstand dar. Das Recyclingmaterial mit einer heterogenen Korngrößenverteilung weist einen höheren Widerstand auf und ist für Testreihen weniger geeignet als die homogenen Bodenarten Feinsand und Kies.

Einen methodischen Ansatz zur Ausweisung der Maximaleffizienz einer Baumaschine geht mit Berücksichtigung einer zeitlichen Varianz für den definierten Lastzyklus einher. Es können hierdurch die Bedenken der Maschinenhersteller von einer zu starken Pauschalisierung eines Lastzyklus‘ entgegengeräumt werden, indem mithilfe von unterschiedlichen festgelegten Zeitintervallen der optimale Wirkungsgrad der Maschine ausgewiesen wird. Die Ergebnisse aus der III. Testreihe haben gezeigt, dass dies für einen Radlader bei einem „Kleinen Ladespiel“ möglich ist.

Die IV. Testreihe hat ergeben, dass die Berücksichtigung der Anbaugeräte unter einen Real-einsatz erfolgen muss, um eine realistische Kraftstoffverbrauchsrate zu erzielen. Bei den Anbaugeräten kommt der Prozesseffizienz eine besondere Bedeutung zu. Die Ausweisung der Energieeffizienz ist in Abhängigkeit des Anbaugerätes nicht zielführend, da sich der Mehrwert nur im Baustellenprozess herausstellen kann.

Als Handlungsfeld ist die Bewertung der Produktivität für den Hydraulikbagger zu bezeichnen. Lösungsansätze ergeben sich hieraus durch die Verwendung von weiteren Hilfsmaschinen. Die optimale Lösung würde allerdings in der Nutzung von festen Beladeeinrichtungen mit integrierten Wiegesystemen bestehen, da ein fester Arbeitsplatz mit definiertem Bewegungsumfang für die Maschine sowie eine genaue Verwiegung möglich ist. Dies wäre beispielsweise mit der Nutzung eines Reihendoseurs und einem Förderband mit Bandwaage möglich.

Ein weiteres Handlungsfeld stellt der Lastzyklus „Fahren“ dar. Die optimale Rahmenbedingung würde in einer asphaltierten Rundstrecke bestehen, die eine konstante Einhaltung der Fahrgeschwindigkeit ermöglicht.

Zur besseren Vergleichbarkeit würde sich zudem anbieten, die Bewegung der Arbeitsausrüstung beim Hydraulikbagger und Radlader mithilfe einer 3D-Steuerung aufzuzeichnen. Es können hierdurch im Detail der Bewegungsumfang sowie die Schaufelfüllstrategie nachgehalten und verglichen werden.

6.7 Modell zur Energieeffizienzausweisung

Basierend auf den Erkenntnissen aus den Flottenauswertungen, der vorgenommenen Lastzyklusdefinition sowie den Testreihen stellt sich die Frage, wie die Energieeffizienz einer Baumaschine auszuweisen ist.

Im Kapitel 5 ist das Konzept einer zweistufigen Ausweisung vorgestellt worden. Die Stufe I. beinhaltet den definierten Lastzyklus mit einer Betrachtung von Standardtätigkeiten, wohingegen in Stufe II. der Anwender sich nach seinem Nutzerprofil die Tätigkeiten zusammenstellen kann. Im Folgenden soll eine mögliche stufenbasierte Ausweisung am Beispiel der IV. Testreihe für die Energieeffizienz vorgestellt werden.

6.7.1 Stufe I.

Für die Stufe I. ist zu erwähnen, dass aufgrund des Testaufwands nur hier die Bewertung einer Maximaleffizienz vorgenommen wird. Aufgrund der möglichen Variationsmöglichkeit in Form von Anbaugeräten wäre der Testaufwand nicht verhältnismäßig.

Tabelle 6-26: Ausweisung Energieeffizienz nach Stufe I.

Lastzyklen	Variante	Anteil	Verbrauch	Arbeitsleistung
Graben	Power	40%	10,43 l/h	16,22 t/l
Planieren	Power	10%	11,95 l/h	57,27 m ² /l
Fahren	Power - Schnellgang	20%	26,99 l/h	733,33 m/l
Leerlauf	950 U/min	30%	2,70 l/h	-
Kombiniert			11,58 l/h	

In der Tabelle 6-26 ist eine beispielhafte Auswertung für die Ausweisung der Energieeffizienz nach Stufe I aufgeführt.

Denkbar ist bei einer ausreichenden Anzahl an unterschiedlichen Maschinen eine Einsortierung in Effizienzklassen, welche nach Buchstaben und farblichen Skalen sortiert sind, wie dies bei Haushaltsgeräten, PKW etc. üblich ist.

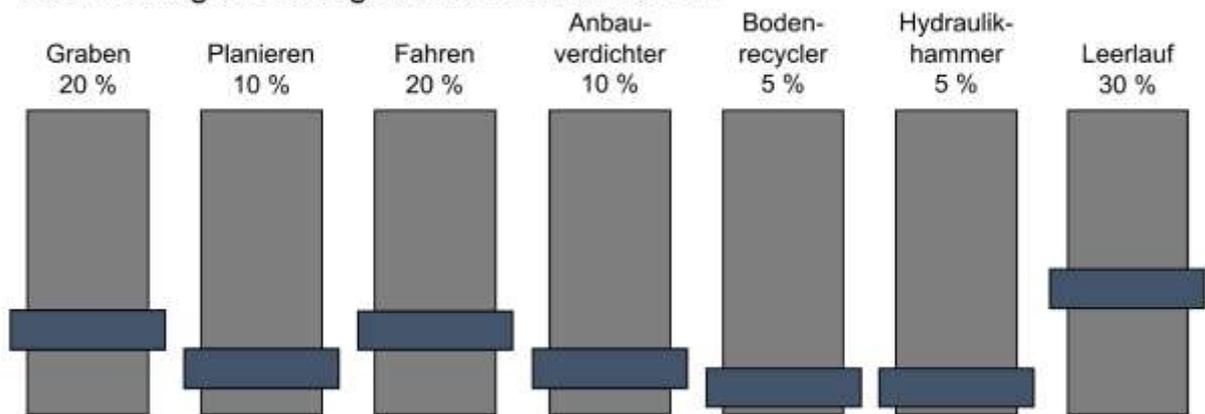
Im Hinblick auf die Vergabe von Bauleistungen mit einem zunehmenden Fokus auf Nebenkriterien, wie die Energieeffizienz, ist eine einfache und unabhängige Bilanzierung des Maschinenfuhrparks mit einer derartigen Ausweisung möglich.

6.7.2 Stufe II.

Mithilfe der Stufe II. wird dem vielfältigen Einsatzspektrum einer Baumaschine genüge getan. Dem Anwender, aber auch dem Baumaschinenhersteller, wird damit ein Instrument zur Verfügung gestellt, mit dem er nach seinem individuellen Einsatz die energieeffizienteste Maschine selektieren kann.

Die Veröffentlichung dieser Ergebnisse in einer webbasierten Datenbank würde sich als sinnvoll darstellen. Basierend auf dieser Online-Datenbank bietet sich ein Konfigurator für das Nutzerprofil an. Ein mögliches Beispiel, wie ein Konfigurator aussehen könnte, führt die Abbildung 6-16 auf. Der Anwender stellt nach seinem Nutzerprofil die Anteile der jeweiligen Tätigkeiten, in Abhängigkeit von der Maschinengröße, ein und erhält als Endergebnis die effizienteste Maschine für seine Einsatzart.

Ausweisung der Energieeffizienz nach Stufe II.



Ergebnis:

1. Hersteller XY

Graben	Planieren	Fahren	Anbauverdichter	Bodenrecycler	Hydraulikhammer	Leerlauf
10,43 l/h	11,95 l/h	26,99 l/h	28,14 l/h	23,90 l/h	18,54 l/h	2,70 l/h
16,22 t/l	57,27 m ² /l	733,33 m/l	14,67 m ² /l	17,40 m ³ /l	11,51 t/l	

Abbildung 6-16: Beispiel einer Anwenderkonfiguration

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit hat zum Ziel, die Energieeffizienz von Baumaschinen praxisnah anhand von Realmessungen auszuweisen. Hierfür gibt es keine standardisierten Methoden oder Normen, woraus sich der Forschungsbedarf ableiten lässt.

Die in der Einleitung aufgestellten fünf Forschungsfragen sollen in diesem Kapitel zusammenfassend beantwortet werden. Der methodische Ansatz ist in drei Stufen zu differenzieren. Die erste Methode erfasst den Stand der Technik und beantwortet Frage 1. Mit der zweiten Methode geht die Bestimmung des Praxiseinsatzes, die Lastzyklusableitung sowie die Beantwortung der Fragen 2, 3 und 4 einher. Die dritte Methode sieht eine Validierung der generierten Erkenntnisse in Form der Praxistests und die Antwort auf Frage 5 vor.

F 1

Frage 1: Welche methodischen Ansätze bestehen bis dato bei der Ausweisung der Energieeffizienz und welche Anforderungen lassen sich hieraus ableiten?

Als methodischer Ansatz für die Ausweisung der Energieeffizienz ist am häufigsten ein Laborversuch auf einem Prüfstand festzustellen. Für den PKW stellt sich die Ausweisung anhand des NEFZ als praxisfern dar, da die Testbedingungen und Belastungen nicht dem realen Einsatzprofil entsprechen. Für Baumaschinen gibt es nur isolierte Aufgaben für einzelne Maschinenklassen (z.B. Liebherr-Normtest) oder eine Norm im Entwurfsstadium, welche zum jetzigen Stand einen Optimierungsbedarf hinsichtlich der Praxisnähe aufweist.

In Bezug auf den Stand der Forschung sind verschiedene Forschungsprojekte zu nennen, deren Ziel durch die Effizienzbewertung es jedoch ist, innermotorische Verluste zu analysieren und zu optimieren. Die Anwender als Zielgruppe und eine transparente Ausweisung der Verbrauchsrate im Realbetrieb fehlen hierbei.

Für die transparente Ausweisung ist ein Prüfstandtest für eine Baumaschine auszuschließen. Beim PKW mit einer trivialen Arbeitsaufgabe ist ein Prüfstandtest noch eine geeignete Methodik, wobei durch Abgasmanipulationen mittlerweile zusätzlich der Realeinsatz berücksichtigt wird. Dies ist bei einer Baumaschine mit einer komplexen Arbeitsaufgabe nicht darstellbar. Daher gilt es, für Realmessungen die größten Einflussfaktoren auf den Kraftstoffverbrauch zu identifizieren und auf deren Einfluss zu isolieren. Den größten Einfluss stellen der Fahrer und der Boden dar, die es methodisch zu isolieren gilt. Die zunehmende Verwendung von Anbaugeräten stellen ein erweitertes Aufgabenspektrum dar, welches zu berücksichtigen ist. Gleiches gilt für die Trends der Hybridisierung und Elektrifizierung von Antriebssträngen, wobei diese aktuell noch auf einzelne Modelltypen beschränkt sind. Dennoch ist diese Entwicklung für die Effizienzausweisung zu berücksichtigen und in die Lastzyklusdefinition zu integrieren.

Ferner ist eine Differenzierung zwischen der Energieeffizienz und Prozesseffizienz wichtig. In dieser Arbeit wird hierunter verstanden, dass die Energieeffizienz eine standardmäßige Bilanzierung der Kraftstoffverbrauchsrate vorsieht. Mit der Prozesseffizienz ist eine Berücksichtigung von Maschinenauslastungsgraden und die tatsächliche Leistung auf der Baustelle gemeint. Diese beiden Effizienzarten stehen in gegenseitiger Wechselwirkung. Daher ist es wichtig, deren Terminologie und Anwendbarkeit zu definieren und klare Abgrenzungen zu treffen.

F 2

Frage 2: Welche Maschinen haben Relevanz auf den Kraftstoffverbrauch?

In der Einleitung sind die Hydraulikbagger und Radlader als maßgebliche Maschinenklassen auf den Kraftstoffverbrauch für Baumaschinen identifiziert worden. In einer weiteren Analyse stellen die Mobil- und Kettenbagger sowie der Klein- und Großlader die relevanten Maschinentypen dar. Trotz der geringen Stückzahl sind Großmaschinen mit einem Betriebsgewicht von über 35,0 t nicht zu vernachlässigen, da diese über eine vielfach höhere Verbrauchsrate und hierdurch zu einem nicht unterschätzenden Anteil an den Gesamtverbräuchen beitragen.

Weitere Statistiken liegen für die Verteilung nach Branchen sowie für die Anbaugeräte vor. Aus beiden Bereichen ist eindeutig der Einsatz im Erd- und Tiefbau sowie die Verwendung von klassischen Anbaugeräten in Form eines Tieflöffels für den Bagger sowie der Ladeschaufel für den Radlader festzustellen. Sonderbereiche, wie der Abbruch mit entsprechenden Anbaugeräten, spielen eine untergeordnete Rolle.

Des Weiteren führen Auswertungen über die Gesamtbetriebskosten zu der Erkenntnis, dass der Kraftstoffverbrauch einen Anteil von bis zu 40 % ausmacht. Bei Maschinen im Kompaktsegment ist dieser mit einem Anteil von 25 % weniger bedeutend.

Für die relevanten Maschinen sind Bauprozessanalysen aufgestellt worden, welche zum Ziel haben, detaillierte Rückschlüsse auf den Maschineneinsatz zu gewinnen. Die aufgestellte Methodik durch personengebundene Prozessanalysen ist sehr zeitaufwändig, hat keinen repräsentativen Charakter und lässt nur Tendenzen zu. Eine repräsentative Erhebung zum Arbeitseinsatz geht jedoch mit der Beantwortung der dritten Forschungsfrage einher.

F 3

Frage 3: Was ist ein praxisnaher Arbeitseinsatz und welche Tätigkeiten und Belastungen gehen damit einher?

Die Beantwortung erfolgt mit der Auswertung von Flottendaten von zwei marktführenden Herstellern. Die Datenbasis umfasst dabei 11.951 Maschinen, 106.506 Monatsberichte und in Summe 8.067.601 auf Normalverteilung gefilterte Daten. Hiermit sind repräsentative Erhebungen zum Maschineneinsatz möglich.

Die marktrelevanten Betriebsgewichte stellen die 18,0 t Mobilbagger, 24,0 t Kettenbagger, 6,0 t Kleinlader sowie 24,0 t Großlader dar. Alle Maschinentypen weisen einen durchschnittlichen Leerlaufanteil von über 30,0 % auf, was bei der betrachteten Anzahl an Maschinen nur für Deutschland und für diesen Hersteller über 2,44 Mio. Stunden im Leerlauf darstellt. Des Weiteren erfolgt mit einer Berechnung der Kraftstoffverbräuche auf den Motorauslastungsgrad eine weitere Analyse. Der Mobilbagger befindet sich bei einer leichten Auslastung, wohingegen der Kettenbagger und Großlader eine mittlere Auslastung aufweisen. Ein baujahrabhängiger Vergleich zeigt beim Mobilbagger und Großlader eine deutliche Senkung der Verbrauchsrate auf. Beim Kettenbagger ist keine signifikante Senkung zu verzeichnen. Hinsichtlich der jährlichen Betriebsstunden sind deutliche Unterschiede zwischen Klein- und Großmaschinen zu erkennen. Die Großmaschinen (Mobil- und Kettenbagger sowie Großlader) weisen eine jährliche Nutzung zwischen 900 bis 1.800 Stunden auf. Im Gegensatz dazu werden die Kleinmaschinen nur 300 bis 600 Stunden im Jahr eingesetzt. Über das Jahr betrachtet ist eine saisonale Schwankung in der Nutzung zu verzeichnen. Dabei ist besonders die Steigerung der Leerlaufanteile in der Winterperiode hervorzuheben. Ferner können mit den Flottendaten die Lademengen für den Radlader erfasst werden. Beispielsweise haben die erfassten 304 Großlader bei 8.286.498 Ladezyklen 5.850.921,57 l Kraftstoff verbraucht und 58.893.717 t Material bewegt. Mit diesen Daten können hinsichtlich der Produktivität der Maschine Soll-Vorgaben für die definierten Lastzyklen abgeleitet werden.

Weitere Auswertungen führen zu detaillierten Erkenntnissen hinsichtlich des europaweiten Maschineneinsatzes von Baumaschinen. Es werden detailliert die Anteile an Tätigkeiten, wie z.B. Graben, Schwenken, Heben, erfasst. Die Auswertungen führen zu Unterschieden bei der Einsatzart in Abhängigkeit des Betriebsgewichtes. Basierend auf der vorherigen Auswertung zur saisonalen Schwankung wird eine Erweiterung zu europäischen Unterschieden vorgenommen. Dabei ist festzustellen, dass ein binärer Zusammenhang zwischen dem saisonalen Leerlaufanteil und der Klimazone existiert. Im mediterranen Klima ist keine saisonale Schwankung zu verzeichnen. Dem gegenüber ist im borealen Klima ein massiver Anstieg des Leerlaufanteils für die Winterperiode zu verzeichnen.

Eine weiterführende Betrachtung erfolgt mit der Modellentwicklung. Diese hat zum Ziel, die verschiedenen Tätigkeiten auf Korrelation zum Kraftstoffverbrauch zu untersuchen und ein länderspezifisches Ranking zum Maschineneinsatz zu berechnen. Hierbei werden auch externe Faktoren wie die Außentemperatur sowie die Lösbarkeit des Bodens betrachtet. Die Datenbasis weist häufig eine geringe Korrelation und eine Ausreißerempfindlichkeit auf, welches zu entsprechenden Abweichungen in der zusammenführenden Modellberechnung führt. Dennoch gehen mit dieser Analyse tiefgehende Erkenntnisse zum europäischen Maschineneinsatz einher.

Aufgrund der umfangreichen Datenbasis über den Leerlaufanteil erfolgt hierzu eine gesonderte Analyse. Die vorher festgestellte saisonale Schwankung ist dabei dem Maschinenführer zuzuordnen. Dieser stellt mit einem Anteil von 26,3 bis 51,6 % den maßgeblichen Einfluss auf den Leerlauf dar. Eine Umrechnung auf die betrachtete Datenbasis führt zu dem Ergebnis, dass in Deutschland 3,2 Mio. Stunden und 11,9 Mio. Liter Diesel an fahrerbedingten Leerlauf eingespart werden könnten.

F 4

Frage 4: Wie ist ein definierter Lastzyklus zu gestalten?

Mit den generierten Erkenntnissen können vielzählige Vorgaben für einen definierten Lastzyklus aufgestellt werden. Im Wesentlichen sind zwei Zielgruppen mit der Energieeffizienzausweisung zu bedienen. Zum einen die Hersteller, denen eine möglichst standardmäßige Ausweisung unterstellt wird, und zum anderen die Anwender, welche auf ihren individuellen Maschineneinsatz eine belastbare Aussage erzielen möchten.

Aus diesem Grund ist ein zweistufiges Modell zur Ausweisung der Energieeffizienz entwickelt worden. In erster Stufe werden die Standardtätigkeiten berücksichtigt. In zweiter Stufe sind weitere Tätigkeiten integriert, welche sich der Anwender nach seinem Einsatzprofil individuell zusammenstellen kann.

Die Standardtätigkeiten umfassen beim Hydraulikbagger die Lastzyklen „Graben“, „Planieren“, „Fahren“ sowie „Leerlauf“. Für den Radlader sind dies die Tätigkeiten „Kleines Ladespiel“, „Großes Ladespiel“, „Fahren“ und „Leerlauf“. Für jeden einzelnen Maschinentyp sind die Anteile der Tätigkeiten festgelegt.

Mit den Realmessungen wird im Rahmen dieser Arbeit ein neues Forschungsfeld erschlossen, sodass keine starren Vorgaben für die Testreihen getroffen sind, sondern ergebnisoffen geforscht wird.

F 5

Frage 5: Ist eine praxisnahe, reproduzierbare Ausweisung der Energieeffizienz für Baumaschinen möglich und welche Methoden sind hierfür zu entwickeln?

Zur Beantwortung dieser Frage wird als Methode die Validierung genutzt, welche für IV. Testreihen angewandt wurde. Als Zielvorgabe für eine Realmessung wird eine Abweichung von < 5,0 % als repräsentatives Ergebnis angesetzt. Für die Testreihen wird ein Kraftstoffmessgerät mit einer Messgenauigkeit von $\pm 1,0$ % genutzt.

Mit der I. Testreihe erfolgt die Durchführung an einem 20,0 t Kettenbagger. Ziel ist es, die aufgestellten Methoden und Varianten zu überprüfen und hinsichtlich eines Optimierungsbedarfs zu analysieren. Die Abweichungen fallen durch nicht ausreichend stringente Vorgaben hoch aus. Als Handlungsfelder werden die Einhaltung der Zeit sowie eine Limitierung in der Arbeitsbewegung identifiziert. Zur Optimierung ist eine eigene Applikation zur Eigenkontrolle

von Zeiten entwickelt worden. Die Einschränkung des Arbeitsspiels der Maschine erfolgt über Markierspray sowie mit Stativen.

Für die II. Testreihe kommen ein 18,0 t Mobilbagger, ein 24,0 t Kettenbagger ein 6,0 t Kleinlader sowie ein 24,0 t Großlader zum Einsatz. Für die Hydraulikbagger geht als wesentliche Erkenntnis eine realitätsnahe Verbrauchsrate ohne eine Erdbewegung hervor. Hierdurch ist der Testablauf deutlich einfacher zu gestalten, da eine Produktivitätsbewertung nicht notwendig ist. Diese ist beim Hydraulikbagger aufwändig, weil das geladene Material durch eine externe Wiegeeinrichtung festzustellen wäre. Mit dem Mobilbagger ist des Weiteren ein anstehende Recycling-Fahrergrund getestet worden, welcher mit einer Abweichung von <6,0 % zu einer Betonoberfläche sehr gute Testbedingungen aufweist. Für den Kettenbagger sind erweiterte Erkenntnisse zum Dieselpartikelfilter mit einem Mehrverbrauch von <1,0 % sowie ein Abgleich zwischen Bordcomputer und Kraftstoffmessgerät mit einer Abweichung von 4,4 % generiert worden. Der Großlader verfügt über eine eigene Wiegeeinrichtung, sodass hiermit die Produktivität bewertet werden kann. In Summe ist für die II. Testreihe zu konstatieren, dass mit den aufgestellten Methoden ein praxisnaher Verbrauch sowie mit einer Abweichung von <5,0 % ein repräsentativer In-Situ-Test vorliegt.

Die III. Testreihe hat zum Ziel, für den Großlader detaillierte Analysen zu unterschiedlichen Schaufelfüllstrategien und Schüttgütern aufzustellen. Die Schaufelfüllstrategie „Harte Fahrweise“ weist dabei die höchste Reproduzierbarkeit aber die geringste Produktivität auf. Die höchste Produktivität geht mit der Strategie „Käsehobel“ einher. In Bezug auf die Schüttgüter weisen homogene Materialien in Form von Kies und Sand deutlich bessere Eigenschaften als ein heterogenes Recyclingmaterial auf. Ferner ist durch eine zeitliche Varianz der definierten Zykluszeiten die Ausweisung einer maschinenindividuellen Maximaleffizienz möglich.

Mit der IV. Testreihe geht die Betrachtung von weiteren Anbaugeräten für den Hydraulikbagger einher. Die Quintessenz besteht darin, dass hydraulische Anbaugeräte, im Vergleich zur Ladetätigkeit, mit einer realen Arbeitsbelastung zu testen sind, um realitätsnahe Verbrauchsraten zu erzielen.

7.2 Ausblick

Der methodische Ansatz mit der Erfassung vom Stand der Technik, der Analyse zum Praxiseinsatz durch Statistiken und Flottendaten sowie der Validierung anhand von Praxistests erfüllt das definierte Ziel einer praxisnahen und repräsentativen Ausweisung der Energieeffizienz für Baumaschinen. Mit dem entwickelten zweistufigen Modell der Effizienzausweisung und der Bestimmung einer maschinenindividuellen Maximaleffizienz liegt ein Ergebnis vor, welches die Interessen aller Akteure in Form der Hersteller und Anwender widerspiegelt.

Als Ausblick gilt es die entwickelten Methoden für eine herstellerübergreifende Testreihe anzuwenden. Ferner sind mit einer umfangreichen Analyse zu den Leerlaufzeiten große Optimierungspotentiale aufgedeckt worden. Die Ergebnisse stellen einen anfänglichen methodischen Ansatz zur digitalen Einsatzberatung dar, woraus sich ein weiterer, signifikanter Forschungsbedarf zur Steigerung der Prozesseffizienz ableiten lässt.

Literaturverzeichnis

Gesetze, Verordnungen, Vorschriften und Normen

[1] Richtlinie 70/220/EWG des Rates zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Emissionen von Kraftfahrzeugen, Fassung vom 01. Januar 2007

[2] Richtlinie 97/68/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 1997 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen zur Bekämpfung der Emission von gasförmigen Schadstoffen und luftverunreinigenden Partikeln aus Verbrennungsmotoren für mobile Maschinen und Geräte, Fassung vom 10. Januar 2013

[3] Richtlinie 2004/26/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. April 2004 zur Änderung der Richtlinie 97/68/EG zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen zur Bekämpfung der Emission von gasförmigen Schadstoffen und luftverunreinigenden Partikeln aus Verbrennungsmotoren für mobile Maschinen und Geräte, Fassung vom 30. April 2004

[4] ECE-R 101: Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Personenkraftwagen, die nur mit einem Verbrennungsmotor oder mit Hybrid-Elektro-Antrieb betrieben werden, Fassung vom 26. Mai 2012

[5] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN ISO 8178-4: Hubkolben-Verbrennungsmotoren, Abgasmessungen, Prüfzyklus, Fassung vom Dezember 1996

[6] Verordnung (EU) 2016/1628 des europäischen Parlaments und des Rates vom 14. Dezember 2016 über die Anforderungen in Bezug auf die Emissionsgrenzwerte für gasförmige Schadstoffe und luftverunreinigende Partikel und die Typgenehmigung für Verbrennungsmotoren für nicht für den Straßenverkehr bestimmte mobile Maschinen und Geräte, zur Änderung der Verordnungen (EU) Nr. 1024/2012 und (EU) Nr. 167/2013 und zur Änderung und Aufhebung der Richtlinie 97/68/EG, Fassung vom 16. Dezember 2016

Monographien und Beitragswerke

[7] Bauer, Ulrich; Winz, Gerald: Ermittlung des Baumaschinenbestandes in Deutschland, Forschungsvereinigung Bau- und Baustoffmaschinen e. V., Frankfurt, 2015

[8] Borgeest, Kai: Manipulation von Abgaswerten, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2016

[9] Deiters, Henning: Standardisierung von Lastzyklen zur Beurteilung der Effizienz mobiler Arbeitsmaschinen, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Dissertation, 2008

[10] Eymmer, Wilfried; Oppermann, Stefan; Redlich, Roland; Schürmann, Michael: Grundlagen der Erdbewegung, 2. Auflage, Kirschbaum Verlag, Bonn, 2007

[11] Filla, Reno: Quantifying Operability of Working Machines, Linköpings Universitet, Linköping (Schweden), Dissertation, 2011

- [12] Filla, Reno: Representative Testing of Emissions and Fuel Consumption of Working Machines in Reality and Simulation, Volvo Construction Equipment AB, Eskilstuna (Schweden), 2012
- [13] Fleczorek, Thomas: Effizienzbewertung von Antrieben mobiler Arbeitsmaschinen am Beispiel eines Mähreschers, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Dissertation, 2012
- [14] Helms, Hinrich; Heidt, Christoph: Erarbeitung eines Konzepts zur Minderung der Umweltbelastung aus NRMM (non road mobile machinery) unter Berücksichtigung aktueller Emissionsfaktoren und Emissionsverminderungsoptionen für den Bestand, ifeu-Institut für Energie- und Umweltforschung, Heidelberg, 2013
- [15] Hüster: Leistungsberechnung der Baumaschinen, 4. Auflage, Shaker Verlag, Düsseldorf, 2003
- [16] Kühn: Der maschinelle Erdbau, Teubner Verlag, Stuttgart, 1984
- [17] Lindgren, Magnus; Petterson, Ola; Hansson, Per-Anders; Norén, Olle: "Engine load pattern and engine exhaust gas emissions from off-road vehicles and methods to reduce fuel-consumption and engine exhaust gas emissions", JTI – Swedish Institute of Agricultural and Environmental Engineering, Uppsala, 2002
- [18] Samuelsson, Ted; Filla, Reno; Frank, Bobbie; Skogh, Lennart: Selecting representative working cycles from large measurement data sets, Volvo Construction Equipment, Eskilstuna (Schweden), 2016
- [19] Scherer, Philipp: Methodik zur Bewertung der Energieeffizienz von mobilen Arbeitsmaschinen, Karlsruher Institut für Technologie, Dissertation, 2016
- [20] Sturm, Christoph: Bewertung der Energieeffizienz von Antriebssystemen mobiler Arbeitsmaschinen am Beispiel Bagger, Karlsruher Institut für Technologie, Dissertation, 2015
- [21] Umweltbundesamt GmbH (Österreich): Abweichung realer Verbrauchswerte von Testwerten bei PKW in Österreich, Pressestelle Umweltbundesamt, Wien (Österreich), 29. Mai 2015
- [22] Wulfmeier, Kirsten: Anforderungen an Methoden zur Effizienzbewertung von mobilen Maschinen, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Dissertation, 2015

Zeitschriften und Zeitungen

- [23] Ays, Isabelle; Geimer, Marcus: CO₂e Quantifizierung von mobilen Arbeitsmaschinen im Erdbau, Steinbruch, Straßen- und Hochbau; Hybride und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen. In Hybride und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen: 6. Fachtagung, Karlsruhe, 15. Februar 2017, S. 145-161
- [24] Caterpillar Inc.: Caterpillar Performance Handbook 45, Peoria, Januar 2015
- [25] Caterpillar Inc.: Caterpillar Performance Handbook 46, Peoria, Januar 2016
- [26] Cohrs, Heinz-Herbert: Keine Energie verschwenden! In bpz – Die Praxis der Bauunternehmer 3-2017, Guntersblum, 2017, S. 18-25
- [27] Daimler FleetBoard GmbH: Fahrzeugmanagement-Benutzerhandbuch, Stuttgart, August 2008

- [28] DB Mobility Logistics AG: Ausgestaltung der Ausschreibungsunterlagen für die Vergabe von Bauleistungen; Hier: Emissionsanforderungen für Baufahrzeuge und Baumaschinen, Berlin, 11. Juni 2013
- [29] Degrell, O; Feuerstein, T: „DLG-PowerMix“-Ein praxisorientierter Traktorentest. In 63. Tagung Landtechnik, Hannover, 4.-5. November 2005, S. 65-76
- [30] Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG: Technische Daten • 918 Spyder, Stuttgart, 9. September 2013
- [31] Filla, Reno: Evaluating the efficiency of wheel loader bucket designs and bucket filling strategies with non-coupled DEM simulations and simple performance indicator. In 6. Fachtagung Baumaschinentechnik, Dresden, 2015
- [32] Frank, Bobbie; Skogh, Lennart; Filla, Reno; Fröberg, Anders; Alaküla, Mats: On Increasing Fuel Efficiency by Operator Assistance Systems in a Wheel Loader. In International Conference on Advanced Vehicle Technologies and Integration, Changchun (China), Juli 2012
- [33] Hogg, G.; Pulkkia, R.; Ackerman, P.: Excavator-based processor operator productivity and cost analysis in Zululand, South Africa. In Southern Forests: A Journal of Forest Science 73, Heft 2, 2011, S. 109-115
- [34] International Council on Clean Transportation Europe gemeinnützige GmbH (ICCT): European Stage V non-road emission standards, November 2016
- [35] Kotte, Gernot: Arbeitswerkzeuge für leistungsfähige Erdbaumaschinen. In Tiefbau Ingenieurbau Straßenbau 7/97, Gütersloh, 1997, S. 24-33
- [36] Kotte, Gernot: Ermittlung der Nutzförderleistung von Hydraulikbaggern. In Tiefbau Ingenieurbau Straßenbau 9/97, Gütersloh, 1997, S. 18-29
- [37] Kleibl, Albrecht: Effizienzbewertung bei Spezialtiefbaumaschinen, Schriftenreihe FVB Nr. 49, Frankfurt am Main, September 2015, S. 123-134
- [38] Kramer-Werke GmbH: Der eRadlader 5055e. Pfullendorf, Februar 2018
- [39] Kramer-Werke GmbH: Der eRadlader KL25.5e setzt Maßstäbe. Pfullendorf, November 2017
- [40] Kunze, Günter; Mieth; Sebastian; Voigt, Sebastian: Bedienereinfluss auf Leistungszyklen mobiler Arbeitsmaschinen. In ATZ offhighway 4, 2011, S. 70-79
- [41] Liebherr-Hydraulikbagger GmbH: Schnellwechselsysteme, Kirchdorf/Iller, April 2013
- [42] Liebherr-Werk Bischofshofen GmbH: Radlader L550-L586 2plus2, Bischofshofen, Mai 2008
- [43] Liebherr-Werk Bischofshofen GmbH: Radlader L550-L586 xPower, Bischofshofen, März 2018
- [44] Mathur, N.; Aria, S.S.; Adams, Timothy; Ahn, Changbum; Lee, S.: Automated Cycle Time Measurement and Analysis of Excavator's Loading Operation Using Smart Phone-Embedded IMU Sensors. In Congress on Computing in Civil Engineering (Tagungsband), Austin (USA), 2015, S. 215-222
- [45] Miller UK Ltd: Buckets and Other Attachments, Cramlington, 2014
- [46] Motorenfabrik Hatz GmbH & Co. KG: Schon heute fit für die Abgasnorm Stufe V, Ruhstorf a. d. Rott, März 2016

- [47] Neunaber, Manfred; Wilmer, Hubert: Es geht auch ohne AdBlue. In Profi 12/2011, Münster, 2011
- [48] Ng, Felix; Harding, Jennifer; Glass, Jacqueline: An eco-approach to optimise efficiency and productivity of a hydraulic excavator. In Journal Cleaner Production, Juni 2015
- [49] Parsakho, Aidin; Hosseini, Seyed Atollah; Jalilvand, Hamid; Lotfalian, Majid: Physical Soil Properties and Slope Treatments Effects on Hydraulic Excavator Productivity for Forest Road Construction. In Pakistan Journal of Biological Sciences 11, 2008, S. 1422-1428
- [50] Pleic, Nediljko: Der Hybrid von Komatsu – effizient und umweltschonend. In 47. VDBUM Seminar, Willingen, 20.-23. Februar 2018
- [51] Reich, Tristan; Geimer, Marcus: Vergleichszyklen für Mobile Arbeitsmaschinen auf dem Rollenprüfstand. In 43. VDBUM Seminar, Kassel, 19.-22. Februar 2014, S. 36-40
- [52] Schnieder, Anja: Die neue Abgasstufe: Für Baumaschinenhersteller eine große Herausforderung. In Wissensportal baumaschine.de 2-2011, Dresden, 2011
- [53] Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz Berlin: Leitfaden zur Kontrolle von emissions-armen Baumaschinen und Partikelfilternachrüstungen - Umweltstandards für Baumaschinen im Hoch- und Tiefbau im Rahmen öffentlicher Aufträge, Berlin, August 2017
- [54] Sprenger, Christian: Straßentauglichkeit von mobilen Baumaschinen. In BauPortal 6-2011, München, Juni 2011, S. 23-24
- [55] Tabert, Bernhard W.: CAT Flottenmanagement - suchen war gestern, finden ist heute. In 44. VDBUM Seminar, Willingen, 24.-27. Februar 2015
- [56] VDMA e. V.: Emissionsgesetzgebung für mobile Maschinen: EU Stufe V – Fact Sheet, Frankfurt am Main, 15. Mai 2015
- [57] Zeppelin Baumaschinen GmbH: Neuer Cat® Radlader 966K XE mit innovativem Antriebskonzept, Garching bei München, Juni 2012

Internetquellen

- [58] ADAC e.V.: Diesel-Nachrüstung mit SCR-System, https://www.adac.de/infotestrat/tests/ecotest/diesel_nachruetzung/default.aspx, Abrufdatum: 5. Juni 2018
- [59] ADAC e.V.: Einführung in das Typengenehmigungsverfahren und dessen Auswirkung auf andere Gesetzgebungen und Verbraucherinformationen, <https://www.adac.de/infotestrat/umwelt-und-innovation/abgas/wltp/default.aspx>, Abrufdatum: 5. Juni 2018
- [60] DLG e. V.: DLG Powermix, <http://www.dlg.org/dlg-powermix.html>, Veröffentlichungsdatum: 2013, Abrufdatum: 23. Juni 2017
- [61] Ecopoint Inc.: Nonroad Transient Cycle (NRTC), <https://www.dieselnet.com/standards/cycles/nrtc.php> Veröffentlichungsdatum: 2013, Abrufdatum: 14. Dezember 2017
- [62] Google: Kartendaten: Google, DigitalGlobe, Screenshot 51°36'40.5"N 6°53'10.8"E, www.google.de/maps, Abrufdatum: 22.09.2017

- [63] Google: Kartendaten: Google, DigitalGlobe, Screenshot 53°50'46.0"N 9°53'39.6"E, www.google.de/maps, Abrufdatum: 22.09.2017
- [64] Google: Kartendaten: Google, DigitalGlobe, Screenshot Barbaragelände Essen, www.google.de/maps, Abrufdatum: 09.03.2017
- [65] Google: Kartendaten: Google, DigitalGlobe, Screenshot Hafengelände Essen, www.google.de/maps, Abrufdatum: 09.03.2017
- [66] Groupe Mecalac S.A.: MECALAC e12: 100 % Elektrobagger für den Einsatz auf städtischen Bau-
stellen, <https://www.mecalac.com/de/neuigkeiten/mecalac-e12-electric-wheel-excavator.html>,
Veröffentlichungsdatum: 22. Januar 2018, Abrufdatum: 22. April 2018
- [67] Liebherr Hydraulikbagger GmbH: Spritsparrechner für Radlader L566 XPower, <http://m.efficiencyplus.liebherr.com/de-DE/147500.wfw?productid=L-566-xpower>, Abrufdatum: 18.10.2017
- [68] Liebherr Hydraulikbagger GmbH: Efficiencyplus - Datenbasis, <http://www.efficiencyplus.liebherr.com/de-DE/148855.wfw>, Abrufdatum: 18.10.2017
- [69] Springer Fachmedien München GmbH: Verunsicherung bei Kaufinteressenten wächst, <https://www.autohaus.de/nachrichten/diesel-umfrage-verunsicherung-bei-kaufinteressenten-waechst-1942648.html>, Veröffentlichungsdatum: 27. April 2017, Abrufdatum: 12. März 2018
- [70] Verband der Automobilindustrie, WLTP – weltweit harmonisierter Zyklus für leichte Fahrzeuge, <https://www.vda.de/de/themen/umwelt-und-klima/abgasemissionen/wltp-weltweit-harmonisierter-zyklus-fuer-leichte-fahrzeuge.html>
Veröffentlichungsdatum: 4. November 2015, Abrufdatum: 12. März 2018
- [71] Verband der Automobilindustrie, WLTP – weltweit am Start für realitätsnähere Ergebnisse beim Kraftstoffverbrauch, <https://www.vda.de/de/themen/umwelt-und-klima/WLTP-realitaetsnaehere-Ergebnisse-beim-Kraftstoffverbrauch/WLTP-Wie-realitaetsnah-ist-der-WLTP.html>
Veröffentlichungsdatum: 30. August 2017, Abrufdatum: 12. März 2018
- [72] Wacker Neuson SE: Technische Daten WL20e, <http://www.wackerneuson.de/de/produkte/radlader/knickgelenkte-radlader/model/wl20e/type/TechnicalData/>, Abrufdatum: 22. April 2018
- [73] Zeppelin Baumaschinen GmbH: Radlader Konfigurator, <https://www.konfigurator.zeppelin-cat.de/de/uebersicht.html>, Abrufdatum: 6. März 2018

Nicht allgemein zugängliche Arbeiten

- [74] Entwurf zur ISO 11152 – Earth moving machinery – Energy use test methods, 2011

Anhangsverzeichnis

Anhang 1	Vorveröffentlichungen	165
Anhang 2	Formelsammlung	166
Anhang 3	Auflockerungsfaktor	170
Anhang 4	Benutzeroberfläche Applikation Bauprozessanalysen.....	171
Anhang 5	Beispielrechnung Minibagger auf Relevanz.....	172
Anhang 6	Einteilung Klimazonen.....	173
Anhang 7	Rahmenbedingungen Lastzyklus.....	174
Anhang 8	Prüfprotokoll Testreihe.....	176
Anhang 9	Löffelgrößen und Baggereinteilung nach Entwurf zur ISO11152	190

Anhang 1 Vorveröffentlichungen

Manfred Helmus, Marco Fecke: Standardisierung definierter Lastzyklen und Messmethoden zur Energieverbrauchsermittlung von Baumaschinen, Schlussbericht zum Forschungsvorhaben, Bergische Universität Wuppertal – Interdisziplinäres Zentrum III, Wuppertal, 2015

Manfred Helmus, Marco Fecke: Standardisierung definierter Lastzyklen und Messmethoden zur Energieverbrauchsermittlung von Baumaschinen, Tagungsband Fachtagung Baumaschinentechnik 2015, Forschungsvereinigung Bau- und Baustoffmaschinen e. V., Frankfurt, 2015, S. 113-123

Manfred Helmus, Marco Fecke: Verbrauch auf dem Prüfstand, Baugewerbe-Unternehmermagazin, JM Fachmedien, Köln, Ausgabe März 2016, S. 56-59

Sonja Reimann: Rückschlüsse auf Kraftstoff-Effizienz, Deutsches Baublatt, Zeppelin Baumaschinen GmbH, Ausgabe Juli-August 2015, S. 25

Anhang 2 Formelsammlung

Die Formelsammlung beinhaltet nur die selbst aufgestellten Formeln der vorliegenden Arbeit. Allgemeingültige Formeln sind nicht aufgeführt.

Formel (4-3)

$$f_{U,100i} = \frac{f_{U_i}}{\sum_i f_{U_i}}$$

mit

$f_{U,100i}$: Korrigierter Marktanteil auf 100 % unter Berücksichtigung von Verbrauch und Betriebsstunden

f_{U_i} : Marktanteil unter Berücksichtigung von Verbrauch und Betriebsstunden

$$f_{U_i} = \frac{n_{M_i} \times \bar{x}_{V_i}}{\sum_i (n_{M_i} \times \bar{x}_{V_i})} \times \frac{\bar{x}_{Std,M_i}}{\bar{x}_{Std,M}}$$

n_{M_i} : Anzahl Maschinentyp

\bar{x}_{V_i} : durchschn. Verbrauch Maschinentyp

\bar{x}_{Std,M_i} : durchschn. Betriebsstunden Maschinentyp

$\bar{x}_{Std,M}$: durchschn. Betriebsstunden aller Maschinentypen

Formel (4-10)

$$f_{E_1,L_k} = f_{E_1} \times \bar{x}_{L_k,Temp}$$

mit

f_{E_1,L_k} : Länderabhängiger Korrekturfaktor Temperatur

f_{E_1} : Korrekturfaktor Temperatur

$\bar{x}_{L_k,Temp}$: Durchschnittstemperaturabweichung Länderabweichung

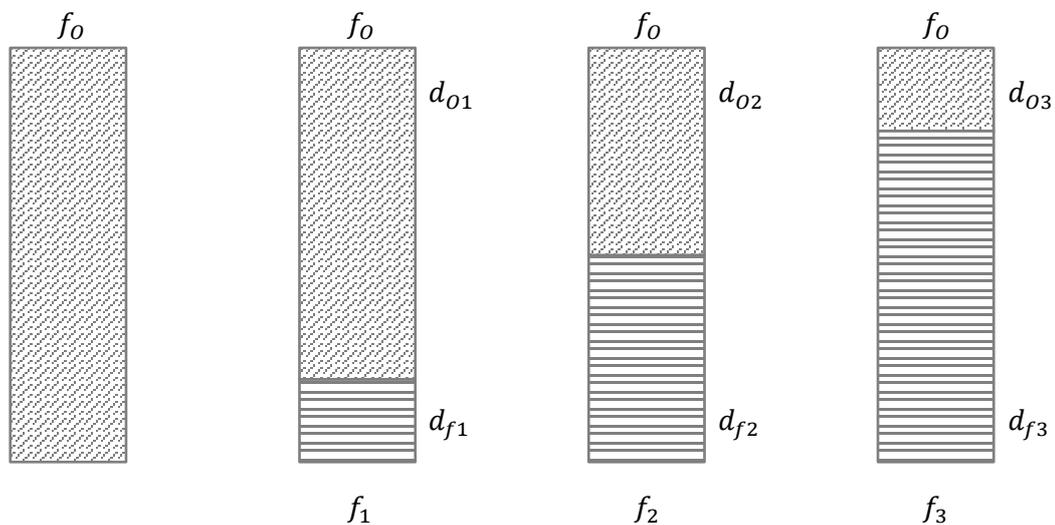
Formel (4-11)

$$B_{L_k,korr} = s_1 \times s_2 \times s_3 \times s_4$$

mit

$B_{L_k,korr}$: Länderabhängiger Bodenkennwert zum Widerstand

$s_1 \dots s_4$:	Schichttiefen nach Einteilung
		$s_1 = f_0$
		$s_2 = f_0 \times d_{01} + f_1 \times d_{f1}$
		$s_3 = f_0 \times d_{02} + f_2 \times d_{f2}$
		$s_4 = f_0 \times d_{03} + f_3 \times d_{f3}$
f_0	:	Schichtverteilung Oberfläche mit Lösefaktor
		$f_0 = b_1 \times f_{01} + b_2 \times f_{02} + b_3 \times f_{03} + b_4 \times f_{04} + b_5$ $\times f_{05} + b_6 \times f_{06}$
$b_1 \dots b_6$:	Anteile [%] Bodenarten
$f_{01} \dots f_{06}$:	Bodenkennwerte / Lösefaktor
$f_1 \dots f_3$:	Felsanteile nach Einteilung mit Lösefaktor
$d_{01} \dots d_{03}$:	Schichttiefen nach Einteilung ohne Fels
$d_{f1} \dots d_{f3}$:	Schichttiefen nach Einteilung mit Fels



Formel (4-17)

$$f_{E_2, L_k} = \frac{B_{L_{DE}, \text{kor.}}}{B_{L_k, \text{kor.}}}$$

mit

f_{E_2, L_k} : Länderabhängiger Korrekturfaktor Boden

$B_{LDE,korr.}$:	Referenzwert Deutschland
$B_{Lk,korr.}$:	Länderabhängiger Bodenkennwert zum Widerstand

Formel (4-18)

$$t_i(V_{M_i}) = \frac{V_{M_i}}{\bar{V}_{M_i}}$$

mit

$t_i(V_{M_i})$:	modellabhängige Faktorisierung auf Verbrauchsrate
V_{M_i}	:	modellabhängige durchschnittliche Verbrauchsrate
\bar{V}_{M_i}	:	Mittelwert aller modellabhängigen durchschnittlichen Verbrauchsraten

Formel (4-19)

$$y_i(T_{j,M_i}) = \frac{T_{j,M_i}}{\bar{T}_{j,M_i}}$$

mit

$y_i(T_{j,M_i})$:	modellabhängige Faktorisierung an Tätigkeit
T_{j,M_i}	:	modellabhängiger durchschnittlicher Anteil an Tätigkeit
\bar{T}_{j,M_i}	:	Mittelwert aller modellabhängigen durchschnittlichen Anteile an Tätigkeiten

Formel (4-21)

$$f_i(x_{L_k}) = a_i + b_i \times x_{L_k}$$

mit

$f_i(x_{L_k})$:	Lineare Funktion zur Bestimmung der modellabhängigen Korrekturfaktoren
a_i	:	y-Achsenabschnitt nach modellabhängiger Tätigkeit
b_i	:	Steigungsmaß nach modellabhängiger Tätigkeit

$$a_i(T_{j,M_i}) = \bar{y} - b_i \times \bar{t}$$

$$b_i(T_{j,M_i}) = \frac{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t}) \times (y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2}$$

- \bar{t} : Mittelwert der modellabhängigen Faktorisierung auf Verbrauchsrate
- \bar{y} : Mittelwert der modellabhängigen Faktorisierung auf Tätigkeit

Formel (4-24)

$$f_i = f_i(x_{L_k})$$

mit

- f_i : Funktion zur Bestimmung der länderspezifischen, modellabhängigen Korrekturfaktoren

- x_{L_k} : länderspezifischer, modellabhängiger Faktor

$$x_{L_k}(T_{j,M_i}) = \frac{\bar{T}_{j,M_i,L_k}}{\sum_l \bar{T}_{j,M_i,L_l}}$$

- \bar{T}_{j,M_i,L_k} : durchschnittlicher, länderspezifischer modellabhängiger Anteil der Tätigkeit

- $\sum_l \bar{T}_{j,M_i,L_l}$: Summe durchschnittlicher, modellabhängiger Anteil der Tätigkeit aller betrachteten Länder

Formel (4-26)

$$V_{intern,korr.}(M_i, L_k) = \frac{\bar{V}_{M_i,L_k}}{\sum_i f_i}$$

mit

- $V_{intern,korr.}(M_i, L_k)$: korrigierte, modellabhängige, länderspezifische Verbrauchsrate der internen Faktoren

- \bar{V}_{M_i,L_k} : Mittelwert der länderspezifischen, modellabhängigen Verbrauchsrate

- $\sum_i f_i$: Summe aller internen Korrekturfaktoren

Formel (4-27)

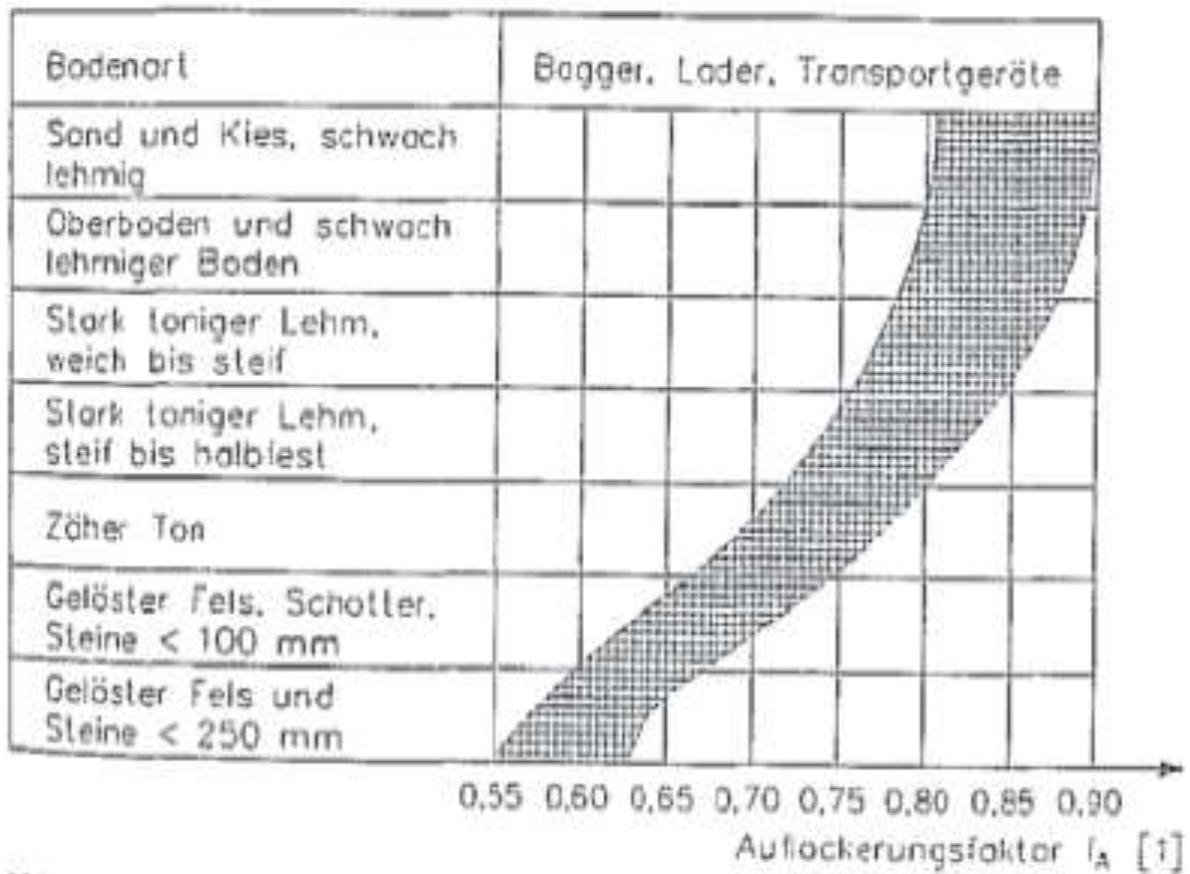
$$V_{extern,korr.}(M_i, L_k) = V_{intern,korr.}(M_i, L_k) \times f_{E_1,L_k} \times f_{E_2,L_k}$$

mit

- $V_{extern,korr.}(M_i, L_k)$: länderspezifischer Gesamtkorrekturfaktor inklusive externer Faktoren

Anhang 3 Auflockerungsfaktor

Aus Hüster: Leistungsberechnung der Baumaschinen, Shaker Verlag, Aachen, 2007, S. 33



Anhang 4 Benutzeroberfläche Applikation Bauprozessanalysen

Start

Save

Ende

Bagger

Bagger (SWS)

Radlader

Minibagger (1-6t)

Kompaktbagger (7-9t)

Mobilbagger (10-25t)

Raupenbagger (14-90t)

Aushub auf LKW (gezielt)

Aushub auf Bodenmiete (ungezielt)

Planierarbeiten

Hebe- und Lastarbeiten

Abbrucharbeiten

Stromkabel 1

Universallöffel

Felslöffel (verstärkt)

Zweischalengreifer

Hochlöffel

Großräumlöffel

Laden ---:---:---

Schwenken ---:---:---

Leerlauf ---:---:---

Planieren ---:---:---

Entladen ---:---:---

Zurückschwenken ---:---:---

Fahren ---:---:---

Störung ---:---:---

Reparatur/Wartung ---:---:---

Umbau ---:---:---

Sonst. 1 ---:---:---

Witterungsbed...	n/a	Trocken	Regen	Unwetter
------------------	-----	----------------	-------	----------

Bodenklasse	n/a	BK 1	BK 2	BK 3	BK 4	BK 5	BK 6	BK 7
-------------	-----	------	------	-------------	------	------	------	------

Untergrund	n/a	Asphaltiert	Glatt / Fest	Leicht wellig / Fest	Wellig / Mittelfest	Wellig / Weich
------------	-----	-------------	--------------	-----------------------------	---------------------	----------------

Zugänglichkeit	n/a	Frei zugänglich	Beschränkt	Stark Beschränkt
----------------	-----	------------------------	------------	------------------

Schwenkwinkel	n/a	0 - 30°	30 - 60°	60 - 90°	90 - 120°	120 - 150°	150 - 180°
---------------	-----	---------	-----------------	----------	-----------	------------	------------

Fahrweglänge	n/a	0 - 20m	0 - 50m	0 - 100m	0 - 200m
--------------	------------	---------	---------	----------	----------

Grabtiefe	n/a	0 bis 1 Meter	bis 2 Meter	bis 3 Meter	bis 4 Meter	bis 5 Meter	> 5 Meter
-----------	-----	---------------	--------------------	-------------	-------------	-------------	-----------

Anhang 5 Beispielrechnung Minibagger auf Relevanz

$$f_{U,100i} = \frac{f_{U_i}}{\sum_i f_{U_i}} \quad (7-1)$$

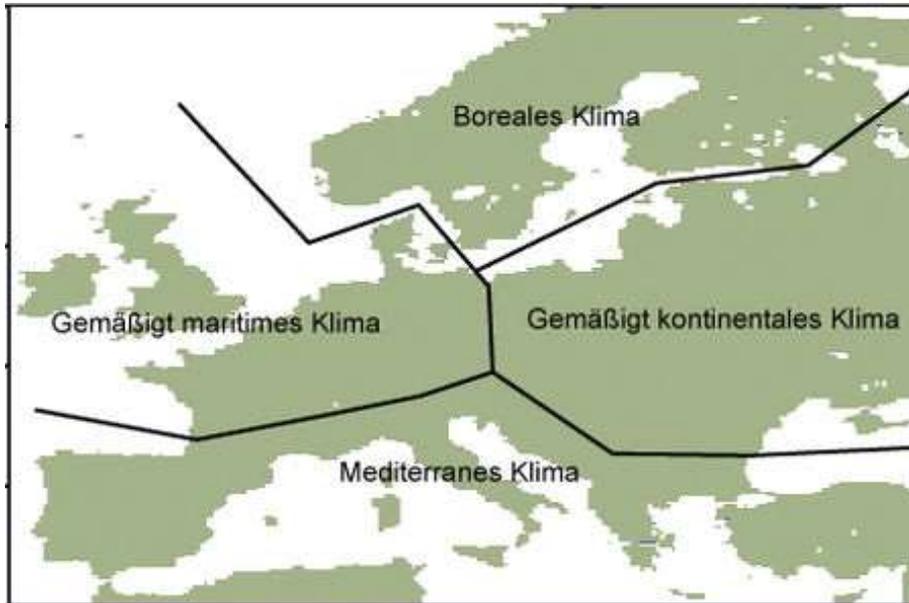
mit:

$$f_{U_i} = \frac{n_{M_i} \times \bar{x}_{V_i}}{\sum_i (n_{M_i} \times \bar{x}_{V_i})} \times \frac{\bar{x}_{Std,M_i}}{\bar{x}_{Std,M}} \quad (7-2)$$

Index	Beschreibung	Wert
$n_{M_{MB}}$	Marktanteil Minibagger	55,0 %
$\bar{x}_{V_{MB}}$	Durchschn. Verbrauch Minibagger	2,0 l/h
$n_{M_{MB}} \times \bar{x}_{V_{MB}}$	Marktanteil x durchschn. Verbrauch für Minibagger	110,0 [-]
$\sum_i n_{M_i} \times \bar{x}_{V_i}$	Summe Marktanteil x durchschn. Verbrauch aller Maschinentypen	729,5 [-]
$\frac{n_{M_{MB}} \times \bar{x}_{V_{MB}}}{\sum_i (n_{M_i} \times \bar{x}_{V_i})}$	Ergebnis Berücksichtigung Verbrauch auf Marktanteil	15,1 [%]
$\bar{x}_{Std,M_{MB}}$	Durchschn. Betriebsstunden Minibagger	328,9 [h/a]
$\bar{x}_{Std,M}$	Durchschn. Betriebsstunden aller Maschinentypen	969,7 [h/a]
$\frac{\bar{x}_{Std,M_{MB}}}{\bar{x}_{Std,M}}$	Faktor zur Berücksichtigung der Betriebsstunden für Minibagger	0,3392 [-]
$f_{U_{MB}}$	Marktanteil Minibagger nach Berücksichtigung vom Kraftstoffverbrauch und Betriebsstunden	5,1 [%]
$\sum_i f_{U_i}$	Summe Marktanteil aller Maschinentypen nach Berücksichtigung vom Kraftstoffverbrauch und Betriebsstunden	90,4 [%]
$f_{U,100_{MB}}$	Korrigierter Marktanteil auf 100 %	5,7 [%]

Anhang 6 Einteilung Klimazonen

Von Climate Service Center: Wälder im Klimawandel: Europa, http://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/W%C3%A4lder_im_Klimawandel:_Europa, Abrufdatum: 18.06.2017



Anhang 7 Rahmenbedingungen Lastzyklus

Im Folgenden sollen die wesentlichen Rahmenbedingungen und Anforderungen an der Testdurchführung stichpunktartig aufgelistet werden. Diese setzen sich sowohl aus pauschalen Annahmen als auch aus den Erkenntnissen aus den Testreihen zusammen.

Testanforderungen:

Reproduzierbarkeit:	< 5,0 % Abweichung
Anzahl Testfahrer:	> 4,00
Fahrniveau:	geübter Fahrer, keine Anfänger
Vorbereitungszeit Fahrer für Test:	je nach Fahrniveau, jedoch min. 1,00 Tag
Kraftstoffmessgerät:	Genauigkeit $\pm 1,00$ % oder besser
Ausstattung:	<ul style="list-style-type: none"> - Applikation zur Eigenkontrolle des Fahrers in Fahrerkabine - Stative mit Absperrband - Markierspray - Messrad - Stoppuhr - Kamera zur Aufzeichnung der Testabläufe - Rechner zur Aufzeichnung Verbräuche
Fahreruntergrund:	Tragfähig mit Längsgefälle < 2,00 %

Rahmenbedingungen:

Die Rahmenbedingungen gilt es vor der Testdurchführung zu protokollieren. Diese sind z.T. aus dem Entwurf zur ISO 11152 entnommen.

Temperaturfenster:	5 bis 35°C
Höhenlage:	< 1.200 m üNN
Maschineneinstellung:	Standardkonfiguration des Herstellers
Anbaugeräte:	Auswahl nach Herstellervorgaben
Maschinenparameter:	<ul style="list-style-type: none"> - Baujahr - Betriebsstunden - Luftdruck Reifen - Batterien und Kondensatoren vor Testbeginn aufladen

- Heizung und Beleuchtung der Maschine
- Motorleistung
- Motortemperatur
- Kraftstofftemperatur
- Hydrauliköltemperatur

Anbaugeräte:

- Baujahr
- Gewicht
- Schaufelvolumen
- Abmessungen
- benötigte Leistung und Druck der Hydraulik
- Leistung

Sonstiges:

- Luftfeuchtigkeit und Lufttemperatur

Testdurchführung:

Für die Testdurchführung sind folgende Parameter, in Abhängigkeit vom Lastzyklus, bei jedem Testdurchlauf festzuhalten.

Parameter:

- Fahrer
- Datum und Uhrzeit
- Vorgegebene Testdauer [Sek.]
- Tatsächliche Testdauer [Sek.]
- Anzahl der Lastzyklen
- Totalverbrauch [l]
- Verbrauchsrate [l/h]
- Produktivität
- Gangstufe
- Fahrstufe
- Arbeitsmodus
- Partikelfilter-Regeneration
- Schaufelfüllstrategie
- Schüttgut

Anhang 8 Prüfprotokoll Testreihe

Protokoll zur Durchführung der Praxistests

Protokoll zur Durchführung der Praxis-Tests

1 Radlader-Test

Maschine: Alter: Betriebsstunden:
 Anbaugerät: Datum:
 Reifentyp: Reifendruck (vo/hi):
 Witterung: Temp.: Luftfeuchtigkeit:
 Ort: Höhenlage:
 Fahrer:

1.1 Heben

Gewicht: Fahrmodus: Power

Höhe:

Stapeleinrichtung	Operator 1	Operator 2	Operator 3	Operator 4
Uhrzeit				
Def. Zeit [Sek.]				
Gesamtzeit [Sek.]				
Anzahl Zyklen				
Verbrauch [l]				
Verbrauch [l/h]				

Gewicht: Fahrmodus: Eco

Höhe:

Stapeleinrichtung	Operator 1	Operator 2	Operator 3	Operator 4
Uhrzeit				
Def. Zeit [Sek.]				
Gesamtzeit [Sek.]				
Anzahl Zyklen				
Verbrauch [l]				
Verbrauch [l/h]				

Protokoll zur Durchführung der Praxistests

1.2 Fahren

V-förmige Strecke, Länge jeweils 15,0 m

Fahrmodus:

Recycling-Material	Operator 1	Operator 2	Operator 3	Operator 4
Uhrzeit				
Zeit gesamt				
∅ - Zykluszeit				
Streckenlänge				
Anzahl Zyklen				
Verbrauch [l]				
Verbrauch [l/h]				
Schluff				
Uhrzeit				
Zeit gesamt:				
∅ - Zykluszeit				
Streckenlänge				
Anzahl Zyklen				
Verbrauch [l]				
Verbrauch [l/h]				
Beton				
Uhrzeit				
Zeit gesamt				
∅ - Zykluszeit				
Streckenlänge				
Anzahl Zyklen				
Verbrauch [l]				
Verbrauch [l/h]				

1.3 Transport-Leer

Streckenlänge: 140,00 m

Recycling-Material	Operator 1	Operator 2	Operator 3	Operator 4
Uhrzeit				
Zeit gesamt				
∅ - Zykluszeit				
Gangart				
Verbrauch [l]				
Schluff				
Uhrzeit				
Zeit gesamt				
∅ - Zykluszeit				
Gangart				
Verbrauch [l]				

1.4 Transport-Beladen

Gewicht:

Streckenlänge: 140,00 m

Recycling-Material	Operator 1	Operator 2	Operator 3	Operator 4
Uhrzeit				
Zeit gesamt				
∅ - Zykluszeit				
Gangart				
Verbrauch [l]				
Schluff				
Uhrzeit				
Zeit gesamt				
∅ - Zykluszeit				
Gangart				
Verbrauch [l]				

Protokoll zur Durchführung der Praxistests

1.5 Kleines Ladespiel

V-Ladespiel, Wege 15,0 m, Höhe:

Fahrmodus:

Recycling-Material	Operator 1	Operator 2	Operator 3	Operator 4
Wichte				
Uhrzeit				
Fahruntergrund				
Gesamtzeit				
∅ - Zykluszeit				
Anzahl Zyklen				
Verbrauch [l]				
Gesamt Material [t]				
Kies				
Wichte				
Uhrzeit				
Fahruntergrund				
Gesamtzeit				
∅ - Zykluszeit				
Anzahl Zyklen				
Verbrauch [l]				
Gesamt Material [t]				
Def. Gewicht				
Wichte				
Uhrzeit				
Fahruntergrund				
Gesamtzeit				
∅ - Zykluszeit				
Anzahl Zyklen				
Verbrauch [l]				
Gesamt Material [t]				

Protokoll zur Durchführung der Praxistests

1.6 Großes Ladespiel

V-Ladespiel, Strecke 130,0 m, Höhe:

Fahrmodus:

Recycling-Material	Operator 1	Operator 2	Operator 3	Operator 4
Wichte				
Uhrzeit				
Fahruntergrund				
Gesamtzeit				
∅ - Zykluszeit				
Anzahl Zyklen				
Verbrauch [l]				
Gesamt Material [t]				
Kies				
Wichte				
Uhrzeit				
Fahruntergrund				
Gesamtzeit				
∅ - Zykluszeit				
Anzahl Zyklen				
Verbrauch [l]				
Gesamt Material [t]				
Def. Gewicht				
Wichte				
Uhrzeit				
Fahruntergrund				
Gesamtzeit				
∅ - Zykluszeit				
Anzahl Zyklen				
Verbrauch [l]				
Gesamt Material [t]				

Protokoll zur Durchführung der Praxistests

1.7 Schaufelfüllstrategie

Variante: Käsehobel

Fahrmodus:

Schüttgut:

	Operator 1	Operator 2	Operator 3	Operator 4
Uhrzeit				
Def. Zeit [Sek.]				
Gesamtzeit [Sek.]				
Anzahl Zyklen				
Verbrauch [l]				
Produktivität				

Variante: Harte Fahrweise

Fahrmodus:

Schüttgut:

	Operator 1	Operator 2	Operator 3	Operator 4
Uhrzeit				
Def. Zeit [Sek.]				
Gesamtzeit [Sek.]				
Anzahl Zyklen				
Verbrauch [l]				
Produktivität				

Variante: Parabol

Fahrmodus:

Schüttgut:

	Operator 1	Operator 2	Operator 3	Operator 4
Uhrzeit				
Def. Zeit [Sek.]				
Gesamtzeit [Sek.]				
Anzahl Zyklen				
Verbrauch [l]				
Produktivität				

 Protokoll zur Durchführung der Praxistests

Variante: Stufen

Fahrmodus:

Schüttgut:

	Operator 1	Operator 2	Operator 3	Operator 4
Uhrzeit				
Def. Zeit [Sek.]				
Gesamtzeit [Sek.]				
Anzahl Zyklen				
Verbrauch [l]				
Produktivität				

1.8 Leerlauf

Die Leerlaufzeit soll mindestens 10 Minuten dauern. Der Motor ist vor Durchführung auf Betriebstemperatur zu bringen.

- Durchführung:
- Kraftstoffverbrauch:

Leerlauf	Operator 1
Dauer [Sek.]	
Verbrauch [l]	

Protokoll zur Durchführung der Praxistests

2 Hydraulikbagger-Test

Maschine: Alter: Betriebsstunden:
 Anbaugerät: Datum:
 Reifentyp: Reifendruck (vo/hi):
 Witterung: Temp.: Luftfeuchtigkeit:
 Ort: Höhenlage:
 Fahrer:

2.1 Laden

Variante: Fahrmodus:
 Höhe: Anbauwerkzeug:

	Operator 1	Operator 2	Operator 3	Operator 4
Uhrzeit				
Def. Zeit [Sek.]				
Gesamtzeit [Sek.]				
Anzahl Zyklen				
Verbrauch [l]				
Produktivität				

Variante: Fahrmodus:
 Höhe: Anbauwerkzeug:

	Operator 1	Operator 2	Operator 3	Operator 4
Uhrzeit				
Def. Zeit [Sek.]				
Gesamtzeit [Sek.]				
Anzahl Zyklen				
Verbrauch [l]				
Produktivität				

Protokoll zur Durchführung der Praxistests

Variante:

Fahrmodus:

Höhe:

Anbauwerkzeug:

	Operator 1	Operator 2	Operator 3	Operator 4
Uhrzeit				
Def. Zeit [Sek.]				
Gesamtzeit [Sek.]				
Anzahl Zyklen				
Verbrauch [l]				
Produktivität				

Variante:

Fahrmodus:

Höhe:

Anbauwerkzeug:

	Operator 1	Operator 2	Operator 3	Operator 4
Uhrzeit				
Def. Zeit [Sek.]				
Gesamtzeit [Sek.]				
Anzahl Zyklen				
Verbrauch [l]				
Produktivität				

2.2 Planieren

Variante:

Fahrmodus:

Länge:

Anbauwerkzeug:

	Operator 1	Operator 2	Operator 3	Operator 4
Uhrzeit				
Def. Zeit [Sek.]				
Gesamtzeit [Sek.]				
Anzahl Zyklen				
Verbrauch [l]				
Produktivität				

 Protokoll zur Durchführung der Praxistests

Variante:

Fahrmodus:

Länge:

Anbauwerkzeug:

	Operator 1	Operator 2	Operator 3	Operator 4
Uhrzeit				
Def. Zeit [Sek.]				
Gesamtzeit [Sek.]				
Anzahl Zyklen				
Verbrauch [l]				
Produktivität				

Variante:

Fahrmodus:

Länge:

Anbauwerkzeug:

	Operator 1	Operator 2	Operator 3	Operator 4
Uhrzeit				
Def. Zeit [Sek.]				
Gesamtzeit [Sek.]				
Anzahl Zyklen				
Verbrauch [l]				
Produktivität				

Variante:

Fahrmodus:

Länge:

Anbauwerkzeug:

	Operator 1	Operator 2	Operator 3	Operator 4
Uhrzeit				
Def. Zeit [Sek.]				
Gesamtzeit [Sek.]				
Anzahl Zyklen				
Verbrauch [l]				
Produktivität				

2.3 Fahren Kettenbagger

Streckenlänge jeweils 15,0 m

Fahrmodus:

Recycling-Material	Operator 1	Operator 2	Operator 3	Operator 4
Uhrzeit				
Zeit gesamt				
Ø - Zykluszeit				
Gangart				
Anzahl Zyklen				
Verbrauch [l]				
Verbrauch [l/h]				
Schluff				
Uhrzeit				
Zeit gesamt:				
Ø - Zykluszeit				
Gangart				
Anzahl Zyklen				
Verbrauch [l]				
Verbrauch [l/h]				
Beton				
Uhrzeit				
Zeit gesamt				
Ø - Zykluszeit				
Gangart				
Anzahl Zyklen				
Verbrauch [l]				
Verbrauch [l/h]				

2.4 Fahren Mobilbagger

Streckenlänge 140,00 m

Recycling-Material	Operator 1	Operator 2	Operator 3	Operator 4
Uhrzeit				
Zeit gesamt				
Ø - Zykluszeit				
Gangart				
Anzahl Zyklen				
Verbrauch [l]				
Verbrauch [l/h]				
Schluff				
Uhrzeit				
Zeit gesamt:				
Ø - Zykluszeit				
Gangart				
Anzahl Zyklen				
Verbrauch [l]				
Verbrauch [l/h]				
Beton				
Uhrzeit				
Zeit gesamt				
Ø - Zykluszeit				
Gangart				
Anzahl Zyklen				
Verbrauch [l]				
Verbrauch [l/h]				

2.5 Leerlauf

Die Leerlaufzeit soll mindestens 10 Minuten dauern. Der Motor ist vor Durchführung auf Betriebstemperatur zu bringen.

- Durchführung:
- Kraftstoffverbrauch:

Leerlauf	Operator 1
Dauer [Sek.]	
Verbrauch [l]	

2.6 Anbaugerät

Variante:

Fahrmodus:

Länge:

Anbauwerkzeug:

	Operator 1	Operator 2	Operator 3	Operator 4
Uhrzeit				
Def. Zeit [Sek.]				
Gesamtzeit [Sek.]				
Anzahl Zyklen				
Verbrauch [l]				
Produktivität				

Variante:

Fahrmodus:

Länge:

Anbauwerkzeug:

	Operator 1	Operator 2	Operator 3	Operator 4
Uhrzeit				
Def. Zeit [Sek.]				
Gesamtzeit [Sek.]				
Anzahl Zyklen				
Verbrauch [l]				
Produktivität				

Protokoll zur Durchführung der Praxistests

Variante:

Fahrmodus:

Länge:

Anbauwerkzeug:

	Operator 1	Operator 2	Operator 3	Operator 4
Uhrzeit				
Def. Zeit [Sek.]				
Gesamtzeit [Sek.]				
Anzahl Zyklen				
Verbrauch [l]				
Produktivität				

Variante:

Fahrmodus:

Länge:

Anbauwerkzeug:

	Operator 1	Operator 2	Operator 3	Operator 4
Uhrzeit				
Def. Zeit [Sek.]				
Gesamtzeit [Sek.]				
Anzahl Zyklen				
Verbrauch [l]				
Produktivität				

Anhang 9 Löffelgrößen und Baggereinteilung nach Entwurf zur ISO11152

Aus Entwurf zur ISO 11152 – Earth moving machinery – Energy use test methods, 2011, Table A1-A4

Machine class V_s	Bucket Capacity Range	Excavation trench depth d [m]	Front structure clearing height h [m]	Grading (Leveling) length L [m]
0.28 m ³	0.28 m ³ - 0.36 m ³	1.0	2.0	2.5
0.45 m ³	0.36 m ³ – 0.47 m ³	1.0	2.5	3.5
0.5 m ³	0.47 m ³ - 0.55 m ³	2.0	2.5	4.0
0.6 m ³	0.55 m ³ - 0.7 m ³	2.0	2.5	4.0
0.8 m ³	0.7 m ³ - 0.9 m ³	2.0	2.5	4.5
1.0 m ³	0.9 m ³ - 1.05 m ³	2.0	2.5	4.5
1.1 m ³	1.05 m ³ - 1.3 m ³	2.0	2.5	4.5
1.4 m ³	1.3 m ³ - 1.7 m ³	2.0	2.5	5.0

Kurzlebenslauf

Der Lebenslauf ist in der Online-Version aus Gründen des Datenschutzes nicht enthalten.