

Dissertation

ENERGETISCHE SYSTEMANALYSE EIN ANSATZ ZUR PRODUKTOPTIMIERUNG

Verfasser:

Dipl.-Ing. Hermann Edtmayer

**Eingereicht am Institut für Verbrennungskraftmaschinen
und Thermodynamik der Technischen Universität Graz**

Vorstand: Univ.-Prof. DI Dr. Helmut Eichlseder

Betreuer:

Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing Dr.tech. Raimund Almbauer

Graz, 29.Februar 2016



Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik
Vorstand: Univ.-Prof. DI Dr. Helmut Eichlseder



Diese Dissertation widme ich meiner wunderbaren Frau Verena.

Mein Dank gilt all denen,
die mich auf dieser spannenden Reise begleitet und unterstützt haben.

Inhaltsverzeichnis

FORMELZEICHEN, INDIZES UND ABKÜRZUNGEN	VII
EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG	XI
ZUSAMMENFASSUNG	XIII
1 EINLEITUNG	1
1.1 MOTIVATION	2
1.2 PROJEKT <i>ETA+</i>	3
2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN	5
2.1 THERMODYNAMISCHE GRUNDLAGEN.....	5
2.1.1 <i>Energie</i>	5
2.1.2 <i>Energiebilanzen</i>	7
2.1.3 <i>Exergie und Anergie</i>	9
2.1.4 <i>Wirkungsgrad</i>	9
2.1.5 <i>Verlustteilung</i>	10
2.2 ENTWICKLUNGSMETHODIK UNS SYSTEMDENKEN.....	11
2.2.1 <i>Produktentstehungsprozess</i>	11
2.2.2 <i>Systems Engineering</i>	14
2.2.2.1 <i>Komponenten des Systems Engineering</i>	14
3 DIE METHODIK <i>META+</i>.....	17
3.1 AKTUELLE ZUGÄNGE ZUR PRODUKTOPTIMIERUNG	17
3.2 ZUGANG ÜBER DIE ENERGETISCHE SYSTEMANALYSE IN <i>ETA+</i>	19
3.3 ÜBERBLICK ÜBER DIE METHODIK <i>META+</i>	21
3.3.1 <i>Methodik</i>	21
3.3.2 <i>Modell</i>	25
3.3.3 <i>Evaluierung</i>	27
3.4 QUERVERNETZUNG, REFLEXION UND ITERATIONSSCHLEIFEN	29
3.5 <i>META+</i> IM DETAIL	30
3.5.1 <i>Definitionsphase</i>	30
3.5.1.1 Aufbereiten der Projektidee	31
3.5.1.2 Ziele formulieren	34
3.5.1.3 Anforderungen und Rahmenbedingungen definieren	34
3.5.1.4 Review	35
3.5.2 <i>Analysephase</i>	35
3.5.2.1 Basisuntersuchungen	37
3.5.2.2 Detailuntersuchung	39
3.5.2.3 Vertiefte Untersuchung ausgewählter Systemuntergruppen in Ebene 3	44
3.5.3 <i>Optimierungsphase</i>	47
3.5.3.1 Lösungsansätze erarbeiten	48
3.5.3.2 Prototypenbau	49
3.5.3.3 Test und Analyse des Prototyps	50
3.5.3.4 Weiterentwicklung.....	51
3.5.4 <i>Projektabschluss</i>	51
4 FORSCHUNGARBEIT IN <i>ETA+</i>.....	53
4.1 DEFINITIONSPHASE <i>ETA+</i>	54
4.1.1 <i>Aufbereiten der Projektidee</i>	54
4.1.1.1 Motorrad BMW F800R	55
4.1.1.2 Rasenmäher Viking MB 755 KS	56
4.1.2 <i>Ziele formulieren</i>	61
4.1.3 <i>Anforderungen und Rahmenbedingungen definieren</i>	62
4.1.3.1 Motorrad:.....	63
4.1.3.2 Rasenmäher:	64
4.1.4 <i>Review Definitionsphase</i>	67
4.2 ANALYSEPHASE <i>ETA+</i>	69
4.2.1 <i>Basisuntersuchungen</i>	70
4.2.1.1 Motorrad.....	70
4.2.1.2 Rasenmäher	74
4.2.2 <i>Detailuntersuchung</i>	81
4.2.2.1 Motorrad:.....	81

4.2.2.2	Rasenmäher:	92
4.2.3	<i>Vertiefte Untersuchung ausgewählter Systemgruppen</i>	100
4.2.3.1	Motorrad	100
4.2.3.2	Rasenmäher	102
4.3	OPTIMIERUNGSPHASE ETA+	110
4.3.1	<i>Lösungsansätze erarbeiten</i>	110
4.3.1.1	Motorrad	110
4.3.1.2	Rasenmäher	111
4.3.2	<i>Prototypenbau</i>	111
4.3.2.1	Motorrad	112
4.3.2.2	Rasenmäher	112
4.3.3	<i>Test und Analyse des Prototyps</i>	114
4.3.3.1	Motorrad:	114
4.3.3.2	Rasenmäher	120
5	SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK	130
	LITERATURVERZEICHNISS	133
	ABBILDUNGSVERZEICHNISS	139
	TABELLENVERZEICHNISS	142
	ANHANG	143

Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen

Lateinische Formelzeichen

$a = \lambda / (\rho \cdot c_p)$	m^2/s	Temperaturleitfähigkeit
a	m/s^2	Beschleunigung
a_n	J/kg	spezifische Anergie
A	m^2	Fläche, Oberfläche, Querschnittsfläche
A_n	–	Anergie
b_e	g/kWh	effektiver spezifischer Kraftstoffverbrauch
c	m/s	Geschwindigkeit
$c = dq_{rev}/dT$	$J/(kg \cdot K)$	spezifische Wärmekapazität
$c_p ; c_v$	$J/(kg \cdot K)$	spezifische isobare; isochore Wärmekapazität
$C_{mp} ; C_{mv}$	$J/(mol \cdot K)$	molare isobare; isochore Wärmekapazität
d	m	Durchmesser
e	J/kg	spezifische Energie; Exergie
e_a	J/kg	spezifische äußere Energie
ex	J/kg	spezifische Exergie
E	J	Energie; Exergie
E_a	J	äußere Energie
Ex	J	Exergie
Ex_V	J	Exergieverlust
Ex_Q	J	Exergie der Wärme
f	s^{-1}	Frequenz
F	N	Kraft
$g_n = 9,80665 g_n$	m/s^2	Normfallbeschleunigung
h	J/kg	spezifische Enthalpie
H	J	Enthalpie
H_G	MJ/m^3	Gemischheizwert
H_u	kJ/kg	spezifischer Heizwert (früher: unterer Heizwert)
k	$W/(m^2 \cdot K)$	Wärmedurchgangskoeffizient
l	m	Länge
L	$kmol L/kmol B$ oder $kg L/kg B$	Luftmenge
L_{min}	$kmol L/kmol B$ oder $kg L/kg B$	Mindestluftbedarf
m	kg oder mol	Masse
\dot{m}	kg/s	Massenstrom
M	g/mol	molare Masse
M_d	$N \cdot m$	Drehmoment
p	bar, Pa	Druck
p^0		Standarddruck / $p^0 = 1 \text{ atm} = 1,013 \text{ bar}$ häufig auch $p^0 = 1 \text{ bar}$
p_i	bar	indizierter Mitteldruck
p_i	bar, Pa	Partialdruck der Komponente i
p_d	bar	Dampfdruck
p_d'	bar	Dampfdruck bei Sättigung
P	$(k)W$	Leistung
q	J/kg	spezifische Wärme(menge)
Q	J	Wärme

R	J/(kg·K)	spezifische Gaskonstante
$R_m = N_A \cdot k_B = 8,31447$	J/(mol·K)	allgemeine (molare) Gaskonstante
s	J/(kg·K)	spezifische Entropie
s	m	Weg
S	J/K	Entropie
t	°C	Celsius-Temperatur
T	K	thermodynamische Temperatur
T_S	K	Siedetemperatur
u	J/kg	spezifische innere Energie
U	J	innere Energie
v	m ³ /kg	spezifisches Volumen
V	m ³	Volumen
w	J/kg	spezifische Arbeit
W	J	Arbeit
x	m	Koordinate
y	m	Koordinate
z	m	Koordinate

Griechische Formelzeichen

ε	–	Leistungszahl; Verdichtungsverhältnis
ζ	–	exergetischer Wirkungsgrad; Verlustbeiwert
η	–	Wirkungsgrad
η_C	–	Wirkungsgrad des Carnot-Prozesses
$\eta_e ; \eta_i$	–	effektiver; innerer Wirkungsgrad
η_m	–	mechanischer Wirkungsgrad
η_{th}	–	thermodynamischer Wirkungsgrad
η_v	–	Wirkungsgrad des vollkommenen Motors
κ	–	Isentropenexponent
λ	W/(m·K)	Wärmeleitfähigkeit
λ	–	Luftverhältnis, Luftzahl
μ	–	Durchflusszahl; Überströmkoeffizient
$\nu = \eta/\rho$	m ² /s	kinematische Zähigkeit, Viskosität
ρ	kg/m ³	Dichte
σ	–	Versperrungsziffer
τ	s	Zeit
φ	° KW	Kurbelwinkel
φ_i	–	Volumenanteil der Komponente i
ω	s ⁻¹	Winkelgeschwindigkeit

Operatoren und Bezeichnungen

d	vollständiges Differential
δ	unvollständiges Differential
∂	partiell
\prod	Produkt
\sum	Summe
Δ	Differenz zweier Größen; Laplace-Operator
'	Zustand (im Querschnitt, am Punkt) ', 1. Ableitung

"	Zustand an der unteren Grenzkurve, vor Verbrennung
"	Zustand (im Querschnitt, am Punkt) ", 2. Ableitung
"	Zustand an der oberen Grenzkurve, nach Verbrennung
·	zeitliche Ableitung

Weitere Indices und Abkürzungen

0	Bezugszustand
0	Standardzustand
1	Zustand (im Querschnitt, am Punkt) 1
2	Zustand (im Querschnitt, am Punkt) 2
1D	eindimensional
3D	dreidimensional
a	aus, außen, äußere
d	Dampf
ab	abgeführt(e Wärme)
abs	absolut
B	Brennstoff; Bildung
C	Kompression, Carnot
CFD	Computational Fluid Dynamics
d	Dampf
DI	Direct Injection (Direkteinspritzung bzw. Direkteinblasung)
DIN	Deutsches Institut für Normung
e	ein, (Behälter-) Eintritt; eingebracht, effektiv
el	elektrisch, Elektron
EB	Einspritzbeginn bzw. Einblasebeginn
ECE	Economic Commission for Europe (United Nations)
EKP	Entwicklungs- und Konstruktionsprozess
EN	Europäische Norm
EU	Europäische Union
fl	flüssig, Flamme
g	gasförmig
ges	gesamt
ggf	gegebenenfalls
h	Hubraum (des Zylinders)
H	Hochdruck(phase), Hubraum (des Motors), Heizung
i	Laufvariable (1, 2, ..., k), innere
I	Integral
ISO	International Organization for Standardization
kin	kinetisch
konst	konstant
l	flüssig (liquid), Luft, Längen-
L	Luft
m	mittel; molar
max	maximal
min	minimal
min ⁻¹	Umdrehungen pro Minute
MFB	Mass Fraction Burnt
MBT	Maximum Brake Torque
n	nach
NEDC	New European Driving Cycle

NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
o	obere
OT	oberer Totpunkt
ÖNORM	Österreichische Norm
PEP	Produktenstehungsprozess
pot	potentiell
PU	Pumpe
real	real
rel	relativ
rev	reversibel
R	Reaktion
SE	Systems Engineering
sog	sogenannt
st	stöchiometrisch; Stoff
th	thermisch
TL	Turbolader
TU	Turbine
u	untere, Umgebung
v	vor
V	Verdampfung, Verlust
vol	volumetrisch
zu	zugeführt(e) (Wärme)
zul	zulässig

In Anlehnung an DIN 1304-1, DIN 1345, DIN 13 345 und ISO 80 0000-5

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Dipl.-Ing. Hermann Edtmayer

Graz, am

Statutory Declaration

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Dipl.-Ing. Hermann Edtmayer

Graz, am

Zusammenfassung

Die vorliegende Dissertation beinhaltet die theoretischen sowie praktischen Forschungsarbeiten, welche im Rahmen des Forschungsprojekts *Eta+* zur Verlustenergieminimierung und Verlustenergieerückgewinnung in technischen Systemen durchgeführt wurden. Das Ziel dieser Untersuchungen war, zwei Versuchsträger, ein Motorrad und ein motorbetriebenes, handgeführtes Arbeitsgerät unter Verwendung einer thermodynamischen Energieflussanalyse in Kombination mit einer entwicklungsmethodisch geleiteten technischen Produktgestaltung zu optimieren. Einen weiteren Inhalt dieser Dissertation stellt die Methodik *MEta+* dar, welche ergänzend zu den Untersuchungen an den Versuchsträgern erarbeitet wurde. Dabei wurde versucht, die zuvor angewandten thermodynamischen Methoden mit dem methodischen Entwickeln technischer Produkte aus der Entwicklungsmethodik zu verbinden. Mit der daraus resultierenden Methodik zur Verlustanalyse, Wirkungsgradverbesserung und Produktoptimierung wurde versucht, einen alternativen Prozess zu zeigen, um ausgehend von einer Idee bis zur möglichen Umsetzung technische Produkte zu optimieren.

Abstract

This PhD thesis comprises of the theoretical and practical research work, which has been carried out in the course of the research project *Eta+*, with the aim of waste energy reduction and recovery in technical systems. The goal of these investigations was, to optimise two experimental vehicles, a bicycle and an engine powered handheld working tool, using a thermodynamic energy flow analysis in combination with a development methodology based technical product design. As a further content of this PhD thesis the Methodology *Meta+* is presented, which was developed supplementary to the investigations on the research objects. Thereby the attempt was, to connect the previously used thermodynamic analysis with the contents of the methodical development of technical products from the development methodology. With the resulting Methodology for the analyses of losses, efficiency improvement and product optimisation it was tempted to offer an alternative guideline to improve technical products, from the idea to a possible implementation.

1 Einleitung

Technische Systeme stellen einen wesentlichen Teil unseres Lebensraumes dar. Sie sollen gewünschte Leistungen erbringen und bestimmte Ergebnisse erzielen. Um sie zu betreiben, muss Energie aufgewendet werden. Der Ablauf der für die Leistungserbringung notwendigen energetischen Prozesse ist jedoch unausweichlich mit Verlusten behaftet. Zudem sind diese technischen Systeme häufig nicht daraufhin optimiert, Energieverluste auf ein Minimum zu reduzieren. Daher ergeben sich Möglichkeiten, diese Verlustenergien zu reduzieren oder im Optimalfall auch zum Teil zurück zu gewinnen.

In der im Zuge des Projektes *Eta+* durchgeführten Forschungsarbeit, welche den Hauptteil dieser Dissertation darstellt, wurde versucht, über eine theoretische und praktische Untersuchung unter Verwendung von thermodynamischen Methoden, die ausgewählten Versuchsträger zu analysieren und zu optimieren. Einzelne Komponenten der in dieser Arbeit untersuchten Produkte wie z.B. Motor, Getriebe, Abgasstrang, etc. sind bereits Gegenstand von internationalen Forschungstätigkeiten. Eine vergleichbare energetische Gesamtsystemanalyse der hier untersuchten Geräte, sowie eine daraus abgeleitete Produktoptimierung zur Verlustenergiereduktion und -rückgewinnung, konnte jedoch in den vorbereitenden Recherchen nicht gefunden werden.

Fragen zur Optimierung stellen sich nicht nur für die technologische Ausführung von Produkten, ebenso die Vorgehensweise in der Entwicklung dieser Produkte kann verbessert werden. Verluste entstehen zum einen im Aufwand von Betriebsmitteln, wie z.B. Benzin oder elektrischem Strom, zum anderen kann bei eingesetzten Human- oder Sachmitteln wie Ingenieurspersonal oder Prüfstandseinrichtungen ein unnötig hoher Aufwand betrieben werden. Die Komplexität von modernen Produkten und deren Entwicklung stellt die mitwirkenden Personen vor Herausforderungen, die nicht ohne Weiteres zu bewältigen sind. Dadurch kann der Wunsch, ein technisches System zu optimieren und somit effizienter zu gestalten, zu unerwünschtem und mitunter erheblichem Zusatzaufwand von Ressourcen führen. Eine systematische Herangehensweise bietet für diese Problemstellung Struktur, Überblick und Sicherheit.

Die Recherche zur Produktoptimierung brachte keine konkrete Vorgehensweise, welche eine thermodynamische Betrachtung zur Optimierung von technischen Produkten, wie sie im Zuge dieser Forschungsarbeit durchgeführt wurde, in die entwicklungsmethodisch geleitete technische Produktgestaltung integriert. Daher beschäftigt sich ein Teil dieser Dissertation mit der Fragestellung, wie sich eine Methodik darstellen lässt, welche die Grundlagen des methodischen Entwickelns technischer Produkte aus der Entwicklungsmethodik sowie die Herangehensweisen in der thermodynamischen Analyse vereint. Dazu werden die Erkenntnisse aus der für diese Dissertation durchgeführten theoretischen und praktischen Forschungsarbeit im Zuge des Projektes *Eta+* herangezogen.

1.1 Motivation

Die Motivation für diese Dissertation begründet sich darin, Ressourcen effizienter zu nutzen. Diese Form des Denkens existiert schon seit langer Zeit, wird in der Praxis jedoch noch immer nur im beschränkten Ausmaß umgesetzt. Billig verfügbare Ressourcen machen oft ein verändertes, energieeffizienteres Handeln nicht unbedingt notwendig oder der menschliche Denkhorizont beinhaltet noch im unzureichenden Ausmaß ein Umwelt- und Klimabewusstsein. Ein Beispiel dazu ist die Erzeugung und Nutzung von elektrischer Energie aus atomaren Brennstoffen. Der Gesamtwirkungsgrad des Prozesses ist äußerst schlecht, das unmittelbare Gefahrenpotential ist hoch, die Verschmutzung der Umwelt und somit unseres Lebensraumes durch radioaktive Stoffe ist beträchtlich und eine sichere Lagerung der anfallenden radioaktiven Abfälle ist bis dato noch ungeklärt. Dennoch wird diese Form der Stromgewinnung durch die Bevölkerung sowie deren Vertreter weiterhin akzeptiert und die Umstellung auf effizientere und umweltschonendere Formen der Energieerzeugung wird dadurch verzögert.

Im Hauptteil der durchgeführten Forschungsarbeit wurde der Fokus auf die verbesserte Energieausnutzung der ausgewählten Versuchsträger und somit eine daraus resultierende Produktoptimierung gelegt. Einen zentralen Grundgedanken stellt dabei die Vermeidung von energetischen Verlusten dar, einen weiteren die mögliche Nutzung der ansonsten im System verloren gegangenen Energien. Der Schluss daraus ist, dass im ersten Schritt die Effizienz in Systemen und Abläufen gesteigert werden muss. Im Anschluss sollte der Versuch unternommen werden, Energie die aktuell aus dem System verloren geht, über technische Prozesse wieder nutzbar zu machen. Die intensive Auseinandersetzung mit dem Thema Energienutzung, Energieverlust und Energierückgewinnung während der Forschungsarbeiten brachte einen tieferen Einblick in die Systematik dieser Betrachtungen. Im weiteren Fortschritt des Projektes entwickelte sich dadurch die Motivation, eine in technologischen Produktentwicklungen anwendbare Methodik zur energetischen Optimierung von technischen Systemen zu entwerfen.

Im Bereich der Zweiräder und handgeführten, motorbetriebenen Arbeitsgeräte stellt der Kraftstoffverbrauch und somit die Energieeffizienz gegenüber dem PKW Sektor noch ein deutlich geringeres Kaufargument dar. Andere Argumente wie Motorleistung, Gerätegewicht, Zuverlässigkeit, Kaufpreis, Sicherheitseinrichtungen (ABS) etc. stehen dazu in Konkurrenz und klar im Vordergrund. Da zusätzlicher Kraftstoff zum Beispiel die Reichweite eines Motorrads oder die durchgehende Arbeitsdauer eines Arbeitsgerätes beeinflusst und somit zusätzlich notwendiges Systemgewicht darstellt, beeinflusst der Punkt Effizienz zumindest über diese indirekten Wege die Auslegung der Produkte. Der Kundenwunsch für eine direkte Verbrauchsverbesserung, der für eine technologische Veränderung eine wichtige Triebfeder bildet, ist jedoch noch relativ gering. Für die Gestaltung von verbesserten Technologien gibt daher die Gesetzgebung die Anforderung für eine Weiterentwicklung vor. Die Notwendigkeit, ein Produkt für eine zu erwartende Gesetzgebung technologisch weiter zu entwickeln, sowie der Wunsch, eine ökologische Wertvorstellung als positives Produktargument im Denken des Kunden zu wecken, stellen wichtige Motivationspunkte in dieser Arbeit dar. Eine weitere Motivation ist, die Erfahrungen der theoretischen und praktischen Projektarbeit in einer Methodik zusammen zu fassen, um die Möglichkeiten der energetischen Produktoptimierung aufzuzeigen und eine zukünftige Anwendung zu ermöglichen.

1.2 Projekt *Eta+*

Das Projekt *Eta+*, welches die Plattform für die durchgeführten Forschungstätigkeiten dieser Dissertation bildete, war Teil des übergeordneten Forschungsprojektes *Eco-PowerDrive*. Dieses war ein so genanntes K-Projekt, welches im Rahmen der COMET Exzellenzinitiative der österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft FFG, dem Land Oberösterreich und dem Land Steiermark gefördert wurde. Hier dazu zwei Zitate, welche der Programmbeschreibung der FFG entnommen sind: „Das Programm COMET fördert den Aufbau von Kompetenzzentren, deren Herzstück ein von Wirtschaft und Wissenschaft gemeinsam definiertes Forschungsprogramm auf hohem Niveau ist.“ [58]. „K-Projekte stellen die Newcomer Linie des COMET Programms dar und bieten Raum für neue Ideen im Bereich der kooperativen Forschung, mit künftigem Entwicklungspotenzial. In den Konsortien müssen mindestens drei Unternehmen vertreten sein. Ihr strategisches Ziel ist die nachhaltige Profilbildung in mittelfristiger Perspektive. Die Projekte können auch als Vorbereitung für eine Bewerbung für ein KI-Zentrum angelegt sein.“[59]. *ECO-PowerDrive* beschäftigte sich im Detail mit der Reduktion von Emissionen und Kraftstoffverbrauch in Zweirädern und Kleinmotorenanwendungen. Dazu ein Auszug aus der Projekthomepage: „Im K-Projekt *ECO-Power Drive* beschäftigen sich rund 20 Mitarbeiter an der TU Graz und bei den Konsortialpartnern mit der Reduktion von Schadstoff- und CO₂-Emissionen von Zweirädern, Kleinmotorenanwendungen und Freizeitfahrzeugen. Hierbei stehen umweltfreundliche, wettbewerbsfähige und kosteneffiziente Methoden und Entwicklungen im Mittelpunkt der Forschungsarbeit. Unter der Führung des Institutes für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik (IVT) wird das übergeordnete Ziel von *ECO-PowerDrive*, einen signifikanten Beitrag zur „Ökologisierung“ von Kleinmotorenanwendungen zu leisten, verfolgt.“[82]. Die Arbeiten im Projekt wurden in zwei übergeordnete Bereiche unterteilt. Area A mit Fokus auf Motor und Emissionen und Area B mit Hybridantrieben als zentrales Thema, wobei das Teilprojekt *Eta+* dabei in Area A angesiedelt war. In den einzelnen Unterprojekten wurde zum einen angestrebt, spezifische Forschung zu den jeweiligen Spezialthemen durchzuführen, zum anderen wurde auch versucht die möglichen Synergien zwischen den Unterprojekten zu nutzen und dadurch ein größtmögliches Maß an Effizienz in der Umsetzung zu erreichen. *Eta+* nutzte hier die teilweise Überschneidung mit drei Schwesterprojekten, was zu einer gemeinsamen Forschung an den Untersuchungsobjekten sowie der kollektiven Entwicklung der Technologien führte.

Der genaue Wortlaut der Projektbeschreibung des Projektes A.S1 *Eta+* lautete *“Waste Energy Reduction and Recovery: Concepts for the efficiency improvement and usage of waste energies for recreational and power sport vehicles and drivetrains”*. Aus diesem Grund befasste sich dieses Projekt mit der Analyse aller relevanten Energieflüsse im gesamten Antriebsstrang der Versuchsträger. Basierend auf den dadurch aufgezeigten Energieflüssen wurden diejenigen mit dem größten Potential zur Reduktion oder Nutzung ausgewählt. Im Zuge der weiteren Projektarbeit erfolgten anschließend die Optimierung der Systeme und die dementsprechende Umsetzung in Konzeptprototypen. Dadurch sollte eine Verbesserung der Gesamteffizienz der untersuchten Versuchsträger herbeigeführt werden. Die einzelnen Ziele dabei waren die detaillierte Quantifizierung der Energieflüsse im Antriebsstrang der Versuchsträger sowie die Darstellung der energetischen Verluste im System. Des Weiteren wurde die Auswahl jener Systemkomponenten, welche signifikant zur Effizienzminderung beitragen, durchgeführt und schließlich erfolgte die Ausarbeitung von Konzepten zur Reduktion und Nutzung der Verlustenergien. In der methodischen Vorgehensweise hierfür erfolgte eine umfassende Datenerfassung über Messungen an den Versuchsobjekten unter Prüfstandsbedingungen, sowie im realen Betrieb. Diese wurden mit Hilfe von thermodynamischen Methoden analysiert und unter Einsatz von computerbasierten Simulations- und Berechnungswerkzeugen ausgewertet. Dazu wurde die Entwicklung von speziellen Simulationsmodellen und Werkzeugen zur thermodynamischen Verlustanalyse von Antriebssystemen, wie der hier untersuchten, angestrebt.

Die geplanten Arbeitspakete im Projektablauf stellten sich vereinfacht wie folgt dar.

- Experimentelle Untersuchung aller Energieflüsse im Antriebsstrang der Versuchsträger.
- Analyse der erfassten Energieflüsse in Hinsicht auf Verlustenergien
- Erarbeitung und Bewertung von technologischen Konzepten zur Reduktion und Nutzung der Verlustenergiepotentiale
- Ableitung und Entwicklung eines methodischen Ansatzes zur energetischen Optimierung

Des Weiteren waren Disseminationstätigkeiten wie Fachbeiträge in Zeitschriften oder Teilnahmen und Beiträge bei Konferenzen sowie Hochschulschriften in Form von Bachelor- und Masterarbeiten oder Dissertationen vorgesehen. Daraus resultierte auch die vorliegende Dissertation als Teilergebnis von *Eta+*.

2 Theoretische Grundlagen

Als Einführung in die Theorie dieser Forschungsarbeit, sollen im folgenden Kapitel die theoretischen Grundlagen zur energetischen Systemanalyse näher beschrieben werden.

2.1 Thermodynamische Grundlagen

Das wissenschaftliche Fachgebiet der Thermodynamik ist ein Teilbereich der klassischen Physik und wird auch als Wärmelehre bezeichnet. Diese Lehre befasst sich im Wesentlichen mit der Wandlung der Energie zwischen ihren Formen, speziell mit der Umwandlung von thermischer Energie in mechanische nutzbare Arbeit. Dieses Fachgebiet bildet die erste Grundlage und den Aufbau der thermodynamischen Analyse in diesem Projekt. Dazu erfolgen die Analyse der vorliegenden technischen Systeme sowie die Entwicklung der Optimierungsmethodik nach den Kriterien der Thermodynamik. Die grundlegenden, thermodynamischen Definitionen, die im Projekt *Eta+* zur Anwendung kommen, sind im Folgenden in kompakter Form aufgeführt. Für ausführlichere Informationen zu diesem Thema wird auf die äußerst umfangreiche, einschlägige Fachliteratur verwiesen. Als Beispiele dazu sind die Veröffentlichungen von Eichlseder [17], Pischinger R. [59], Döring [13], Langeheinecke [47] oder Weigand [86] zu erwähnen.

2.1.1 Energie

Energie ist eine fundamentale physikalische Größe und in vielen wissenschaftlichen Fachbereichen von Bedeutung. In der vorliegenden Arbeit bildet sie den zentralen Punkt und die durchgeführten Überlegungen und Untersuchungen sind darauf aufgebaut. Es kann zwischen verschiedenen Formen der Energie unterschieden werden, einige davon sind im Folgenden kurz beschrieben.

Äußere Energie:

In der Thermodynamik wird die potentielle und die kinetische Energie unter dem Begriff der äußeren Energie E_a zusammengefasst.

Potentielle Energie:

Die potentielle Energie wird auch als Lageenergie bezeichnet und beschreibt jene Energie eines physikalischen Systems, welche durch seine Lage in einem Kraftfeld (Schwerefeld, Magnetfeld, elektrisches Feld, etc.) bestimmt wird. Ein Beispiel dazu ist die potentielle Energie E_{pot} eines Körpers im Schwerefeld der Erde, in Gleichung (2-1) berechnet mit der Masse m des Körpers, der durch das Gravitationsfeld der Erde auf den Körper wirkenden Normalfallbeschleunigung g_n und der Höhe z_1 über einer Bezugshöhe z_0 .

$$E_{pot} = m \cdot g_n \cdot (z_1 - z_0) \quad (2-1)$$

Kinetische Energie:

Die kinetische Energie, oder Bewegungsenergie ist die Energie, die ein Körper aufgrund seiner Geschwindigkeit beinhaltet. Wie in Gleichung (2-2) veranschaulicht, errechnet sich die kinetische Energie E_{kin} aus der Masse des Körpers m multipliziert mit dem Quadrat seiner Geschwindigkeit c multipliziert mit dem Faktor 0,5.

$$E_{kin} = m \cdot c^2 \cdot \frac{1}{2} \quad (2-2)$$

Die kinetische Energie entspricht auch jener Energie, die für die Beschleunigung des Körpers aus dem Ruhezustand auf die aktuelle Geschwindigkeit aufzuwenden ist. Beim reibungsfreien

Fall eines Körpers aus eine Höhe z_1 bis zu einer aktuellen Höhe z_2 wird die Differenz der potentiellen Energie zum Großteil in kinetische Energie umgewandelt. Bei einem reibungsbehafteten (realen) freien Fall, wird ein Teil der potentiellen Energie durch die Luftreibung in thermische Energie gewandelt. Dies zeigt sehr gut die Möglichkeit, wie Energie zwischen verschiedenen Formen transferiert werden kann.

Innere Energie:

Die innere Energie U eines Systems ist die Gesamtenergie eines Systems E minus der äußeren Energien E_a . Sie ist die Summe aller Energien, die in den Molekülen in Form von thermischer, chemischer und nuklearer Energie gespeichert ist.

Thermische Energie:

Die thermische Energie ist die Summe der ungeordneten Bewegungsenergien der in einem Stoff enthaltenen Teilchen, also der Atome und Moleküle und kann durch die Zufuhr von Wärme erhöht werden. Die thermische Energie E_{th} berechnet sich aus der Masse m des Stoffes und dem Integral der spezifischen Wärmekapazität c über die Temperatur vom absoluten Nullpunkt bis zu einer absoluten Temperatur T_1 , wie in Gleichung (2-3) gezeigt ist.

$$E_{th} = m \cdot \int_0^{T_1} c(T) dT \quad (2-3)$$

Chemische Energie:

Als chemische Energie E_{chem} wird jene Energie bezeichnet, die in Form von Bindungsenergie in den Molekülen eines Energieträgers gespeichert ist und teilweise durch eine chemische Reaktion freigesetzt oder eingespeichert werden kann.

Wärme:

Wärme ist in der Thermodynamik im Gegensatz zum alltäglichen Sprachgebrauch sehr speziell definiert. Sie beschreibt eine Form der Energieübertragung, bei der thermische Energie von einem System höherer Temperatur auf ein System niedrigerer Temperatur über die Systemgrenzen fließt. Damit Wärme fließen kann, ist also ein treibendes Temperaturgefälle notwendig. Wird die Übertragung der Wärme auf die Zeit bezogen erhält man den Wärmestrom \dot{Q} welcher nach der Gleichung (2-4) berechnet wird.

$$\dot{Q}(\tau) = \frac{\delta Q}{d\tau} \quad (2-4)$$

$$\dot{Q} = \frac{\lambda}{l_x} A(T_2 - T_1) \quad (2-5)$$

Gleichung (2-5) beschreibt den vereinfachten Fall der Leitung von Wärme durch eine ebene Wand mit der Dicke l_x . Der Wärmestrom \dot{Q} errechnet sich dabei aus der Wärmeleitfähigkeit λ des Wandmaterials, der betrachteten Wandfläche A und der Differenz der Temperaturen T_1 und T_2 der beiden Wandoberflächen. Grundsätzlich kann Wärmeübertragung in den drei Formen Wärmeleitung, Konvektion oder Wärmestrahlung erfolgen.

Enthalpie:

Die Enthalpie H ist ein spezifischer Begriff der Thermodynamik und setzt sich aus der Summe der inneren Energie und der Volumenänderungsarbeit zusammen, siehe Gleichung (2-6). Diese Zustandsgröße erleichtert die Berechnung von Prozessen bei denen Masse über die Systemgrenzen transportiert wird. Beim Einschieben von Masse wird neben der inneren Energie auch

die Einschiebearbeit $p \cdot V$ geleistet.

$$H = U + p \cdot V \quad (2-6)$$

Arbeit:

Arbeit ist wiederum eine Form der Energieübertragung, wobei hier auf mechanischem Weg Energie von einem System in ein anderes transferiert wird. Das heißt, über eine Systemgrenze wird Arbeit verrichtet, indem eine Kraft auf eine mechanische Verbindung über die Systemgrenze wirkt und diese in Kraftrichtung bewegt wird. Die Arbeit ist gleich der wirkenden Kraft mal dem zurückgelegten Weg. Ebenso kann über eine drehende Welle, die über die Systemgrenze reicht und auf die ein Drehmoment wirkt, sogenannte Wellenarbeit übertragen werden. Dieser Vorgang, also die geleistete Arbeit bewirkt eine Energieänderung im betrachteten System. Gleichung (2-7) beschreibt die Berechnung der Arbeit W mit der Integration der wirkenden Kraft $F(\vec{s})$ über die Wegstrecke \vec{s} vom Startpunkt \vec{s}_1 bis zum Endpunkt \vec{s}_2 .

$$W_{12} = \int_{\vec{s}_1}^{\vec{s}_2} F(\vec{s}) d\vec{s} \quad (2-7)$$

Leistung:

Arbeit pro Zeit wird als Leistung P definiert. Dabei wird die verrichtete Arbeit W auf die dafür benötigte Zeitspanne $\Delta\tau$ bezogen, wie in Gleichung (2-8) ersichtlich ist. Bei zeitlich veränderlichen Leistungen wird die Momentanleistung $P(\tau)$ über den Differentialquotienten nach der Zeit angegeben, siehe Gleichung (2-9).

$$P = \frac{W}{\Delta\tau} \quad (2-8)$$

$$P(\tau) = \frac{\delta W(\tau)}{d\tau} \quad (2-9)$$

2.1.2 Energiebilanzen

1. Hauptsatz der Thermodynamik:

Der 1. Hauptsatz der Thermodynamik ist der Energieerhaltungssatz. Dieser besagt, dass sich in einem isolierten System der Gesamtbetrag der Energie über die Zeit nicht verändert. Es werden lediglich die verschiedenen Formen der Energie ineinander umgewandelt. Die innere und äußere Energie eines Systems kann sich nur durch den Transport von Energie über die Systemgrenze ändern. Energietransport über die Systemgrenze kann durch Arbeit, Wärme oder Massentransport erfolgen. Formuliert für ein geschlossenes System nach Gleichung (2-10) setzt sich die Änderung der inneren Energie dU und der äußeren Energien dE_a aus den Änderungen der über die Systemgrenze transportierten Wärme δQ_a und Arbeit δW_t zusammen.

$$\delta Q_a + \delta W_t = dU + dE_a \quad (2-10)$$

Wärme und Arbeit stellen dabei die über die Systemgrenzen transportierten Energien dar und innere und äußeren Energien die im System gespeicherten. Arbeit und Wärme sind positiv, wenn sie dem System zugeführt und negativ, wenn sie vom System abgegeben werden.

Für instationäre, offene Systeme wird dieser Hauptsatz erweitert, um die zeitlich veränderlichen, mit den Massen über die Systemgrenzen transportierten Energien abbilden zu können, siehe Gleichung (2-11). Dabei beschreibt der Zusatzterm die Summe der spezifischen

Enthalpien h_i und äußeren Energien e_{ai} mal den über die Systemgrenzen verschobenen Massen dm_i .

$$\delta Q_a + \delta W_t + \sum dm_i(h_i + e_{ai}) = dU + dE_a \quad (2-11)$$

2. Hauptsatz der Thermodynamik:

Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik besagt, dass alle natürlichen technischen Prozesse irreversibel also nicht umkehrbar sind. Bei der Energiewandlung in Prozess wird neben der gewünschten Energieform immer auch unerwünschte erzeugt und dieser Prozess kann nicht rückgängig gemacht werden. Beispiele für irreversible Prozesse sind Reibungsvorgänge, Wärmeleitung, Expansion ohne Arbeitsleistung oder Mischung von Gasen. Weiters schränkt dies die Aussagen des ersten Hauptsatzes ein, nämlich dass Wärme nicht von einem kälteren zu einem wärmeren Körper fließen kann und es unmöglich ist, in einem adiabaten System Wärme vollständig in Arbeit umzuwandeln. Es kann also die an die Umgebung verloren gegangene Energie nicht mehr rückgewonnen werden. Dieser Vorgang kann auch als Verlust von Ordnung oder Erhöhung von Unordnung angesehen werden. Als ein Maß für diese Unordnung wird die Zustandsgröße Entropie S angegeben. Eine Schlussfolgerung aus dem 2. Hauptsatz ist, dass die Entropie des Universums einem Maximum zustrebt.

Carnot Prozess:

Dieser stellt den idealen Kreisprozess, also jenen der nicht übertroffen werden kann dar um Wärmeenergie in Arbeit umzuwandeln. Im Ts-Diagramm, siehe Abbildung 2-1, bilden sich die vier Zustandsänderungen dieses Prozesses folgendermaßen ab. Von Punkt eins zu Punkt zwei erfolgt eine isotherme Wärmeabfuhr bei der unteren Prozesstemperatur T_2 . Danach wird eine isentrope Kompression nach Punkt drei bis zur oberen Prozesstemperatur T_3 durchgeführt. Worauf dem Prozess wiederum isotherm Wärmeenergie bis zum Punkt vier zugeführt wird. Abschließend erfolgt eine isentrope Expansion nach Punkt eins und der Kreisprozess schließt sich.

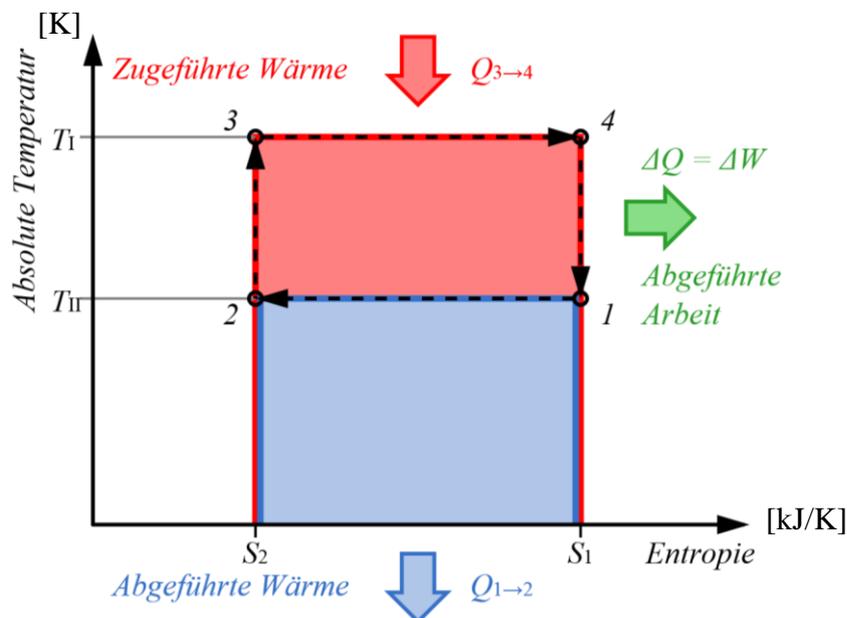


Abbildung 2-1: Carnot Prozess im Ts-Diagramm [88]

Die Gesamtfläche unter der Linie von drei nach vier stellt dabei die zugeführte Wärmeenergie dar und die Fläche unter der Linie eins nach zwei die abgeführte, somit verlorene Wärmemenge. Der eingeschlossene Flächeninhalt innerhalb der Punkte definiert die abgeführte Arbeit und somit den Nutzen aus dem Kreisprozess. Daraus kann die Gleichung (2-12) abgeleitet werden, in der der Carnot-Wirkungsgrad η_c aus eins minus dem Quotienten aus der Temperatur der

Wärmeabfuhr und der Temperatur der Wärmezufuhr gebildet wird. Aus dieser Gleichung lässt sich erkennen, dass die Arbeit im Prozess umso größer ist, je höher die obere und je niedriger die untere Prozesstemperatur ist.

$$\eta_C = 1 - \frac{T_{ab}}{T_{zu}} \quad (2-12)$$

2.1.3 Exergie und Anergie

Nach den Ausführungen des 2. Hauptsatzes sind Umwandlungen von Energien immer verlustbehaftet und somit mit einer Zunahme der Gesamtentropie verbunden. Bei der Umwandlung von Energieformen in Arbeit kann man zwischen voll umwandelbaren Formen (potentielle, kinetische oder elektrische Energie) und teilweise umwandelbaren Formen (Wärme, innere Energie, Enthalpie) unterscheiden. Die Exergie Ex stellt dabei die voll in Arbeit umwandelbare Energie im betrachteten System dar. Diejenige Energie, die nicht umgewandelt werden kann und somit als Verlust verloren geht, wird als Anergie An bezeichnet. Die Summe von Exergie und Anergie entspricht der Gesamtenergie und ist immer konstant, siehe Gleichung (2-13).

$$\Sigma(Ex + An) = \text{Gesamtenergie} = \text{konst.} \quad (2-13)$$

Betrachtet man die untere Prozesstemperatur im Carnot-Wirkungsgrad, so liegt der Schluss nahe, dass die Umgebungsbedingungen als absolute Referenz für die Bewertung der Energie heran gezogen werden können. Der Begriff der Exergie Ex_Q stellt also auch die Arbeitsfähigkeit der betrachteten Energie bei Umgebungsbedingungen dar. Daraus folgt die Beschreibung der Exergie der Wärme nach Gleichung (2-14).

$$Ex_Q = Q \cdot \left(1 - \frac{T_u}{T_Q}\right) \quad (2-14)$$

2.1.4 Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad η ist in vielen Fachgebieten als Maß für die Effizienz eines Vorganges definiert. In der Thermodynamik wird er zur Beschreibung der Güte von Energieumwandlungen verwendet. Stellt man in einem Wärmekraftprozess die daraus gewonnene mechanische Leistung der dafür aufgewendeten Wärmeleistung gegenüber, so erhält man den thermodynamischen Wirkungsgrad nach Gleichung (2-15). Die Obergrenze des thermodynamischen Wirkungsgrades wird vom oben bereits beschriebenen Carnot-Wirkungsgrad gebildet, wobei für den Prozess die obere und untere Prozesstemperatur eingesetzt wird.

$$\eta_{th} = \frac{P_{Nutzen}}{\dot{Q}_{Aufwand}} \quad (2-15)$$

$$\eta_m = \frac{E_{ab}}{E_{zu}} = \frac{P_{Nutzen}}{P_{Aufwand}} \quad (2-16)$$

Bei mechanischen Systemen, wie zum Beispiel einem Getriebe, kann dabei über den mechanischen Wirkungsgrad η_m nach Gleichung (2-16) die Qualität der Übertragung von mechanischer Energie angegeben werden. Dabei wird die abgegebene Energie der zugeführten gegenübergestellt.

2.1.5 Verlustteilung

Die Verlustteilung stellt eine Form der Energiebilanzierung dar, in welcher die auftretenden Verluste eines Prozesses getrennt voneinander aufgezeigt werden. Dies ermöglicht eine Gegenüberstellung und Bewertung der jeweiligen Vorgänge, wodurch mit Hilfe von spezifischen Maßnahmen gezielt auf einzelne Verluste eingegangen werden kann und es somit ermöglicht wird, diese zu verringern. Zum Beispiel können in der Analyse einer Hubkolben-Verbrennungskraftmaschine die auftretenden Verluste bei der Umsetzung der chemischen Energie des Kraftstoffes bis zur an der Ausgangswelle abgegriffenen Arbeit aufgelistet werden. Abbildung 2-2 zeigt den Verlauf der Wirkungsgrade von einzelnen Vorgängen der motorischen Verbrennung bei konstant gehaltener Drehzahl über steigender Last. Die Differenzen zwischen den einzelnen Wirkungsgraden beschreiben die einzelnen Verluste. Zum Beispiel wird die Differenz zwischen dem inneren Wirkungsgrad der Verbrennung η_i und dem effektiven Wirkungsgrad η_e des gesamten Motors als mechanischer Wirkungsgrad η_m bezeichnet und beschreibt die über die innere Reibung des Motors verloren gegangene mechanische Energie.

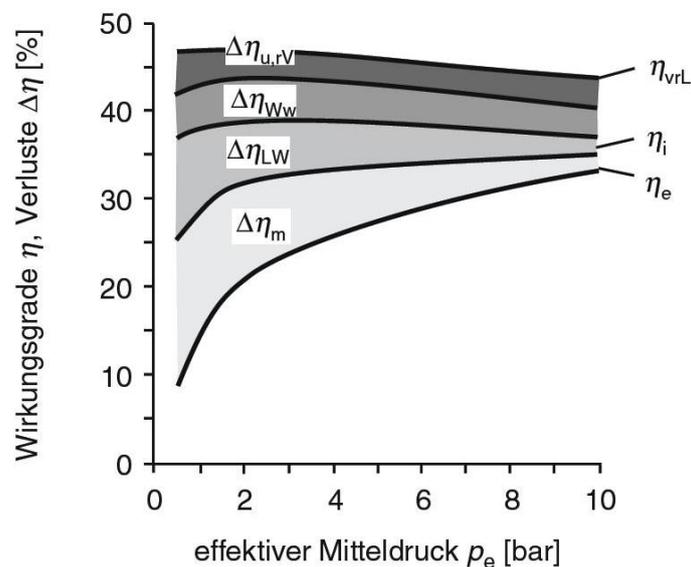


Abbildung 2-2: Pkw-Ottomotor, Verlustanalyse über der Last bei 3000 min^{-1} [18]

2.2 Entwicklungsmethodik uns Systemdenken

Seit dem Beginn der industriellen Herstellung von technischen Produkten und der damit einhergehenden Aufteilung der Arbeiten in den Entwicklungs- und Fertigungsprozessen wird an systematischen Methoden zum diesem Vorgehen gearbeitet. Abbildung 2-3 zeigt die Historie der Entwicklungs- und Konstruktionshilfsmittel in den vergangenen 200 Jahren. Die Notwendigkeit, die immer komplexer werdenden Prozesse in Methoden und Richtlinien abzubilden, hat schon um 1850 erste Überlegungen dazu angestoßen und wird bis heute weiterentwickelt. Aus diesem Grund existiert zum Thema entwicklungsmethodisch geleitete technische Produktgestaltung eine Vielzahl von Literatur wie zum Beispiel von Lindemann [51], Ponn [61], Ophye [57], Pahl/Beiz [26], Winzer [96], Spahni [76], Haberfellner [36] oder Schalcher [71], um nur einige zu nennen. Wie die Thermodynamik ist die Entwicklungsmethodik ein eigenes wissenschaftliches Fachgebiet und entsprechend umfangreich, daher wird im folgenden Kapitel nur vereinfacht ein Überblick über deren Grundlagen gegeben.

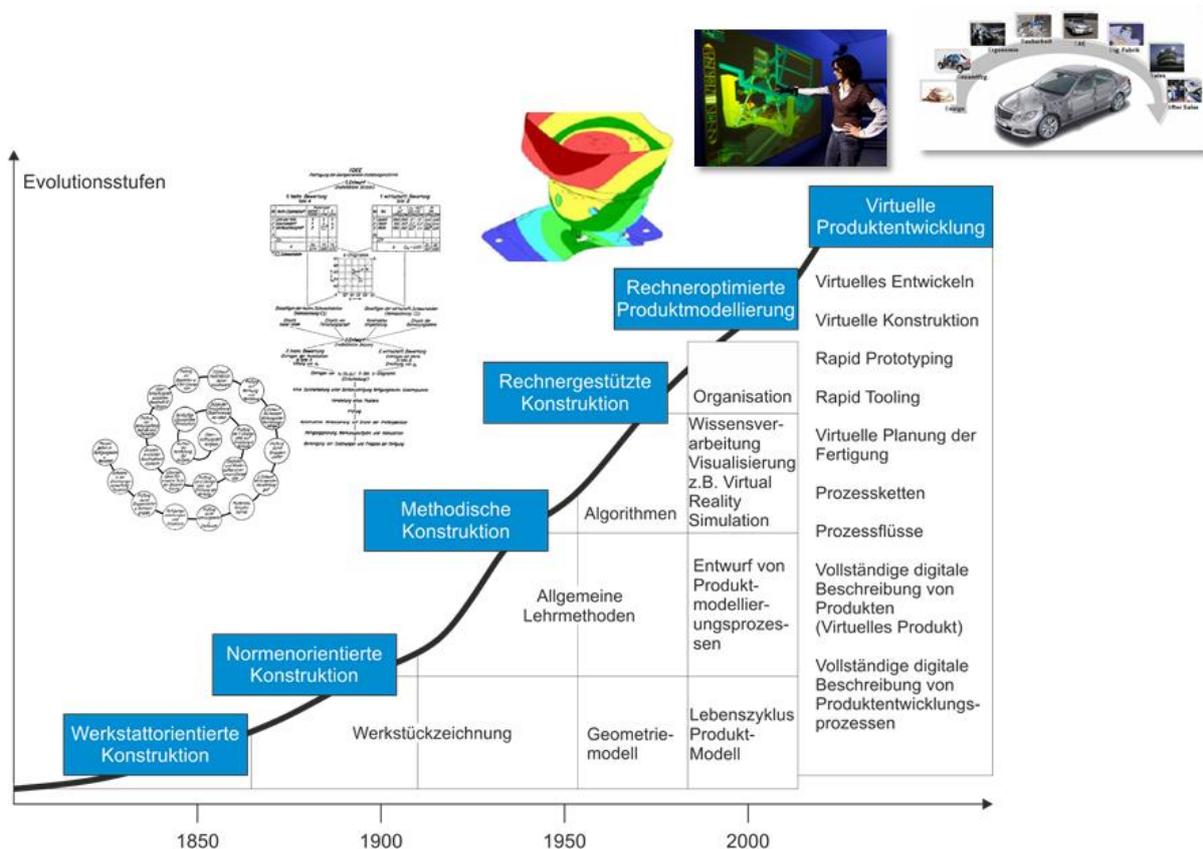


Abbildung 2-3: Historie der Entwicklungs- und Konstruktionshilfsmittel angelehnt an Pahl/Beiz [26]

2.2.1 Produktentstehungsprozess

Die Bezeichnung des Produktentstehungsprozesses (PEP) beschreibt die Gesamtheit der vielen einzelnen Arbeitsschritte, um vom Ausgangspunkt, der Idee für ein Produkt zu einem fertig hergestellten, verkaufsfertigen Produkt zu gelangen. Dabei werden die dazu nötigen Prozessphasen und -schritte genau festgelegt und die Schnittstellen zwischen diesen Inhalten eindeutig definiert. Weiters werden dabei mehrere Arbeitsschritte zu Teilprozessen oder Phasen zusammengefasst.

Entwicklungs- und Konstruktionsprozess

„Die Summe aller Arbeitsschritte von der Produktidee bis zur Erzeugung der Fertigungsunterlagen wird als Entwicklungs- und Konstruktionsprozess (EKP), bezeichnet.“ Pahl/Beiz [26]

Im vorrausschauenden Entwicklungs- und Konstruktionsprozess (EKP) eines Produktes nimmt die Modellbildung eine zentrale Rolle ein. Diese Modelle können zum Beispiel Konstruktionszeichnungen und Materialbeschreibungen eines Bauteils sein oder aus der mathematischen Beschreibung über Formeln zur Berechnung von Einzelsystemen bestehen. Diese Modelle werden zusammen mit Eigenschaften und Werten der Modellparameter in einer Arbeitsmethode verarbeitet, um zu Produkteigenschaften zu gelangen, siehe Abbildung 2-4. Durch die Summe einer Vielzahl solcher Arbeitsschritte wird ein Produkt über die Modellierung zur Gänze abgebildet.

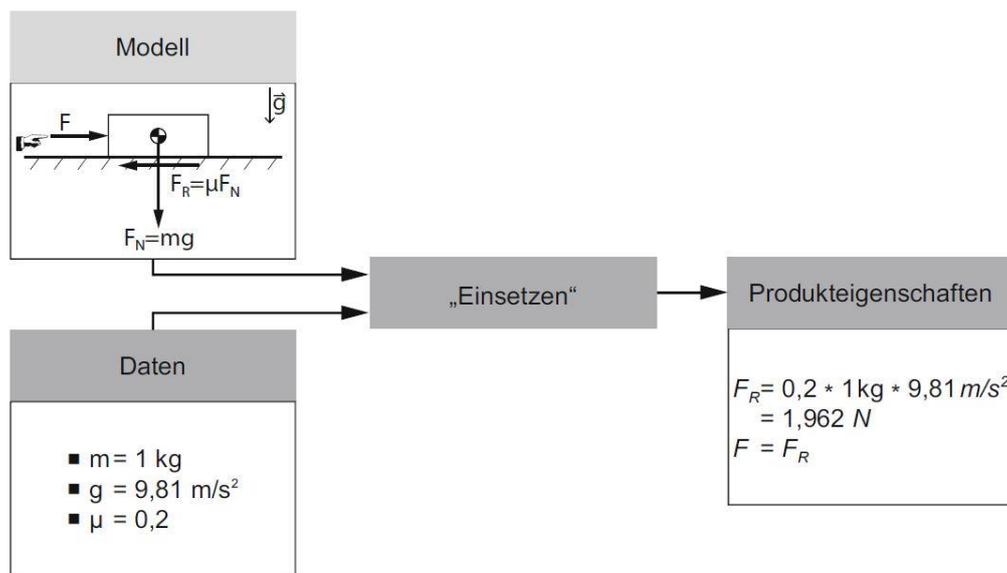


Abbildung 2-4: Arbeitsschritt „Reibkraft bestimmen“ [26]

Die hohe Komplexität erlaubt kein geradliniges Voranschreiten, daher ist ein weiteres Merkmal des EKP der nicht geradlinige Durchlauf des Prozesses und die Iteration in größeren und kleineren Schleifen. In der Reflexion der einzelnen Phasen werden die gesetzten Vorgaben überprüft und Teile des EKP gegebenenfalls wiederholt. Um einen möglichst effizienten Ablauf in die richtige Richtung zu gewährleisten, werden dazu Methoden für die Vorgehensweise definiert.

Ein weiterer Aspekt im EKP ist das „*simultaneous engineering*“ – das teilweise parallele Arbeiten unterschiedlicher Phasen im Entwicklungsprozess. Dies erfordert einen höheren Aufwand an Koordination und ergibt mehr in weiterer Folge nicht genutzte (Teil-) Entwicklungen. Eine simultane Arbeitsaufteilung ermöglicht jedoch, das Ziel schneller zu erreichen und Kosten einzusparen.

Im modernen Einsatz des EKP, wie zum Beispiel in der Automobilbranche wird versucht, alle Prozesssteile parallel ablaufen zu lassen, um Produkte möglichst schnell zu entwickeln und die Markteinführung zu beschleunigen (Time to Market). Dies gelingt oft nur zum Teil und ergibt ein Springen zwischen den einzelnen Prozessschritten, welches ein ineffizientes Arbeiten zur Folge haben kann. Daher wird in aktuellen EKP Methoden auf die klare Zieldefinition zu Prozessbeginn eingegangen, um bereits bestehende Vorgängerlösungen mit den Zielen des neuen Produktes frühzeitig vergleichen zu können. Somit können unnötige Lösungen oder Fehlentwicklungen und daraus entstehende Zusatzkosten vermieden werden.

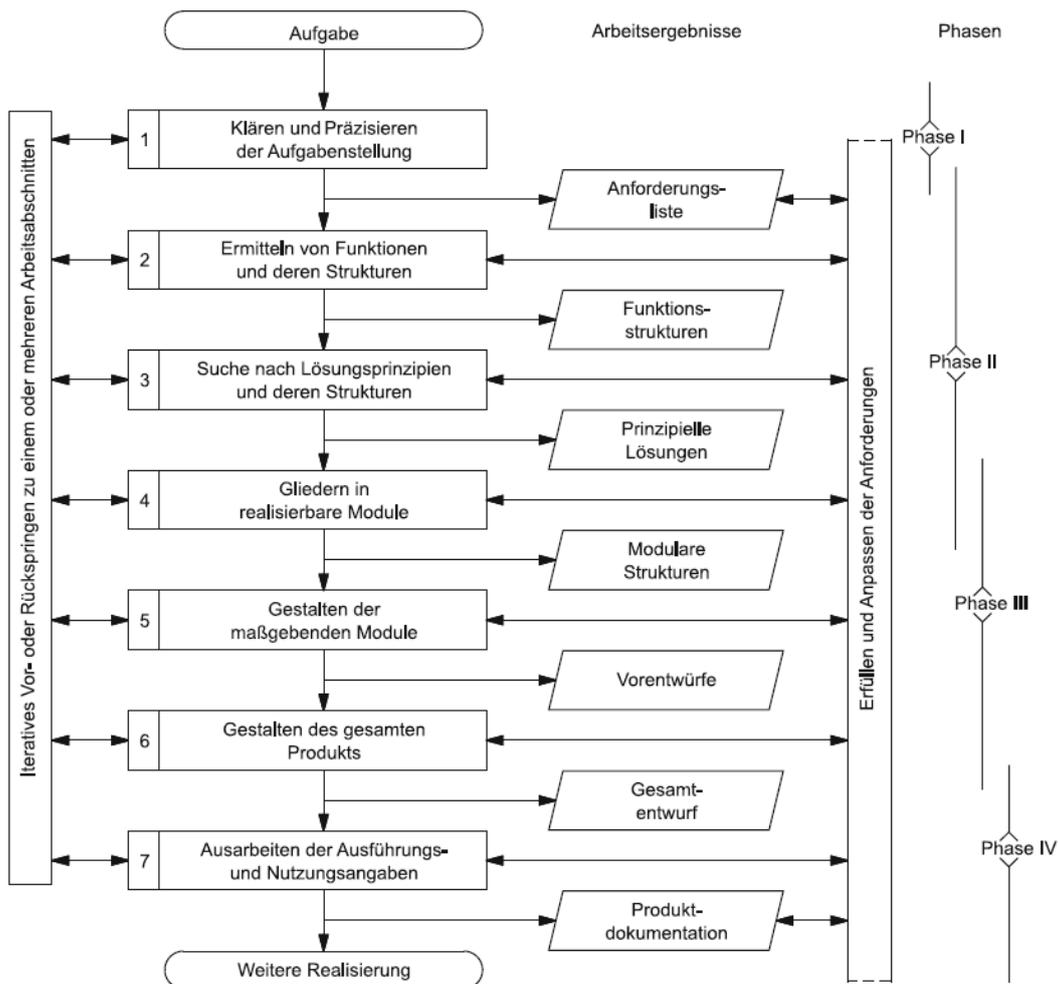


Abbildung 2-5: Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren nach VDI 2221 [26]

In Abbildung 2-5 ist das generelle Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren nach VDI 2221 dargestellt. Nach Pahl/Beiz [26] können folgende Prozessphasen im Überblick über den Produktentwicklungsprozess, wie auch in Abbildung 2-6 zu sehen ist, zusammengefasst werden:

- Planung
- Entwicklung mit den Hauptschritten:
 - Lösungserarbeitung
 - Lösungsbewertung
 - Lösungsauswahl
- Konzeptentwicklung mit den Hauptschritten:
 - Festlegung der vorläufigen Produktarchitektur
 - Festlegung der Hauptkenngrößen der Hauptgruppen wie Funktionsumfang Kosten und Schnittstellen der Produktebenen Mechanik, Elektrik, Elektronik, Software
- Konzeptkonstruktion mit den Hauptschritten:
 - Festlegung der Produktstruktur (mechanische Sicht auf das Produkt)
 - Festlegung der Hauptkenngrößen der Hauptbaugruppen wie Bauraum, Gewicht
 - Gestalten der Hauptbaugruppen
 - Erstellen des Service Konzepts (Wartung, Reparatur, Ersatzteile, etc.)
 - Erstellen des Fertigungskonzepts
- Gestaltung mit den Hauptschritten:
 - Gliederung der Hauptbaugruppen in Bauteile
 - Gestalten der Bauteile

- Gestalten der Baugruppenschmittstelle
- Dokumentation mit den Teilbereichen:
 - Herstellungsunterlagen
 - Nutzungsunterlagen
 - Wartungsunterlagen
 - Reparaturunterlagen
 - Recyclingunterlagen
 - weitere Unterlagen für z. B. Arbeitssicherheit, Sicherheitsnachweise usw.

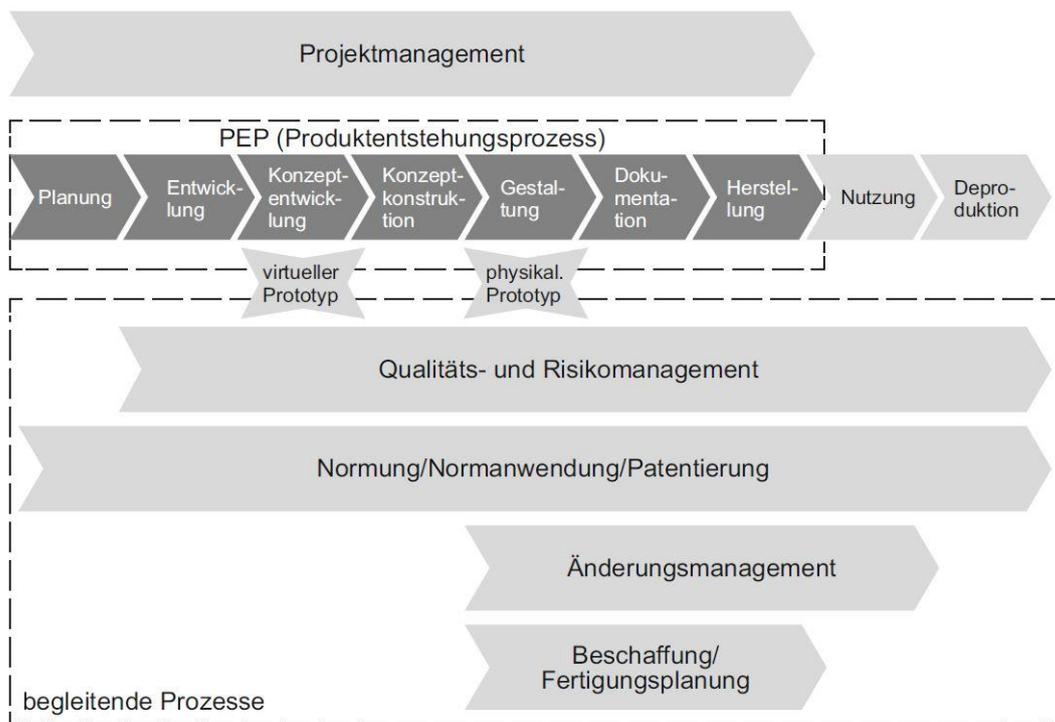


Abbildung 2-6: Entwicklungs- und Konstruktionsprozess mit Begleitprozessen nach Pahl/Beiz [26]

2.2.2 Systems Engineering

Als Teildisziplin der Entwicklungsmethodik, beschreibt das Systems Engineering (SE) einen methodischen Ansatz mit ausgeprägtem Systemdenken, um in umfangreichen technischen Projekten die handelnden Projektbereiche und deren Disziplinen wirkungsvoll und nachhaltig in Interaktion zu bringen. Die dabei verwendeten Techniken und einheitlichen, systemübergreifenden, teamorientierten und strukturierten Prozesse werden in komplexen Entwicklungsaufgaben, wie zum Beispiel in der Raumfahrt erfolgreich eingesetzt.

2.2.2.1 Komponenten des Systems Engineering

- Systemdenken

Das Systemdenken bildet die Grundlage der Problemlösung im Systems Engineering und hat zum Ziel die Denkvorgänge systematisch zu ordnen, sowie komplexe Systeme verstehen und gestalten zu können. Es beinhaltet spezifische Herangehensweisen, um komplexe und komplizierte Gesamtsysteme und die dazugehörigen Zusammenhänge zu beschreiben. Weiters werden modellhafte Ansätze benutzt, um die realen Gegebenheiten in Abbildern darzustellen. Allgemein sind die Ansätze im Systemdenken derart gewählt, dass sie das ganzheitliche, holistische Denken unterstützen. Das Ganze soll dabei als mehr als die Summe der einzelnen Teile angesehen werden. Wie in Abbildung 2-7 gezeigt ist, wird das System mit den inhaltlichen Teilen,

deren Beziehungen und dessen Systemgrenze im Modell abgebildet. Auch dargestellt wird die relevante, nähere Umwelt mit einer dazugehörigen Relevanzgrenze, welche die Abgrenzung zur nicht relevanten Umwelt bildet. Die Beziehungen der Systemkomponenten und des Gesamtsystems zur relevanten Umwelt und deren Teile werden dabei explizit mit betrachtet. Das erarbeitete System stellt dabei eine Gesamtheit von Elementen dar, die durch Beziehungen verbunden sind und gemeinsam einen bestimmten Zweck erfüllen, siehe dazu Spahni [76].

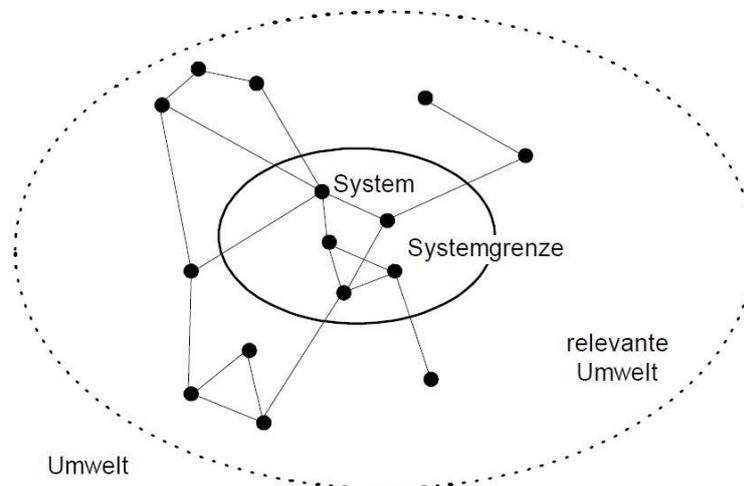


Abbildung 2-7: Systemdarstellung nach Haberfellner [35]

- Vorgehensmodell

Das Vorgehensmodell dient als genereller Leitfaden, um den Problemlösungsprozess strukturiert abzuwickeln. Dieses basiert auf den Hauptkomponenten „Strukturierung“ mit den Unterpunkten „Vom Groben zum Detail“ und „Variantenbildung“ sowie „Projektphasen“ und „Problemlösungszyklen“, wie aus Abbildung 2-8 ersichtlich ist.

Das Vorgehen vom Groben zum Detail beschreibt das schrittweise Eingrenzen des Betrachtungsfeldes und die Variantenbildung gibt das stufenweise Denken und Handeln in Lösungsvarianten vor. Die Variantenbildung beinhaltet des Weiteren eine Bewertung und Selektion der Varianten. Die Projektphasen teilen den Ablauf des Projektes in die drei Hauptphasen, Entwicklung, Realisierung und Nutzung ein. In der Entwicklung wird das Objekt des Projektes in der Vorstudie, Hauptstudie und Detailstudie entwickelt. Anschließend folgen in der Realisierung der Bau und die Einführung des Produktes. In der abschließenden Phase wird das Projekt geschlossen und das Produkt genutzt. Zwischen den einzelnen Phasen wird jeweils ein Entscheidungspunkt eingefügt, an dem die Vorgänge bewertet und die Entscheidung über Weiterführung oder Abbruch gefällt werden. Als Problemlösungszyklus wird wie der Name schon sagt, die systematische Vorgehensweise zur Erarbeitung von Lösungen für eine vorliegende Problemstellung bezeichnet. Dabei wird eine Zielsuche gefolgt von einer Lösungssuche und einer abschließenden Auswahl wiederholend auf die Teilbereiche der Projektphasen angewendet.

- Systemgestaltung

Als Systemgestaltung wird die eigentliche Problemlösung bezeichnet. Darin findet die konstruktive Arbeit an der neuen Lösung für das untersuchte Objekt statt. Dabei wird auf das Objekt selbst, seine Ziele, die Abgrenzung, die technischen Aspekte und auf seine relevante Umwelt eingegangen.

- Projektmanagement

Das Projektmanagement beinhaltet die Organisation und Koordination des Problemlösungsprozesses. Darin enthalten sind alle planenden, überwachenden, koordinierenden und steuernden Maßnahmen, um Systeme zu gestalten. Es werden dabei die für den Prozess notwendigen Ressourcen (Personal- oder Sachmittel) organisiert und koordiniert.

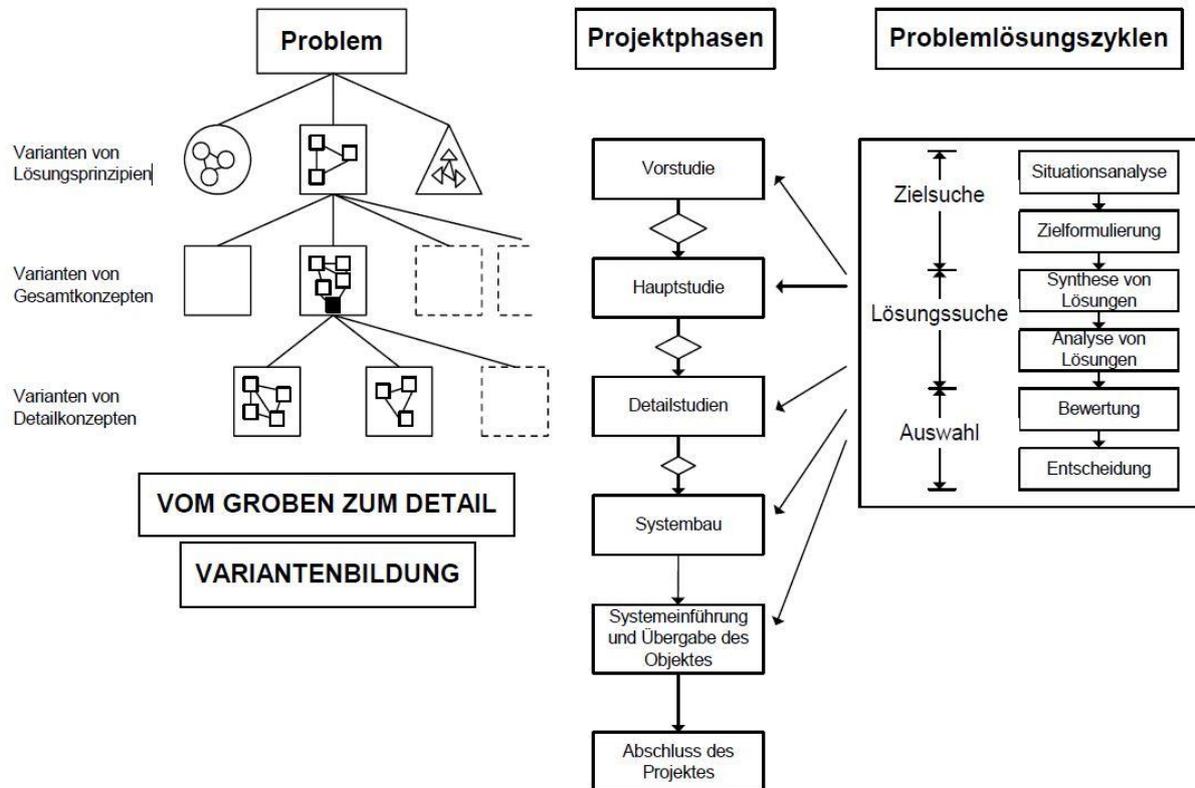


Abbildung 2-8: Komponenten des SE Vorgehensmodells nach Haberfellner [35]

Grundprinzipien des Systems Engineering

Das systematische Denken und Handeln im SE basiert auf mehreren Grundprinzipien, die in der Literatur vielfach erwähnt sind und in folgender Auflistung zusammengefasst werden können.

- Denken in Systemen
- Denken in Alternativen
- Strukturierung und diskursives Vorgehen
- Vom Ganzen zum Detail
- Abstrakten zum Konkreten
- Minimale Modelle
- Minimierung von Schnittstellen
- Wiederkehrende Reflexion
- Anwendung mehrerer Sichten
- Verständlichkeit und Standardisierung

3 Die Methodik *MEta+*

Während der ersten Arbeiten in *Eta+* zeigte sich schon früh in der Projektentwurfsphase die Notwendigkeit, das Vorgehen im Projekt zu strukturieren. Die durchgeführte, energetische Systembetrachtung und Optimierung an den im Projekt verwendeten Versuchsträgern zeigten umfangreiche Zusammenhänge innerhalb der Systeme auf. Sie brachten dabei eine Komplexität mit sich, die von Beginn an Strukturen des Systemdenkens erforderten und nicht rein erfahrungsbasiert erfolgen konnten. In den Untersuchungen wurde zuerst mit einer technischen Analyse nach den klassischen Ansätzen der entwicklungsmethodisch geleiteten technischen Produktgestaltung in Verbrennungskraftmaschinen und Antriebssträngen begonnen. Nach der Definition der Ziele im Projekt und der genaueren Betrachtung der vorliegenden Versuchsträger zeigte sich, dass die zu untersuchenden Energieflüsse in den Versuchsträgern über eine thermodynamische Analyse erfasst werden müssen. Die umfangreichen Zusammenhänge dieser energetischen Ströme innerhalb der vorliegenden Objekte brachten zusätzlich Aspekte des Systemdenkens in die Betrachtungen mit ein. Die vorhandenen Entwicklungserfahrungen der Arbeitsgruppe sowie ergänzende Literaturstudien ergaben eine erste Struktur der Vorgehensweise, aus welcher während der theoretischen und praktischen Arbeit in *Eta+* allmählich eine Methodik entstand. Dabei wurden bestimmte Vorgehensweisen und Werkzeuge ausgewählt, die es auch Ingenieuren ohne einschlägige Spezialisierung ermöglichten, diese in der praktischen Arbeit erfolgreich einzusetzen. Ein Beispiel dazu ist die Erarbeitung einer Längsdynamiksimulation im Softwarepaket *Matlab-Simulink*. Dieses blockbasierte Tool wurde speziell für diese Anwendungen entwickelt, um es auch Ingenieuren ohne vertiefte Ausbildung in Software Entwicklung zu ermöglichen, komplexe mathematische Modelle in ein Simulationsprogramm umzusetzen.

Weiters wurde eine Methodik zur energetischen Analyse als eigenes Arbeitspaket und Teilergebnis von *Eta+* definiert. Dabei sollte diese später *MEta+* genannte Methodik aus den Erfahrungen in *Eta+* abgeleitet werden und zu einer Zusammenfassung der erworbenen Erkenntnisse führen. So diente die durchgeführte Forschungsarbeit im Projekt *Eta+* mit der darin enthaltenen energetischen Analyse zur Verlustenergieminimierung und Rückgewinnung als Arbeitsgrundlage für die in dieser Dissertation weiter ausgearbeitete Methodik zur energetischen Verlustanalyse. Es wurde dabei versucht, die thermodynamische Analyse mit Vorgehensweisen des methodischen Entwickelns technischer Produkte aus der Entwicklungsmethodik zu einem nutzbaren Werkzeug zur Produktoptimierung zu kombinieren. Daraus ergibt sich eine Vorgehensweise zur Produktoptimierung und Wirkungsgradverbesserung, welche den Gedanken der Effizienz in den Mittelpunkt stellt.

3.1 Aktuelle Zugänge zur Produktoptimierung

Warum wird eine Produktoptimierung angestrebt? Grundsätzliches Ziel eines Herstellers ist es unter anderem, seine Produkte im Rahmen der wirtschaftlichen Sinnhaftigkeit stetig weiter zu entwickeln um dadurch einen Wettbewerbsvorsprung zu erlangen oder zu halten. Mit technischen Weiterentwicklungen können neue rationale oder emotionale Argumente für eine positive Bewertung und somit den Kauf eines Produktes geschaffen werden. Weiters besteht aufgrund des Klimawandels global die ökologische Notwendigkeit, die energieverbrauchenden Systeme effektiver zu gestalten. Um dies umzusetzen, müssen auch passende Technologien entwickelt werden. Die erste Motivation ist eher kurzfristig orientiert, die zweite eher langfristig, beide sind jedoch sicherlich gleich bedeutend. Der erste Motivationsgrund wird jedoch durch das kaufmännische und wirtschaftliche Denken wesentlich stärker beeinflusst und steht daher in der aktuellen Entwicklung deutlich im Vordergrund. Optimierungen, die für den Kunden positive Argumente darstellen, können verkauft werden. Diese Argumente können so konträr sein wie zum Beispiel der wirtschaftlich motivierte Aspekt der verringerten Treibstoffkosten durch einen sparsamen Betrieb des Geräts gegenüber dem emotionalen Aspekt der puren

Leistungsdaten, wo der Kraftstoffverbrauch nebensächlich wird. Notwendig ist aber auch, mehr Verantwortung für die zweite Motivation zu übernehmen und diese in die Weiterentwicklung der technischen Produkte mit einzubeziehen. Einen weiteren wichtigen Grund zur Produktoptimierung stellen die rechtlichen Rahmenbedingungen dar. Vom Gesetzgeber werden Vorgaben geschaffen, wie z.B. die Abgasgesetzgebung, welche die aktuellen Produkte nicht mehr erfüllen können, wodurch eine technologische Überarbeitung notwendig wird.

Die umfangreichen Argumente zur Produktoptimierung können kurz zusammengefasst werden zu den Punkten:

- Kundenwünsche / Bedürfnisse
- Weiterentwicklung des Produktes / der Marke
- Wettbewerbsfähigkeit
- Energieeffizienz / Wirkungsgrad
- Ressourcenschonung
- Verringerung von gesetzlich reglementierten und nicht reglementierten Emissionen:
 - Toxische Stoffe (HC, NO_x, CO, etc.)
 - Treibhausrelevante Stoffe (CO₂, Methan, etc.)
 - Akustischen Emissionen
- Vorbeugende Maßnahmen für die künftige Gesetzgebung

Vertieft man sich in dieses Thema, finden sich viele verschiedene Zugänge zur Produktverbesserung. Zum einen werden rein über die Erfahrungswerte und das Können erfahrener Konstrukteure Produkte weiter entwickelt. Wobei konkrete Entwicklungsmethoden wie z.B. der morphologische Kasten nur zu einem geringen Teil eingesetzt werden. Zum anderen existiert ein eigener wissenschaftlicher Forschungszweig, welcher sich mit einem systematischen und methodischen Zugang zu dieser Thematik befasst. Es können dazu eine Fülle von Methoden gefunden werden, wie Lindemann [51] zusammengefasst hat. Einige Beispiele dazu sind:

- Produktentstehungsprozess
- Systems Engineering
- Statistische Versuchsplanung / Design of Experiments
- TRIZ - Theory of Inventive Problem Solving
- Ursache – Wirkungsanalysen
- FMEA – Fehler Auswirkungsanalyse
- Mind Mapping
- Morphologischer Kasten
- QFD – Qualitätsfunktionsdarstellung
- Ähnlichkeitsanalyse
- Nutzwertanalyse
- Bionik
- Methode 365

3.2 Zugang über die energetische Systemanalyse in *Eta+*

Wie oben schon beschrieben wird, ist der Zugang zur Produktoptimierung über die energetische Systemanalyse ein Ergebnis der Forschungsarbeit in *Eta+* und die Folge aus den Ansprüchen dieser spezifischen, technischen Analyse. Es wurde dabei eine Produktoptimierung in Hinsicht auf Verlustenergieminimierung und -nutzung verfolgt. Die dabei maßgeblichen Energieflüsse wurden über eine thermodynamische Analyse erfasst und bewertet. Ein systematisches Vorgehen mit Hilfe der entwicklungsmethodisch geleiteten technischen Produktgestaltung sollten die Komplexität beherrschbar machen und die Zusammenhänge der Untersysteme und deren Auswirkungen aufzeigen. Diese Herangehensweise erfolgte vereinfacht dargestellt nach dem folgenden Ablauf:

1. Basisentwurf Methodik

Aus der Projektplanung, den Erfahrungen von Projektbeteiligten und aus der Literaturrecherche entstand ein einfacher Entwurf dieser Methodik.

2. Weiterentwicklung durch die Forschungstätigkeit in *Eta+*

Dieser erste Entwurf wurde in der Forschungsarbeit eingesetzt und allmählich an die Bedürfnisse im Projekt angepasst. Dabei wurden die Versuchsträger, ein Motorrad und ein Rasenmäher einer theoretischen Systemanalyse unterzogen, um die Energieflüsse aufzuzeigen und eine geeignete Messdatenerfassung zu ermöglichen. Die in den praktischen Untersuchungen der Versuchsträger erfassten Daten wurden in einer Analyse ausgewertet, in einer Optimierung wurden daraus folgend Prototypen entworfen und gebaut, welche wiederum einer Analyse unterzogen wurden. Das Vorgehen in der Projektarbeit und der gezielte Einsatz von Werkzeugen der methodischen Entwicklung technischer Produkte und der thermodynamischen Analyse ergaben weitere Inhalte für die energetische Systemanalyse.

3. Methodik *MEta+*

Nach Abschluss der Forschungstätigkeiten in *Eta+* wurde die in einer Rohfassung vorliegende Methodik weiter ausgearbeitet. Der Einsatz der thermodynamischen Denkweisen und Werkzeuge wurde mit der methodischen Entwicklung technischer Produkte bei der Produktoptimierung kombiniert. Daraus folgte eine systematische Vorgehensweise zur Analyse von Energieflüssen und Energiepotentialen in technischen Systemen. Somit wurde versucht eine Methodik zu erarbeiten, welche die Stärken beider Ansätze verbindet und gleichzeitig für Techniker handhabbar bleibt. Es können daraus zwei grundlegende Mechanismen und deren Unterpunkte hervorgehoben werden.

a. Potential des Systems über eine energetische Analyse erschließen

- Die thermodynamische Analyse wird als technisch-wissenschaftliches Werkzeug verwendet.
- Die direkte Darstellung der Energieflüsse und deren Wirkungsgrade geben die Potentiale zur Optimierung an.
- Verluste im Energiefluss repräsentieren Schwachstellen im System.
- Über die ermittelten Schwachstellen lassen sich Möglichkeiten für eine Verlustenergieminimierung und -nutzung ableiten.

b. Methodische Entwicklung technischer Produkte als strukturierte Vorgehensweise zur Erschließung der Potentiale

- Differenzierte Betrachtung des Produktes; systemorientierte Betrachtungsweise – Systemdenken.
- Einsatz von konkreten Werkzeugen aus dem Systems Engineering (Top Down)

Analyse, vom Groben zum Detail, etc.), um das Systemdenken zu etablieren und komplexe Strukturen handhabbar zu machen.

- Modellabbild des Systems: Das technische Produkt wird über eine modellhafte Darstellung abstrahiert.
- Vereinfachung der Produktanalyse über das Modellabbild des Systems um Überblick und Kontrolle zu schaffen.
- Einsatz von konkreten Werkzeugen aus der Entwicklungsmethodik (Mindmap, Brainstorming, Projektablaufplan, Projektzeitplan, etc.), um spezifische Fragestellungen zu bearbeiten.
- Zielgerichtete Analyse technischer Systeme.

Der Entwurf einer modellhaften Darstellung als Abbild des zu bearbeiteten Systems, in weiterer Folge als das Modellabbild des Systems bezeichnet, wird in der Literatur als ein wichtiger Bestandteil in einem Projekt und dessen Teilbereichen gesehen, siehe dazu Haberfellner [35][36], Lindemann [51] oder Winzer [96]. Aus diesem Grund wurde in der Forschungstätigkeit eine Modellabbildung der Versuchsträger durchgeführt. Es wird dadurch die Verbindung der thermodynamischen Analyse mit der systematischen Vorgehensweise der entwicklungsmethodisch geleiteten technischen Produktgestaltung erleichtert. Das anfänglich noch kleine und einfache Modellabbild der Systeme, ein Beispiel ist in Abbildung 3-1 gezeigt, wurde über die Projektlaufzeit hinweg nach und nach erweitert. In einem Brainstorming über die Modellierung der Versuchsträger wurden die ersten Systemskizzen entworfen. Einzelne Schlagwörter, Bilder, Skizzen und Modellblöcke wurden dabei festgehalten. Abbildung 3-2 zeigt den Entwurf eines Modellabbildes des Systems zur Energieflussanalyse in einem der Versuchsträger. Diese Entwürfe wurden bei der Weiterentwicklung des Modellabbildes durch neue Erkenntnisse erweitert. Das Gesamtbild bot fortlaufend einen Überblick über das Konzept und neue Gedankengänge fanden dadurch leichter den richtigen Platz im System. Auch wurden Auswirkungen von Umstellungen oder Modulzusammenhänge leichter erkennbar.

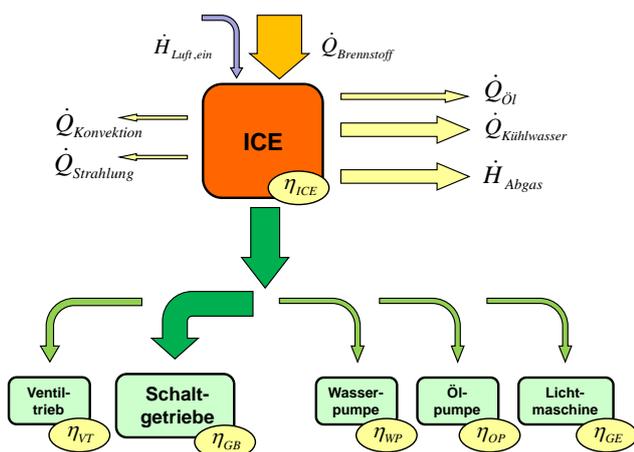


Abbildung 3-1: Skizze Energiefluss in einem KFZ Antriebsstrang

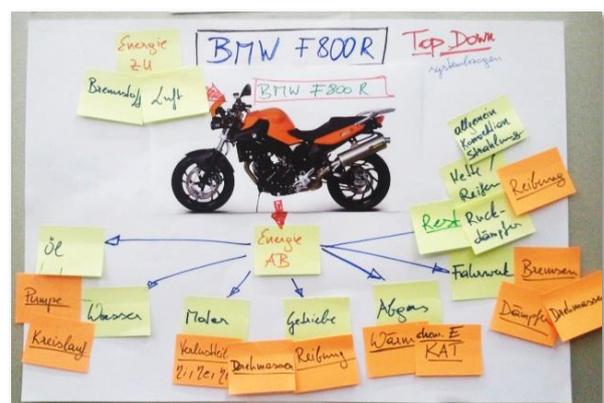


Abbildung 3-2: Entwurf zum Energiefluss im Motorrad

3.3 Überblick über die Methodik *MEta+*

Der grundsätzliche Aufbau von *MEta+* lässt sich in drei voneinander unabhängige Blöcke einteilen, dem Modell-, dem Methodik- und dem Evaluierungsblock, wie in Abbildung 3-3 dargestellt ist. Die thermodynamischen Methoden zur Energieflussanalyse sind dabei in allen drei Blöcken integriert. Während des Ablaufs des geplanten Projektes zur Optimierung eines technischen Produktes werden alle drei Blöcke parallel abgearbeitet, wobei ein intensiver Informationsaustausch zwischen ihnen stattfindet.

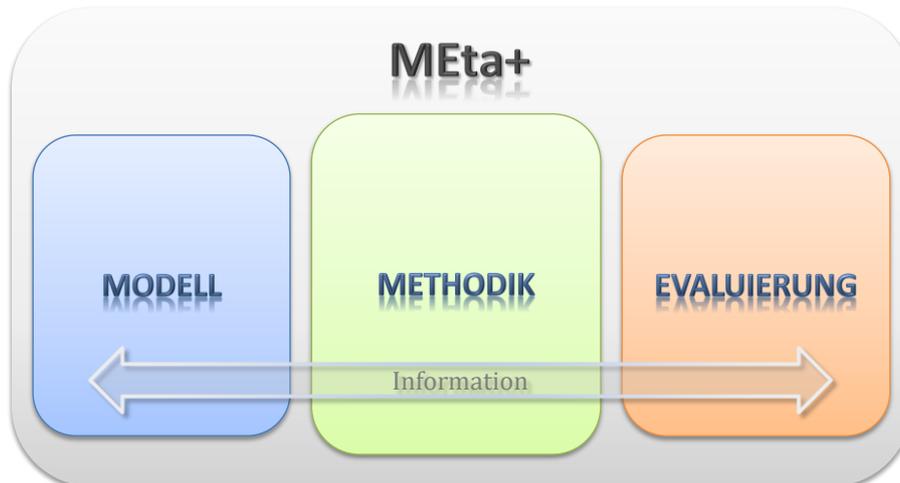


Abbildung 3-3: Die drei Säulen von *MEta+*

Diese Einteilung baut auf die in Kapitel 2.2 beschriebenen Grundlagen von Entwicklungsmethodik und Systems Engineering auf. Wie gezeigt wird, entspricht die Darstellung von *MEta+* dem Prinzip des *Denkens in Systemen* und die Aufteilung in Untergruppen dem Prinzip der *Strukturierung*. In der später folgenden vertieften Definition der Methodik wurden auch die Vorgehensweisen *Vom Abstrakten zum Konkreten* und *Vom Ganzen zum Detail* angewendet, um einen komplexen Projektablauf einfach und übersichtlich handhabbar zu machen. Dabei erfolgt eine fortschreitende Präzisierung der drei Blöcke über Unterblöcke in verschiedenen Ebenen. Die Grundprinzipien der *Minimalen Modelle* und der *Minimierung der Schnittstellen* wurden berücksichtigt, um klar abgetrennte Teilbereiche zu erzeugen und die Beziehungen zwischen diese Blöcke möglichst einfach aufzuzeigen.

3.3.1 Methodik

Der Methodikblock bildet das zentrale Grundgerüst von *MEta+*. Er beinhaltet die strukturierte Vorgehensweise nach den Prinzipien des systematischen Denkens und Handelns aus der Entwicklungsmethodik sowie aus der thermodynamischen Analyse. In der ersten Verfeinerungsstufe werden dabei drei grundlegende Ablaufphasen definiert.

- Definitionsphase
- Analysephase
- Optimierungsphase

Diese sind, wie in Abbildung 3-4 zu sehen ist, zeitlich aufeinanderfolgend angeordnet. In dieser Darstellung wird das Vorgehen im linearen Ablauf gezeigt. In der realen Projektsituation ist diese Struktur jedoch flexibel handzuhaben und muss an die jeweiligen Gegebenheiten der Projektsituation angepasst werden. Einzelne Teile oder gesamte Unterblöcke werden dabei bedarfsweise nach vorne bzw. hinten verschoben oder aufgeteilt und mehrmals bearbeitet.

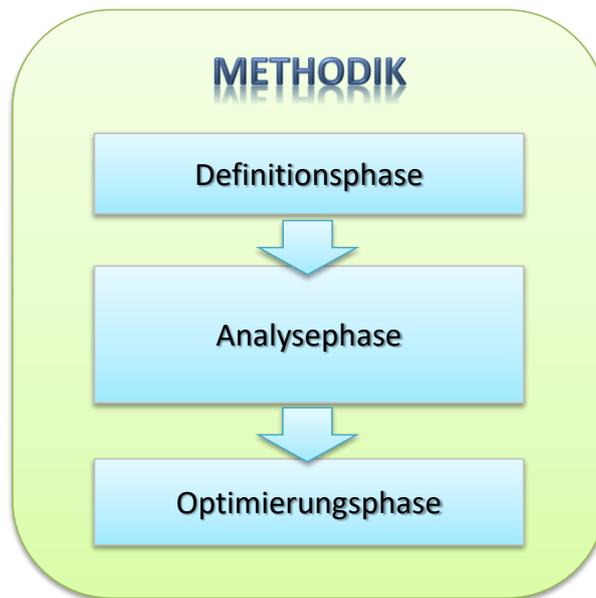


Abbildung 3-4: Phasen des Methodikblocks

Definitionsphase

Die Definitionsphase ist die einleitende Phase in das Projekt. Sie beschäftigt sich mit der Zielsetzung des Projektes. Dabei werden die Ideen und Wünsche der verschiedenen Interessensvertreter gesammelt und zu Zielen, Anforderungen und Rahmenbedingungen weiter verarbeitet. Die Diskrepanz zwischen Soll- und Istzustand muss herausgearbeitet werden und erste Fragestellungen, welche in der Analysephase zu klären sind, werden aufgeworfen. Diese Diskrepanz zwischen Soll- und Istzustand stellt die zentrale Motivation für das Projektvorhaben dar und muss genau definiert werden. Daraus leiten sich alle weiteren Fragestellungen und Tätigkeiten ab und es wird der Grundstein des Projektes gelegt. Um diese Vorbereitungsphase zu bearbeiten sind verschiedene systemische Werkzeuge wie z.B. *Brainstorming* oder *Mindmapping* sehr gut einsetzbar.

Für eine erfolgreiche Entwicklung des Projektes ist es sehr wichtig, die Definitionsphase ausführlich zu behandeln und dabei ein für alle Interessensvertreter klar verständliches Ergebnis zu erhalten. Dadurch vermeidet man präventiv in einem frühen Stadium des Projektes Missverständnisse, die später teilweise gravierende Probleme mit sich bringen können. Ein zu schnelles Voranschreiten im Projekt kann zu einem „Tunnelblick“ auf die zuerst generierten Ideen und zum Übersehen des restlichen, nicht so leicht zu erfassenden Lösungsraumes führen. Dieser Lösungsraum könnte aber für das Projekt signifikant wichtige Ideen beinhalten. Der detaillierte Blick während der Definitionsphase bringt vielfältige Ideen, Ziele und Rahmenbedingungen in das aktive Bewusstsein der projektbeteiligten Personen. Daraus können sich wiederum weitere Denkansätze entwickeln.

In dieser Projektphase ist es bereits hilfreich, ein einfaches Modellabbild des betrachteten technischen Systems zu erstellen, wie in Kapitel 3.3.2 näher beschrieben wird. Handskizzen des technischen Systemaufbaus mit Energieflüssen, Systemgrenzen, Schnittstellen, Beziehungen, etc. auf einem Flipchart oder Whiteboard sind dazu völlig ausreichend. Ein Foto davon auf einer gemeinsamen Projektplattform wie z.B. Dropbox geteilt, trägt zur ersten Arbeitsgrundlage bei. Dadurch wird ein Systemüberblick geschaffen und das interdisziplinäre Verständnis des Systems ermöglicht. Weiters ist der Einbezug des Evaluierungsblockes in diesem Projektstadium notwendig, um klare Aussagen und Abschätzungen über die Ergebnisse der Definitionsphase treffen zu können. Eine Variantenbildung der Ansätze sollte ebenfalls durchgeführt werden, um die verschiedenen Lösungswege gegeneinander abschätzen zu können und bei

notwendigen Änderungen während des Projektverlaufs bereits bewertete Lösungsalternativen zur Verfügung zu haben. Dies entspricht dem Grundprinzip *Denken in Alternativen*.

Analysephase

In dieser Projektphase findet die ausführliche thermodynamische Energieflussanalyse des zu untersuchenden Systems statt. Große Teile der durchgeführten Forschungsarbeit an den Versuchsträgern, welche in Kapitel 4 beschrieben wird, waren in dieser Projektphase angesiedelt.

Wiederum werden für diese Phase die Grundlagen der thermodynamischen Analyse sowie der Entwicklungsmethodik berücksichtigt. Aus der Vorgehensweise *Vom Ganzen zum Detail* ergibt sich zu Beginn eine einfache Basisuntersuchung, die mit möglichst geringem Aufwand grundlegende Erkenntnisse über das energetische Systemverhalten liefern soll. Als Arbeitsgrundlage für Planung der Untersuchungen wird dabei das Modellabbild aus dem Modellblock herangezogen. Daraus kann abgeleitet werden, welche Informationen über das Basissystem von Bedeutung sind. Um diese Informationen zu erhalten werden entsprechende Berechnungs- und Versuchsentwürfe erstellt und durchgeführt. Dabei muss im Evaluierungsblock die Entscheidung getroffen werden, welche Informationen von Bedeutung sind und in Kombination mit dem Methodikblock, mit welchen Maßnahmen diese in vertretbarem Aufwand beschafft werden können. Die Ergebnisse der Datenerfassung werden anschließend im Evaluierungsblock weiterverarbeitet, um das Gesamtsystem zu bewerten und Entscheidungen für den weiteren Projektverlauf zu treffen.



Abbildung 3-5: Motorrad am Rollenprüfstand

Das Modellabbild, das in der durchgeführten Forschungsarbeit für die erste Analyse des Motorrads entworfen wurde, ist in Abbildung 3-12 auf Seite 33 dargestellt. Anschließend wurde das betrachtete Motorrad auf einem Rollenprüfstand untersucht, siehe Abbildung 3-5, wobei der Kraftstoffmassenstrom, die Rollengeschwindigkeit und das Rollendrehmoment erfasst

werden. Daraus ergibt sich die Information über den Gesamtwirkungsgrad des Systems, siehe Gleichung (3-3) auf Seite 28. Dies ist eine am Institut sehr häufig angewendete Standarduntersuchung für Zweiräder, daher ist diese Datenerfassung einfach durchzuführen und liefert in kurzer Zeit die gewünschte Information.

Im darauffolgenden Schritt werden die Untersuchungen eine Ebene verfeinert. Das Modellabbild des Systems wird weiterentwickelt und Lösungen für die entsprechende Energieflussanalyse und der dafür notwendigen Datenerfassung werden erarbeitet. Neu entstehende Querverbindungen zwischen einzelnen Untergruppen des Modellabbildes sowie zwischen System und relevanter Systemumgebung müssen dabei beachtet werden. Auch hier wird das Grundprinzip *Denken in Alternativen* mit einbezogen. Es werden verschiedene Lösungsvarianten für eine adäquate Informationsbeschaffung erarbeitet und gegenüber gestellt. Eine oder mehrere davon werden anschließend weiterverfolgt. Im Evaluierungsblock findet zeitgleich eine stetige Bewertung der erarbeiteten Projekthinhalte statt.

Dieser Verfeinerungsprozess wird so oft wie nötig iterativ durchlaufen und weiter vertieft. Als Ergebnis steht anschließend eine breite Datenbasis für die darauffolgende Optimierungsphase zur Verfügung.

Optimierungsphase

In der Optimierungsphase werden auf Grundlage der erarbeiteten Informationen aus der Analysephase Optimierungsvarianten entworfen. Diese werden mit Hilfe des Evaluierungsblocks wiederum einer genauen Betrachtung unterzogen. Dementsprechend wird das Modellabbild im Modellblock weiter modifiziert und alle sich verändernden Eigenschaften und Beziehungen gründlich betrachtet. Anschließend erfolgt die Realisierung eines Prototyps, der wiederum in einer Analysephase untersucht wird.



Abbildung 3-6: Realversuch am Rasenmäher

Einen Teil davon können auch z.B. Prototypenuntersuchungen im Realbetrieb bilden. In Abbildung 3-6 ist ein in den Forschungsarbeiten durchgeführter Realversuch am Rasenmäher zu sehen.

Mit den gewonnenen Erfahrungen aus den Untersuchungen werden im Anschluss das Konzept

zur Verbesserung des Systems sowie der Prototyp weiterentwickelt. Das Ziel ist, dass am Ende dieser Phase ein machbarer Lösungsvorschlag zur Produktverbesserung und ein lauffähiger Prototyp zur Verfügung stehen. Falls dies nicht der Fall ist, ist zu evaluieren, ob in einer Iterationsschleife eine Fehleranalyse und ein nochmaliger, modifizierter Durchlauf des Methodikblocks gemacht werden. Andernfalls, ob die Optimierung des vorliegenden Systems unter den gegebenen Rahmenbedingungen nicht machbar oder sinnvoll ist.

3.3.2 Modell

Die Modellabbildung zur abstrakten Darstellung von komplexen technischen Systemen wird in der Fachliteratur wie z.B. Lindemann [51], Winzer [96], Haberfellner [36] oder Spahni [76] zu einem wichtigen Grundbaustein in einer erfolgreichen Projektabwicklung gezählt. Verschiedenste technische Systeme können mit einer problemorientierten Modellabbildung zielgerichtet dargestellt werden. Dadurch kann die Komplexität dieser Systeme in eine überschaubare und beherrschbare Form gebracht werden. Somit wird den einzelnen Projektmitgliedern und Interessensvertretern eine einheitlich verständliche Ebene geschaffen. Über diese Ebene können wichtige Informationen kommuniziert und Missverständnisse präventiv vermieden werden. Dieses Vorgehen entspricht den Grundprinzipien der *Verständlichkeit* und der *Standardisierung*.

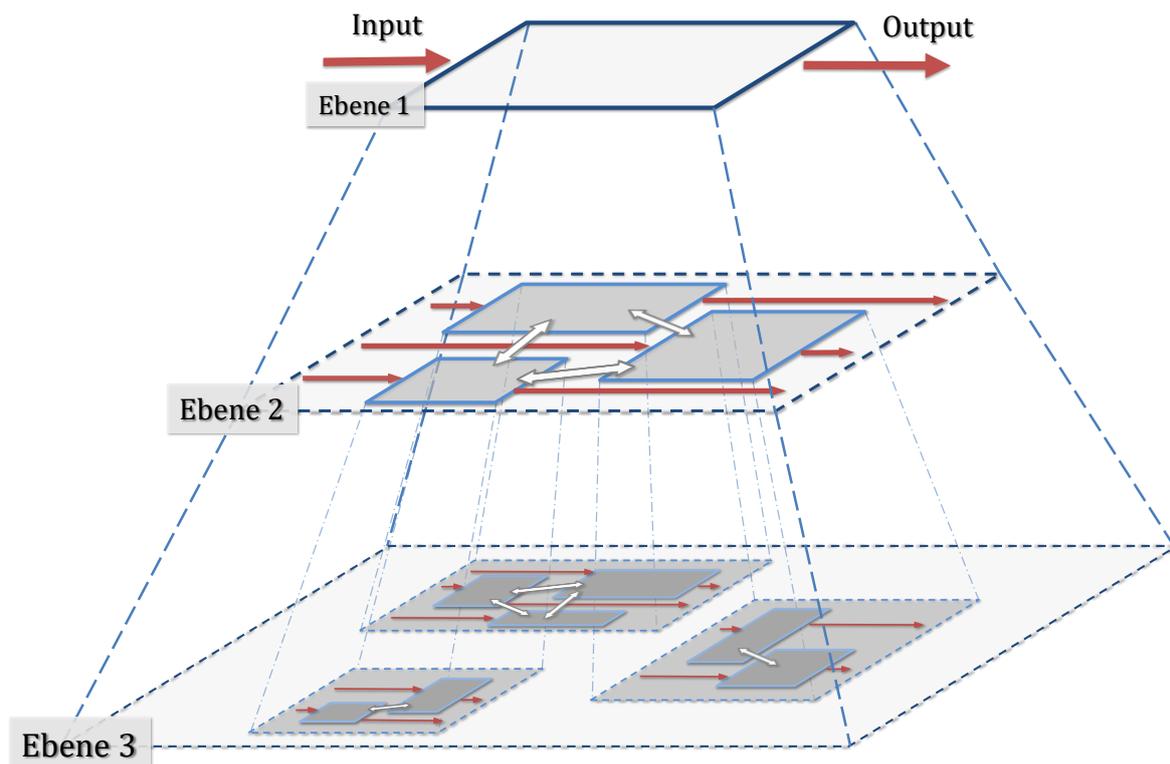


Abbildung 3-7: Blackbox Darstellung in mehreren Ebenen

Im vorhergehenden Abschnitt *Methodik* wurde die Vorgehensweise in der Modellabbildung schon teilweise angesprochen. Das Modellabbild eines Systems wird ebenso nach den Prinzipien *Vom Ganzen zum Detail* und *Vom Abstrakten zum Konkreten* entworfen und stetig der Weiterentwicklungen im Projekte angepasst.

In Abbildung 3-7 ist die Abstraktion des betrachteten Systems durch die Blackbox Darstellung

in mehreren Ebenen gezeigt. Diese Darstellung ist den Ansätzen der stufenweise Auflösung eines Systems von Haberfellner [36] nachempfunden. Auch in der thermodynamischen Analyse werden Systemgrenzen um den betrachteten Raum gelegt und dabei ein thermodynamisches System definiert sowie die Stoff- und Energieflüsse über dessen Grenzen beschrieben. Des Weiteren entspricht diese Anordnung von Unterblöcken in einzelnen Ebenen dem Aufbau eines Simulationsmodells unter *Matlab-Simulink*, worauf in der Beschreibung der Forschungsarbeit in *Eta+* in Kapitel 4 genauer eingegangen wird.

Das Gesamtsystem wird in der ersten Betrachtungsebene als Blackbox skizziert. Die Wechselwirkungen mit der relevanten Systemumgebung werden dabei in den Parametern Input und Output zusammengefasst. Eine vertiefende Betrachtung auf Ebene 2 ermöglicht die Öffnung der Blackbox und die Modellierung einzelner Subsysteme. Die Wechselwirkungen dieser Subsysteme mit den Blackbox Grenzen der Ebene 1 werden wiederum über Input- und Outputparameter beschrieben. Über die Input- und Outputparameter ist es möglich, Eigenschaften des Systems, die für die Analyse von Interesse sind zu qualifizieren und zu quantifizieren. Anschließend folgt eine Analyse der Wechselwirkungen der Subsysteme untereinander. Die Betrachtung in vertiefenden Ebenen wird je nach Bedarf für das gesamte System oder einzelne Subsysteme fortgeführt. Wichtig ist hier wiederum, durch Reflexion und Iteration, aus einzelnen Ebenen gewonnene Erkenntnisse in andere Ebenen überzuführen. Bei der Modellabbildung soll ein zu starres Festhalten an bestehenden Strukturen vermieden werden, um die nötige Flexibilität im Denken und Handeln zu erhalten. Dabei spielt der Evaluierungsblock wiederum eine wichtige Rolle. Es muss bewertet werden, welche Strukturen weiter wichtig sind und welche weggelassen werden können, um unter Berücksichtigung des Prinzips der *Minimierung der Schnittstellen* die Einfachheit des Modells zu erhalten. Das heißt, während der Weiterentwicklung der Modellabbildung dürfen der Überblick über das System und die korrekte Beschreibung der Zusammenhänge im System, welche die wichtigsten Eigenschaften des Modells darstellt, nicht verloren gehen.

Bei vertiefter Betrachtung des Modellblocks können abermals einzelne Blockphasen beschrieben werden.

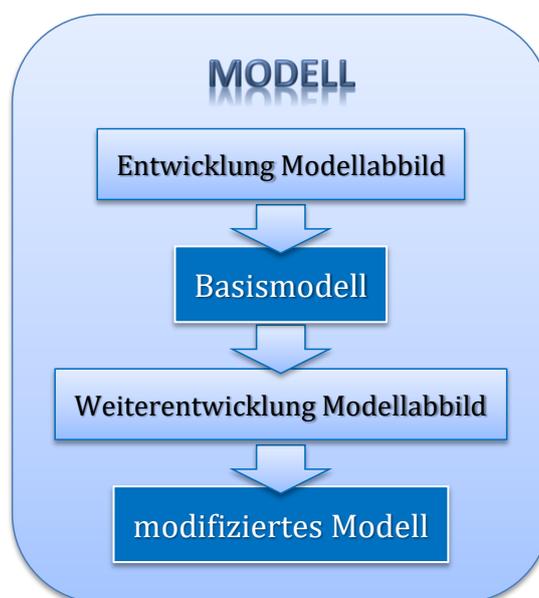


Abbildung 3-8: Phasen des Modellblocks

Der zeitliche Ablauf und die gleichzeitige Verfeinerung sind dem Methodikblock ähnlich und laufen parallel zu dessen Phasen ab. Abbildung 3-8 veranschaulicht diesen Aufbau.

Entwicklung Modellabbild

In der ersten Phase des Modellblocks findet ein problemorientiertes Erstellen eines Modellabbildes des Systems statt. Problemorientiert bedeutet, dass die Ergebnisse aus der Definitionsphase des Methodikblocks als Eingangsinformation für die Modellabbildung verwendet werden. Dabei wird nach der Blackbox Darstellung in mehreren Ebenen vorgegangen und die 1. Ebene definiert. Des Weiteren werden die Input- und Outputparameter beschrieben und die für die energetische Systemanalyse bedeutenden Parameter isoliert.

Basismodell

Aus der Entwicklung des Modellabbildes ergibt sich nun das Basismodell. Dieses bildet die Arbeitsgrundlage der am Projekt beteiligten Personen. Nach Erhalt der ersten Informationen aus der Analysephase des Methodikblocks geben nun die vorher definierte Eigenschaften und Kennwerte Auskunft über das Systemverhalten.

Weiterentwicklung Modellabbild

Aus der Analyse des Basismodells wird die weitere Vorgehensweise erarbeitet. Die Modellabbildung wird überarbeitet und in der nächsten Ebene verfeinert. Dabei spielt der Informationsaustausch mit dem Methodik- und dem Evaluierungsblock eine wichtige Rolle. Die Erhöhung des Detaillierungsgrades zur Weiterentwicklung des Modellabbildes verläuft parallel zur Analysevertiefung im Methodikblock. Weitere Input- und Outputparameter werden identifiziert, um eine adäquate Bewertung über Kennwerte und Systemeigenschaften im Evaluierungsblock zu ermöglichen.

Modifiziertes Modell

Aus der Weiterentwicklung Modellabbildes resultiert ein modifiziertes Modellabbild des Systems mit verschiedenen Submodellabbildungen.

Diese Iterationsschleife von Entwurf und Weiterentwicklung der Modellabbildung wird mit den anderen beiden *MEta+* Blöcken abgestimmt und so oft wie nötig wiederholt.

3.3.3 Evaluierung

Die in dieser Methodik enthaltene Evaluierung fällt in das Gebiet der Qualitätssicherung und ist in der Fachliteratur wie z.B. bei Feldhusen [26] Bauer [2] Bronner [8] Ophay [57] Lindemann [51] umfangreich beschrieben. Der Evaluierungsblock von *MEta+* enthält verschiedene Teilgebiete, wie in Abbildung 3-9 dargestellt ist. Darin erfolgt die Bewertung der einzelnen Methodikschritte. Die Teilgebiete überschneiden sich zum Teil und werden je nach Evaluierungsanforderung parallel eingesetzt. In der Evaluierung werden die Arbeitsschritte des Methodikblocks aber auch des Modellblocks kritisch betrachtet und über die vorher definierten Bewertungskriterien beurteilt. Zum Beispiel sind das in der Definitionsphase eine Beurteilung der gefundenen Zieldefinitionen, bei der Modellabbildung der adäquate Aufbau des Modells nach den Grundprinzipien der Entwicklungsmethodik oder in der Analysephase die thermodynamische Bewertung des Systems über die definierten Kriterien und Kennwerte. Die Bewertung erfolgt bei Bedarf während einzelner Arbeitsabläufe oder zwingend als Reflexion nach größeren Methodikblöcken in sogenannten *Quality Gates*. In eventuell notwendigen Iterationsschleifen werden die gewonnenen Erkenntnisse mit den vorher erfolgten Arbeitsschritten abgeglichen.

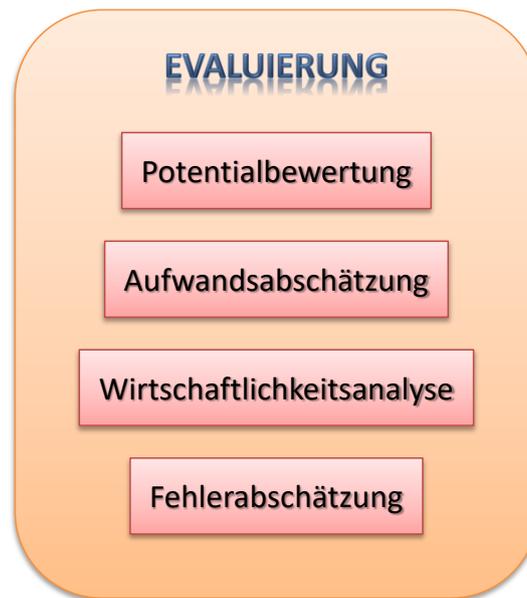


Abbildung 3-9: Inhalte des Evaluierungsblocks

Potentialbewertung

Die Potentialbewertung beschäftigt sich mit den Verbesserungsmöglichkeiten einzelner Teilgebiete eines Systems. Um eine Bewertung zu ermöglichen werden diese Potentiale über Kriterien oder Kennzahlen greifbar gemacht und mit bestehenden Referenzsystemen abgeglichen. Ein Beispiel für eine Potentialbewertung ist die Wirkungsgradanalyse. Der Wirkungsgrad ist definiert über das Verhältnis *Nutzen aus einem Prozess zu Aufwand für diesen Prozess*, wie aus Gleichung (3-1) ersichtlich ist. Diese Wirkungsgradbetrachtung wird vielfach für technische Vorgänge verwendet. Z.B. wird für eine Wärmekraftmaschine der *Carnot Prozess* als Kreisprozess mit optimalen Wirkungsgrad als Vergleichsprozess heran gezogen [18][60], siehe Gleichung (3-2).

$$\eta = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} \quad (3-1)$$

$$\eta_c = 1 - \frac{T_{ab}}{T_{zu}} \quad (3-2)$$

Im speziellen Fall, wie in Gleichung (3-3) ausgeführt ist, kann der effektive Wirkungsgrad η_e eines Fahrzeuges mit Hilfe von Untersuchungen am Rollenprüfstand ermittelt werden. Den Nutzen stellt hier die am Prüfstand gemessene effektive Leistung P_e dar, welche sich aus dem Moment M und der Winkelgeschwindigkeit ω an der Bremswelle der Prüfeinrichtung zusammensetzt. Die zugeführte Brennstoffenergie \dot{Q}_B wird aus dem Massenfluss \dot{m}_B und dem spezifischen Heizwert H_u des Kraftstoffes errechnet und bildet in diesem Fall den Aufwand für den betrachteten Prozess.

$$\eta_e = \frac{P_e}{\dot{Q}_B} = \frac{M * \omega}{\dot{m}_B * H_u} \quad (3-3)$$

Aufwandsabschätzung

In der Aufwandsabschätzung wird versucht, den Bedarf an finanziellen und personellen Mitteln für die Generierung von systemrelevanten Entwicklungsergebnissen abzuschätzen. Die Aufwandsabschätzung steht im engen Zusammenspiel mit der Wirtschaftlichkeitsanalyse. Hier ist es sehr wichtig, zu Projektbeginn das Projekt in einzelne Arbeitspakete einzuteilen und den dafür nötigen Zeitaufwand in einem Etappenplan abzuschätzen. Darauf aufbauend kann der Aufwand für die einzelnen Etappen ermessen werden. Eine Bewertung des Aufwands kann über verschiedene Werkzeuge aber auch über Erfahrungswerte durchgeführt werden. Je nach Situation im Projekt wird dabei mehr oder weniger vertiefend vorgegangen. Zum Beispiel kann bei der Bewertung einer Bauteilanalyse am Komponentenprüfstand im ersten Anlauf ein übersichtsmäßiges Aufstellen des Zeit – und Materialaufwandes eine grobe Einschätzung des finanziellen Rahmens ermöglichen. Wenn entschieden wird die angedachte Analyse durchzuführen, kann vertiefend mit Hilfe von speziellen Werkzeugen der Aufwand in genaue Zahlen gefasst werden.

Wirtschaftlichkeitsanalyse

Wie oben schon erwähnt, hängt die Wirtschaftlichkeitsanalyse sehr eng mit der Aufwandsabschätzung aber auch mit der Potentialbewertung zusammen. Wie der Name schon sagt, wird hier beurteilt, ob es wirtschaftlich ist, gewisse Projektstrategien zu verfolgen. Dabei müssen zum einen die Kosten der einzelnen Projektschritte und Vorgehensweisen bewertet werden. Zum anderen müssen die möglichen Effekte der angedachten Handlungen abgeschätzt werden. Mit diesen Informationen können Aussagen über die Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen und Entscheidungen über die weiteren Schritte im Projekt getroffen werden.

Beispiele für Werkzeuge zur Aufwandsabschätzung und Wirtschaftlichkeitsanalyse sind verschiedene nicht monetäre Entscheidungstechniken wie der *Entscheidungsbaum*, der *morphologische Kasten*, die *Kosten – Wirksamkeitsanalyse* oder die *Nutzwertanalyse*. Beispiele für monetäre Techniken sind die *Kosten – Nutzen Analyse*, die Gewinnvergleichsrechnung oder die Rentabilitätsrechnung.

Fehlerabschätzung

Auf der Projektmanagementebene dient die Fehlerabschätzung zur Risikoanalyse und Fehlerminimierung. Vielfach verwendete Werkzeuge hierfür sind die *Fehlerbaumanalyse*, die *Fehlermöglichkeits-Einfluss Analyse (FMEA)* oder eine Analyse nach der *Quality Function Deployment (QFD)* Methodik. *Design Reviews* werden in Besprechungen im Workshop-Stil eingesetzt, um an kritischen Projektzeitpunkten gezielt die vorangegangene Projektphase zu reflektieren. Auf der Ebene der technischen Analyse wird eine Fehlerabschätzung benutzt, um mögliche Messunsicherheiten berechnen und darstellen zu können. Da eine Messkette in der Messdatenerfassung immer fehlerbehaftet ist, ist es notwendig die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der gesammelten Daten zu bestimmen. Dazu werden statistische Verfahren zur Fehlerberechnung und Fehlerfortpflanzung verwendet, wie bei Rieberer [67] oder Wimmer [94] beschrieben ist.

3.4 Quervernetzung, Reflexion und Iterationsschleifen

Die Quervernetzung von Information zwischen den einzelnen Blöcken von *MEta+* stellt eine wichtige Grundlage dieser Methodik dar. Der Methodikblock mit seinen Ablaufphasen bildet die zentrale Struktur. Die einzelnen Phasen und deren Unterpunkte müssen einerseits über den Evaluierungsblock kritischer beurteilt werden. Andererseits muss das Modellabbild des Systems im Zusammenspiel mit dem Methodikblock entwickelt und laufend weiter verbessert werden.

Mit der Information aus der Definitionsphase des Methodikblocks wird das grundlegende Modellabbild erstellt. Aus diesem Modellabbild ergeben sich Eingangsgrößen für weitere Anforderungen, Ziele und Randbedingungen in der Definition. Die neu entstandenen Kriterien werden wiederum in das Modellabbild integriert. Dieser stätige Informationsfluss wird während des gesamten Projektablaufs beibehalten.

Aus diesem Beispiel lässt sich erkennen, dass Information ständig zwischen den MEta+ Blöcken ausgetauscht werden muss. Obwohl ein Informationsaustausch normalerweise selbsttätig durch die Projektarbeit des Teams entsteht, kann die Qualität durch bewusstes Handeln noch deutlich verbessert werden. Die Grundprinzipien des systematischen Denkens und Handelns werden hierbei mit einbezogen. Die für den jeweiligen Empfänger notwendigen Informationen werden gezielt beschrieben und anschließend zusammengestellt. Wichtig ist es die Quantität zu verringern und gleichzeitig die Qualität zu verbessern. Dabei wird in den jeweiligen Abschnitten der Blöcke der Bedarf an Information ermittelt und anschließend klar kommuniziert. Vereinbarungen was wann zur Verfügung stehen soll, verbessern den zeitlichen Ablauf und Überblick. Ein schriftliches Festhalten der Kommunikation bewirkt, dass Handlungen zu späteren Zeitpunkten nachvollzogen und mögliche Nachbesserungen identifiziert werden können.

Auch die Reflexion von Projektphasen und die Wiedereingliederung von gewonnenen Erkenntnissen durch Iterationsschleifen werden von Haberfellner [36] als sehr wichtig in der erfolgreichen Abwicklung eines Projektes erachtet. Wie Lindemann [51] aber auch Winzer [96] verdeutlichen, bringt die Dynamik von modernen Entwicklungsprozessen notwendige Iterationen mit sich. In Reflexionsphasen muss bewertet werden, ob neu gewonnene Erkenntnisse für frühere Projektabschnitte von Bedeutung sind und diese in Iterationsschleifen nochmals in den Projektablauf eingearbeitet werden müssen. Die wichtige Rolle des Evaluierungsblockes wird dadurch klar aufgezeigt. Die bewusste Reflexion, hier als *Review* bezeichnet, zu klar festgelegten Zeitpunkten an wichtigen Projektknotenpunkten, den so genannten *Quality Gates* ist hierfür unbedingt zu beachten. Aber auch ein flexibles Innehalten aufgrund von plötzlich auftretenden, projektkritischen Ereignissen und dem dabei entstehenden Druck stand zu halten, zeichnet eine intelligente Projektabwicklung aus. Dabei ist es wichtig in kurzer Zeit die notwendige Information in kompakter Form zu beschaffen und darauf aufbauend weitere Entscheidungen zu treffen. Es kann immer wieder beobachtet werden, dass unter Zeitdruck die notwendige Gründlichkeit in Entscheidungsprozessen vernachlässigt wird. Dadurch entstehen jedoch sehr häufig Folgeprobleme im Projekt, die weit schwerer ins Gewicht fallen, als der kurzfristige Mehraufwand in der Informationsbeschaffung.

3.5 MEta+ im Detail

Die bisher vorgestellte Methodik wird nun weiter aufbereitet sowie die Inhalte der thermodynamischen Energieflussanalyse vertiefend mit einbezogen. Aus den einfachen Fragestellungen *Was* soll erreicht werden, *Wie* soll es erreicht werden und *Womit* soll es erreicht werden, können die Untergruppen *Anforderungen* (*Was*), *Funktionen* (*Wie*) und *Komponenten* (*Womit*) abgeleitet werden. Diese Fragestellungen werden in die Methodikphasen integriert und bilden dadurch den Methodikprozess. Daraus entwickeln sich in darauffolgenden Verfeinerungsstufen die detaillierten Phaseninhalte von MEta+. Der Vorgang der *Variantenbildung* hilft Prioritäten in den einzelnen Phaseninhalten zu setzen und trägt damit wesentlich zur Effizienzsteigerung bei. In dieser Vorgehensweise spiegeln sich unter anderem die Grundprinzipien *vom Ganzen zum Detail* und *vom Abstrakten zum Konkreten* sowie die *Strukturierung* und die *Anwendung mehrerer Sichten* wieder.

3.5.1 Definitionsphase

Eine Grundidee oder ein Wunsch zur Produktverbesserung bildet den Ausgangspunkt eines Projektes. Zu Beginn des Projektes steht die Definitionsphase, welche bei weiterer

Detailierung mehrere Unterphasen beinhaltet, wie in Abbildung 3-10 veranschaulicht ist.

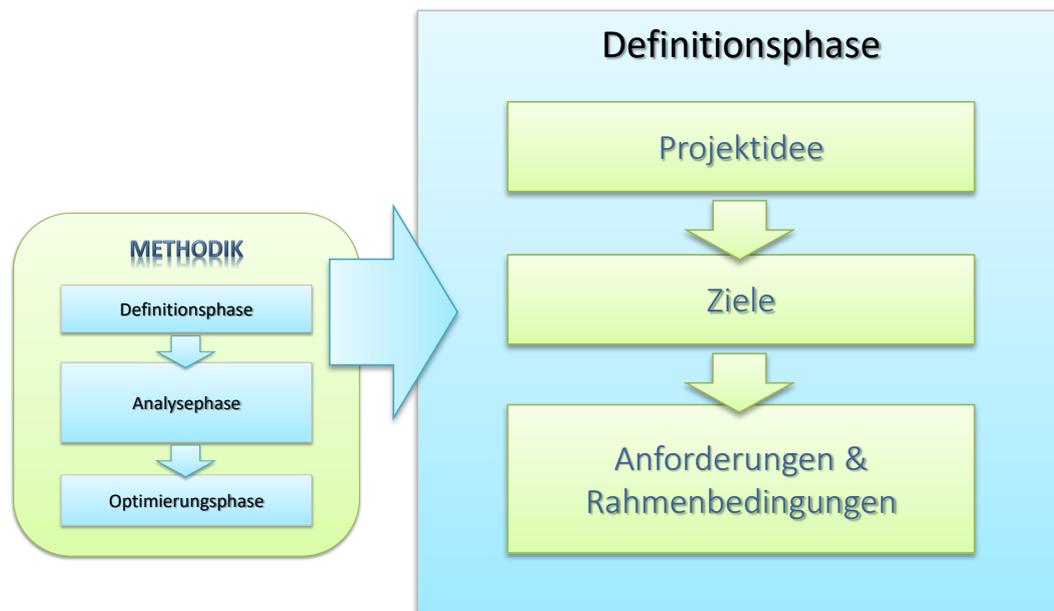


Abbildung 3-10: Definitionsphase

3.5.1.1 Aufbereiten der Projektidee

Mit Hilfe von verschiedenen Kreativwerkzeugen, welche unter anderem bei Ninaus [56] beschrieben werden, wie z.B. *Brainstorming*, *Brainwriting* oder *Mindmaps* wird die Projektidee bearbeitet und das dazugehörige Produkt genau durchleuchtet. Der Zugang zur Fragestellung kann dabei unter anderem über eine moderierte Teambesprechung mit Kollegen der Abteilung gefunden werden. Diese erste Kreativsitzung wird locker und möglichst konstruktiv durchgeführt. Es geht vorwiegend darum Ideen in den Raum zu werfen, aufzuschnappen und weiter zu spinnen. Wichtig ist dabei, alle gefundenen Ideen weiter zu verfolgen. Der Moderator der Sitzung schreibt dabei die Ideen am Whiteboard oder Flipchart nieder, woraus eine erste, einfache Skizze des Vorhabens entstehen kann. Wie zuvor bereits erwähnt, bergen abweichende Herangehensweisen verschiedener Fachrichtungen an Problemstellungen die Gefahr von Verwechslungen und Fehlinterpretationen. Durch die Dokumentation der Arbeiten und Meetings und der weiteren Verfügbarkeit dieser Unterlagen über eine zentrale Informationsschnittstelle, können Missverständnisse vermieden werden. Verschiedene Softwarepakete aber auch Onlineplattformen bieten eine gute Möglichkeit eine interaktive Informationsverlinkung während des Projektzeitraums herzustellen. Dabei kann jedes Teammitglied laufend Anmerkungen und Ergänzungen in der Dokumentation vornehmen. Auch verschiedenste Formate der Inhalte wie PDF, Tabellen (Excel), Text, Bild (jpeg, gif) oder Ähnliches können dabei verlinkt werden. Beispiele für „Scratchpad“ Plattformen zum schnellen Verfassen und einfachen Teilen von Notizen sind *Microsoft One Note* [52], *Evernote* [25] oder *Conceptboard* [10]. Über online Datenspeicher wie zum Beispiel *Dropbox* [14] oder *Onedrive for Business* [53] kann eine Plattform zum Datenaustausch geschaffen werden.

Projektplanung

Die intelligente und konsequente Projektplanung bildet das Rückgrat eines erfolgreichen Projektes, wie Lindemann [51] oder Feldhusen [26] betonen. Eine einfache Planung wird sehr früh im Projekt durchgeführt, um beim Akquirieren möglicher Projektpartner einen Überblick über das Vorhaben geben zu können. Für die Einreichung von Projektanträgen bei Fördergebern wie z.B. der österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft [58], ist eine vertiefende Projektplanung zwingend notwendig. Mit Fortschreiten des Projektes wird die Planung laufend

mitverbessert, der Hauptteil wird allerdings bereits in der Definitionsphase erarbeitet. Am Ende dieser Phase sollte daher ein gut durchdachter und klar definierter Projektplan stehen. Wesentliche Inhalte des Projektplans sind:

- **Arbeitspakete**
Abgrenzung der Projektinhalte in einzelne Pakete und Definition der Inhalte dieser Pakete.
- **Deliverables**
Ergebnisse, die am Ende eines Arbeitspaketes zur Verfügung stehen sollen.
- **Milestones**
Bedeutende Projektzeitpunkte die den Abschluss eines Arbeitspaketes oder die Fertigstellung wichtiger Einzelinhalte in einem Paket darstellen.
- **Zeitplanung**
Die Zeitplanung wird für das Gesamtprojekt und die darin enthaltenen Arbeitspakete durchgeführt. Deliverables und Milestones bilden die Eckpunkte dieses Zeitplans.
- **Ressourcenplanung**
Die Ressourcenplanung ist im Grunde ein Teil der Finanzplanung. Es werden die notwendigen personellen, material- und anlagentechnischen Aufwände für die geplanten Arbeitspakete abgeschätzt.
- **Finanzplanung**
Die finanziellen Notwendigkeiten für die angedachten Arbeitspakete werden erhoben. Weiters werden diese den finanziellen Möglichkeiten gegenüber gestellt.

Kick off Meeting

Ein Kick off Meeting darf in keinem Projektzeitplan fehlen. Vor der eigentlichen Projektarbeit ist es sehr wichtig, dem Kennenlernprozess der einzelnen Projektbeteiligten ausreichend Raum zu geben. Dabei werden erste Wünsche und Vorstellungen kommuniziert aber auch ein persönlicher Kontakt zwischen den beteiligten Personen hergestellt.

Teambuilding

In diesen Projektabschnitt fallen auch die ersten Phasen des klassischen Teambuildings. Die Projektleitung sollte die grundlegenden Mechanismen des Teambuildings berücksichtigen. Damit kann die Teamdynamik bewusst gesteuert und positiver Einfluss auf die Kooperationsbereitschaft und den Teamgeist genommen werden. Die Arbeitseffizienz und Arbeitsqualität des Teams wird dadurch deutlich gesteigert, wie bei Tuckman [84] oder Bohic [6] beschrieben wird.

Modellentwicklung

Während der Definitionsphase wird der Modellblock mit einbezogen und ein einfaches Modellabbild über eine Ebene 1 Blackbox zur Beschreibung des untersuchten Systems erstellt, siehe Abbildung 3-11. Diese Modellabbildung dient als Grundlage für die später folgenden Basisuntersuchungen.

Vorgehensweise:

1. Setzen der Systemgrenze im realen System
2. Darstellen des Systems über eine Ebene 1 Blackbox
3. Schnittstellen des Systems mit der relevanten Umwelt in die Blackbox eintragen
4. Beziehungen des Gesamtsystems mit der relevanten Umwelt in der Blackbox beschreiben
 - a. Über Systemgrenzen laufende Energieflüsse darstellen sowie Input/Output definieren



Abbildung 3-11: Ebene 1 Blackbox

Abbildung 3-12 zeigt die Ebene 1 Blackbox, die für die Arbeit am Motorrad erstellt wurde. Die in dieser Ebene noch sehr einfache Modellabbildung scheint zuerst nicht notwendig zu sein, es wird hier jedoch der Grundstein für die reibungslose Arbeit zwischen den am Projekt arbeitenden Personen gelegt. Ein Beispiel dazu ist die in unterschiedlichen Disziplinen oft unterschiedliche Bezeichnung für ähnliche Betrachtungen, wodurch sehr leicht und unbemerkt Missverständnisse entstehen können. Weitere sehr gute Beispiele zu diesem Thema werden durch Winzer [96] beschrieben.

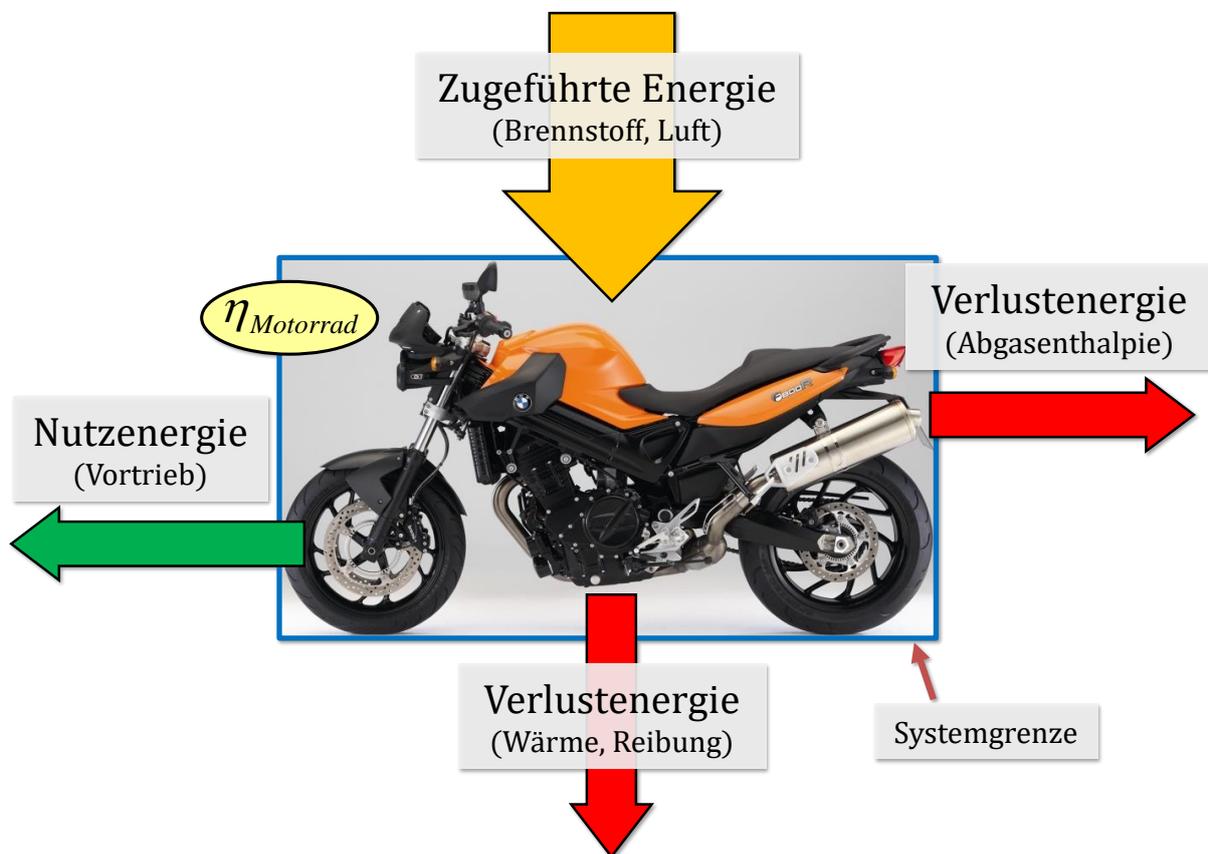


Abbildung 3-12: Ebene 1 Blackbox Motorrad

Ein Aufstellen und Festhalten des Modellabbildes bringt Klarheit für alle Beteiligten und als Resultat aus einem Workshop kann es auch problemlos in die persönliche Arbeit mit zurück genommen werden. Als Basis dient es für Modifikationen während der individuellen Tätigkeiten und unterstützt bei einem erneuten Projekttreffen die Kommunikation und das Zusammenführen der einzelnen Ansätze. Ein weiteres Argument ist, dass durch die frühe und konsequente Modellabbildung das Projekt von Beginn an einfach und klar verständlich beschrieben wird. Bei steigender Komplexität durch Vertiefen in das System während des Projektfortschritts, wird dadurch der Überblick bewahrt. Falls es im Projektverlauf notwendig wird, können ohne Probleme ein oder mehrere Schritte zu früheren Projektphasen gemacht werden.

3.5.1.2 Ziele formulieren

Die aus dem vorhergehenden Schritt generierten Ideen werden nun mit Hilfe des Evaluierungsblocks analysiert und bewertet. Auf Basis dieser Synthese findet die Formulierung der Projektziele statt. Der Zweck der Zielbildung ist laut Haberfellner [36] die systematische Zusammenfassung von Absichten und Erwartungen. Die Absichten und Erwartungen der Projektbeteiligten sollen dabei nach gewissen Kriterien wiedergegeben werden, wie Feldhusen [26] beschreibt.

Kriterien für die Formulierung können sein:

- Einsatzgebiet des Produktes
- Art des Einsatzes
- Gesetzliche Rahmenbedingungen
- Primäre Produktfunktionen
- Primäre Kundenwünsche
- Markante Merkmale des Produktes
- Unterschiede zur Konkurrenz
- Produktionskosten
- Kostenrahmen für die Entwicklung / Produktverbesserung
- Spezielle Herausforderungen in Entwicklung, Produktion, Einsatz, Projektarbeit
- Fehlerquellen in Entwicklung, Produktion, Einsatz, Projektarbeit

Eine *QFD*, die *FEMA*, die *Nutzwertanalyse*, der *morphologische Kasten*, der *Entscheidungsbaum* oder eine *paarweise Vergleichsmatrix* sind hier gut einsetzbar, siehe dazu Schalcher [71] oder Ophrey [57]. Während dieses Prozesses werden die Konzepte in Varianten mit verschiedenen Prioritätsstufen eingeteilt. Mit den vielversprechendsten Varianten aus diesem Filtervorgang wird die Projektarbeit fortgesetzt. Die restlichen Varianten bleiben als Backup in der Projektdokumentation bestehen. Es ist möglich, dass während einer späteren Iterationsschleife die ursprünglich gewählten Ziele abgeändert werden müssen und diese Backupvarianten eine wertvolle Informationsquelle darstellen.

3.5.1.3 Anforderungen und Rahmenbedingungen definieren

Die festgelegten Projektziele werden nun in Projektanforderungen umgelegt sowie die Projekt Rahmenbedingungen werden definiert. Die formulierten Ziele werden einzeln betrachtet und dabei auf die verschiedenen Bereiche des Projektes übertragen. Dadurch entstehen dezidierte Anforderungen für die definierten Komponenten des Produktes sowie für dessen Analyse und Weiterentwicklung. Weiters werden Anforderungen an den Projektablauf und das Projektteam definiert. Die Rahmenbedingungen beschreiben die Vorgehensweise im Projekt. Die

Projektmitglieder einigen sich über die Form der Kommunikation innerhalb der Gruppe, die Art und Häufigkeit der Meetings, wo diese stattfinden sollten, die Aufgaben- und Rollenverteilung innerhalb des Projektes, etc. Jedes Gruppenmitglied bekommt dabei in gegenseitigem Einverständnis seine Projektaufgaben klar zugewiesen. Als Ergebnis muss der Projektfahrplan in Zahlen und Fakten niedergeschrieben und für alle nachvollziehbar dargestellt sein.

3.5.1.4 Review

Der Abschluss einer größeren Methodikphase stellt ein sogenanntes *Quality Gate* dar. Daher wird an dieser Stelle eine *Design Review*-Sitzung eingeschoben. Mit Hilfe des Evaluierungsblocks werden die Ergebnisse der Definitionsphase reflektiert. Bei der konzentrierten Arbeit an den Projektthemen kann der Bezug zu den anderen Bereichen und den übergeordneten Strukturen leicht verloren gehen. Darum ist es notwendig, „einen Schritt zurück zu treten“ und den umfassenden Sachverhalt der Projektarbeit zu betrachten. Unterstützend wirkt dabei das Modellabbild des Systems aus dem Modellblock, welches die Zusammenhänge der jeweiligen Projektteile leicht verständlich darstellt und einen guten Überblick gewährt.

In diesem Review wird festgelegt, ob das Projektteam mit den erhaltenen Ergebnissen zufrieden ist, die notwendigen Arbeitspakete adäquat durchgeführt und die geforderten Deliverables erbracht worden sind. Wenn dem nicht so ist, werden die jeweiligen Arbeitspakete in einer Iterationsschleife nochmals überarbeitet. Am Ende dieser ersten Phase im Methodikblock, müssen klar definierte und nachvollziehbare Vereinbarungen stehen, mit denen alle Beteiligten einverstanden sind.

In Abbildung 3-13 ist die sind die einzelnen Komponenten der detaillierten Definitionsphase in einer Überblicksdarstellung zusammen gefasst.

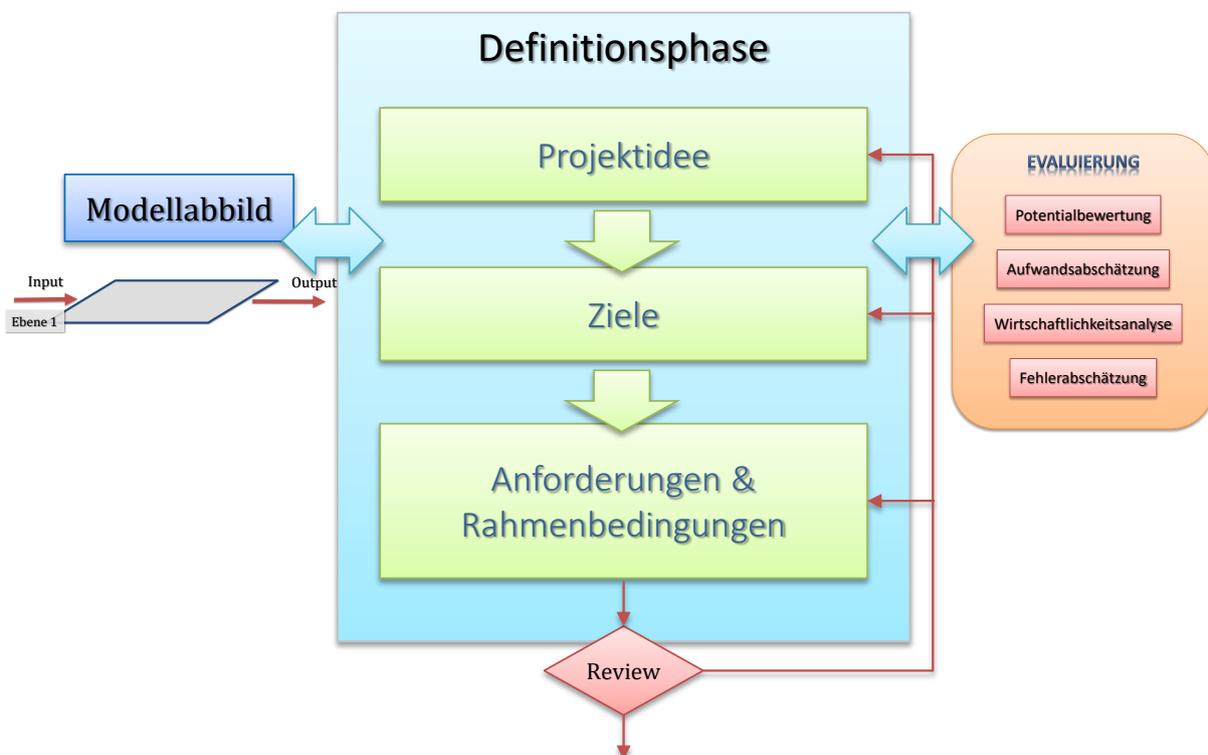


Abbildung 3-13: Definitionsphase mit Modellentwicklung und Evaluierung

3.5.2 Analysephase

Ist die Definitionsphase für alle Beteiligten zufriedenstellend abgearbeitet, kann in die zentrale

Phase der energetischen Systemanalyse, der Analysephase gewechselt werden. Unter Verwendung von thermodynamischen Methoden findet dabei die eingehende Auseinandersetzung mit dem Produkt statt. In Abbildung 3-14 ist die verfeinerte Betrachtung der Analysephase schematisch dargestellt. Das primäre Ziel ist, alle für eine thermodynamische Energieflussanalyse notwendigen Informationen über das Produkt und dessen Teilbereiche zu ermitteln. Dabei wird auf die energetischen Eigenschaften der Produktkomponenten eingegangen und diese detailliert betrachtet. Aus den gewonnenen Erkenntnissen über die energetischen Verluste im System kann auf mögliche Schwächen des Produktes geschlossen werden. In weiterer Folge ist es möglich, an diesen Schwachpunkten Ansätze für eine Optimierung zu finden. Wie auch schon in den zuvor beschriebenen Phasen wird während der unterschiedlichen Teilbereiche dieser Phase wieder auf die Bildung von Varianten geachtet.

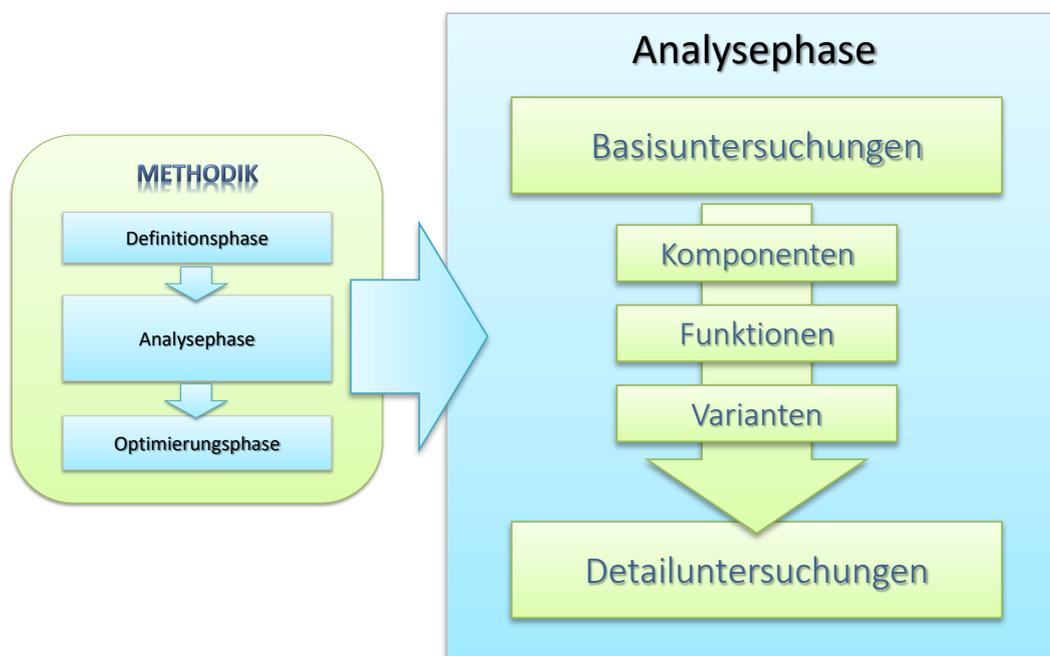


Abbildung 3-14: Analysephase

Top Down Analyse - vom Ganzen zum Detail

Untersuchungen mit hohem Detaillierungsgrad und entsprechender Qualität sind in der Regel anspruchsvoll, aufwändig und kostenintensiv. Eine systematische Vorgehensweise mit gezieltem Einsatz der gewählten Werkzeuge und der ausführenden Fachkräfte, kann dabei entscheidend zur Effizienz im Projekt beitragen. Aus diesem Grund wird wiederum das systematische Denken und Handeln nach den Grundprinzipien der Entwicklungsmethodik in diese Projektphase mit eingebunden.

Mit zeitlichem Fortschreiten der Phase wird die Analyse immer weiter vertieft und die Struktur der Systems umfangreicher aufgeschlüsselt. Der Informationsgrad über das Produkt steigt und die Datenlage wird umfangreicher. Daher wird auf einen regen Austausch zwischen Methodikblock und Modellblock geachtet. Während die Einzelheiten des Modellabbildes in Unterebenen detailliert ausgearbeitet werden, bleiben die Grundmodelle der Systembereiche in den übergeordneten Ebenen bestehen. Es ist dadurch jederzeit möglich, Zusammenhänge aus Detailergebnissen im größeren Kontext zu betrachten und Verknüpfungen zu anderen Systembereichen leichter herzustellen. Um die Priorität der jeweiligen Information ermitteln zu können, werden die Möglichkeiten des Evaluierungsblockes zur Bewertung herangezogen.

3.5.2.1 Basisuntersuchungen

Zu Beginn der Basisuntersuchung ist das Ziel, mit möglichst geringem Aufwand die wichtigsten Aussagen über energetischen Schwachstellen des Produktes zu treffen und somit die Optimierungsmöglichkeiten zu beurteilen. Dies kann über eine theoretische oder praktische Analyse stattfinden, je nachdem welche Mittel schneller und einfacher zur Verfügung stehen. Ein Beispiel dafür ist die in Kapitel 3.3 erwähnte Rollenprüfstandsuntersuchung eines Motorrades zur Ermittlung des allgemeinen Wirkungsgrades, welche relativ einfach durchzuführen ist. Eine messtechnische Untersuchung bei nicht vorhandener Infrastruktur oder Fachkompetenz ist jedoch nicht die erste Wahl. Solche und andere Fragestellungen gilt es zu Beginn der Basisuntersuchungen zu klären. Wieder ist zu erkennen, dass Effizienz eine zentrale Rolle in *MEta+* einnimmt.

Produktanalysezyklus

Der *Produktanalysezyklus* stellt eine während der Untersuchungen immer wiederkehrende, systematische Vorgehensweise in der Energieflussanalyse dar, siehe Abbildung 3-15. Ausgangspunkt ist ein theoretischer Teil mit Literaturrecherche und einer Bestandsaufnahme des theoretischen Wissens in der Projektgruppe. Danach werden in einem praktischen Teil die Möglichkeiten zur Datenerhebung aus Simulation und Versuch erhoben und die vielversprechendsten daraus durchgeführt. Zwischen den Teilen des Zyklus erfolgen im Zusammenspiel mit dem Modell- und Evaluierungsblock laufende Aktualisierungen des Modellabbildes und Bewertungen der Ergebnisse.

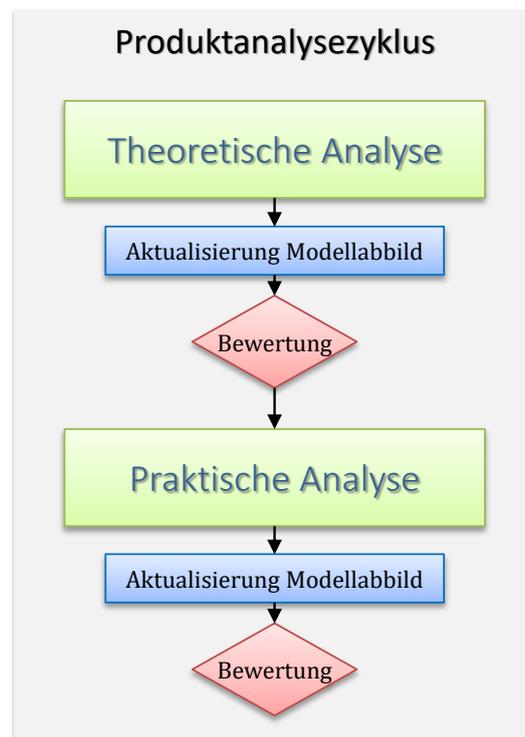


Abbildung 3-15: Produktanalysezyklus

Erste Energieflussanalyse des Basissystems

Es wird zuerst der *Produktanalysezyklus* mit geringer Intensität, d.h. geringem theoretischen und praktischen Aufwand eingesetzt.

1. Einfache theoretische Energieflussanalyse des Basissystems
 - a. Vorhandene Ressourcen ermitteln

- b. Fachliteratur und Publikationen sichten
 - c. Erfahrungswerte auflisten
 - d. Referenzprodukte analysieren
2. Aktualisieren des Modellabbildes
3. Bewertung
 - a. Wirkungsgradanalyse
 - b. Potentialbewertung
4. Besteht Informationsbedarf, der über die theoretische Analyse nicht geklärt werden konnte?
5. Einfache praktische Energieflussanalyse des Basissystems
 - a. Vorhandene Ressourcen ermitteln
 - b. Notwendige Datenkategorien festlegen
 - c. Möglichkeiten der vorhandenen Simulationstools abschätzen
 - d. Simulation durchführen
 - e. Möglichkeiten der vorhandenen Datenerfassung abschätzen
 - f. Versuchsplanung
 - g. Versuchsdurchführung
 - h. Datenanalyse
6. Aktualisieren des Modellabbildes
7. Bewertung
 - a. Wirkungsgradanalyse
 - b. Potentialbewertung

Review

Als Abschluss der ersten Energieflussanalyse des Basissystems wird wieder eine Review-Einheit gesetzt. Dabei wird mit Hilfe passender Tools aus dem Evaluierungsblock die gewonnene Information über das Produkt bewertet.

- Potentialbewertung
- Aufwandsabschätzung
- Fehlerabschätzung
- Analyse der Wirtschaftlichkeit

Aufbauend auf diese Bewertung werden Entscheidungen für die weitere Vorgehensweise getroffen. An dieser Stelle muss die Frage gestellt werden, ob für bestimmte Teilaspekte Iterationsschleifen notwendig sind und wie weit diese zurückgreifen müssen. Auch kann sich aus verschiedenen Gründen wie z.B. der Machbarkeit oder der Wirtschaftlichkeit ergeben, das Projekt abzuändern oder abzubrechen. Dadurch vermeidet diese frühe, kritische Betrachtung des Projektes unnötigen Verbrauch von wertvollen Ressourcen. Sind die Ergebnisse der ersten Analyse zufriedenstellend, können die nächsten Schritte eingeleitet und die energetische Systemanalyse vertieft werden.

Intensive Energieflussanalyse des Basissystems

Ist aus der einfachen Basisuntersuchung hervorgegangen, dass die erste Energieflussanalyse noch zu wenig Informationen zur Bewertung des energetischen Potentials geliefert hat, wird die Untersuchung des Basissystems umfangreicher durchgeführt. Es werden nun alle Aspekte des Basissystems berücksichtigt und analysiert, wobei die Vorgehensweise der *ersten Energieflussanalyse des Basissystems* in einer intensiveren Form wieder durchlaufen. Die zur Verfügung stehenden theoretischen und praktischen Mittel werden umfangreich eingesetzt und ein *Produktanalysezyklus* mit höherer Intensität wird abgearbeitet. Nicht nur die Datenerhebung soll dabei aufwändiger betrieben werden, das Projektteam muss sich, wenn nicht bereits vorhanden auch ein genaueres, spezifisches Wissen über das Produkt aneignen. Am Ende dieser Phase steht wieder eine Review-Einheit, in der eine Reflexion der gewonnenen Erkenntnisse erfolgt.

3.5.2.2 Detailuntersuchung

Um für einen Lösungsansatz zur Produktoptimierung ausreichend Informationen zu erhalten ist es meistens notwendig, das Produkt eingehender zu betrachten und die Systemuntergruppen energetisch zu analysieren. Dazu wird das technische System, unter Zuhilfenahme des Modellabbildes nach mechanischen und thermodynamischen Kriterien in Untergruppen aufgeteilt. Beim untersuchten Motorrad waren das z.B. der Motor, das Getriebe, der restliche Antriebsstrang, der Abgasstrang, der Kühlmittelkreislauf, etc. Im Modellblock wird dabei das bestehende Modellabbild des Systems zu einer nächsten, detaillierteren Ebene weiterentwickelt.

Energieflussmethode

Dieser Begriff beschreibt die Vorgehensweise der Analyse der Energiefluss-Pfade durch das betrachtete System. Dabei wird nach thermodynamischen und mechanischen Aspekten die Energie im System vom Eintritt bis zum Austritt nachverfolgt. Verzweigungen bilden Knotenpunkte, von denen neue Pfade abgehen oder in denen Pfade wieder zusammen laufen. Abbildung 3-16 zeigt eine einfache Handskizze, die während der ersten Energieflussanalyse des Motorrads erarbeitet wurde. Eine digitale Darstellung der vertieften Energieflussanalyse wie sie in der Detailuntersuchung für das Motorrad entworfen wurde, ist in Abbildung 4-20 auf Seite 82 gezeigt.

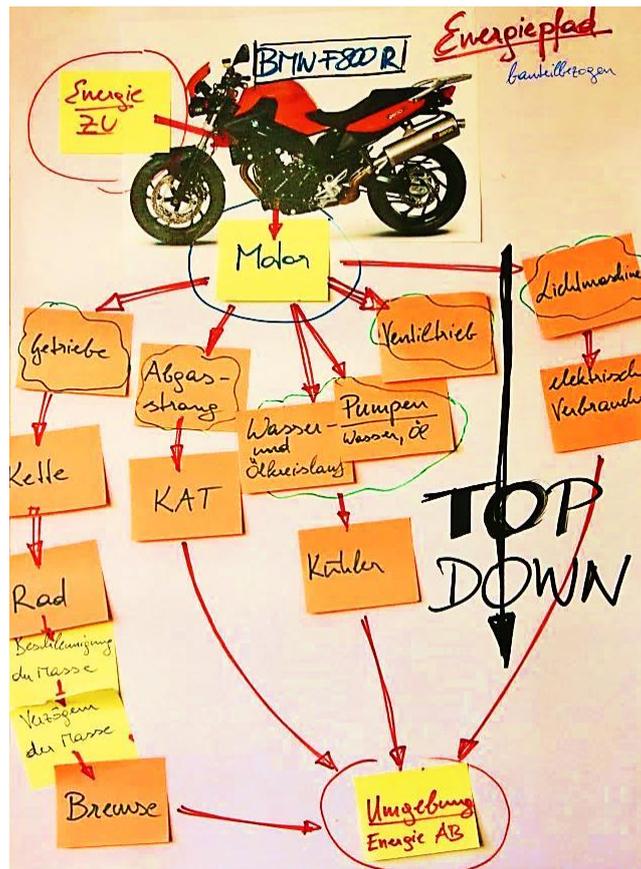


Abbildung 3-16: Handskizze, Energieflussmethodik für ein Motorrad

Weiterentwicklung Modellabbild – Bildung von Systemuntergruppen

Für die folgende, vertiefende Analyse der Systemuntergruppen wird das Modellabbild des Systems erweitert. Es basiert auf dem in der vorhergehenden Phase erstellten Modellabbild auf Ebene 1, wie in Abbildung 3-17 dargestellt ist. Dieses erweiterte Modellabbild des Systems bildet die Basis für die Folgeuntersuchungen. Durch die Analyse der Schnittstellen des Systems, der Beziehungen der einzelnen Untersysteme untereinander und zur Systemgrenze ergeben sich die einzelnen Kriterien, für die Daten erhoben werden müssen.

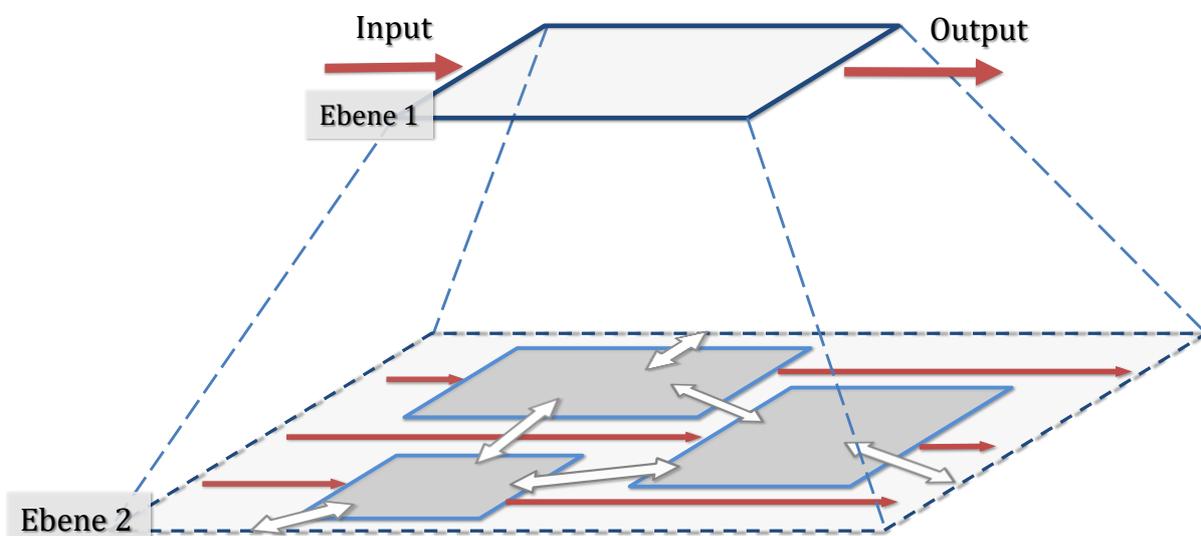


Abbildung 3-17: Erweiterung des Modells auf Ebene 2

Vorgehen für die Erweiterung des Modellabbildes auf Ebene 2

1. Systematisches Aufspalten des Systems
 - a. Öffnen der Ebene 1 Blackbox
 - b. *Energieflussmethode*
 - c. Definition von Untergruppen auf Ebene 2
Berücksichtigen der Systemkomponenten und deren mechanischen und thermodynamischen Eigenschaften
2. Setzen von Systemgrenzen
 - a. Definition der Systemgrenzen für die einzelnen Untergruppen
Berücksichtigen der mechanischen und thermodynamischen Kriterien der Systeme
3. Schnittstellen ermitteln
 - a. Schnittstellen der Untergruppen untereinander, mit dem Gesamtsystem und mit der relevanten Umwelt darstellen
4. Beziehungen analysieren
 - a. Zusammenspiel und gegenseitigen Einfluss der Untergruppen ermitteln
 - b. Einfluss der Untergruppen auf das Gesamtsystem ermitteln
5. Input/Output definieren
 - a. Über Systemgrenzen laufende Energieflüsse darstellen

Abbildung 3-18 zeigt ein Beispiel für ein Modellabbild der Untergruppe Verbrennungskraftmaschine (VKM), welches in der Forschungsarbeit für das Motorrad ermittelt wurde. Die VKM wird dabei als Blackbox dargestellt, da die in ihr enthaltenen Komponenten in dieser Modellebene noch nicht betrachtet werden. Der Input und Output der Energieflüsse ist qualitativ abgebildet. Aus diesem folgt die Definition der zu ermittelnden Daten aus der Literatur, dem Fahrzeugprüfstand oder dem Komponentenprüfstand.

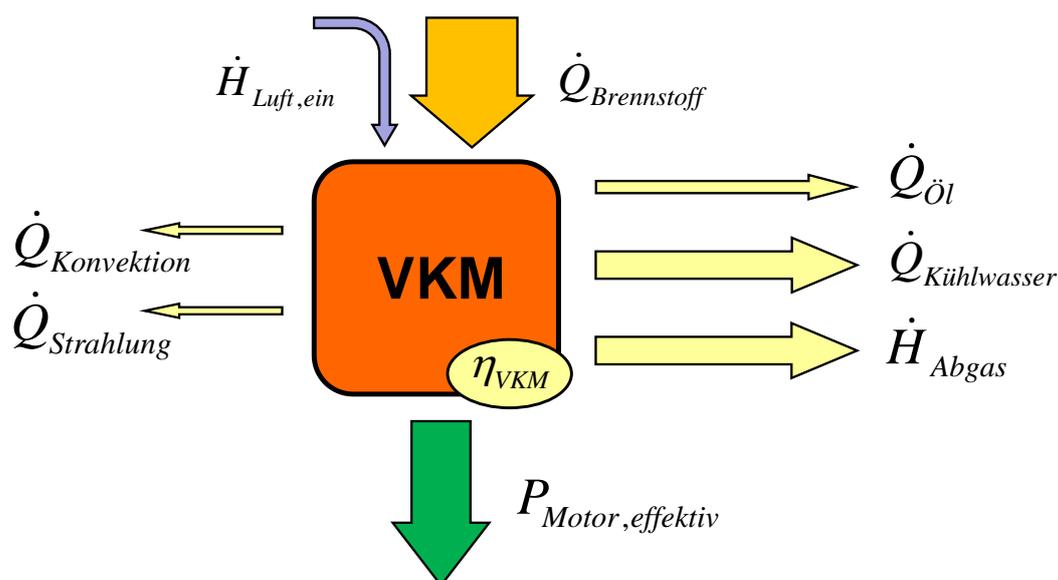


Abbildung 3-18: Modellabbild der Energieflüsse über die Systemgrenze in der Verbrennungskraftmaschine des untersuchten Motorrads

Methode der Variantenbildung

Wie schon öfters angesprochen, ist eine Variantenbildung von Lösungsansätzen in einer systematischen Vorgehensweise sinnvoll. Hier dient sie dazu, die Effizienz der Analyse noch weiter zu steigern, indem Systemuntergruppen, die einer näheren Betrachtung bedürfen herausgezogen werden. Dabei werden eine Vorabbewertung der einzelnen Systemkomponenten und eine anschließende Zusammenstellung von Untersuchungspaketen durchgeführt. Die Kosten-Nutzen Abschätzung erfolgt nach verschiedenen Kriterien wie z.B. den vorhandenen Mitteln zur Untersuchung, den Erfahrungswerten der Projektmitglieder, dem bestehendem Fachwissen über die Komponente, die Schwierigkeit der Datenerhebung aus dem Versuch oder der Simulation, dem Verbesserungspotential der Komponente, etc. Die Analyse der besten Lösungen wird zuerst durchgeführt. Nach einer Bewertung der Ergebnisse werden wenn notwendig schwieriger zu analysierende Varianten untersucht. Die verbliebenen, noch nicht bearbeiteten Varianten dienen wiederum als Lösungsbackup für etwaige Iterationsschleifen.

Energieflussanalyse in der Detailuntersuchung

In dieser Analysetiefe wird ein *Produktanalysezyklus* mit hoher Intensität kombiniert mit einer *Methode der Variantenbildung* eingesetzt. Weiters muss abgeschätzt werden, welche zusätzlichen Ressourcen notwendig sind, um die notwendige Analysegenauigkeit zu erreichen.

1. Theoretische Energieflussanalyse der Systemuntergruppen
 - a. Vorhandene Ressourcen ermitteln
 - b. Erfahrungswerte auflisten
 - c. Fachliteratur und Publikationen sichten
 - d. Vertiefende Fachkenntnis erlangen
 - e. Referenzprodukte analysieren
2. Aktualisieren des Modellabbildes
3. Bewertung
 - a. Wirkungsgradanalyse
 - b. Kosten – Nutzen Analyse
 - c. Potentialbewertung
 - d. Fehlerabschätzung
4. *Methode der Variantenbildung*
5. Erweiterte theoretische Analyse der Untersuchungsvariante
 - a. Vorhandene Ressourcen ermitteln
 - b. Erfahrungswerte auflisten
 - c. Weitere Personen mit Fachwissen miteinbeziehen
 - d. Fachliteratur und Publikationen sichten
 - e. Vertiefende Fachkenntnis erlangen
 - f. Referenzprodukte analysieren
6. Aktualisieren des Modellabbildes
7. Bewertung
 - a. Wirkungsgradanalyse

- b. Kosten – Nutzen Analyse
 - c. Potentialbewertung
 - d. Fehlerabschätzung
8. Besteht Informationsbedarf, der über die theoretische Analyse nicht geklärt werden konnte?
9. Praktische Energieflussanalyse der Untersuchungsvariante
 - a. Notwendige Datenkategorien für die Energieflussanalyse festlegen
 - b. Analyse über computergestützte Simulation
 - i. Möglichkeiten der vorhandenen Simulationstools abschätzen
 - ii. Nach Bedarf externe Ressourcen mit einbeziehen
 - iii. Simulation aufsetzen und durchführen
 - c. Analyse über Versuch
 - i. Vorhandene messtechnische Ressourcen ermitteln
 - ii. Nach Bedarf externe Ressourcen mit einbeziehen
 - iii. Versuchsplanung
 - iv. Versuchsdurchführung
 - d. Datenanalyse
 - e. Quantifizieren der Energieflüsse und -verluste
10. Aktualisieren des Modellabbildes
11. Bewertung
 - a. Wirkungsgradanalyse
 - b. Kosten – Nutzen Analyse
 - c. Potentialbewertung
 - d. Fehlerabschätzung
12. Beurteilung der Ergebnisse dieser Untersuchungsvariante
 - a. Sind die Ergebnisse dieser Variante ausreichend?
 - b. Werden weitere Informationen benötigt?
13. Bei Bedarf Energieflussanalyse in der Detailuntersuchung wiederholen und weitere Varianten oder Variantenteile untersuchen

Review

An dieser Stelle steht das bereits bekannte Phasen – Review. Die Projektphase wird wiederum reflektiert und es wird erhoben, ob Iterationsschleifen in Bereiche früherer Projektphasen notwendig sind.

Den Abschlusspunkt dieses Analyseabschnitts bildet die Fragestellung, ob ein weiteres Aufspalten der Systemuntergruppen in der Phase der *vertieften Untersuchung* notwendig oder sinnvoll ist. Andernfalls kann dieser Analyseabschnitt übersprungen und direkt in die Optimierungsphase übergewechselt werden. Antworten darauf ergeben sich aus den Ergebnissen der bis jetzt getätigten Analysen und Bewertungen. Oftmals kann es auch vorkommen, dass in

beiden Phasen parallel weitergearbeitet wird. Mögliche Ansätze für eine Optimierung werden dabei in der Optimierungsphase verarbeitet, während bestimmte Systemgruppen noch einer ausführlicheren Untersuchung bedürfen.

3.5.2.3 Vertiefte Untersuchung ausgewählter Systemuntergruppen in Ebene 3

Die vertiefte Untersuchung ausgewählter Systemuntergruppen in Ebene 3 beschäftigt sich ausführlich mit den Einzelheiten der Systemkomponenten. Dabei werden die Komponenten in der Modellabbildung weiter aufgebrochen und wiederum nach mechanischen und thermodynamischen Kriterien in weitere Systemuntergruppen unterteilt.

Weiterentwicklung Modellabbild des Systems auf Ebene 3

Ein weiteres Mal findet eine Verfeinerung des Modellabbildes statt, siehe Abbildung 3-19. Die Blackboxes der Ebene 2 werden dabei geöffnet. Einzelne Bausteine der Systemgruppen kommen zum Vorschein und werden wiederum nach der Vorgehensweise der *Modellbildung* behandelt.

Die Ermittlung der Schnittstellen und der gegenseitigen Einflüsse der entstandenen Untersysteme auf Ebene 3 mit deren Umwelt ist nun deutlich umfangreicher als auf Ebene 2. Es kann erkannt werden, wie sich bei einer Vertiefung der Analyse der Aufwand erhöht. Auch steigt die Komplexität des Projektes wesentlich und der Einfluss einer geordneten Modell- und Projektstruktur wird deutlich. Durch die Maßnahmen des methodischen Entwickelns technischer Produkte aus der Entwicklungsmethodik bleibt der Überblick über das Projekt erhalten und die vielschichtigen Quereinflüsse der einzelnen Systemkomponenten können weiter erfasst werden.

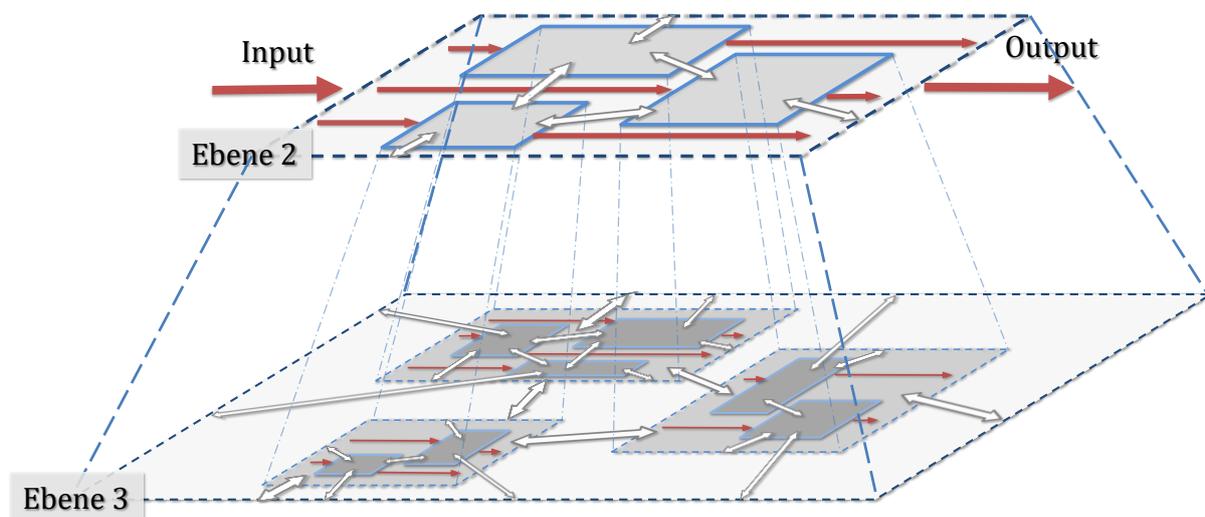


Abbildung 3-19: Erweiterung des Modellabbildes auf Ebene 3

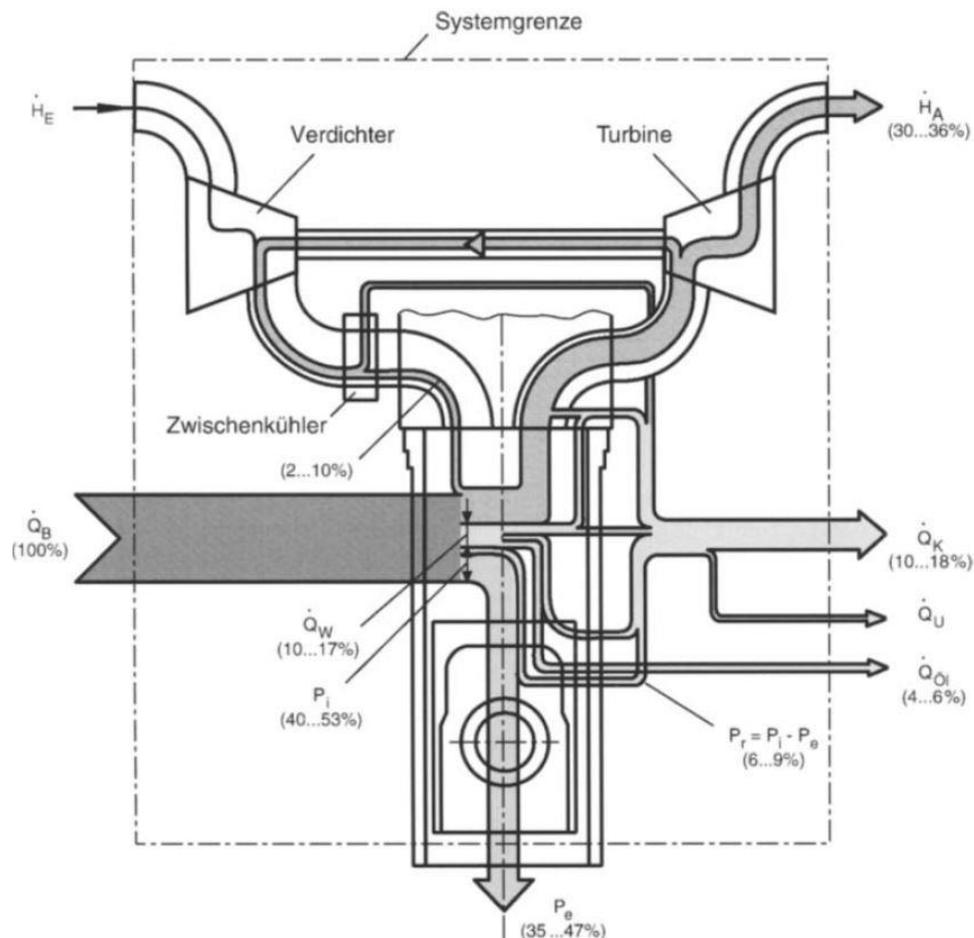


Abbildung 3-20: Energieflussdiagramm eines hochbelasteten aufgeladenen LKW-Dieselmotors nach Pischinger [60]

Abbildung 3-20 zeigt die Energiebilanz über einen LKW-Dieselmotor, betrachtet als stationäres offenes System nach Pischinger [60]. Zu erkennen sind die über die Systemgrenze der Ebene 3 fließenden Energien, die bereits in der Modellabbildung in Abbildung 3-18 aufgezeigt wurden. Jedoch können hier nun auch die Energieflüsse, deren Verläufe und Quantität innerhalb der Verbrennungskraftmaschine nachvollzogen werden. Weiters zeigen sich neue Systemuntergruppen, wie z.B. Zylinder, Zylinderkopf, Kolben, Turbine, Verdichter, Zwischenkühler, etc.

Energieflussanalyse

- *Produktoptimierungszyklus* mit hoher Intensität anwenden
- *Methode der Variantenbildung*

Die Energieflussanalyse der Teilsysteme der Systemuntergruppen wird in gleicher Form, wie auf Seite 42 bereits beschrieben ist, durchgeführt, jedoch wird die Intensität des betriebenen Aufwandes noch weiter erhöht. Energieflüsse, wie sie in Abbildung 3-20 dargestellt sind, sind zum Teil messtechnisch bereits nur mehr sehr schwer zu erfassen und bedürfen spezieller, kostenintensiver Ausrüstung sowie aufwändiger Prüfstandsuntersuchungen. Die Vorgehensweise der Methode der Variantenbildung wird ebenfalls, wie zuvor bereits beschrieben, durchgeführt. Es wird dabei versucht, die Untersuchung derjenigen Systemgrößen zu vermeiden, die für die Produktverbesserung von geringerer Bedeutung sind. Weiters bleiben wiederum Backuplösungen verfügbar, falls die zuerst versuchte Variante nicht die gewünschten Ergebnisse bringt. Dadurch trägt die Methode der Variantenbildung wiederum zur Steigerung der Effizienz und zur Risikoabsicherung bei.

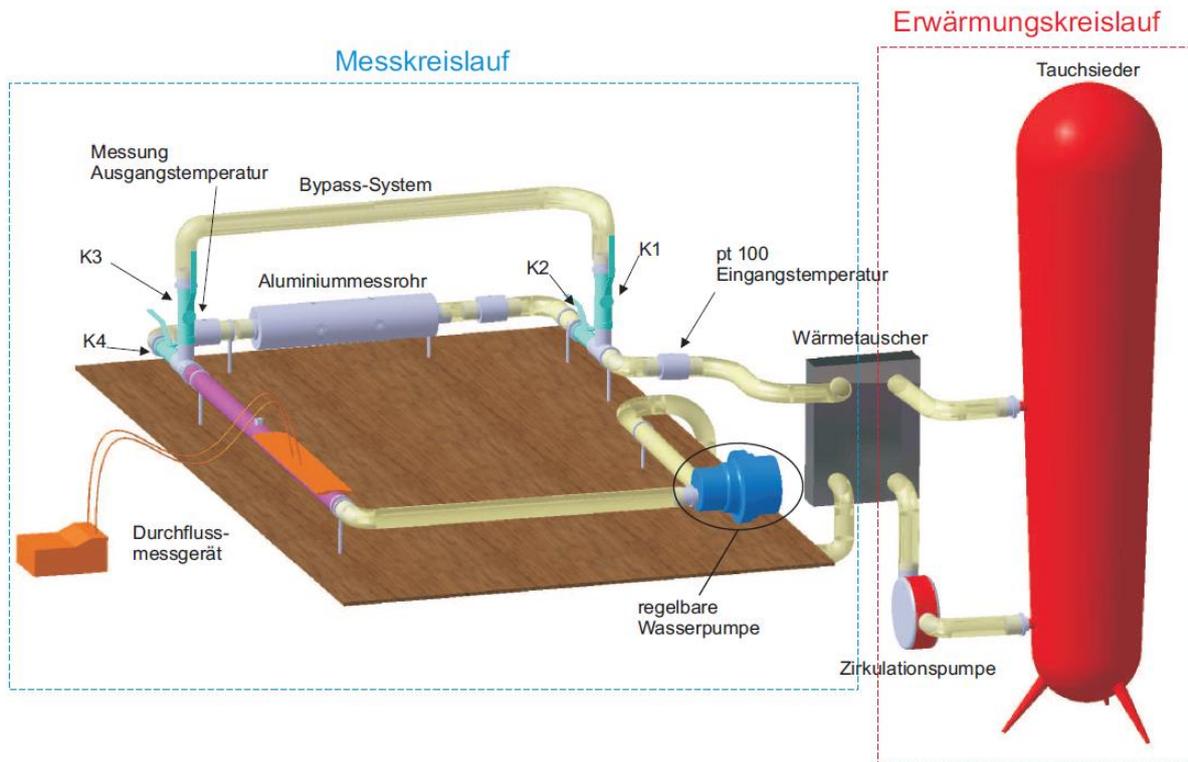


Abbildung 3-21: Komponentenprüfstand, thermisches Modell [31]

Die größer werdende Komplexität und der steigende Informationsbedarf führen in dieser Projektstufe bereits zu teils mehrmonatigen Unterprojekten. Diese wurden im Projekt *Eta+* in Form von studentischen Projekten und Bachelor- und Diplomarbeiten verwirklicht. Es ist wiederum zu sehen, dass sich auch im durchgeführten Forschungsprojekt das Vorgehen vom *Ganzen zum Detail* widerspiegelt. Fallweise mussten Prüfeinrichtungen für einzelne Komponenten oder Produktfunktionen in eigenen Teilprojekten erst erarbeitet und angefertigt werden. Ein Beispiel dafür ist ein Prüfstands Aufbau, mit welchem die Datenerfassung für das thermische Verhalten von realen Bauteilmodellen erfasst wurde. Dies diente zum Abgleich von computergestützten Berechnungen des Aufwärmverhaltens eines Fahrzeugbauteils, siehe Abbildung 3-21.

Review

Das Ende der vertieften Untersuchung stellt wiederum ein *Quality Gate* dar und es wird wie üblich eine Review-Einheit zur Reflexion und Bewertung mit einer eventuellen Iterationschleife eingeschoben.

Zusammenfassend ist in Abbildung 3-22 nochmals ein schematischer Überblick über die Analysephase im Detail dargestellt.

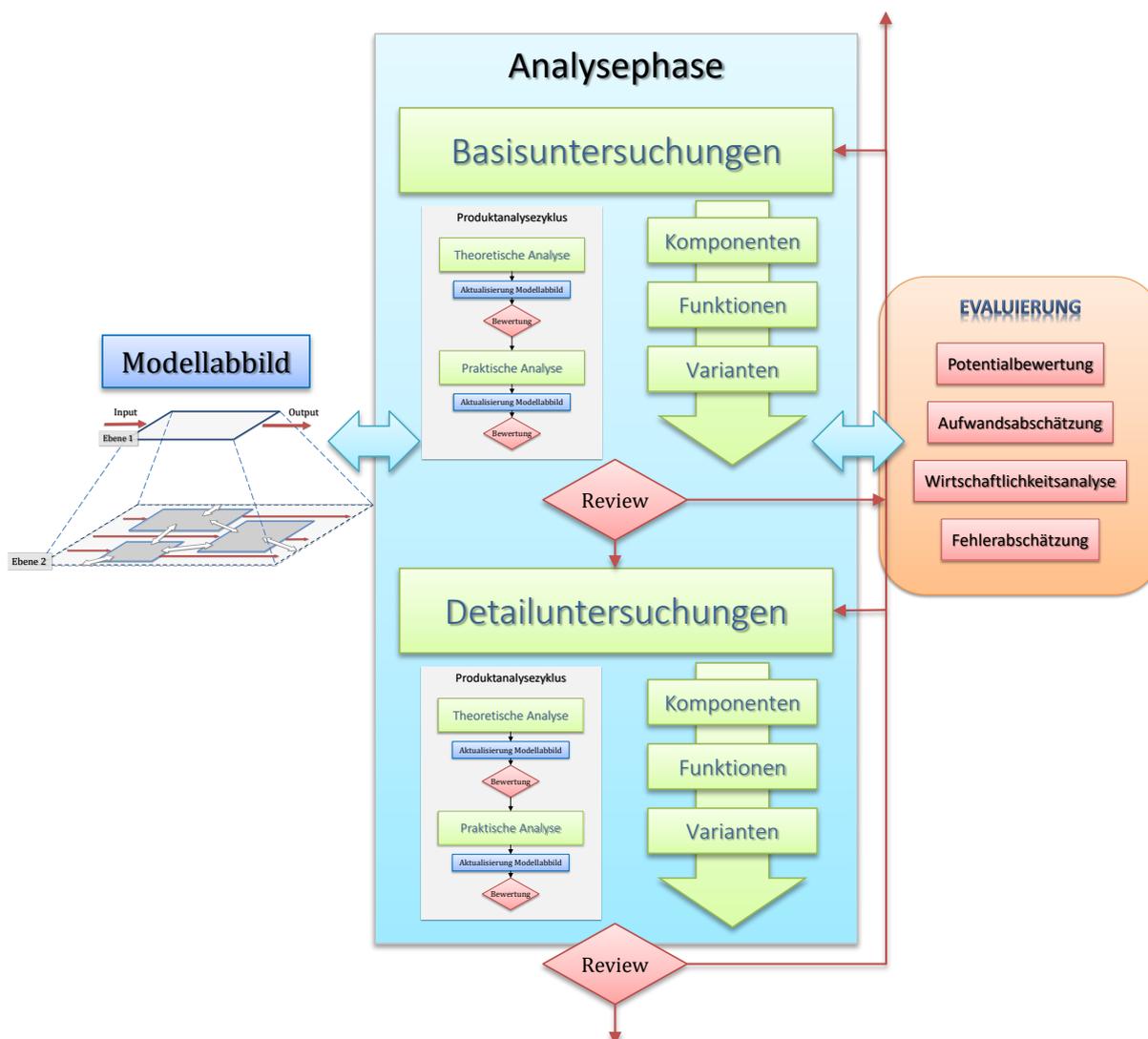


Abbildung 3-22: Analysephase im Detail

3.5.3 Optimierungsphase

Die Optimierungsphase bildet die dritte grundlegende Phase im Methodikblock. Sie wird durch die Verfeinerung, wie in Abbildung 3-23 gezeigt ist, präzisiert und teilt sich dabei in vier Bereiche auf.

Beginnend werden mit den Ergebnissen aus der Analysephase Lösungsansätze für eine Produktverbesserung erarbeitet. Danach folgt eine Umsetzung dieser theoretischen Ansätze in ersten Versuchsprototypen. Diese Prototypen werden anschließend unter Verwendung des bereits beschriebenen *Produktanalysezyklus* einer Energieflussanalyse unterzogen. Dabei erfolgt eine Datenerfassung an den Versuchsträgern unter Labor – sowie Realbedingungen.

Die Verbesserung und Weiterentwicklung zum einsatzfähigen Prototyp wird mit Hilfe der Erkenntnisse aus der Prototypanalyse durchgeführt. Dabei wird der Ablauf der Optimierungsphase so oft wie notwendig durchlaufen und die Entwicklungskriterien der Vorentwicklung stärker berücksichtigt. Dies soll jedoch in dieser Arbeit nicht mehr näher behandelt werden.

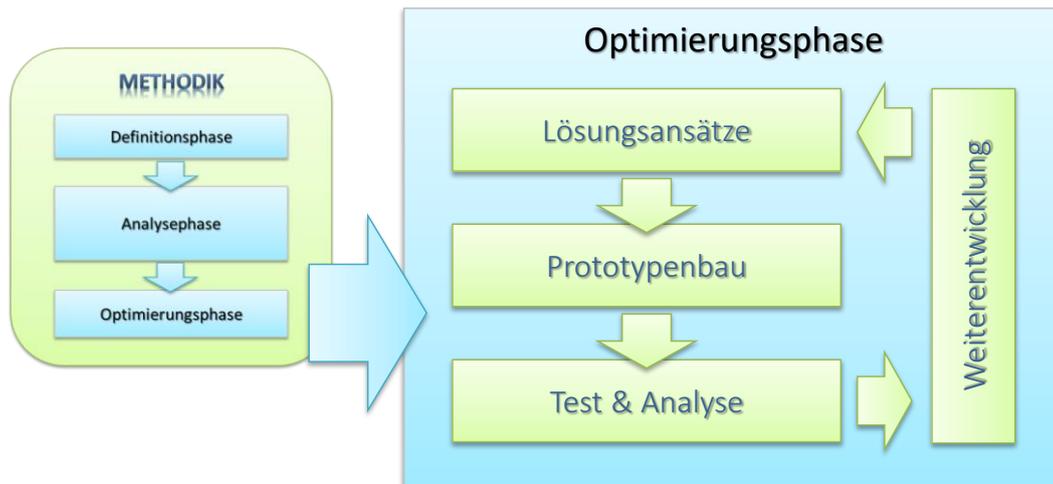


Abbildung 3-23: Optimierungsphase

3.5.3.1 Lösungsansätze erarbeiten

Im ersten Abschnitt der Optimierungsphase werden Lösungsansätze für eine mögliche Produktverbesserung ausgearbeitet.

Ideenfindung

Die Ergebnisse der Analysephase dienen als Ausgangsmaterial für eine Ideenfindung. Sie werden dabei kategorisch den einzelnen Produktkomponenten und -funktionen zugeteilt. Anschließend werden die Kategorien systematisch durchgegangen und Lösungsideen daraus entwickelt. Das Vorgehen gleicht dem *Aufbereiten der Projektidee* auf Seite 31 in der Definitionsphase von *MEta+*. Unter Zuhilfenahme geeigneter Werkzeuge übernimmt das Projektteam die in der Analysephase erworbenen Erkenntnisse und führt diese in vielfältige Lösungsvorschläge über. Der Kreativität soll dabei möglichst viel Raum gegeben werden und Kreativ-Sitzungen sind hier wiederum gut einsetzbar. Es ist von Bedeutung, an dieser Stelle einen Blick auf die am Projektbeginn definierten Anforderungen und Rahmenbedingungen zu werfen und diese in die Lösungsentwicklung mit einzubeziehen.

Methode der Variantenbildung

Ein weiteres Mal wird die Methode der Variantenbildung zu Hilfe genommen. Für den Prozess der Lösungsfindung werden die Inhalte der Kategorien zu Varianten von Lösungspaketen zusammengestellt. Danach erfolgt eine Bewertung der einzelnen Pakete mit Hilfe der Werkzeuge des Evaluierungsblocks. Kriterien dafür sind unter anderem die verfügbaren Ressourcen und Möglichkeiten im Projekt. Es soll ähnlich wie schon zuvor eine zielgerichtete Selektion der effektivsten Vorgehensweise möglich sein. Die Gegenüberstellung der Bewertungsergebnisse und die Auflistung der Vor- und Nachteile ergibt eine Auswahl einer oder mehrerer Varianten für den darauf folgenden Prototypenbau. Die restlichen Varianten bilden wiederum Lösungsalternativen für eventuell nötige Iterationsschleifen.

Abgleich Modellabbild des Systems

In Interaktion mit dem Modellblock werden die Modifikationen an Systemkomponenten in das Modellabbild des Systems implementiert. Das ermöglicht eine Interpretation der durch die Systemveränderungen entstandenen Auswirkungen. Eine Vorgehensweise ähnlich wie auf Seite 41 beschrieben, ist dabei sinnvoll. Es wird jedoch das Augenmerk auf die Veränderungen im System und die daraus entstandenen Konsequenzen für das Modellabbild gelegt. Die durch die Weiterentwicklung neu entstandenen Schnittstellen und Wechselwirkungen werden herausgestrichen, deren Auswirkungen nachverfolgt und energetisch analysiert. Möglichen negativen Folgen können so geeignete Maßnahmen entgegengestellt werden.

Hier zeigt sich eine der Stärken der Modellabbildung des Systems. Es bleibt der Systemüberblick auch bei immer komplexer werdendem Projektumfang erhalten und möglichen Auswirkungen durch Produktmodifikationen kann effektiv begegnet werden. Dies ist von entscheidender Bedeutung für eine erfolgreiche Produktoptimierung.

Review

Eine Review-Einheit an diesem Quality Gate ist unbedingt durchzuführen. Es muss die Entscheidung zur gewählten Optimierungsvariante nochmal kritisch reflektiert werden um die Gesamtauswirkungen auf die Produktoptimierung zu erfassen. Der im Anschluss folgende Schritt des Prototypenbaus kann zum Teil mit erheblichem Aufwand verbunden sein, daher sollte die Entscheidung über das weitere Vorgehen erst nach gründlicher Überlegung gefällt werden.

3.5.3.2 Prototypenbau

Ist eine Entscheidung getroffen, kann nun die Umsetzung der Lösungsvorschläge in einem ersten Versuchsprototyp erfolgen. Eine Auflistung der Produktkomponenten, die abgeändert werden müssen, wird zuerst durchgeführt. Die Betrachtung der zuvor definierten Lösungsansatzvarianten liefert die entsprechenden Informationen.

Konstruktion

In der Konstruktionsphase findet die Abänderung oder Neugestaltung der identifizierten Bauteile statt. Ein gut durchdachtes Design und eine qualitativ hochwertige Konstruktion sind Voraussetzung für den Erfolg des Produktes. Je nach vorhandenen Mitteln wird dieser anspruchsvolle Teilbereich des Projektes intern durchgeführt oder an professionelle Konstruktionsdienstleister vergeben. Verschiedene CAD Werkzeuge wie z.B. *Catia* oder *ProEngineer* werden dafür üblicherweise eingesetzt.

Simulation

Bei nicht trivialen Konstruktionsaufgaben bringt eine computergestützte Berechnung und Simulation mit Hilfe von MKS oder FEM Werkzeugen zusätzliche Sicherheit für das Projekt. Da aber zuverlässige Ergebnisse aus einer Simulation einem erfahrenen Berechnungsingenieur und dementsprechender Infrastruktur bedürfen, sollte eine Simulation nur wenn nötig eingesetzt werden. In der später folgenden Phase der Weiterentwicklung zum lauffähigen Prototyp wird der Einsatz dieser leistungsstarken Tools zwingend notwendig werden.

Fertigung und Zusammenbau

Sind erste Teile der Konstruktion erarbeitet, kann die Fertigung in Auftrag gegeben werden. Nach einer Qualitätsprüfung der angefertigten Komponenten erfolgt der Zusammenbau des Prototyps.

3.5.3.3 Test und Analyse des Prototyps

Der praktische Versuch dient dazu, die in der Theorie erarbeiteten Lösungsansätze zur Produktverbesserung zu verifizieren. Daraus lassen sich für den weiteren Projektablauf wichtige Erfahrungswerte gewinnen. Auch können hiermit bestehende Simulationsergebnisse abgeglichen und Modelle angepasst werden.

Versuche werden an einzelnen Komponenten oder dem ganzen Prototypen vorgenommen, wobei die Datenerfassung an Prüfstandseinrichtungen sowie in Realumgebungen stattfinden können. Als Methode zum Vorgehen wird wiederum der *Produktanalysezyklus*, welcher in der Analysephase bereits zur Anwendung kommt, in einer leicht abgeänderten Form verwendet, siehe Abbildung 3-24.

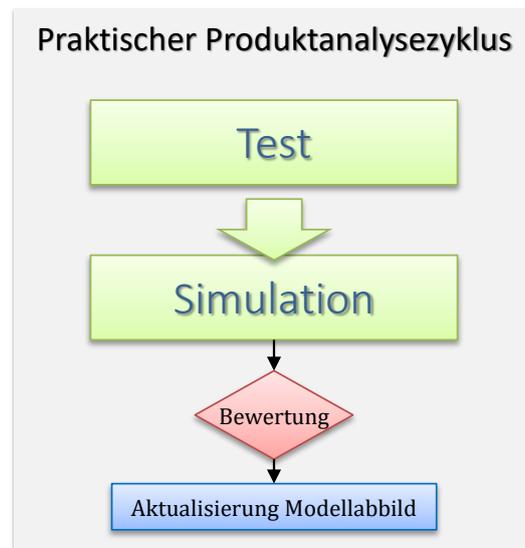


Abbildung 3-24: Praktischer Produktanalysezyklus

Die theoretische Analyse ist in diesem Fall nicht mehr notwendig. Ergänzend zur praktischen Analyse können auch hier Simulationswerkzeuge eingesetzt werden, um einen vertieften Einblick in das Verhalten des Prototyps zu erhalten. Externe Ressourcen wie Simulations- oder Prüfdienstleister bieten gegebenenfalls eine kostengünstigere Möglichkeit spezielle Analysen durchzuführen.

Praktische Energieflussanalyse des Prototyps:

1. Notwendige Datenkategorien festlegen
2. Energieflussanalyse über Versuch
 - a. Vorhandene messtechnische Ressourcen ermitteln
 - b. Externe Ressourcen einbinden
 - c. Versuchsplanung
 - d. Versuchsdurchführung
3. Energieflussanalyse über computergestützte Simulation
 - a. Möglichkeiten der vorhandenen Simulationstools abschätzen
 - b. Externe Ressourcen einbinden
 - c. Simulation aufsetzen und durchführen

4. Datenauswertung
 - a. Ausführliche Datenauswertung
 - b. Darstellen von energetischen Potentialen und Verlusten
 - c. Vergleich von Original und Prototyp
 - d. Darstellen der Vor – und Nachteile des Prototyps
5. Bewertung
6. Aktualisieren des Modellabbildes

Nach erfolgter Datenerfassung kann eine ausführliche Auswertung der erhaltenen Ergebnisse erfolgen. Über die Gegenüberstellung der Originaldaten aus der Analysephase und den nun gewonnenen Prototypdaten ist es möglich, die Veränderungen durch die Produktoptimierung klar darzustellen. Dabei wird die Auswirkung durch die Modifikation der Einzelkomponenten detailliert nachvollzogen und herausgestrichen. Anschließend können die Vor- und Nachteile der getroffenen Maßnahmen aufgelistet und bewertet werden. Die Bewertung erfolgt wie übliche mit den im Evaluierungsblock zur Verfügung stehenden Werkzeugen. Den Abschluss der Prototypenanalyse bildet die Aktualisierung des Modellabbildes, wobei auch hier die Folgen der getätigten Veränderungen nachvollzogen und dokumentiert werden müssen.

3.5.3.4 Weiterentwicklung

Nach der Analyse der Versuchsergebnisse werden die Versuchsprototypen mit den gewonnenen Erkenntnissen zu lauffähigen Prototypen weiterentwickelt.

Für diese Weiterentwicklung wird die Optimierungsphase in Iterationsschleifen nochmals durchlaufen. Anders als in vorherigen Projektphasen, ist hier die Iteration nicht nur obligatorisch sondern zwingend notwendig und ein fixer Bestandteil des methodischen Vorgehens. Motivation dafür ist, dass ein Versuchsprototyp möglichst zielorientiert und kostengünstig entwickelt wird. Das bedeutet, er soll die notwendigen Erkenntnisse zur Produktoptimierung liefern, es erfolgt jedoch noch keine Rücksichtnahme auf Kriterien der Vor- oder Serienentwicklung wie etwa Dauerhaltbarkeit oder Stoßresistenz. Aus diesem Grund ist eine weitere, vertiefte Entwicklungsarbeit für einen lauffähigen Prototypen zwingend erforderlich. Abbildung 3-25 gibt nochmals einen schematischen Überblick über die Optimierungsphase im Detail.

3.5.4 Projektabschluss

Ein geordneter Projektabschluss wird als mindestens ebenso wichtig angesehen wie der richtige Projektstart, wie Ophay [57], Jakoby [38] oder Bohinc [6] beschreiben. Darin enthaltene Teilbereiche sind die Projektübergabe, die Erkenntnissicherung, das Wissensmanagement, die Projektauflösung und ein Abschlussevent.

Als Gegenstück zum Kick-Off Meeting dient ein Projektabschluss-Workshop zum Erarbeiten der Zusammenfassung und im Weiteren zum Erstellen des Projektabschlussberichts. Darin wird die bisherige Dokumentation zusammengefasst und in ein durchgehendes Dokument gebracht. Eine große Hilfe für die Planung des Folgeprojektes bietet eine wirtschaftliche Projektanalyse. Die Auswertung der Projektstatistiken ermöglicht eine Bewertung der benötigten materiellen, personellen und finanziellen Ressourcen. Während der nochmaligen Durchsicht der Unterlagen sollte gleichzeitig ein kritischer Blick auf den Projektverlauf und die erzielten Ergebnisse gemacht werden, da darin Potential für weitere Schlussfolgerungen enthalten ist. Positive sowie negative Ereignisse ergeben mögliche Leitlinien für nutzvolle Veränderungen in zukünftigen Projekten. Der konstruktive Ausklang bringt Feedback und Reflexion, um Lessons learned zu ermitteln und in das Wissensmanagement einfließen zu lassen. Fehlermuster werden analysiert, Auswirkungen und Hintergründe verstanden und Lösungsansätze für zukünftige

Handlungsweisen erarbeitet. Zudem ist eine Abschlussveranstaltung für den persönlichen Eindruck, der dem einzelnen Projektmitarbeiter mitgegeben wird sehr positiv. Dies bildet gleichzeitig eine gute Basis für zukünftige Projekte mit den beteiligten Projektpartnern.

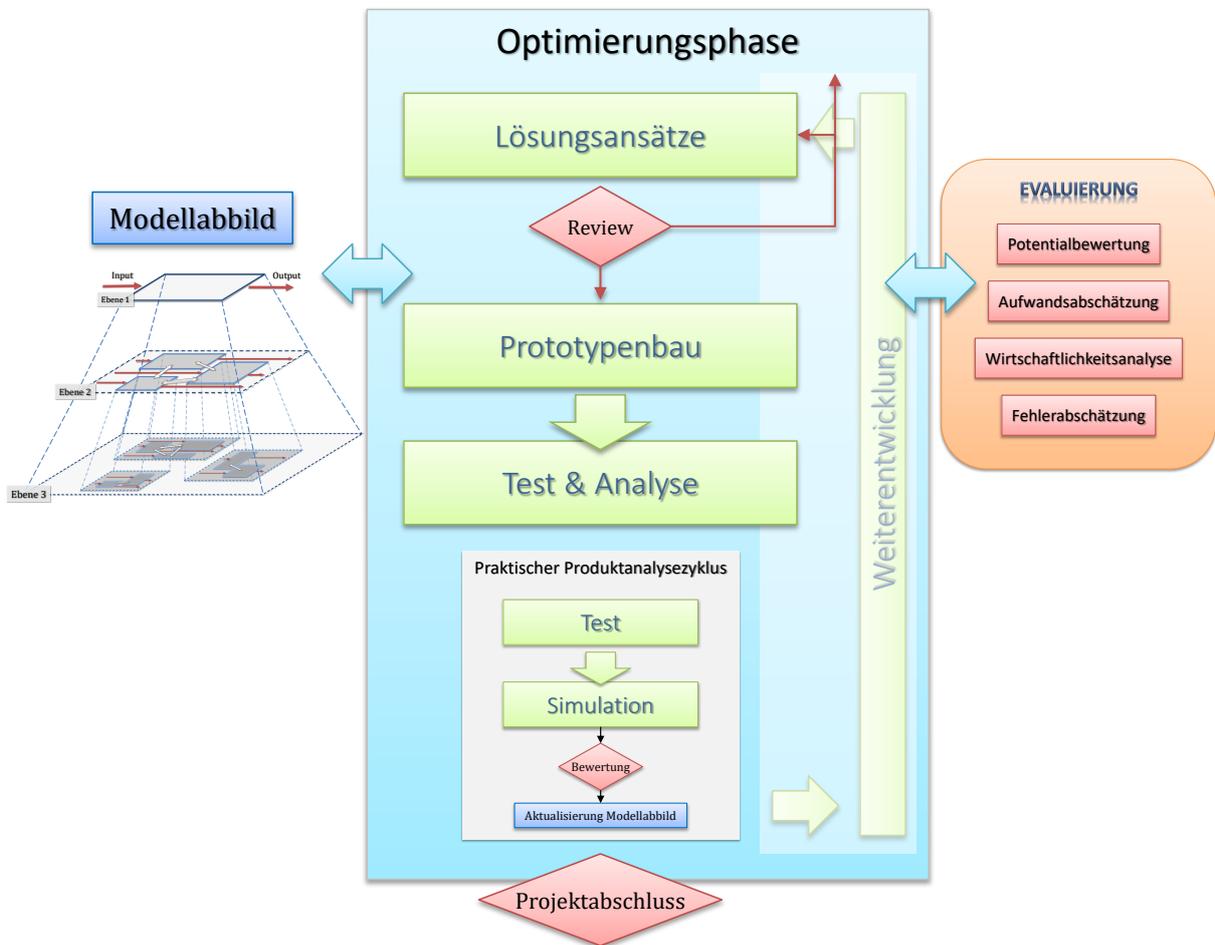


Abbildung 3-25: Optimierungsphase im Detail

4 Forschungarbeit in *Eta+*

Im kommenden Abschnitt wird nun auf die theoretische und praktische Forschungsarbeit zur Verlustenergie Minimierung und Rückgewinnung, die im Zuge des Projektes *Eta+* durchgeführt wurde, eingegangen. Weiters wird in diesem Kapitel versucht, den Zusammenhang zwischen den Ergebnissen und Erkenntnissen der durchgeführten Untersuchungen an den Versuchsträgern und der daraus abgeleiteten Methodik *MEta+* aufzuzeigen. Dazu sind am Beginn der beschriebenen Projektphasen die entsprechenden Ablaufschemata aus der Methodik angeführt. Wie schon zuvor beschrieben, wurde *MEta+* nach den Tätigkeiten in *Eta+* erarbeitet und verfeinert. Daher sind in der theoretischen und praktischen Arbeit der folgenden Unterkapitel nicht alle Aspekte von *MEta+* wiedergegeben.

Am Ausgangspunkt wurde in der Definitionsphase ein Entwurf des Projektes erarbeitet. Mithilfe einer Literaturrecherche und der Erörterung des vorhandenen Wissens im Umfeld erfolgte das Einarbeiten in das Projektthema. Dabei wurde versucht, einen Überblick über die in Frage kommenden Technologien zu bekommen. Anschließend wurden mögliche Versuchsträger nach Potential und Machbarkeit abgeschätzt. Mit Hilfe der Modellabbildung der betrachteten Systeme, erfolgte eine weitere Annäherung an die zu untersuchenden Inhalte. Darauffolgend konnte die Auswahl der für eine energetische Bewertung wichtigen Energieströme und der dazu erforderlichen Messgrößen erfolgen. Danach wurde die Datenerfassung geplant und Versuchsreihen an den Untersuchungsobjekten durchgeführt. Die Analyse der Messergebnisse ermöglichte den Einblick in das energetische Verhalten der technischen Systeme im Realbetrieb. Die Gesamteffizienz, welche zuvor aus der Literatur und durch Erfahrungswerte nur abgeschätzt werden konnten, war daraus nun in wissenschaftlicher Genauigkeit quantitativ bestimmbar.

Nach dem Einarbeiten der gewonnenen Erkenntnisse in die Modellabbilder der Systeme und der Anpassung der weiteren Vorgehensweise folgte die vertiefende Analysephase. Dabei wurden die Versuchsträger mit der zur Verfügung stehenden Messtechnik ausgestattet und Versuchsreihen durchgeführt. Darin waren auch studentische Mitarbeiter im Zuge von Projektarbeiten in das Projekt mit eingebunden, siehe dazu Girstmair [31], Kupnick [46], Lehner (1) [48], Lehner (2) [49] und Prossliner [64]. Ein weiteres Ziel bestand darin, Synergien zwischen den Einzelprojekten von *Eco-Power Drive* zu generieren. Dabei wurden Untersuchungen, wie z.B. der Motorprüfstandsaufbau des Projektes *LOCO₂*, mit Schwesterprojekten gemeinsam erarbeitet und ermöglichten somit beiden Projekten die notwendige Datenerfassung. Ein im Projekt parallel zu den Realversuchen entwickeltes Längsdynamik-Simulationsmodell ergänzte die reale Datenerfassung. Es ermöglichte mithilfe der gemessenen, stationären Kennfelder Voraussagen über dynamische Fahrzustände und die dabei auftretenden Energieflüsse treffen zu können.

Dies führte in der Optimierungsphase zum Erarbeiten von Lösungsansätzen und in weiterer Folge zum Prototypenbau. Nach einer weiteren, umfangreichen Analyse der neuen Systeme nach dem zuvor bereits erarbeiteten Schema der Analysephase, wurden die gewonnenen Erkenntnisse verglichen und mögliche Potentiale für eine Weiterentwicklung aufgezeigt.

4.1 Definitionsphase *Eta+*

In der Definitionsphase erfolgte die Arbeit am Projektinhalt nach der in der Methodik im Kapitel 3.5.1 auf Seite 30 beschriebenen Vorgehensweise. Abbildung 4-1 zeigt nochmals das dazugehörige Ablaufschema.

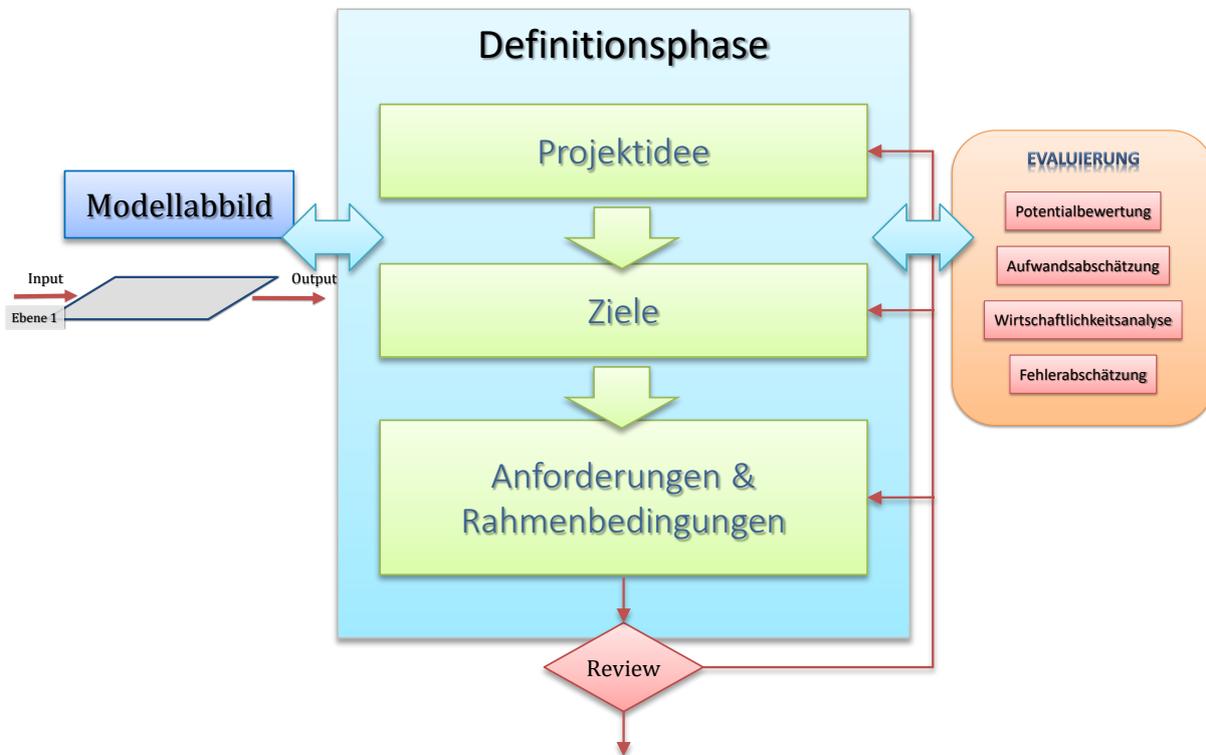


Abbildung 4-1: Definitionsphase mit Modellentwicklung und Evaluierung

Die Formulierung des Projektes begann mit der Aufbereitung der Projektidee hin zu konkreten Zielen und die dazu notwendigen Anforderungen und Randbedingungen. Im Ist-Soll Vergleich der betrachteten Versuchsträger und von vergleichbaren Systemen wurde versucht, den Projektgrundstein zu legen. Eine erste Modellentwicklung half, die in Frage kommenden technischen Systeme zu erfassen und die energetische Wirkungsweise kennen zu lernen. Durch das kreative Auseinandersetzen mit der Projektidee ergaben sich verschiedene Wege, Ziele zu formulieren und somit die Untersuchungen in eine klare Richtung zu lenken. Die zuerst grobe und bei weiterer Vertiefung detaillierte Literaturrecherche brachte notwendige Erkenntnisse zum Stand der Technik zur Analyse von Energieflüssen in vergleichbaren technischen Systemen. Eine Kombination dieser Schritte führte schlussendlich zur Zusammenstellung der Anforderungen und Randbedingungen für das Projekt. Ein Review bewertete die zuvor durchgeführte Arbeit und rundete die Definitionsphase ab.

4.1.1 Aufbereiten der Projektidee

Die Forschungstätigkeiten im Projekt *Eta+* folgten aus der Idee, den Trend in der globalen Automobilindustrie zur Steigerung der Effizienz und somit Reduktion des CO₂ Ausstoßes von Fahrzeugen auch im Bereich der Zweiräder und handgeführten, motorbetriebenen Arbeitsgeräte umzusetzen. Eine Untersuchung der Gesamtenergieflüsse in den ausgewählten Versuchsobjekten kann dabei einen Zugang zur Effizienzsteigerung bieten. Vereinfacht wird davon ausgegangen, dass in konventionellen Ottomotoren eine Drittelung der Gesamtenergie angenommen werden kann. Von der zugeführten chemischen Energie wird dabei etwa ein Drittel in Form von mechanischer Energie im Antriebsstrang umgesetzt und jeweils ca. ein Drittel im Abgastrakt und im Kühlkreislauf in Form von thermischer Energie abgeführt. Veröffentlichungen zur

präziseren Darstellung der Verteilung dieser Energieflüsse im Gesamtsystem von Zweirädern und handgeführten, motorbetriebenen Arbeitsgeräten sowie der umfassenden Abbildung aller energetischen Verluste in solchen Systemen konnten in der Vorrecherche nicht gefunden werden. Aus der Projektidee und den Fragen die diese aufwirft ergaben sich nun in der Aufbereitung der Projektidee Fragestellungen wie z.B.: Wie verhält sich der Energiefluss in einem Zweirad oder einem handgeführten, motorbetriebenen Arbeitsgerät im Detail? Wo liegen die energetischen Verluste, in welcher Größe fallen sie an und welche Komponenten und Bauteile sind davon betroffen? Welche Möglichkeiten bestehen, um diese Verlustenergien zu verringern oder wieder nutzbar zu machen. Dazu wurden Arbeitskollegen und Personen im näheren Umfeld nach bestehendem Wissen befragt. Bezüglich thermodynamischer Analyse und technischer Entwicklung von Verbrennungsmotoren bestand am Institut ein ausgiebiger Erfahrungsschatz. Spezielles Wissen zu der angedachten Energieflussanalyse des Gesamtsystems musste jedoch noch angeeignet werden. Nach der ersten Betrachtung der Versuchsträger wurde daher eine Literaturrecherche zu diesen Fragestellungen durchgeführt.

4.1.1.1 Motorrad BMW F800R

Im Bereich Zweiräder gelten Leistung, Performance und Emotion als die wichtigsten Kriterien für den Käufer. Der Kundenkreis ist wählerisch und reagiert empfindlich auf Veränderungen in Design oder der Fahrbarkeit des Produktes. Das Bauchgefühl überwiegt hier deutlich gegenüber den pragmatischen Kaufentscheidungen, wie sie im PKW Sektor zu finden sind. Aber auch hier zeigt sich langsam ein Umdenken. In einschlägigen Magazinen können vermehrt auch Produkttests zum Thema Verbrauch gefunden werden. Was zeigt, dass die Effizienz der Antriebsstränge auch in diesem Sektor an Bedeutung zunimmt. In der Recherche zu diesem Thema konnten jedoch keine wissenschaftlichen Veröffentlichungen im Bereich der energetischen Analyse von Motorrädern, abgesehen von der klassischen Entwicklung in der Motorentechnologie, gefunden werden. Dies bestätigte das Vorhaben, das ausgewählte Motorrad BMW F800R als Versuchsträger zu verwenden.



Abbildung 4-2: BMW F800R [5]

Das Fahrzeug, welches in Abbildung 4-2 zu sehen ist, stellt ein klassisches Mittelklasse-Motorrad in sogenannter „Naked Bike“-Bauweise dar. Eine Mischung aus Komfort und Sportlichkeit ergibt sich durch eine moderate Motorauslegung und Fahrwerksabstimmung. Der Kraftstoffverbrauch liegt im Bereich der sparsameren Modelle in dieser Kategorie. Der Motor ist ein

Viertakt-, Zweizylinder- Reihenmotor mit obenliegender Nockenwelle und Vierventiltechnik. Eine zusätzliche Schwinge für den Ausgleich der Massenkräfte und der Zündabstand von 360° bringen eine verbesserte Laufruhe. Die Kühlung des Aggregats erfolgt über eine Wasserkühlung mit zusätzlichem Öl-Wasser Wärmetauscher, um das Motoröl im optimalen Temperaturbereich zu halten. Eine Saugrohreinspritzung, eine elektronische Motorsteuerung und ein 3 Wege Katalysator ermöglichen das Erreichen des Euro 3 Standards. Die ausführliche Auflistung der technischen Daten des Versuchsträgers ist im Anhang beigefügt.

4.1.1.2 Rasenmäher Viking MB 755 KS

Auch im Bereich der Rasenmäher konnten keine Veröffentlichungen zur Effizienzsteigerung gefunden werden. Der enorm hohe Preisdruck in diesem Segment, der kostenintensivere Investitionen in die Technologie erschwert, macht eine Investition in die Effizienz dieser Produkte unattraktiv. Die Firma Stihl GmbH, mit der Konzerntochter Viking GmbH, führt jedoch Entwicklungstätigkeiten im Bereich der handgehaltenen und handgeführten Arbeitsgeräte durch und war daher als Projektpartner im Projekt vertreten. Die Produktkategorie der handgeführten Rasenmäher für den professionellen Einsatz, in welche der Viking MB 755 KS fällt, hat die Möglichkeit geboten, positive Argumente in Punkto Effizienzsteigerung zu erzeugen. Des Weiteren stellte eine thermodynamische Effizienzanalyse an einem Rasenmäher ein neues, noch nicht betrachtetes Untersuchungsfeld dar.



Abbildung 4-3: Viking MB 755 KS [85]

Dieser in Abbildung 4-3 dargestellte Rasenmäher ist für die anspruchsvolle Anwendung bei Landschaftsgärtnern oder in der kommunalen Grünflächenpflege ausgelegt und für viele Arbeitsstunden, erschwerte Einsatzbedingungen und Ausfallsicherheit entworfen. Das Gerät verfügt unter anderem über einen dreigängigen, selbstfahrenden Antrieb, eine Messerkupplung für das Mähmesser, ein Gehäuse aus gegossenem Aluminium und eine Schitthöhenverstellung in sieben Stufen. Mit 53 cm Schnittbreite ist dies der größte handgeführte Rasenmäher im Programm von Viking. Darüber hinaus wird der gesetzlich vorgeschriebene Lärmemissionsgrenzwert von 98 dB(A) [21] garantiert und mit gemessenen 89 dB(A) angegeben. Im Anhang sind weitere technische Daten des Geräts aufgelistet. Der eingesetzte luftgekühlte, Viertakt-

Ottomotor Kawasaki FJ180V gehört mit einer Leistung von 3,4 kW zu den leistungsstärkeren Motoren im Bereich der handgeführten Rasenmäher. Die verwendete Technologie wie z.B. Ölumlaufschmierung mit Ölpumpe oder stehende Ventile mit Antrieb über Stößelstangen und Kipphebel ergibt eine vergleichsweise lange Lebensdauer von 500 Betriebsstunden und gute Abgaswerte in dieser Motorsparte. Als Zündeinrichtung wird eine Magnet-Induktions-Zündung am Schwungrad eingesetzt, welche jedoch keine elektronische Verstellung des Zündzeitpunkts erlaubt. Der Schwimmervergaser wird zur Konstant-Drehzahlregelung über einen Fliehkraftregler betätigt. Die Dekompression zur Starterleichterung wird automatisch durchgeführt und eine Abgasnachbehandlungseinrichtung ist nicht verbaut.

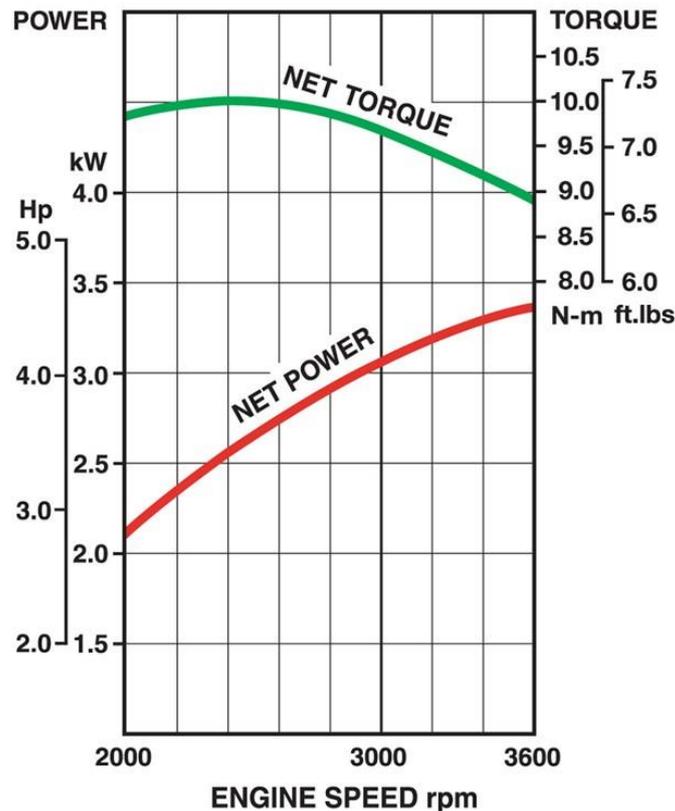


Abbildung 4-4: Motorkennlinie Kawasaki FJ180V [42]

In Abbildung 4-4 sind die Motorkennlinien für Drehmoment und Leistung über die Drehzahl der Ausführung für den europäischen Markt aufgetragen. Im Original ist die Motor-Vergaser Abstimmung für den amerikanischen Markt entworfen und die Lehlaufdrehzahl liegt dabei bei 3200 min^{-1} . In Europa wird ein Lärmemissionsgrenzwert für im Freien betriebene Arbeitsgeräte von 98 dB(A) [21] vorgeschrieben. Daher muss die Lehlaufdrehzahl von 3200 min^{-1} auf 2800 min^{-1} verringert und der Vergaser daran angepasst werden.

Für die angedachte Analyse war eine Bewertung der Energieumwandlungs-, -transport- und -speicherprozesse notwendig und es wurde eine energetische Bewertung über den Wirkungsgrad angestrebt. Um die Effizienzbewertung vollständig durchführen zu können, war außerdem eine exergetische Verlustanalyse zielführend. Um Zugang zu diesen Themen zu bekommen, wurden Veröffentlichungen zu energetischen Prozessen im Allgemeinen und im Speziellen zur Analyse von Energieflüssen in Fahrzeugen oder zur Verlustenergie minimierung und -nutzung gesucht.

Wesselak [87] behandelt die vielfältigen Möglichkeiten Energie durch regenerative Erzeugung bereit zu stellen. Es wird gezeigt, wie Energieverluste über Energieeffizienzmaßnahmen und eine entsprechende Analyse reduziert werden können. Dabei betont er, dass zuerst nach Möglichkeiten zur Vermeidung von unnötigem Energieverbrauch gesucht werden sollte und erst in

weiterer Folge eine Optimierung der Systeme anzustreben ist. Zahoransky [97] bietet einen weiten Überblick über die Energietechnik und die Systeme der Energieumwandlung. Vertiefend wird auf die Möglichkeiten der Energiebereitstellung, Energieverteilung und Energiespeicherung eingegangen. Stan [78] beschäftigt sich ausführlich mit den verschiedenen Möglichkeiten einen KFZ Antrieb zu gestalten. Es werden sowohl die Gründe als auch die Vorteile und die Effizienz der technischen Ausführungen einsetzbarer Antriebssysteme dargestellt. Dies wird durch differenzierte Betrachtungsweisen und real mögliche Beispiele veranschaulicht. Vertiefend wurden die vorgestellten Systeme um eine ökologische und ökonomische Analyse erweitert. Stoffregen [63] gibt einen umfassenden Überblick über alle relevanten Themen rund um das Motorrad. Pott [62] befasst sich mit der Analyse der fahrzeuginternen Energieströme zur Reduktion und Nutzung der Verlustenergien. Ein Ziel ist dabei die Senkung von Kraftstoffverbrauch und Emissionen bei gleichzeitiger Steigerung der Leistung des Heizkreislaufsystems des Fahrzeuges. BMW setzt im Bereich der PKW Entwicklungen zum Thema Effizienz unter dem Überbegriff *BWM EfficientDynamics* um. Veröffentlichte Arbeiten wie die von Liebl [50] zeigen wie versucht wird, eine möglichst gute Fahrdynamik mit einer Effizienzsteigerung und der Minderung von Emissionen in Einklang zu bringen. Feulner [27] berichtet über die Analyse von verschiedenen technologischen Möglichkeiten, zusätzliche Energiewandler in zukünftigen Antrieben im PKW einzusetzen. Rumbolz [69] wiederum beschreibt ein umfangreiches Projekt zur Messung der energetischen Leistungsflüsse in einem PKW. Dabei werden die empirischen Daten auf einem festgelegten Straßenrundkurs im öffentlichen Verkehr mit 50 verschiedenen Probanden ermittelt. Birnbreier [4] beschreibt die Erprobung, Datenerfassung und energetische Bilanzierung von verschiedenen Elektrofahrzeugen auf der deutschen Insel Rügen. Die dabei erarbeiteten Energiebilanzen umfassen die Energieflüsse in den Antriebsstrangkomponenten, wobei nach Antreiben und Bremsen unterschieden wird.

Zum Thema Energierückgewinnung können auch verschiedenste Veröffentlichungen gefunden werden. Seifert [74] beschreibt eine Studie über die Möglichkeiten zur Energierückgewinnung aus dem Abgas eines PKW Ottomotors auf Basis eines Rankine Prozesses. Bredel [7] zeigt ebenfalls einen Versuch über einen Rankine Prozess und einen Hubkolbenexpander Energie aus dem Motorabgas rückzugewinnen, in diesem Fall aber für größere Ausführungen wie LKW- oder Stationärmotoren. Diese und ähnliche Projekte haben gemein, dass Abwärmeenergie über einen Dampfkreisprozess zurück gewonnen wird. Eine andere Herangehensweise versuchen mechanische Speichersysteme, die wie im Beispiel vom Kliffken [44], kinetische Energie beim regenerativen Bremsen in hydrostatische Energie wandeln und über eine Druckgasfeder speichern. Auch mittels Schwungmassenspeicher wird versucht Bremsenergie in mechanische Energie, in diesem Fall kinetische Energie, zu speichern, wie Atkins [1] zeigt. Einen gänzlich anderen Ansatz der Verlustenergienutzung wählt Willems [93] bei der Analyse zur Potentialabschätzung der in den PKW Stoßdämpfern während der Fahrt in Reibung umgesetzten kinetischen Energie.

Auch nach umfangreicher Recherche konnten während der einleitenden Phase von *Eta+* keine Projekte und Veröffentlichungen zum angedachten Forschungsinhalt in Bezug auf Zweiräder, Freizeitfahrzeuge oder handgeführte Arbeitsgeräte gefunden werden. Die vorgefundenen Effizienzsteigerungsmaßnahmen beschränken sich ausschließlich auf die Motortechnologie und werden bei Gumpesberger [34] in Freizeitfahrzeugen teilweise eingesetzt. Moderne Motortechnologien im Stand der Technik wie z.B. Ottomotoren mit Direkteinspritzung und Turboaufladung werden dabei serienmäßig nicht umgesetzt und nur in einzelnen Forschungsprojekten erprobt. Bei den handgeführten Arbeitsgeräten sind Versuche zur Reduktion von Emissionen und Verbrauch bei Zweitakt-Ottomotoren in Serie eingeführt, wie von Dobler [12] angeführt wird. Im Bereich der Viertaktmotoren mit Ottoprinzip können für diese Anwendung keine Veröffentlichungen zum Thema Energieflussanalyse oder Effizienzsteigerung aufgeführt werden.

Auf Basis des bis hierhin gesammelten Wissens folgte die vertiefte Aufbereitung des

Projektthemas. Über Kreativitätstechniken wie Brainstorming und Mindmapping wurde versucht, das weite Feld der Basisliteratur und die Herangehensweise der einzelnen, sehr speziellen Untersuchungen in verschiedene Themenkategorien im KFZ einzuteilen. Abbildung 4-5 zeigt eine Mindmap dazu, wobei die Untergruppen Energieformen, Energieträger, Speicher, Verbraucher und Übertragung gebildet wurden. Diese verfeinerten sich in weiterer Folge in den tiefergehenden Ebenen in weiteren Unterteilungen. Energieträger zum Beispiel konnten in gasförmig, flüssig und fest eingeteilt werden. Bei den Energieformen wurde chemische, potentielle, kinetische und Wärmeenergie identifiziert. Die Wärmeenergie konnte wiederum in Strahlungswärme und Wärmeleitung aufgeteilt werden. Hier spiegelte sich die aus Entwicklungsmethodik stammende Vorgehensweise vom Groben zum Detail wieder.



Abbildung 4-5: Mindmap Energie im KFZ

Die Forschungsarbeiten am bis hierher zusammengetragenen Wissen offenbarte ein multidisziplinäres und komplexes Themenfeld. Es vereinte Inhalte aus der Physik, der Chemie, der Mechanik, der Wärmetechnik, der Thermodynamik, der Strömungsmechanik, der Elektrik und Fahrzeugtechnik aber auch eher unerwartet, über das Nutzerverhalten und der Technologieakzeptanz, Inhalte aus der Soziologie und Psychologie. Der weiter oben bereits erwähnte Versuch die aktuellen Anforderungen bezüglich Emissionsgesetzgebung, Effizienzsteigerung und Fahrdynamik zu vereinen, gab ein weiteres Beispiel wie interdisziplinär sich Effizienzmaßnahmen in Fahrzeugen gestalten können. Daraus war zu erkennen, dass ein ganzheitlicher Zugang zur Problemstellung erforderlich ist. Einerseits war eine klassische mechanische und thermodynamische Analyse notwendig, welche die Energieflussanalyse darstellt. Andererseits war eine sehr strukturierte Vorgehensweise wichtig, um in der Komplexität des Vorhabens die Kontrolle über das Projekt zu behalten und sich nicht in verzweigten Seitenästen zu verlieren. Zusätzlich sollten auch Aspekte abseits des Technischen mitbetrachtet werden, um nicht Lösungen zu generieren, die in Realität vom Kunden nicht akzeptiert werden und somit wirtschaftlich nicht umsetzbar sind. An diesem Punkt in der Arbeit zeigte sich nun die Notwendigkeit, in der Herangehensweise für eine zielführende Analyse und Optimierung dieser Versuchsträger, auch auf die Thematik der Entwicklungsmethodik einzugehen. Wie in Kapitel 3.3.2 bereits beschrieben, kann ein Modellabbild des Systems für den kontrollierten Ablauf der Analyse einen wichtigen

Baustein darstellen. Daher folgte der Entwurf eines einfachen Modellabbildes, um den ersten Überblick über das System zu ermöglichen und die Übertragung der bisher erworbenen Kenntnisse auf die Versuchsobjekte zu erleichtern. Abbildung 4-6 zeigt die Modellbildung in der ersten Ebene der betrachteten Systeme am Beispiel des Versuchsmotorrads.

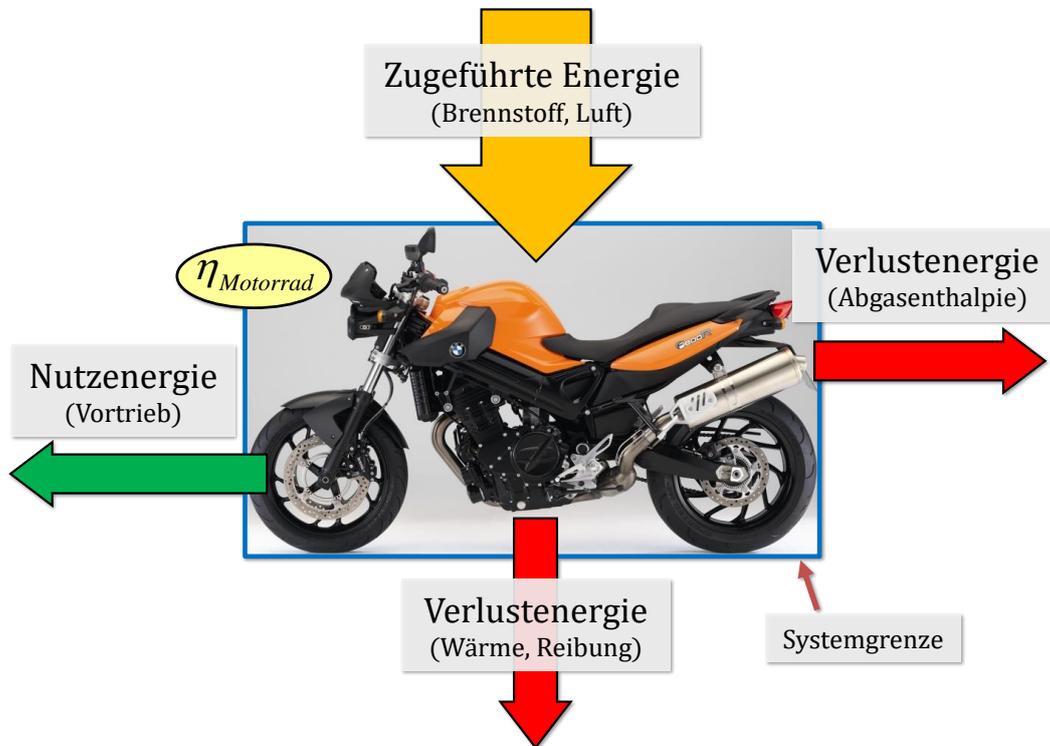


Abbildung 4-6: Modellbildung in Ebene 1 für das Motorrad

Bei der Erarbeitung des Modellabbildes in der ersten Ebene wurde wie folgt vorgegangen:

1. Schematisches Darstellen des Systems in einer Ebene 1 Blackbox
Das gesamte Fahrzeug oder Arbeitsgerät wird als Blackbox abgebildet.
2. Setzen der Systemgrenze
Die Systemgrenze wird bei beiden Versuchsobjekten um die physikalische Außengrenze des gesamten Systems gelegt.
3. Schnittstellen des Systems mit dem systemnahen Umfeld darstellen
Motorrad: Die Schnittstelle für die Zufuhr von Energie ist der Kraftstofftank. Für die Energieabfuhr stellen die Räder die Schnittstelle für die Nutzenergie und die gesamte Motorradhülle (Bauteiloberfläche, Wärmetauscher, Abgasanlage, etc) die Schnittstelle für die Energieverluste dar.
Rasenmäher: Schnittstellen sind der Kraftstofftank für die Energiezufuhr. Für die Energieabfuhr über Nutzenergie sind das das Mähmesser und die Antriebsräder. Für die Verlustenergie ist die Schnittstelle wiederum die gesamte Geräteoberfläche (Kühlrippen, Abgasanlage, etc.).
4. Input/Output definieren; über Systemgrenzen laufende Energieflüsse darstellen
Motorrad: Die Energiezufuhr erfolgt über das Betanken des Geräts mit Kraftstoff. Eine Nutzenergieabfuhr findet über den Fahrtrieb zum Decken der Fahrwiderstände statt. Verlustenergie geht über den Wärmefluss in Form von Wärmestrahlung und konvektiven Wärmetransport sowie Abgasenthalpie an die Umwelt verloren.

Rasenmäher: Die Energiezufuhr erfolgt über das Betanken mit Kraftstoff. Die Nutzenergieabfuhr geschieht über das Mähmesser beim Rasenschnitt sowie über den Fahrtrieb zur Überwindung der Fahrwiderstände. Verlustenergie geht über den Wärmefluss in Form von Wärmestrahlung und konvektiven Wärmetransport sowie Abgasenthalpie an die Umwelt verloren.

4.1.2 Ziele formulieren

Als folgender Schritt wurden Ziele definiert, welche eine grundlegende Richtung für das Vorgehen im Projekt weisen sollen. Mögliche Kriterien für die Formulierung waren:

- Einsatzgebiet des Produktes
- Art des Einsatzes
- Gesetzliche Rahmenbedingungen
- Primäre Produktfunktionen
- Primäre Kundenwünsche
- Markante Merkmale des Produktes
- Unterschiede zur Konkurrenz
- Produktionskosten
- Kostenrahmen für die Entwicklung / Produktverbesserung
- Darstellen spezieller Herausforderungen und potentieller Fehlerquellen in Entwicklung, Produktion, Einsatz und Projektarbeit

Verschiedene Werkzeuge zur systematischen Arbeit waren hier gut einsetzbar. In diesem Fall wurde wieder auf die Mindmap, wie in Abbildung 4-7 zu sehen ist, für ein geordnetes Brainstorming zurückgegriffen.

Aus den bis hier hin gemachten Recherchen konnte gefolgert werden, dass aus der Literatur nicht ersichtlich ist, wie sich die energetischen Vorgänge innerhalb der betrachteten Gesamtsysteme darstellen. Daraus konnte das erste Ziel, eine notwendige detaillierte Systemanalyse, definiert werden. Durch den Wunsch die Versuchsträger detaillierter darzustellen geht hervor, dass in der Entwicklung der Modellabbildung die Verluste der Energie ersichtlich sein und somit Systemkomponenten, die maßgeblich zur Wirkungsgradverbesserung beitragen können hervorgehoben werden sollten. In den ausgesuchten Antriebssystemen und deren Unterkomponenten war es dabei auch von Interesse, eine Verlustteilung und Verlustanalyse über eine passende Energiebilanzierung unter charakteristischen Betriebsbedingungen der jeweiligen Maschinen durchzuführen. Weiters war zu erkennen, dass Möglichkeiten bestehen, neuere und verbesserte Technologien in den Geräten einzusetzen. Dadurch ergab sich die Notwendigkeit, Standardtechnologien aus anderen Bereichen des Maschinenbaus und der Fahrzeugtechnik, wie z.B. der Automobilindustrie für Produkte wie den hier betrachteten Versuchsträgern speziell zu adaptieren. Weiters zeigte sich der Bedarf an einer methodischen Vorgehensweise in der energetischen Analyse, welche aus der Erkenntnis, dass umfangreiche und multidisziplinäre Systeme betrachtet werden folgte. Um die Erkenntnisse aus der Projektarbeit für eine optimierte Bearbeitung möglicher nachfolgender, energetischer Analysen aufzubereiten, sollte eine Methodik zur energetischen Verlustanalyse und Wirkungsgradverbesserung abgeleitet werden. Die Erarbeitung und der Einsatz von softwarebasierten Simulationsmodellen zur Berechnung der Energieflüsse sowie Hardwaretools wie z.B. speziellen Prüfstandaufbauten zur Komponentenanalyse und Datenerfassung ergaben daraus ein weiteres Ziel im Projekt. Zu guter Letzt war es wünschenswert, Konzepte zur Reduktion und Nutzung der vorgefundenen Verlustenergien

als Ergebnisse präsentieren zu können.



Abbildung 4-7: Mindmap Ziele

Zusammengefasst waren die beschriebenen Ziele des Projektes folgende:

- Eine detaillierte Systemanalyse inklusive Unterkomponenten
- Simulationsmodelle und Werkzeuge für die Erhebung und Berechnung von Energieflüssen
- Qualitative und quantitative Darstellung der Energieflüsse
- Aufzeigen der energetischen Verluste
- Definition der Systemkomponenten mit Potential zur Wirkungsgradverbesserung
- Anpassen moderner Technologien an die untersuchten Systeme
- Erarbeiten von Konzepten zur Reduktion und Nutzung der Verlustenergien
- Ressourcenoptimierte Vorgehensweise
- Entwicklung einer systematischen Methodik für den Entwicklungsprozess

4.1.3 Anforderungen und Rahmenbedingungen definieren

Die Anforderungen und Rahmenbedingungen, die nun die oben gesteckten Ziele ermöglichen sollten, wurden zum Teil schon in den vorhergehenden Ausführungen beschrieben. Zusätzlich

sollte für die betrachteten Energien eine Aufteilung in verwertbare und nicht verwertbare Energie stattfinden und diese bewertet werden, was über die thermodynamische Exergiebetraachtung möglich war. Weitere spezifische Kriterien für die Versuchsträger konnten wie folgt zusammengestellt werden:

4.1.3.1 Motorrad:

- **Leistung**

Als wichtigstes Merkmal eines Freizeit- und Sportfahrzeuges ist die Spitzenleistung das bedeutendste Verkaufsargument für den Hersteller. Es bildet die Messlatte, die bei einer energetischen Optimierung für ein gleichwertiges Fahrzeug nicht unterschritten werden darf. Daraus folgt die Bedingung: Gleiche Leistungsdaten bei besserer Effizienz.
- **Drehmoment**

Das zweitwichtigste Merkmal ist gleichzusetzen mit der Elastizität und Durchzugsfähigkeit eines Motorrads. Es gelten dieselben Bedingungen wie für die Leistung.
- **Fahrbarkeit**

In den Bereich Fahrbarkeit fallen unter anderem das Ansprechverhalten und die Leistungsentfaltung des Motors sowie die Gewichtsverteilung und das Handling des Fahrzeugs. Sie wird von verschiedenen Käuferschichten unterschiedlich bewertet, ist aber bei allen Testberichten ein wichtiges Kriterium. Bei auf Langstreckentauglichkeit ausgelegten Motorrädern ist diese bedeutend, da der Fahrkomfort im direkten Bezug dazu steht.
- **Gewicht**

Das Gewicht ist auch ein wichtiges Thema bei Zweirädern, wobei bei den sportlichen Fahrzeugen besonderes Augenmerk darauf gelegt wird. Zusätzliche Komponenten für die Effizienzsteigerung sollten nur im begrenzten Umfang ein erhöhtes Fahrzeuggewicht verursachen.
- **Verbrauch**

Der Kraftstoffverbrauch ist vor allem bei Freizeit- und Langstreckenfahrzeugen von Bedeutung, ist aber von geringerer Bedeutung als z.B. die Leistungsdaten des Motors.
- **Abgasgesetzgebung**

Die Abgaswerte des Motorrads sind als Kundenargument unbedeutend. Gesetzliche Vorschriften, aktuell die Euro 3 Norm in der europäischen Gesetzgebung [24] und deren zukünftige Veränderung bilden jedoch eine wichtige Rahmenbedingung für die Fahrzeugentwicklung. In Abbildung 4-8 sind die Grenzwerte für Motorräder dieser Klasse dargestellt.
- **Produktionskosten & Fahrzeugpreis**

Die Produktionskosten spiegeln sich direkt im Fahrzeugpreis wider und stellen ein wichtiges Kriterium dar. Wobei jedoch Motorradfahrer durchaus gewillt sind, für Qualität und eine bestimmte Marke höhere Kosten in Kauf zu nehmen.

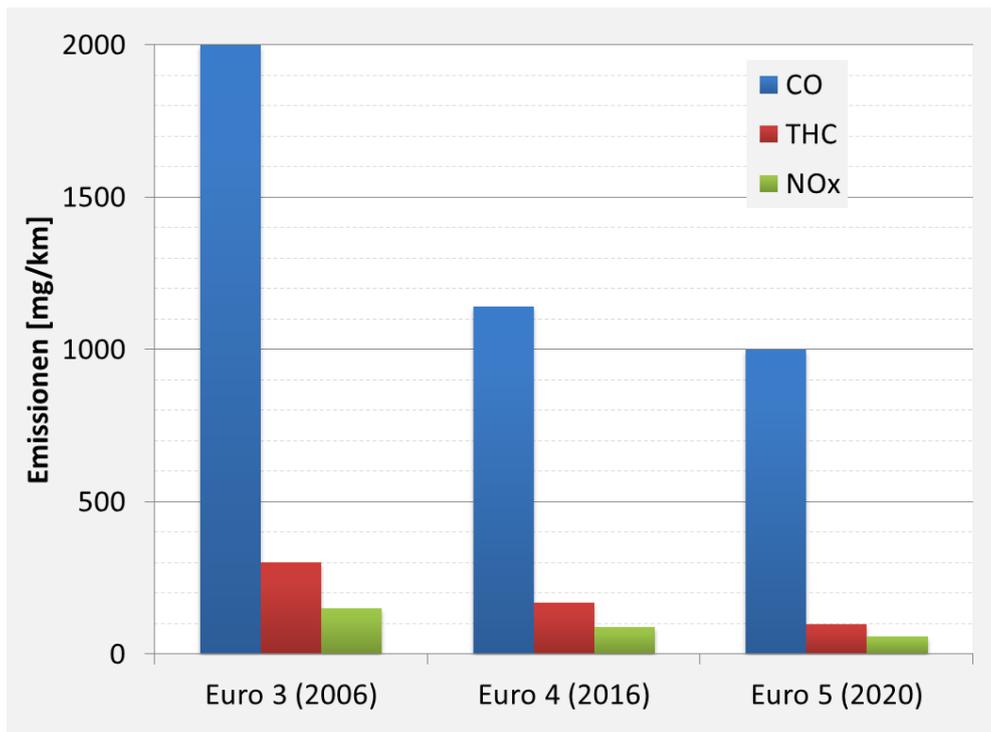


Abbildung 4-8: Europäische Emissionsgesetzgebung

4.1.3.2 Rasenmäher:

- Handhabung, Zuverlässigkeit und Robustheit

Ein Rasenmäher stellt ein Arbeitsgerät dar, daher sind die einfache Handhabung, die Zuverlässigkeit und die Robustheit des Gerätes die bedeutendsten Kriterien für den Nutzer. Beim Einsatz des Gerätes wird normalerweise keine Rücksicht auf Warmlauf, schwierige Umgebungsbedingungen wie Nässe, hohe Dauer- oder Spitzenlasten, Hitze und Ähnliches geachtet. Der Start sollte bei hohen und niedrigen Temperaturen gleichermaßen leicht funktionieren. Da alle handgeführten Rasenmäher per Seilzug gestartet werden und dies bei schlechten Starteigenschaften schnell überaus mühsam ist, wird dies als sehr negativ empfunden. Auch der einwandfreie Lauf sollte unter unterschiedlich widrigen Umständen, wie unmittelbare Last nach dem Start, hohe oder niedrige Luftfeuchtigkeit und Temperatur, etc. gegeben sein.

- Schnittleistung

Ein kraftvoller Motor und eine dementsprechend hohe Schnittleistung sind vor allem für Nutzer bei größeren Rasenflächen von Bedeutung. Da der Mäher normalerweise in einer konstant gehaltenen Gasstellung und von einem Regler gesteuerten Schnittrehzahl betrieben wird, spielt das subjektive Leistungsempfinden eine große Rolle. Die Reaktionsgeschwindigkeit des Reglers auf Lastsprünge sowie die Schwungmasse und das Drehmoment des Motors inklusive Mähmesser lassen die Drehzahl dabei entsprechend einbrechen und geben bei guter Auslegung ein subjektives Gefühl der höheren Motorleistung. Die Arbeitsdauer ist bei Privatanwendern zwar wichtig aber eher subjektiv beurteilt. Vor allem für professionelle Grünflächenpflegedienste ist jedoch eine hohe Schnittleistung und damit eine kurze Arbeitsdauer wirtschaftlich bedeutend und ein wichtiges Argument.

- Schnittbild

Das Schnittbild ist für alle Rasenpfleger von Bedeutung, wird jedoch vom

Gartenliebhaber als Anwender sicherlich am kritischsten betrachtet. Beeinflusst wird das Schnittbild unter anderem durch die Motordrehzahl, die Messerschärfe oder den Schnittvorschub respektive die Fahrgeschwindigkeit.

- Geräuscentwicklung

Die Geräuscentwicklung ist sowohl von Gesetzgeber limitiert wird aber auch durch den Nutzer und dessen unmittelbare Umgebung als unangenehm empfunden. Dadurch stellt das Arbeitsgeräusch eines der wichtigsten Kriterien für den Rasenmäher dar. Maßgeblichen Einfluss darauf hat die Geschwindigkeit des Schnittmessers und somit die Motordrehzahl.

- Verbrauch

Dem Verbrauch wird vom privaten Nutzer wenig Beachtung geschenkt. Nur die mögliche Mähzeit zwischen den notwendigen Betankungen ist von Bedeutung, da die Unterbrechung als unangenehm empfunden wird. Gegenüber dem finanziellen Aufwand für einen PKW verlieren die Kosten für den Betrieb des Rasenmähers an Relevanz. Wiederrum dominieren hier subjektive Empfindungen. Bei professionellen Rasenpflegediensten stellen die Betriebskosten sehr wohl einen wichtigen Posten in der betrieblichen Abrechnung dar.

- Abgasgesetzgebung

Eine Abgasgesetzgebung für diese und ähnliche Arbeitsmaschinen existiert zwar, ist jedoch von den Grenzwerten her im Vergleich zur Gesetzgebung der Automobilindustrie deutlich entfernt. Es lassen sich einige und auch schon ältere Veröffentlichungen zu den toxikologischen Auswirkungen der Abgasbestandteile finden, ein Bewusstsein dafür kann aber in Käuferkreisen kaum festgestellt werden.

- Laufleistung

Eine lange Laufleistung ist für alle Kundensegmente von Relevanz, wobei die Arbeitsstundenzahl das Bewertungskriterium darstellt.

- Produktionskosten und Gerätepreis

Die Produktionskosten und der Gerätepreis sind die wichtigsten Kriterien in diesem Segment. Vor allem der Privatkunde greift eher zum günstigeren Produkt als zur höheren Qualität oder der renommierten Marke. Höhere Gerätekosten lassen sich nur mit sehr guten Argumenten vertreten. Auch der professionelle Anwender muss auf die Anschaffungskosten achten, die Qualität und die dadurch mögliche lange Einsatzdauer spielen aber eine wesentlich wichtigere Rolle.

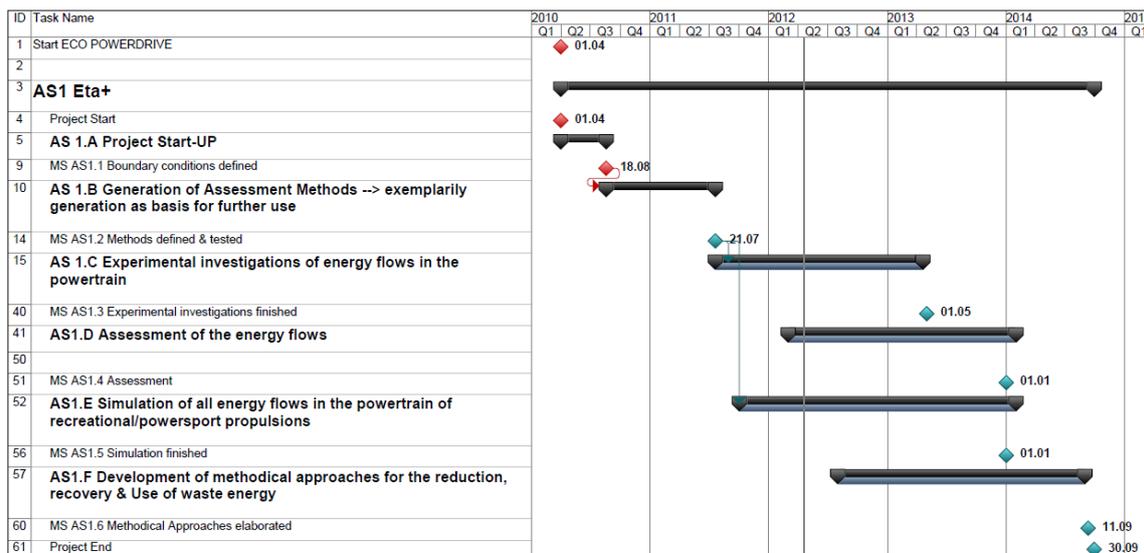


Abbildung 4-9: Förderantrag Projektplanung mit Work Packages und Milestones [72]

In Abbildung 4-9 ist die für den Förderprojektantrag entworfene Zeitplanung zum Projekt in Form eines Gantt Charts dargestellt. Darin enthalten ist eine erste Einteilung der Arbeiten für das Projekt und die dazugehörige Abschätzung des zeitlichen Aufwandes. Dieser Zeitplan diente wiederum als Input für die Definition der Projektrahmenbedingungen.

Work Packages und Milestones:

1. Projektstart
 - Milestone 1: Projekt gestartet
 - Milestone 2: Randbedingungen definiert
2. Definition der Bewertungsmethoden
 - Milestone 3: Methoden definiert und getestet
3. Experimentelle Untersuchung aller Energieströme in den Geräten
 - Milestone 4: Experimentelle Untersuchungen abgeschlossen
4. Bewertung der Energieflüsse in Bezug auf das Effizienzpotential
 - Milestone 5: Bewertung abgeschlossen
5. Entwicklung von Lösungsansätzen für die Effizienzsteigerung und Verlustenergienutzung
 - Milestone 6: Ausarbeitung der Konzepte abgeschlossen
 - Milestone 7: Projekt abgeschlossen

Die zur Verfügung stehenden technischen Untersuchungsmöglichkeiten wie z.B. die am Institut oder bei den Partnern vorhandenen Prüfstände, Simulationswerkzeuge, das Personal oder das spezialisierte technische Know-how und Ähnliches bildeten dabei einen umfassenden Projektrahmen. Daraus wurde ein detaillierter Projektplan erarbeitet und die Zeit- und Ressourcenplanung für einzelne Work Packages eingeteilt. Milestones am Ende von Phasen oder Projekteinhalten bildeten dabei zentrale Eckpunkte, um den Verlauf der Arbeiten nachverfolgen und überprüfen zu können. Mit den bis hierhin erlangten Erkenntnissen wurde ein Projektablauf skizziert und genauer geplant, siehe Abbildung 4-10.

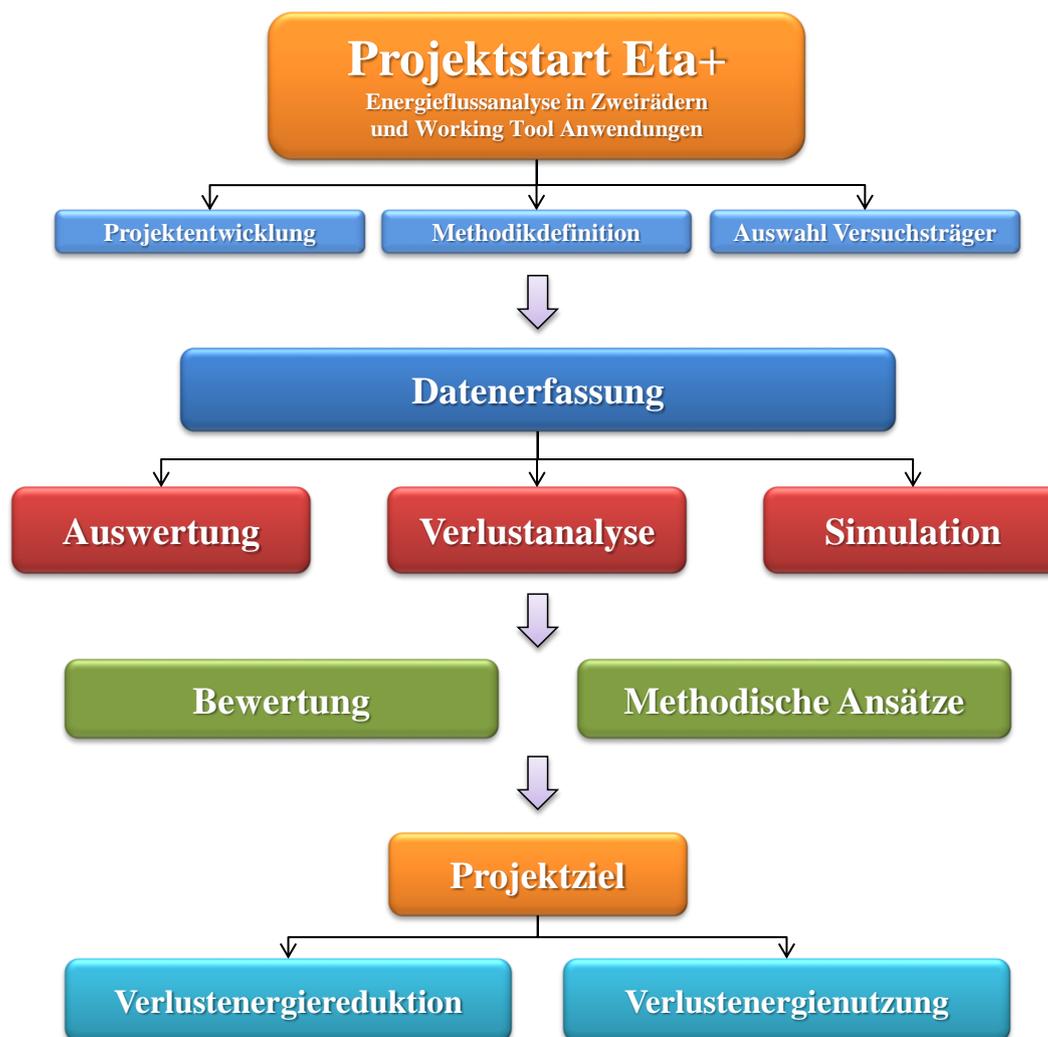


Abbildung 4-10: Projektablauf Eta+

4.1.4 Review Definitionsphase

Für die kritische Reflexion der Definitionsphase wird zum besseren Verständnis auf die Inhalte aus den verschiedenen Abschnitten unter Kapitel 3 hingewiesen, die sich mit dem Themen Evaluierung (Kapitel 3.3.3), Reflexion (Kapitel 3.4), oder Review in der Definitionsphase (Kapitel 3.5.1.4) beschäftigen. Eine Bewertung der Definitionsphase erfolgte unter anderem unter den Gesichtspunkten der Potentialbewertung und der Aufwandsabschätzung.

Die Auseinandersetzung mit der Technologie und des Einsatzbereiches der Versuchsträger zeigte Potentiale zur Produktverbesserung auf. Vor allem beim Rasenmäher kann der Einsatz von moderner Technologie in vielen Bereichen Fortschritte bringen aber auch beim Motorrad wird noch Standardtechnologie verwendet und es könnten Einsatzmöglichkeiten für modernere Technologien gefunden werden. Die Wirtschaftlichkeit ist jedoch bei beiden Versuchsträgern ein kritischer Punkt. Da dies ein Forschungsprojekt war, wurden verschiedene technische Lösungen verfolgt, es sollte dabei aber immer die wirtschaftliche Machbarkeit im Hinterkopf behalten werden. Die Wünsche der Projektpartner zeigten, dass dahingehend Lösungen, die eventuell den Weg in die Serienentwicklung finden könnten, bevorzugt wurden.

Überlegungen zur Aufwandsabschätzung zeigten, dass für das Motorrad ein einfacher Rollenprüfstandsversuch ausreicht, um den Gesamtwirkungsgrad des Systems zu ermitteln. Dabei wird der verbrauchte Kraftstoff gemessen und die effektiv erzeugte Vortriebsleistung über die Rolle des Prüfstands abgenommen. Für eine vertiefte Analyse war die Bewertung der

energetisch relevanten Unterkomponenten im System notwendig. Dazu mussten alle Energieflüsse zuerst qualitativ und in weiterer Folge quantitativ erfasst werden, um die Darstellung der Energien zu erhalten. Am Motorprüfstand kann dies für den Motor und das Getriebe erfolgen, am Rollenprüfstand für den restlichen Antriebsstrang. Ein Problem stellten die begrenzten Möglichkeiten des zur Verfügung stehenden Rollenprüfstands dar, wodurch das volle Potential des Motorrads nicht getestet werden konnte. Starke Beschleunigungen waren über die Kraftübertragung Rad-Rolle und die Leistungsgrenze der Prüfstandbremse limitiert. Auch Bremsmanöver können am Rollenprüfstand nur rein über das Hinterrad abgebildet werden, was das reale Bremsen, welches zu ca. 60 % am Vorderrad erfolgt nur bedingt widerspiegelt. Eine Messung der Betriebszustände im Motorrad während der Realfahrt im Straßenverkehr war nur aufwändig durchführbar. Am Zweirad herrschte Platzknappheit und die Messtechnik musste dabei in Zusatzkoffern untergebracht werden. Der Umwelteinfluss, vor allem durch Nässe bedurfte eines Schutzes der Sensorik und der Datenlogger. Weiters war die Bordstromversorgung in der Regel nicht für eine höhere Belastung ausgelegt, was zusätzliche Aufwände zur Versorgung mit sich brachte. Passende Datenerfassungssysteme waren zum Teil am Institut vorhanden, für eine komplette Messung hätten jedoch noch weitere Messeinrichtungen beschafft werden müssen (z.B. eine Hinterradfelge mit Drehmomentmessung). Aus Veröffentlichungen zu Versuchen im PKW konnte auch erkannt werden, dass klar reproduzierbare Messungen im Realbetrieb schwierig durchzuführen sind. Unterstützung zum Abschätzen der Leistungen im Fahrbetrieb bot eine Längsdynamiksimulation. Am Institut waren Lizenzen und Know-how für *Matlab-Simulink* verfügbar [83]. Wichtig war jedoch, die Datengrundlage für die Simulation aus Motorprüfstandversuchen zu erhalten und das Simulationsmodell über Rollenprüfstandsfahrten abzugleichen.

Um den Gesamtwirkungsgrad des Rasenmähers zu ermitteln, war die Messung der Schnitt- und Antriebskräfte notwendig und der Kraftstoffverbrauch musste erfasst werden. Durch ein bereits vorhandenes Chassis mit installierter Drehmomentmessung war der Realtest am Gerät zu Beginn die sinnvollste Variante. Zur Kraftstoffmessung am Gerät war am Institut allerdings keine passende Messtechnik vorhanden, daher musste diese am Motorprüfstand vorgenommen werden. Der am Institut verfügbare Prüfstand konnte auch hochtransient betrieben werden und das Abfahren von Drehmoment- oder Drehzahlvorgaben aus den Realmessungen war dabei möglich. Die gemessenen Lastverläufe konnten dadurch wiedergegeben werden, wobei zusätzlich eine Abgasanalyse durchführbar war, da der Prüfstand über eine entsprechende Messtechnik verfügte.

4.2 Analysephase *Eta+*

Wiederum ist die zusammenfassende Darstellung des Ablaufschemas der Analysephase in Abbildung 4-11 wiedergegeben. Das Vorgehen in dieser Phase ist äquivalent zu der Methodikbeschreibung in Kapitel 3.5.2 auf Seite 35 zu sehen.

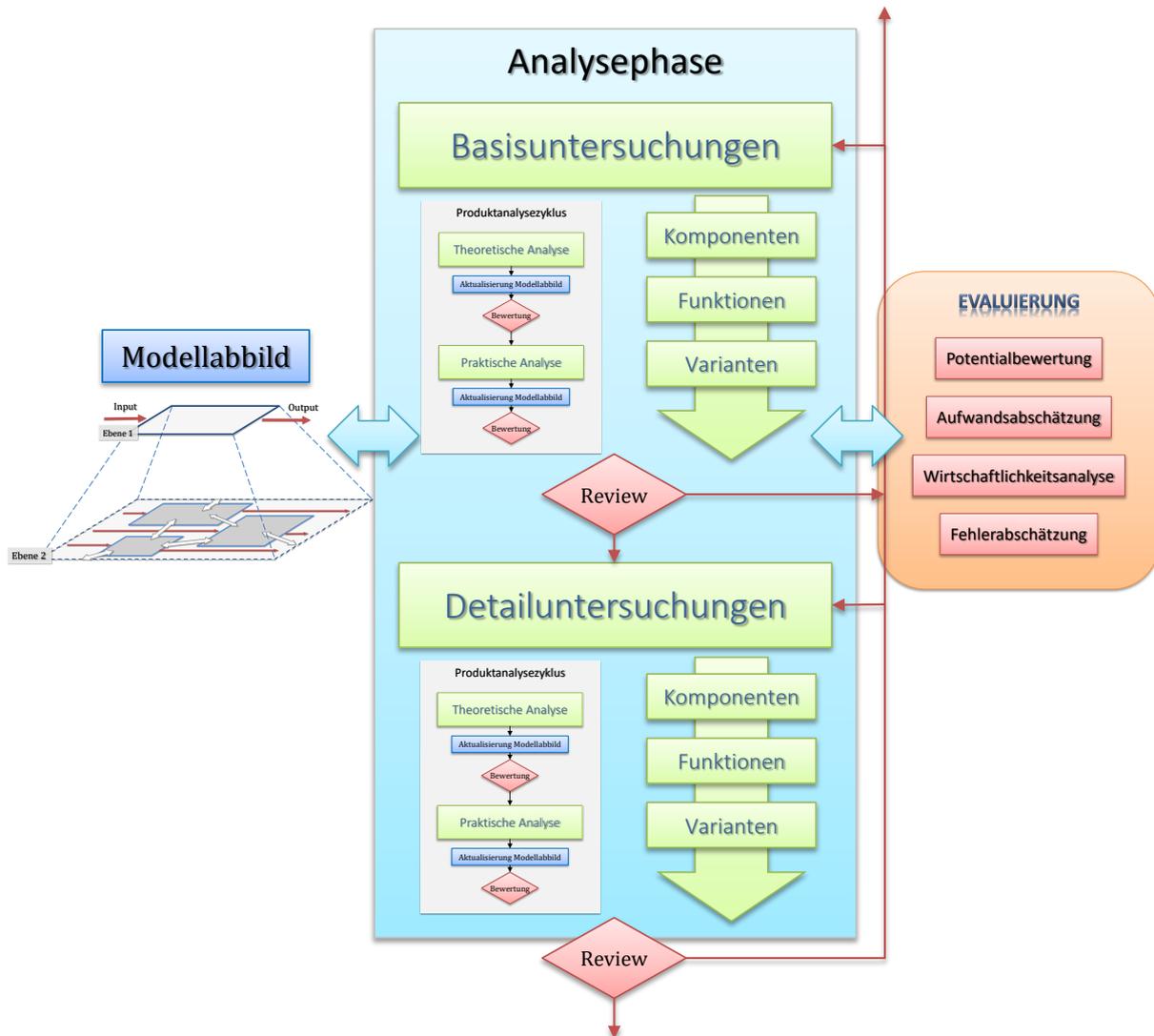


Abbildung 4-11: Analysephase im Detail

Auf die grundsätzliche Betrachtung der Versuchsfahrzeuge und deren Komponenten, wie sie in der Definitionsphase begonnen wurde, folgte nun eine schrittweise vertiefende Analyse der Versuchssysteme. Von der qualitativen Energieflussanalyse mit Hilfe der Theorie zu den Versuchsfahrzeugen und der direkten Arbeit an den Versuchobjekten wurde zu einer quantitativen Analyse und genauen Datenerfassung übergegangen. An beiden Fahrzeugen erfolgten dabei die Verlustanalyse des Antriebsstrangs und dessen Einzelkomponenten. Für die Längsdynamiksimulation des Motorrades mussten die notwendigen Eingangsgrößen definiert werden, um sie in Messungen zu erfassen. Für das Motorrad existierte bereits ein gut einsetzbarer Referenzzyklus, der Worldwide Harmonized Motorcycle Emission Test Cycle (WMTC)[79], um angenäherte Realfahrbedingungen am Prüfstand oder in der Simulation abbilden zu können. Für den Rasenmäher waren nur Referenzmesspunkte aus der Abgasgesetzgebung vorhanden, wobei in keiner Weise Erfahrungen bestanden, wie gut diese die realen Bedingungen abbilden. Daher wurde hier zuerst die Erfassung des Lastkollektivs am Gerät durchgeführt und darauf folgend der

Motorprüfstandsversuch bearbeitet. Wichtig bei allen Untersuchungen war die genaue und reproduzierbare Abbildung der Flüsse im Energiehaushalt der Systeme, wobei auch versucht wurde, die Vorgänge aufgrund von dynamischen Belastungen mit zu erfassen. Die Analyse der Daten sollte im weiteren Schritt die energetischen Schwachstellen aufzeigen und Möglichkeiten für eine Effizienzsteigerung liefern.

4.2.1 Basisuntersuchungen

Als erster Schritt in der Basisuntersuchung wurde eine einfache Betrachtung des Istzustandes der Systeme erarbeitet, um der Projektgruppe einen Überblick zu verschaffen. Aus der durchgeführten Literaturrecherche wurde versucht Referenzgrößen zu entnehmen, um eine Bewertung der Versuchsträger über eine Wirkungsgradanalyse zu ermöglichen. Die vorliegenden Systeme besitzen einen Gesamtwirkungsgrad, welcher sich über den Zusammenhang

$$\eta = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} \quad (4-1)$$

definiert. Den Aufwand stellt die in Form von Kraftstoff zugeführte Brennstoffenergie dar. Diese wird in Relation zur genutzten mechanischen Arbeit, also der zuvor definierten abgegebenen Nutzenergie zur Überwindung der Fahrwiderstände oder der Schnittkraft gesetzt. Der verbleibende Rest geht, über Verlustenergie in Form von Wärme und Abgasenthalpie an die Umgebung verloren. Bei diesem Vorgang erfolgt eine Umwandlung von chemisch gebundener Energie in mechanische Energie und Wärme.

4.2.1.1 Motorrad

Im Motorrad fließt die Nutzenergie in die Überwindung der Fahrwiderstände und dem daraus folgenden Vortrieb des Fahrzeugs. Eine häufig verwendete Vergleichsgröße für die Effizienz eines Straßenfahrzeugs ist die Angabe des Kraftstoffverbrauchs in Litern bezogen auf die zurück gelegte Distanz in Kilometern. Gumpesberger [34] gibt in einer Analyse zum Antriebsaggregat des hier untersuchten Motorrads 3,4 l/100 km während der Konstantfahrt bei 90 km/h und 4,5 l/100 km bei 120 km/h an, die Messmethodik ist dabei nicht näher beschrieben. Der Verbrauch in Realfahrt auf der Landstraße wird hier mit „deutlich unter 5 Liter“ angegeben. Werden diese Daten in einer Realfahrt erhoben, nehmen verschiedene Parameter wie z.B. die individuelle Fahrweise des Lenkers oder das aktuelle Verkehrsaufkommen Einfluss auf den ermittelten Wert und erschweren es, ein reproduzierbares Ergebnis zu erhalten. Einer der Praxistests eines Motorradmagazins [32] ermittelt unter anderem den Benzinverbrauch dieses Versuchsmotorrads, wie in Tabelle 4-1 ersichtlich ist.

Tabelle 4-1: Testverbrauch BMW F 800 R [32]

Teststrecke	l/100km
Autobahnverbrauch bei konstantem Tempo 100 km/h	3,78
100 km Landstraßenrunde, bei sehr defensiver Fahrweise	3,88
Landstraße mit sportlicher Fahrweise	4,30
Bergiger Rundkurs mit vielen Spitzkehren	5,01
Autobahnfahrt mit Maximalgeschwindigkeit, 210 km/h	9,32

In einer weiteren Veröffentlichung von Schmieder [73] werden die Testverbräuche unterschiedlicher Motorräder in Konstantfahrt auf der Autobahn bei 130 km/h und bei der Fahrt auf einem definierten Landstraßenabschnitt verglichen. Bei dem Test mit 130 km/h werden Werte

zwischen 4 und 7,9 l/100 km angegeben, für den Landstraßentest 1,9 – 7,4 l/100km. Werte ab 3,4 l/100km werden durch Motorräder ab 650 cm³ erzielt und können somit für einen Vergleich herangezogen werden. Angegeben wird der Verbrauch dabei in Tabelle 4-2 in Liter pro 100 Kilometer. Als Vergleich zwischen den Referenzmotorrädern und der BMW F 800 R konnte am besten die Landstraßenfahrt heran gezogen werden. Fahrzeuge mit ähnlichem Hubraum und ähnlicher Leistung sind etwa die Yamaha TDM 900 A, die mit 4,3 l auf 100 km gleich abschneidet wie die F 800. Die Ducati Monster 696 mit etwas weniger Hubraum und Leistung gibt sich deutlich sparsamer während die Aprilia NA 850 Mana mit geringfügig mehr Hubraum aber weniger Leistung einen klar höheren Verbrauch aufweist. Für die erste Wirkungsgradabschätzung wurden nun diese Vergleichswerte heran gezogen. Die BMW F 800 R mit 4,3 l/100 km bewegt sich dabei im Mittelfeld der oben aufgelisteten Motorräder. Es sind nur drei besser im Verbrauch und neun schlechter, das Beste mit 3,7 l/100 km und das Schlechteste mit 5,1 l/100 km. Durch diese Recherche konnte abgeschätzt werden, dass sich die Antriebs-einheit der BMW F 800 R im Vergleich zur Konkurrenz im Bereich der höheren Wirkungsgrade befindet.

Tabelle 4-2: Testverbrauch Vergleichsmotorräder [73]

Modell	130 km/h l/100 km	Landstrasse l/100 km	Hubraum cm³	Leistung kW/PS
Aprilia NA 850 Mana	6,5	4,8	839	56/76
BMW F 800 GS	5,2	5,0	798	63/85
Ducati Monster 696	4,7	3,7	696	58,8/80
Ducati 848	-	5,2	849,4	98,5/134
Gilera GP 800	-	4,9	839	50,5/69
Honda CBF 600 S	5,4	4,6	599	57/78
Honda Hornet 600	6,7	4,7	599	75/102
Kawasaki Z 750	5,5	4,9	748	81/110
KTM 690 Duke	5,1	3,9	654	48/65
Suzuki V-Strom 650	4,8	3,9	645	51/69
Suzuki Intruder M 800	6,1	4,4	805	39/53
Triumph Street Triple	5,8	5,1	675	78/106
Yamaha TDM 900 A	4,2	4,3	849	63/86

Der exakte Gesamtwirkungsgrad des Versuchsträgers wurde nun über einen Rollenprüfstandsversuch erhoben. Für die Ermittlung des Aufwandes war die Messung des Kraftstoffmassenstroms notwendig. Messtechnik dazu war am Prüfstand in Form eines hochauflösenden Coriolis-Durchflussmessers verfügbar. Für den Abgriff der Messgröße wurde über geringe Umbauten der Durchflussmesser in die Kraftstoffleitung integriert. Den Nutzen bildete die an die Prüfstandseinrichtung abgegebene Antriebsleistung, welche von der Prüfstandsmesstechnik erfasst und aufgezeichnet wurde. Weiters wurde versucht, Konstantgeschwindigkeiten in Anlehnung an reale Fahrbedingungen zu finden. Es wurden dazu übliche Geschwindigkeitsbeschränkungen in Österreich herangezogen wie z.B. Ortsgebiet 50 km/h, Freilandstraßen beschränkt 70 km/h, Freilandstraßen unbeschränkt 100 km/h und Autobahn 130 km/h sowie maximale

Steigungen von Bergstraßen nach Tabelle 4-3.

Tabelle 4-3: Durchschnittliche Steigung ausgewählter Passstraßen in Österreich

Pass	Steigung lang [%]	Steigung kurz [%]
Großglockner	5,7	7,9
Bielerhöhe	6,5	8,5
Arlberg	6,6	7,1
Turracherhöhe	4,1	7,8
Timmelsjoch	4,8	6,4
Soboth Pass	2,6	4,3
Mittelwert:	6,0	

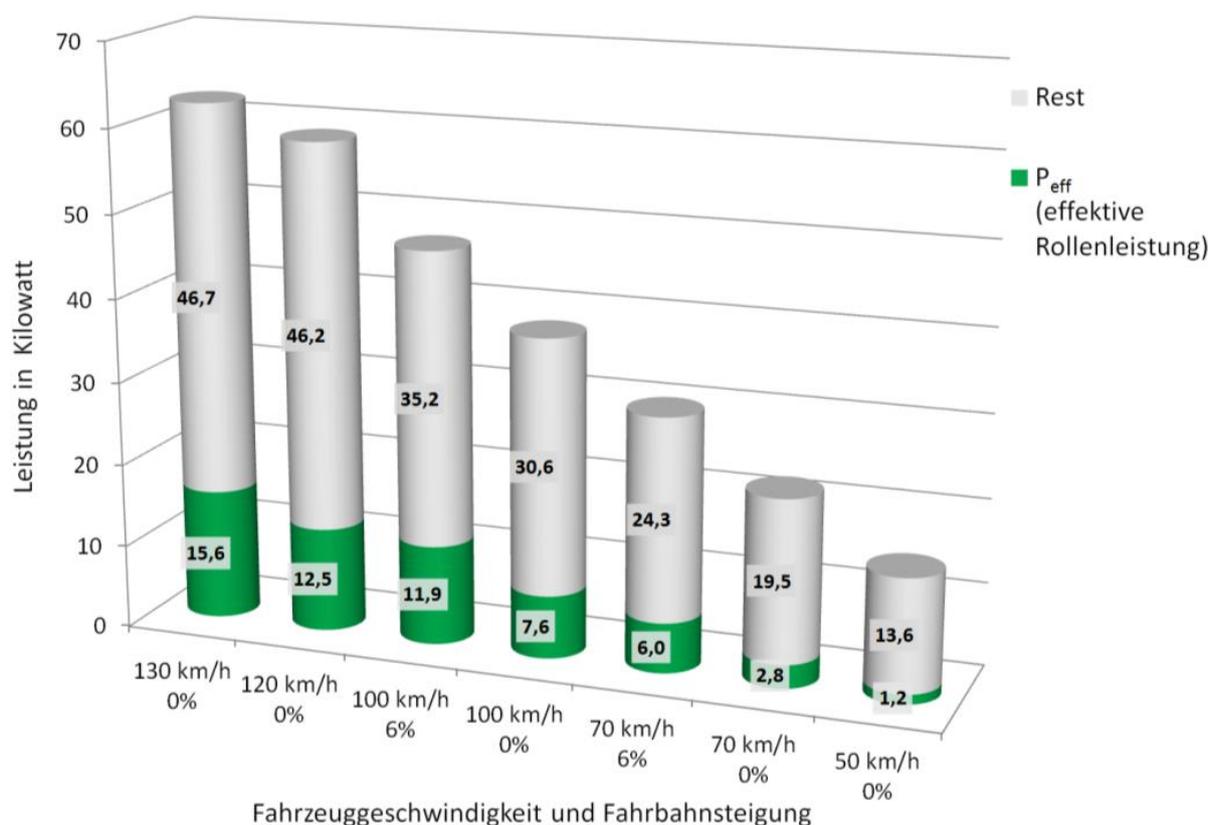


Abbildung 4-12: Absoluter Anteil der effektiven Rollenleistung an der zugeführten Kraftstoffleistung

Abbildung 4-12 zeigt die absolut aufgebrauchte Kraftstoffleistung in Kilowatt durch die Höhe der Säulen. Der Anteil der an der Rolle gemessenen effektiven Leistung ist in Grün dargestellt. Der effektive Wirkungsgrad η_e für den Versuchsträger stellt sich in folgender Beziehung dar:

$$\eta_e = \frac{P_e}{\dot{Q}_B} = \frac{M * \omega}{\dot{m}_B * H_u} \quad (4-2)$$

Die an die Rolle des Prüfstands abgegebene Leistung P_e und somit der Nutzen setzt sich aus dem an der Prüfstandsbremseinrichtung anliegenden Drehmoment M und der Winkelgeschwindigkeit ω zusammen. Der Aufwand \dot{Q}_B entspricht der im Kraftstoff gebundenen chemischen

Energie und ergibt sich aus dem Massenstrom des Kraftstoffes \dot{m}_B multipliziert mit dem unteren Heizwert des Kraftstoffes H_u .

In Abbildung 4-13 ist dieses Ergebnis in prozentuellen Werten abgebildet und spiegelt somit den effektiven Wirkungsgrad des Motorrads in den unterschiedlichen, konstanten Lastpunkten wieder.

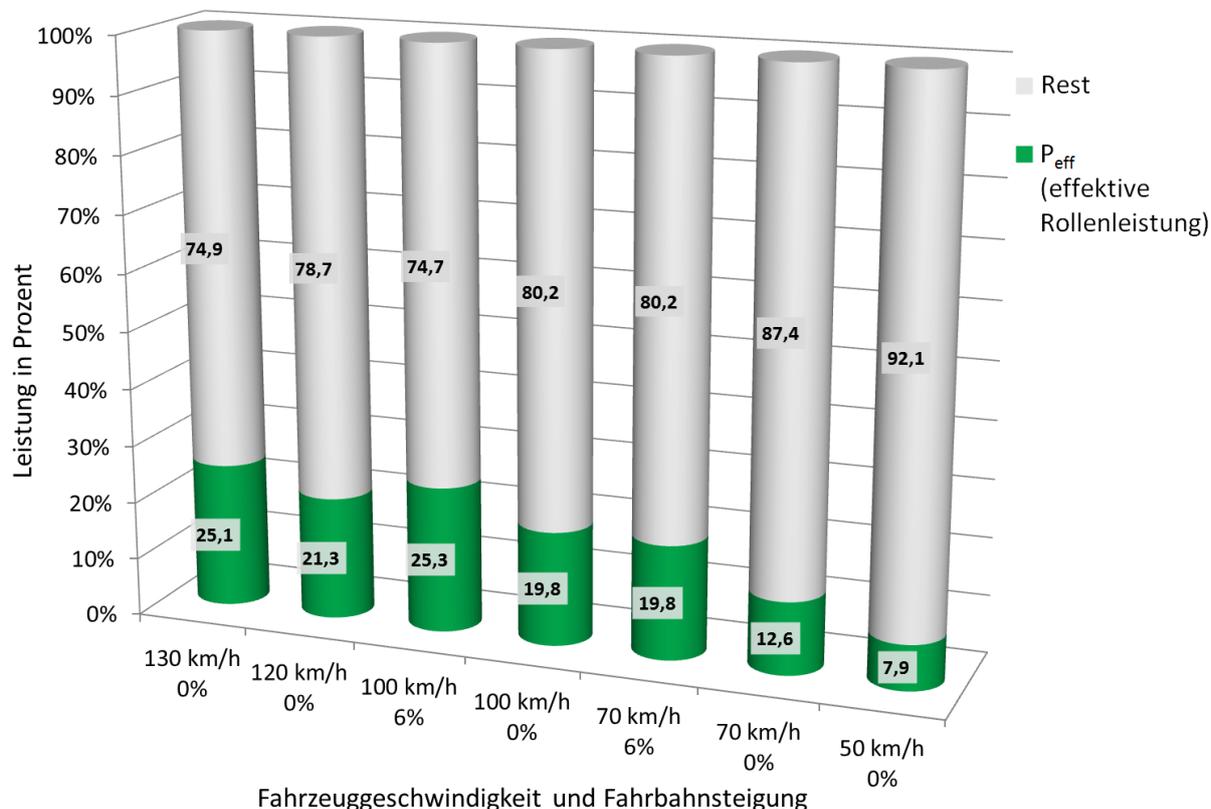


Abbildung 4-13: Prozentueller Anteil der effektiven Rollenleistung an der zugeführten Kraftstoffleistung

In Tabelle 4-4 sind die aus dem Rollenprüfstandsversuch erhaltenen Messdaten und Wirkungsgrade zusammengefasst.

Tabelle 4-4: Messdaten und Wirkungsgrad Rollenprüfstandsversuch

Geschwindigkeit	130 km/h	120 km/h	100 km/h	100 km/h	70 km/h	70 km/h	50 km/h
Steigung	0%	0%	6%	0%	6%	0%	0%
Drehzahl [min^{-1}]	5770	5780	4800	4820	3770	3760	2640
Gang	5	4	4	4	3	3	3
\dot{Q}_B [kW]	62,4	58,7	47,1	38,1	30,3	22,3	14,75
P_e [kW]	15,6	12,5	11,9	7,6	6,0	2,8	1,16
Kraftstoffverbrauch [l/100 km]	6,1	5,8	5,6	4,5	5,1	3,8	3,5
η_e [%]	25,1	21,3	25,3	19,8	19,8	12,6	7,9

Zuerst fällt der sehr geringe Wirkungsgrad bei 50 km/h auf, welcher trotz geringer Motordrehzahl sich lediglich im einstelligen Bereich befindet. Es wird angenommen, dass die Abstimmung des Motors für diese Lastpunkte eher ungünstig ausgelegt ist. Da dieser Lastpunkt jedoch eine Ortsdurchfahrt darstellt und bei klassischen Motorradtouren sicherlich des Öfteren

gefahren wird, konnte hier schon ein mögliches Verbesserungspotential ausgemacht werden. Beim Vergleich der Geschwindigkeitspunkte mit und ohne Steigung, z.B. 70 km/h ist sehr gut die aus der Literatur bekannte, klassische Lastabhängigkeit des Wirkungsgrades von Ottomotoren zu erkennen. Vor allem Drosselverluste durch die Lastregelung über eine Drosselklappe sind dafür verantwortlich und einer der klaren Nachteile eines Ottomotors. In der Entwicklungstätigkeit wird seit langem nach Möglichkeiten gesucht, z.B. über den Einsatz einer variablen Ventilhubsteuerung, um dieses Defizit zu reduzieren. Durch die steigende Geschwindigkeit zeichnet sich auch der mit dem Quadrat steigende Strömungswiderstand ab. Für eine Fahrt mit 130 km/h auf ebener Strecke muss etwa die doppelte Antriebsleistung als für 100 km/h aufgebracht werden. Zusätzlich ist bei diesem Versuchsobjekt aufgrund der „Naked“-Bauweise, also dem Weglassen der gesamten Verkleidung aus Stilgründen, ein erhöhter Strömungswiderstand bei höheren Geschwindigkeiten zu erwarten. Auch zu sehen ist, dass beim Vergleich von 120 km/h und 0 % Steigung mit 100 km/h und 6 % Steigung, trotz leicht steigender Last durch die deutlich höhere Drehzahl, der Wirkungsgrad zurückgeht. Dies kann auf die größeren Reibungsverluste des Motors und wiederum auf die Drosselverluste durch die geringere Drosselklappenöffnung zurückgeführt werden. Motoren, die im unteren Drehzahlbereich höhere Drehmomente aufweisen und daher niedertouriger gefahren werden, können hier wiederum von Vorteil sein.

4.2.1.2 Rasenmäher

Für den Rasenmäher war wesentlich weniger Datenmaterial zum Wirkungsgrad oder Kraftstoffverbrauch zu finden. Grundsätzlich wurde hier die Nutzarbeit für den Grasschnitt und bei selbstfahrenden Mähern für den Antrieb aufgewendet. In der Literatur sind immer wieder einfache Tests in Heimwerkerzeitschriften zu finden, welche aber keine Aussage über den Wirkungsgrad dieser Arbeitsmaschinen erlauben. Magazine veröffentlichen Artikel mit subjektiven Angaben für den Verbrauch und die Arbeitsleistung, konkrete Zahlen im realen Betrieb werden dabei aber nicht ermittelt. Im Test wird der Benzinverbrauch beim Mähen von 1000 m² Rasen nur mit sehr gut, gut und ausreichend bewertet [80]. Gemessene Benzinverbräuche mit Zahlenwerten werden im Artikel von M. Radke aufgeführt [66], jedoch wurden diese nur im Leerlauf gemessen. Die dazu angegebenen Werte für die Laufzeit in Minuten pro Liter Kraftstoff variieren dabei zwischen 90 min/l und 223 min/l. Wissenschaftliche Veröffentlichungen zu dieser Gerätegruppe waren in Bezug auf den Emissionsausstoß verfügbar und beinhalteten nur selten gemessene Kraftstoffverbräuche. In einer Studie zum Emissionsverhalten von Rasenmähern wurde der Verbrauch volumetrisch ermittelt [63]. Es werden dabei jedoch keine Angaben zur Temperatur und der Zusammensetzung des Kraftstoffes gemacht, lediglich der Standardwert von 0,74 g/ml wird für die Kraftstoffdichte angegeben. Kraftstoffverbräuche wurden dabei von Zweitakt- und Viertaktmotoren in einem Feldversuch sowie am Motorprüfstand im Milliliter pro Minute ermittelt. Bei den Zweitaktmotoren variierten die gemessenen Verbräuche zwischen 10,3 ml/min und 25,7 ml/min, bei den Viertaktmotoren zwischen 8 ml/min und 16,1 ml/min bei einer Last von 0,72 – 0,92 kW. Es wird angegeben, dass dieser Lastzustand als Mittelwert für die Last im realen Versuch gesehen werden kann. Genauere Angaben werden dabei nicht gemacht, wodurch die Bewertung des Betriebszustandes des Motors nicht möglich ist. Zum besseren Vergleich zur vorher angeführten Veröffentlichung werden die Ergebnisse auf min/l umgerechnet. Dies ergibt Werte von 97,1 – 38,9 min/l bei den Zweitaktern und 125 – 62,1 min/l bei den Viertaktern. Der Hersteller gibt eine empfohlene Rasenfläche von 2500 m² an, genaue Zahlen für die Schnittleistung pro Zeiteinheit, die einen Anhaltspunkt für eine Wirkungsgradbewertung geben würde, gab es jedoch nicht. Zum Motor des Rasenmähers konnten Werte aus der kalifornischen Abgaszertifizierung gefunden werden [9]. Für Kohlenmonoxid werden 402 g CO/kWh angegeben und für die Summe von Stickoxiden und Kohlenwasserstoffen 8 g NO_x+HC/kWh. Die Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs war dabei nicht vorgegeben.

Der im Versuchsobjekt verbaute Kawasaki FJ180V ist mit einem Hubraum von 179cm^3 ausgeführt und liefert $2,9\text{ kW} / 3,9\text{ PS}$ bei 2800 min^{-1} . Die empfohlene Rasenfläche für den Mäher wird mit 2500 m^2 angegeben und die Schnittbreite beträgt 53 cm . Im Vergleich dazu sind in Tabelle 4-5 ähnliche Rasenmäher aufgelistet.

Tabelle 4-5: Auflistung vergleichbarer Rasenmäher [33]

Modell und Motor	Schnittbreite cm	Rasenfläche m^2	Hubraum cm^3	Leistung kW/PS bei min^{-1}
Castelgarden Briggs & Stratton XLC 675	51	2.700	190	4,8/6,5 -
Cub Cadet B&S 750 Serie DOV	53	2200	160	2,8/3,8 2900
Castelgarden Honda GCV 190	51	2400	190	4,8/6,5 -
Castelgarden Honda GXV 160	50,5	2800	160	4/5,5 -
Castelgarden Honda GCV 160	51	-	160	4/5,5 -
Cub Cadet Briggs & Stratton 750 DOV	53	2200	160	2,8/3,8 2900
Cub Cadet Briggs & Stratton 800 Series	53	1800	175	3/4 2900
Wolf-Garten Briggs & Stratton DOV	53	2000	160	4/5,5 2900
Blisar Blisar Y179V	51	2000	173	3,6/4,9 3000

Es war leider nicht zu eruieren, wie die Empfehlung für die Rasenfläche zustande kommt. Wie der Projektpartner aus eigener Erfahrung sagen konnte, sind die Datenangaben der Motorenhersteller nicht verlässlich für den betrachteten Rasenmäher zu verwenden, da es oft notwendig ist, für spezielle Marktanforderungen das Setup der Originalmotoren zu verändern. Dies führt zu anderen Leistungs- und Drehmomentverläufen und zu einem abweichenden Verbrauch. Es war hier klar festzustellen, dass keine zuverlässigen Daten für den Versuchsträger oder vergleichbare Geräte zur Verfügung stehen.

Zum Wirkungsgrad des Rasenmähers konnte bis hier hin keine Aussage gemacht werden und Potentiale für eine Effizienzsteigerung konnten nur ganz grob abgeschätzt werden. Dies konnte unter anderem durch eine Gegenüberstellung der angenommenen, aktuellen Schnittleistung zu einer theoretisch möglichen erfolgen. Die Schnittleistung errechnet sich aus folgendem Zusammenhang:

$$P(W) = \frac{M(Nm) \cdot n(\text{min}^{-1}) \cdot 2\pi}{60} \quad (4-3)$$

Bei einer Arbeitsdrehzahl von 2800 min^{-1} und einem Drehmoment von rund 10 Nm errechnete sich daraus eine Schnittleistung von 2932 Watt . Da die Arbeitsdrehzahl des Rasenmähers aber unter der Leerlaufdrehzahl liegt, ergab sich dadurch ein Potential zur Leistungssteigerung. Liegt die Drehzahl bei angenommenen 2700 min^{-1} errechnet sich daraus eine Schnittleistung von 2827 Watt und daher eine Differenz von 105 Watt . Da die Drehzahl linear in die Leistungsrechnung einfließt, ergibt sich auch ein linearer Abfall der Schnittleistung mit der Drehzahl. Bei angenommenen 2600 min^{-1} besteht ein Potential von 210 Watt oder rund 8% , welches noch

genutzt werden konnte. Dies konnte als Argument für eine bessere Performance bei gleichem Grundmotor angeführt werden.



Abbildung 4-14: Drehmomentmessflansch

Ein baugleicher Versuchsrasenmäher mit Drehmomentmessflansch stand für die Untersuchungen zur Verfügung, zu sehen in Abbildung 4-14. Weiters war die Durchführung von Realmessungen am Testgelände des Projektpartners möglich. Dieses Gelände bietet unterschiedliche Lastbedingungen, angefangen von klassischem Rollrasen bis hin zu hohem, wildgewachsenen Grasgestrüpp. Aus diesen Gründen wurden zuerst die Lastanforderungen an den Versuchsträger im Realbetrieb erhoben. Die Beschreibung des Lastkollektivs für den Rasenmäher erfolgte über das vom Motor abgegebene Drehmoment an der Motorwelle und die dabei gefahrene Motordrehzahl. Für die Feldtests wurden drei verschiedene Rasentypen, die am Testgelände vorhanden waren definiert, zu sehen in Abbildung 4-15. Der Rasenmäher verfügt des Weiteren über eine variable Einstellmöglichkeit der Schnitthöhe und über einen Dreigang-Antrieb. Dies wurde bei der Planung der Versuchsfahrten mit berücksichtigt.



Abbildung 4-15: Rasentypen; links Rollrasen, Mitte Bauernwiese, rechts hohes Gras

Abbildung 4-16 zeigt die Auswertung der erfassten Daten bei einer Messfahrt am Rollrasen. Der obere Graph in Grün stellt den Verlauf des Motormomentes über die Zeit dar. Die schwarze Linie repräsentiert den über ein Polynom angenäherten, mittleren Verlauf des Drehmoments. Im unteren Graphen in Rot ist die Motordrehzahl aufgetragen.

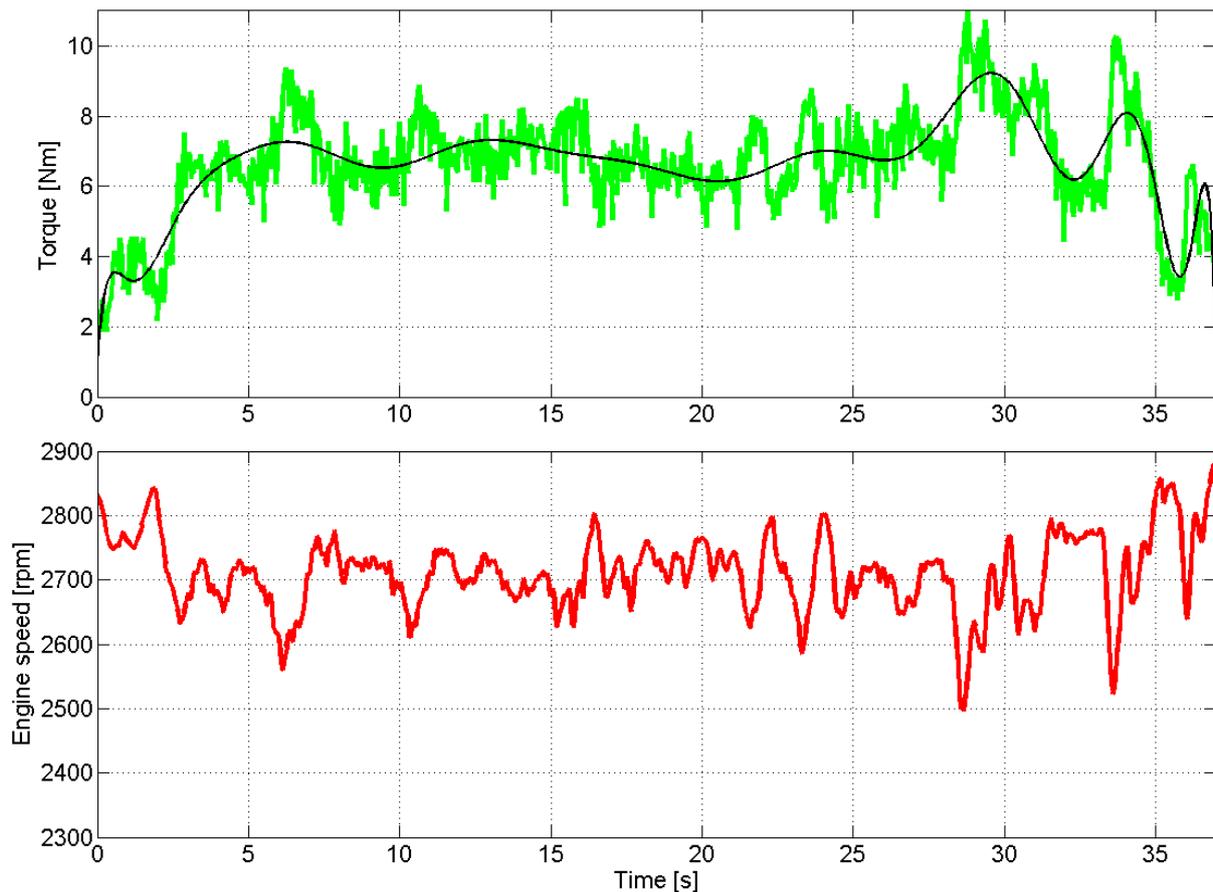


Abbildung 4-16: Verlauf von Motormoment und Drehzahl auf Rollrasen

Die Drehzahleinbrüche aufgrund von Spitzenlasten sind teils erheblich und gegen Ende der Messfahrt zeichnen sich stärkere Inhomogenitäten in der Rasendichte ab.

Grundsätzlich stellen sich die Daten des Mähvorgangs deutlich unruhiger dar, als zuvor angenommen und während des Mähens empfunden wurde. Die sich ergebende Abweichung der Schnittdrehzahl und somit Schnittleistung von der maximal möglichen, stellt das oben gezeigte Potential für das Gerät dar. Wird die Schnittleistung über die Dauer des Versuchs integriert, ergibt sich die dabei verrichtete Arbeit W , nach der Formel (4-4).

$$W(kWs) = \int_{\tau_0}^{\tau_1} \frac{M(Nm) \cdot n(\text{min}^{-1}) \cdot 2\pi}{60} d\tau \quad (4-4)$$

In der Analyse wurde die integrale Schnittarbeit über den Versuch der theoretisch machbaren Schnittarbeit bei 2800 min^{-1} gegenüber gestellt. Tabelle 4-6 listet die Ergebnisse der drei befahrenen Untergründe auf und Abbildung 4-17 sowie Abbildung 4-18 zeigen die entsprechenden Verläufe dazu. Die Bauernwiese zeigt hier mit der geringsten durchschnittlichen Drehzahl auch das größte theoretische Potential, obwohl sie von den getesteten Bewuchssorten das geringste mittlere Motormoment aufweist. In den graphischen Darstellungen werden die Skalierungen gleich gehalten, dadurch können die jeweiligen Charakteristika verglichen werden. Gut zu erkennen sind die deutlich höheren Schwankungen des Drehmoments bei gleichzeitig geringerem mittlerem Drehmoment in den Daten der Bauernwiese. Dies führt in der Regelung des Motors zu einer konstant niedrigeren Drehzahl und somit zum höheren theoretischen Potential. In der zu trägen Lastregelung konnte hier ein Nachteil des Systems gefunden werden.

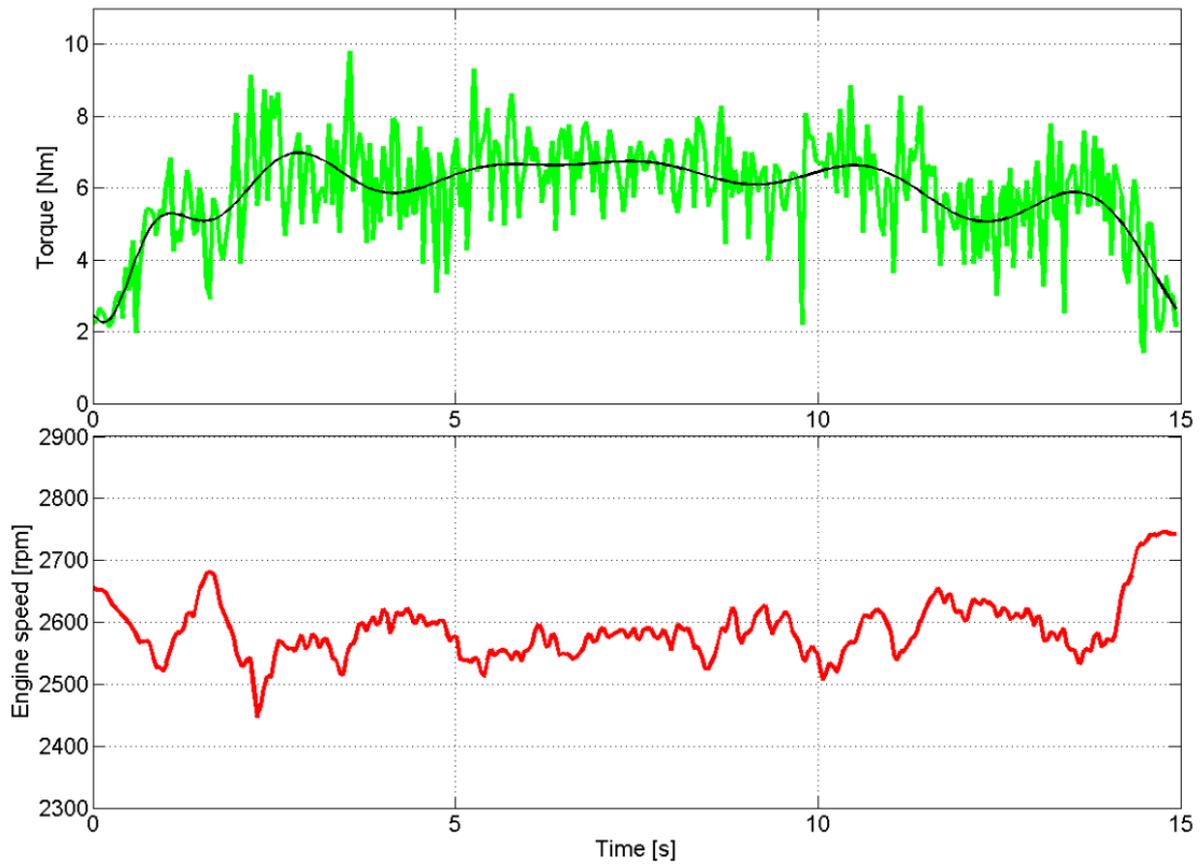


Abbildung 4-17: Verlauf von Motormoment und Drehzahl auf der Bauernwiese

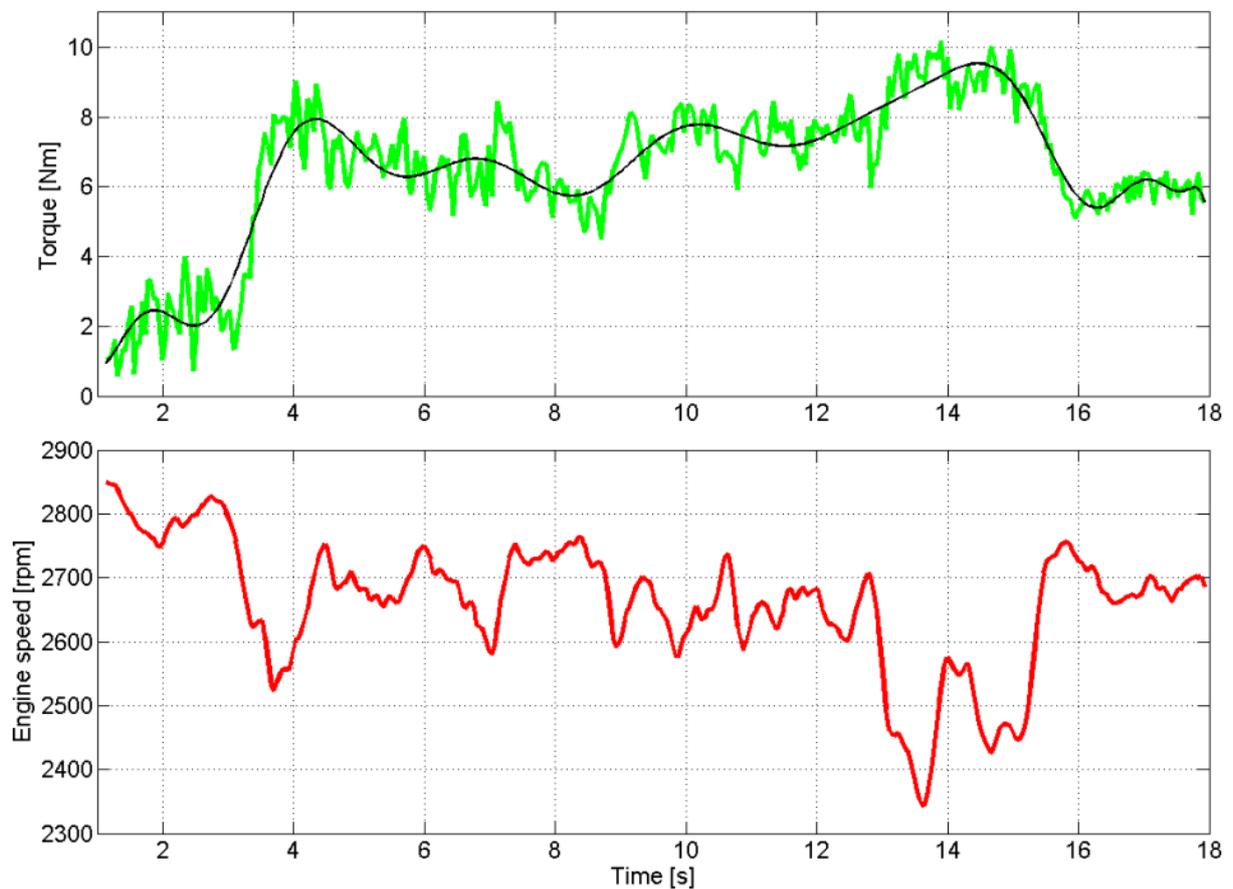


Abbildung 4-18: Verlauf von Motormoment und Drehzahl in hohem Gras

Das hohe Gras zeigt mit der teils harten und auch dichten Vegetation die höchsten Drehmomentspitzen und somit stärksten Drehzahleinbrüche. In Sekunde 14 kommt der Motor an seine Leistungsgrenze und bei länger anhaltender hoher Belastung wird der Motor zum Stillstand gebracht. Der Benutzer vermeidet das normalerweise durch Auskuppeln des Fahrtriebes und gleichzeitigem Wegheben des Messers vom Untergrund. Auch die mögliche Kompensation der starken Drehzahleinbrüche könnte vom Nutzer positiv empfunden werden und es ergab sich dadurch ein weiteres Potential zur Verbesserung des Rasenmähers.

Tabelle 4-6: Gegenüberstellung der theoretischen und praktischen Schnittwerte auf verschiedenen Untergründen

Rollrasen

Mittleres Motormoment über Test [Nm]	6,6
Mittlere Motordrehzahl über Test [min^{-1}]	2711
Testdauer [Sekunden]	37
Mittlere Wellenleistung [kW]	1,87
Wellenarbeit [kWs]	69,1
Theoretische mittlere Wellenleistung bei konstant 2800rpm [kW]	1,94
Theoretische Wellenarbeit bei konstant 2800rpm [kWs]	71,6
Theoretische Verbesserung [%]	3,64

Bauernwiese

Mittleres Motormoment über Test [Nm]	5,83
Mittlere Motordrehzahl über Test [min^{-1}]	2589
Testdauer [Sekunden]	14,9
Mittlere Wellenleistung [kW]	1,58
Wellenarbeit [kWs]	23,5
Theoretische mittlere Wellenleistung bei konstant 2800rpm [kW]	1,71
Theoretische Wellenarbeit bei konstant 2800rpm [kWs]	25,5
Theoretische Verbesserung [%]	8,44

Hohes Gras

Mittleres Motormoment über Test [Nm]	6,43
Mittlere Motordrehzahl über Test [min^{-1}]	2664
Testdauer [Sekunden]	17,9
Mittlere Wellenleistung [kW]	1,78
Wellenarbeit [kWs]	31,8
Theoretische mittlere Wellenleistung bei konstant 2800rpm [kW]	1,88
Theoretische Wellenarbeit bei konstant 2800rpm [kWs]	33,8
Theoretische Verbesserung [%]	6,08

In Abbildung 4-19 ist die Drehzahl und das Drehmoment am Rollrasen in zwei Varianten der

Verteilungsdarstellung aufgetragen. Zum einen zeigen im Scatter-Plot die Kreise in Blau jeweils einen Mittelwert pro Motorzyklus, also bei einem 4-takt Motor über 720° Kurbelwinkel. Zum anderen wird in den Balkenhistogrammen in Grün die Verteilung des Drehmomentes über den Versuch dargestellt und in Rot die Verteilung der Drehzahl. Die schwarzen Linien beschreiben die jeweiligen Best-Fit Kurvens über alle Datenpunkte.

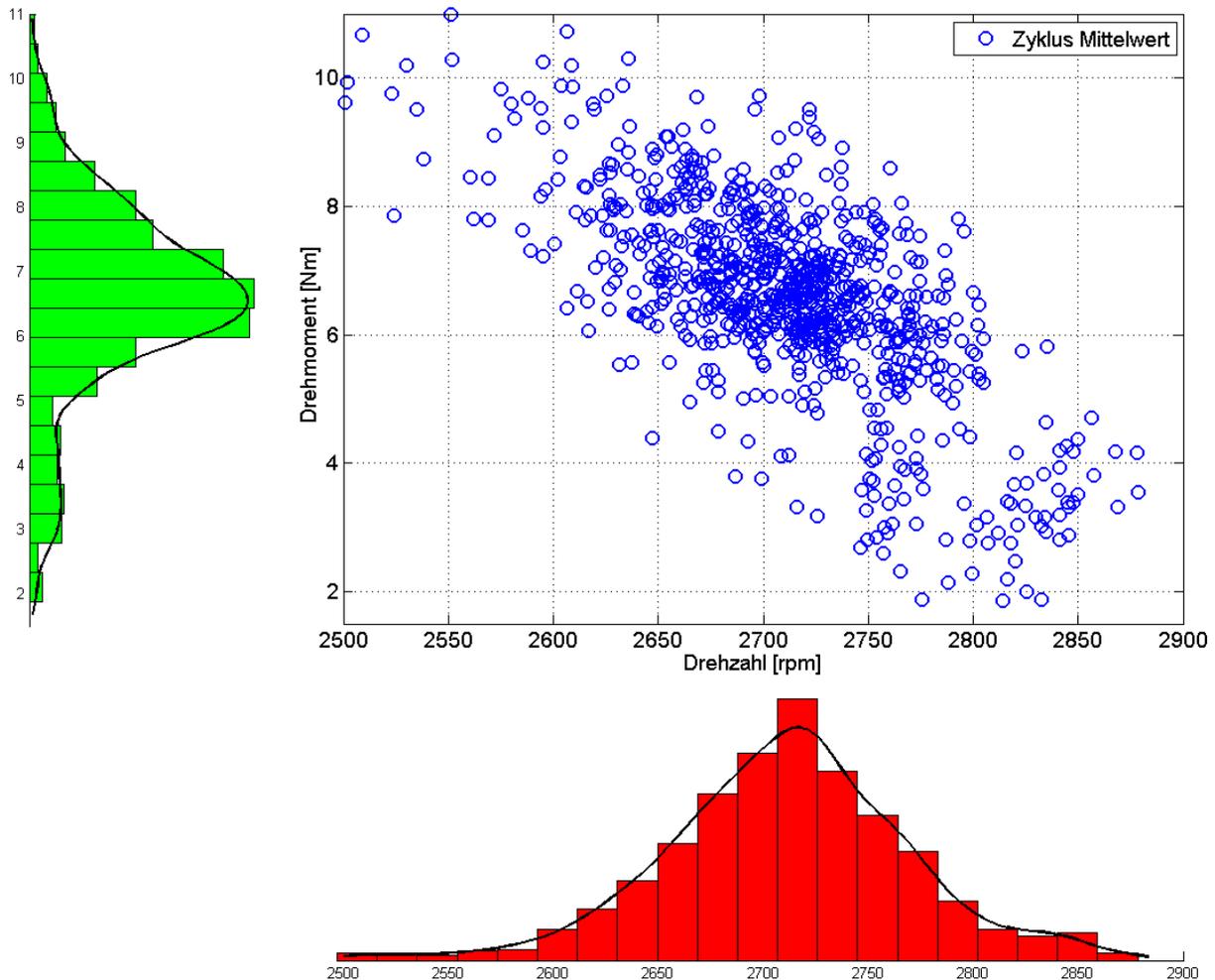


Abbildung 4-19: Lastpunktverteilung auf Rollrasen

Bei der Drehzahl ist eine annähernd symmetrische Verteilung zu erkennen, wobei der Teil unterhalb der mittleren Drehzahl etwas mehr Anteil beinhaltet. Die Verteilung des Drehmomentes dagegen zeigt sich klar unsymmetrisch und der Schwerpunkt liegt hier deutlich bei den höheren Werten. Des Weiteren können Ausreißer aufgrund von Spitzenlasten gut ausgemacht werden. Die Verteilungscharakteristik von rechts unten nach links oben im Scatter-Plot beschreibt das Regelverhalten des Systems und die Steigung dieser Charakteristik spiegelt die Reaktionsfreudigkeit Systems wider. Der Hauptbereich der Motorbetriebspunkte liegt etwa zwischen 6 und 8 Nm sowie 2650 und 2750 min^{-1} . Die minimalen Drehzahlen betragen auf dem Rollrasen 2500 min^{-1} , auf der Bauernwiese 2450 min^{-1} und im hohen Gras 2350 min^{-1} . In der Betrachtung der Schnitтарbeit zeigte sich ein klarer Nachteil durch den systembedingten, starken Drehzahleinbruch während des Mähens. Diese Drehzahldifferenz ist jedoch notwendig, um die notwendige Regelgröße für die Laststeuerung zu erhalten. Das mechanisch getriebene Regelorgan führte somit zu einem Verlust an möglicher Schnitтарbeit. Stellt man die Arbeit des Realversuchs der theoretisch machbaren Arbeit bei konstanter Drehzahl gegenüber, ergeben sich Potentiale von 3,6 % bis 8,4 %.

Aus der Betrachtung der aus den Versuchen erhaltenen Motorbetriebspunkte folgten weitere

Potentiale. Der Hauptbereich liegt dabei ungefähr zwischen 6 und 8 Nm sowie 2600 und 2750 min^{-1} . Bei einem vom Hersteller angegebenen maximalen Drehmoment von 10 Nm bei 2400 min^{-1} besteht im mittleren Schnittbetrieb noch ausreichend Kraftreserve. Kurzfristige Lastspitzen, die hier bis zu 11 Nm betragen und dabei die Drehzahl auf bis zu 2350 min^{-1} abfällt, bringen jedoch den Motor an seine Grenzen. Eine Anhebung der Schnittdrehzahl brachte daher auch ein mögliches Potential für den praktischen Gebrauch des Gerätes. Der obere Grenzwert der Drehzahl von 2800 min^{-1} kann jedoch, wie bereits erwähnt aus Lärmemissionsgründen nicht überschritten werden. Ohne verlässliche Kraftstoffmessung war an dieser Stelle noch keine Aussage über das Potential der Systemeffizienz möglich. Beim Rasenmäher wurde daher eine vertiefende Analyse am Motorprüfstand durchgeführt.

Review

Es zeigten sich bereits nach den ersten einfachen Untersuchungen mögliche energetische Potentiale für eine Produktoptimierung. Offen blieben dabei aber noch viele Punkte, die nur über eine Detailuntersuchung geklärt werden konnten. Die Ungenauigkeit der aus der Literatur ermittelten Informationen über die beiden Versuchsobjekte war, wenig überraschend, zum Teil hoch. Eine wirklich aussagekräftige Analyse die wissenschaftlichen Ansprüchen genügt, konnte nur über eine qualifizierte Versuchsplanung und die Verwendung von hochwertiger Messtechnik erfolgen. Jedoch war hier zu erkennen, dass auch der Einsatz von wenigen Mitteln zum Finden von ersten Verbesserungspotentialen führen kann.

4.2.2 Detailuntersuchung

In der Detailuntersuchung erfolgte die Analyse der Systemuntergruppen. Es wurde wiederum eine theoretische Betrachtung dieser Untergruppen vorgenommen. Im Anschluss daran folgte nochmals eine praktische Datenerfassung und Analyse der Versuchsträger, wobei die praktische Seite zunehmend überwog. Um die Analyse entsprechend der zugrundeliegenden Energieflüsse durchführen zu können, erfolgte ein Nachverfolgen der Energiepfade im System nach der in Kapitel 3.5.2.2 vorgestellten *Energieflussmethodik*. Dazu erfolgten die eingehende Untersuchung des realen Versuchsobjektes sowie die Zuhilfenahme von Literatur. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse ermöglichten das Aufzeigen der Energieströme im System.

4.2.2.1 Motorrad:

Abbildung 4-20 zeigt die vertiefte, Modellabbildung der Energieflüsse im Motorrad. Die Systemuntergruppen mit ihren jeweiligen Systemgrenzen bestehen aus Motor, Schaltgetriebe, Antriebskette, Hinterrad, Ventiltrieb, Wasserpumpe, Ölpumpe, Lichtmaschine, Wärmetauscher Öl-Wasser, Wärmetauscher Wasser-Luft und Abgasstrang. Der Fluss der Energie beginnt beim Eintritt in den Motor über den Brennstoff und die angesaugte Luft. Danach teilt sich die Energie in Nutzenergie, welche über die Kurbelwelle abgegeben wird und in die Verlustenergie, die durch Leitung, Strahlung, Konvektion und das Abgas verloren geht. Strahlung und Konvektion ergeben sich zum einen direkt über die Motoroberfläche und zum anderen über den Wasserkühler, der Überschusswärme an die Umgebung abführt. Der Enthalpiestrom \dot{H}_{Abgas} beschreibt die Energiemenge, die über das Abgas abgegeben wird. Die Nutzenergie teilt sich wiederum auf in direkt an den Antriebsstrang weitergegebene Leistung und Energie, die für Nebenaggregate aufgewendet wird. Durch die integrale Bauweise von Motor und Schaltgetriebe, bei der beide Komponenten eine einzige Baugruppe darstellen und beide dasselbe Schmieröl nutzen, wird die Konvektion und Strahlung des Schaltgetriebes dem Motor zugerechnet.

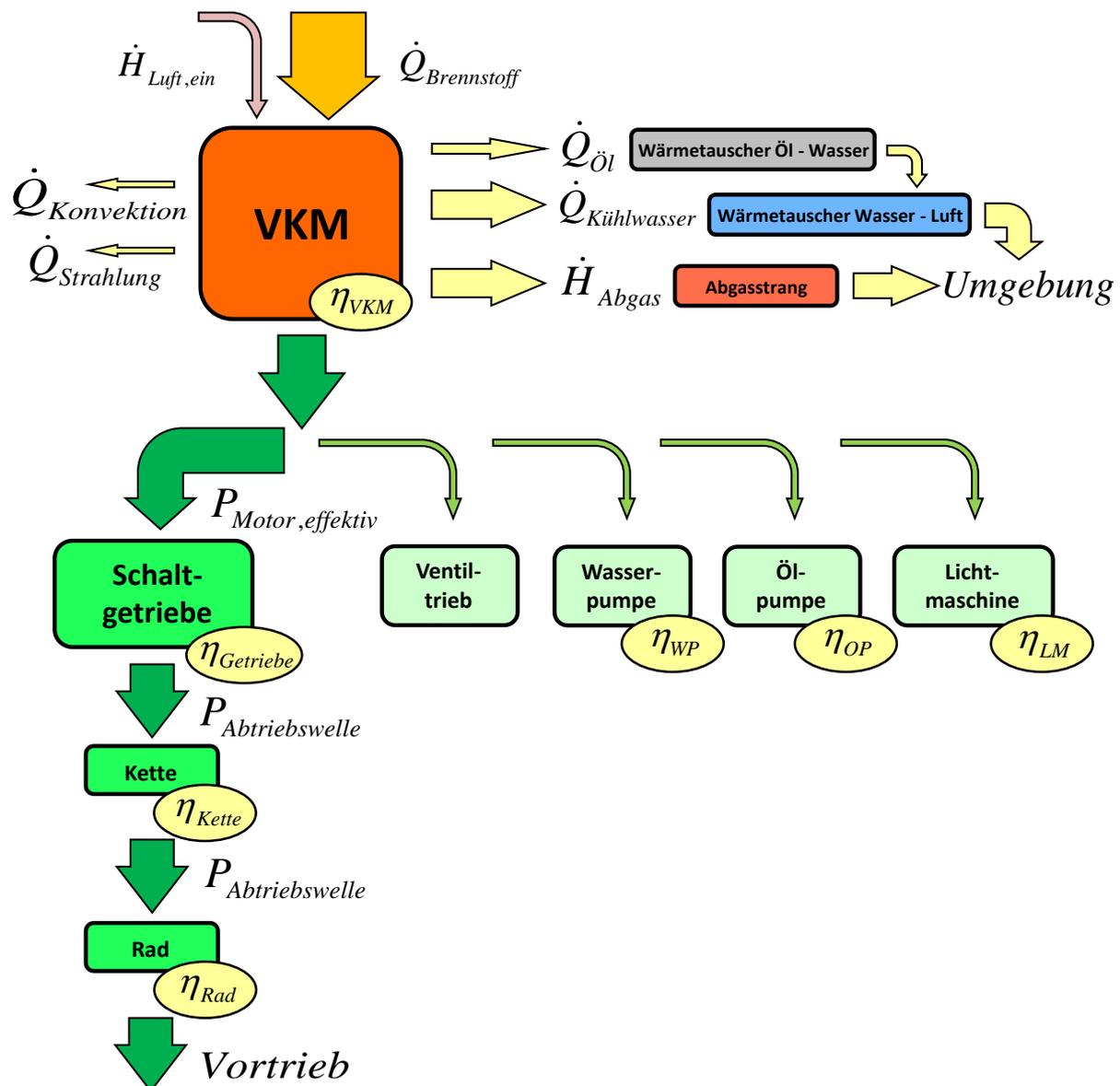


Abbildung 4-20: Modellabbildung - Energiefluss im Motorrad

Die Nutzenergie wird im weiteren Verlauf an die Antriebswelle und das Hinterrad geleitet. Die Paarung Rad-Fahrbahn bildet die Schnittstelle der Nutzenergie und ergibt den genutzten Vortrieb des Fahrzeugs. Für alle Übergabeschritte der mechanischen Energie können Wandelverluste über den Wirkungsgrad angegeben werden.

Es wurde nun versucht, über einen adäquaten Einsatz von Messtechnik die in der Modellabbildung des Systems definierten Energieströme in konstanten Lastpunkten und dadurch eingeschwungenen Zuständen am Rollenprüfstand zu erfassen. Da der Aufwand für Realfahrten mit Messtechnik als zu umfangreich beurteilt wurde, diente der Worldwide Harmonized Motorcycle Test Cycle (WMTC), gefahren am Rollenprüfstand, als Lastprofil für den Gesamtwirkungsgrad im Fahrbetrieb. In Abbildung 4-21 ist die Geschwindigkeitsvorgabe über die Zeit im Zyklus dargestellt. Der Test unterteilt sich in die Phasen „Stadt“ mit geringen Geschwindigkeiten und mehreren Stillstandszeiten, „Überland“ mit höheren Geschwindigkeiten, transienteren Fahrzuständen und nur einem Stopp und „Autobahn“ mit zwei markanten Beschleunigungen, konstanteren Fahrzuständen und Geschwindigkeiten bis 125 km/h. Die gesamte Prüfdauer beträgt dabei 30 Minuten.

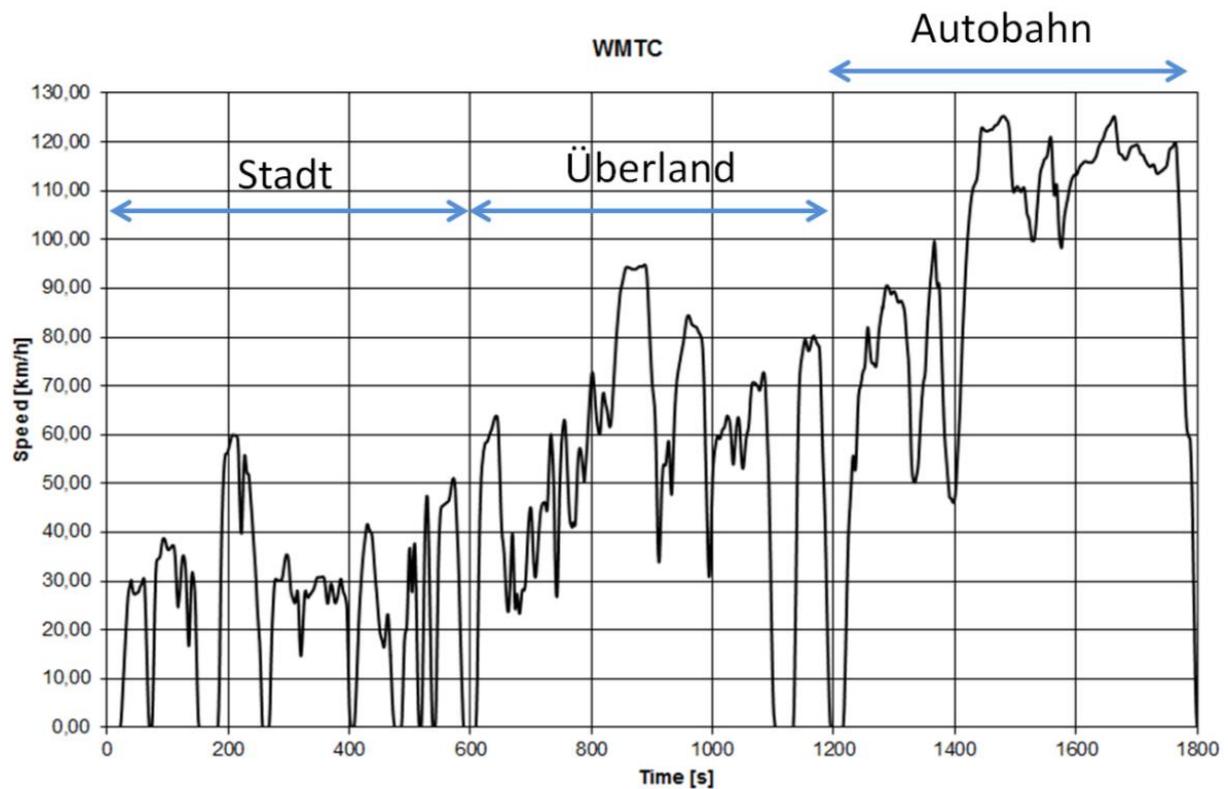


Abbildung 4-21: WMTC Zyklus [48]

Die Beschreibung der Energieflüsse erfolgt über den ersten Hauptsatz der Thermodynamik für instationäre, offene Systeme.

$$dW_t + dQ_a + \sum dm_i(h_i + e_{ai}) = dU + dE_a \quad (4-5)$$

Die über die Systemgrenzen transportierten Energien werden auf der linken Seite der Gleichung beschrieben und die Änderung der gespeicherten Energie im System auf der rechten Seite dargestellt. Bei der Berechnung von Stationärpunkten handelt es sich um einen eingeschwungenen, stationären Betriebspunkt im System und dadurch können die beiden Terme der rechten Seite, dU und dE_a gleich Null gesetzt werden. Weiters sind die zu- und abgeführten Energie- und Stoffströme zeitlich konstant und es wird somit die Gleichung des stationären Fließprozesses angesetzt.

$$\dot{W}_t + \dot{Q}_a + \sum_{i=1}^n \dot{m}_i(h_i + e_{ai}) = 0 \quad (4-6)$$

- \dot{W}_t über Systemgrenze transportierte Leistung
- \dot{Q}_a über Systemgrenze fließender Wärmestrom
- \dot{m}_i über Systemgrenze fließende Massenströme
- h_i spezifische Enthalpie der Masse m_i
- e_{ai} spezifische äußere Energie der Masse m_i

\dot{W}_t , \dot{Q}_a und \dot{m}_i sind positiv angesetzt, wenn diese dem System zugeführt werden. In diesem Berechnungsfall wurde ein Mittelwert über 200 Sekunden Messdauer für einen konstanten Fahrzustand verwendet. Die über die Systemgrenze transportierte Leistung \dot{W}_t kann somit als

mechanische Leistung P bezeichnet werden. Für die Energiekategorien aus der Modellabbildung des Systems in Abbildung 4-20 wurden in der Gleichung die einzelnen Anteile entnommen und summiert. Die in diesem Versuch schwer messbaren Energieströme in Form von Konvektion und Strahlung ergaben anschließend eine Restmenge in der Gleichung.

$$P_{e,Rolle} = -P_{KW} - P_{\ddot{O}l} - P_{Gen} - \dot{Q}_{KW} - \dot{Q}_{\ddot{O}l} + \dot{Q}_B + \dot{H}_{ein} - \dot{H}_{aus} - Rest \quad (4-7)$$

$P_{e,Rolle}$	effektive Antriebsleistung Rollenprüfstand
P_{KW}	Leistung der Kühlwasserpumpe
$P_{\ddot{O}l}$	Leistung der Ölpumpe
P_{Gen}	Leistung des Generators
\dot{Q}_{KW}	Kühlleistung des Kühlwassers
$\dot{Q}_{\ddot{O}l}$	Kühlleistung des Motoröls
\dot{Q}_B	eingebrachte Kraftstoffleistung
\dot{H}_{ein}	zugeführter Enthalpiestrom
\dot{H}_{aus}	abgeführter Enthalpiestrom

Die einzelnen Terme der Gleichung werden im weiteren Vorgehen wie folgt berechnet:

- Effektive Antriebsleistung Rollenprüfstand $P_{e,Rolle}$

Das Drehmoment M und die Drehzahl n für die Antriebsleistung am Prüfstand wird über die Messtechnik des Prüfstands direkt ermittelt.

$$P_{e,Rolle} = M * \omega \quad \text{mit} \quad \omega = \frac{\pi * n}{30} \quad (4-8)$$

- Mechanische Leistung der Kühlwasserpumpe P_{KW}

Die direkte Messung der Wellenleistung der Kühlwasserpumpe ist technisch sehr aufwändig, daher erfolgt die Bestimmung der mechanischen Leistung über die Druckdifferenz Δp_{KW} an der Pumpe. Aufgrund von fehlenden Daten zum hydraulischen Wirkungsgrad der Pumpe und der gering zu erwartenden Leistung wurde näherungsweise mit $\eta = 1$ gerechnet. Der dadurch errechnete Fehler findet sich im Restwert der Gleichung wieder. Mithilfe der Dichte des Kühlmittels $\rho_{KW}(t)$ bei gemessener Temperatur t und dem Kühlmittelmassenstrom \dot{m}_{KW} errechnet sich die gesuchte hydraulische Pumpenleistung.

$$P_{KW} = \Delta p_{KW} * \frac{\dot{m}_{KW}}{\rho_{KW}(t)} \quad (4-9)$$

- Mechanische Leistung der Ölpumpe $P_{\ddot{O}l}$

Die Berechnung der mechanischen Leistung der Ölpumpe erfolgt gleich wie die der Kühlwasserpumpe.

$$P_{\ddot{O}l} = \Delta p_{\ddot{O}l} * \frac{\dot{m}_{\ddot{O}l}}{\rho_{\ddot{O}l}(t)} \quad (4-10)$$

- Elektrische Leistung des Generators P_{Gen}

Hierfür werden die Spannung U_{Bat} und der Ladestrom I_{Bat} der Batterie für die Berechnung herangezogen. Daraus ergibt sich die elektrische Leistung P_{Gen} des Generators.

$$P_{Gen} = U_{Bat} * I_{Bat} \quad (4-11)$$

- Kraftstoffleistung \dot{Q}_B

Die in das System eingebrachte Kraftstoffleistung wird mit Hilfe des unteren Heizwertes H_u und dem gemessenen Massenstrom \dot{m}_B des Kraftstoffes errechnet. H_u wird dabei aus dem Datenblatt der Laborprüfung für die am Institut verwendeten Kraftstoffe entnommen.

$$\dot{Q}_B = \dot{m}_B * H_u \quad (4-12)$$

- Kühlleistungen von Öl- und Wasserkreislauf $\dot{Q}_{\ddot{O}l}$ und \dot{Q}_{KW}

Für die Ermittlung der Kühlleistungen der Öl- und Wasserkreisläufe werden die Temperaturen vor und nach Wärmetauscher für Kühlwasser ΔT_{KW} und Motoröl $\Delta T_{\ddot{O}l}$ kombiniert mit den Massendurchflüssen $\dot{m}_{\ddot{O}l}$ und \dot{m}_{KW} der Medien verwendet. Die Massenströme können über die Druckdifferenzen an den Pumpen und Pumpenkennfelder der Hersteller bestimmt werden. Weiters führen die spezifischen Wärmekapazitäten von Kühlwasser $c_{KW}(t)$ und Motoröl $c_{\ddot{O}l}(t)$ sowie die Dichten von Kühlwasser $\rho_{KW}(t)$ und Motoröl $\rho_{\ddot{O}l}(t)$ zu den gewünschten Werten. Im hier verwendeten Kühlsystem wird das Motoröl über einen Wärmetauscher im Kühlwasserkreislauf konditioniert, daher ergibt sich die reine Wärmeleistung aus der Wasserkühlung des Motors \dot{Q}_{KW} über den Abzug der Leistung $\dot{Q}_{\ddot{O}l}$ von der gesamten Kühlleistung \dot{Q}_{KW_ges} .

$$\dot{Q}_{KW_ges} = \dot{m}_{KW} * c_{KW}(t) * \Delta T_{KW} \quad (4-13)$$

$$\dot{Q}_{\ddot{O}l} = \dot{m}_{\ddot{O}l} * c_{\ddot{O}l}(t) * \Delta T_{\ddot{O}l} \quad (4-14)$$

$$\dot{Q}_{KW} = \dot{Q}_{KW_ges} - \dot{Q}_{\ddot{O}l} \quad (4-15)$$

- Zugeführte und abgeführte Enthalpien \dot{H}_{ein} und \dot{H}_{aus}

Der zugeführte Enthalpiestrom \dot{H}_{ein} setzt sich aus der Summe von zugeführter Kraftstoffenthalpie \dot{H}_B und Enthalpie der zugeführten Luft \dot{H}_{Luft} zusammen. Der abgeführte Enthalpiestrom \dot{H}_{aus} wird aus der Summe des Enthalpiestroms im Abgas \dot{H}_{Abgas} und dem Enthalpiestrom über den Katalysator \dot{H}_{Kat} gebildet und der zugeführte Enthalpiestrom \dot{H}_{ein} davon abgezogen.

$$\dot{H}_{ein} = \dot{H}_B + \dot{H}_{Luft} \quad (4-16)$$

$$\dot{H}_{aus} = \dot{H}_{Abgas} + \dot{H}_{Kat} - \dot{H}_{ein} = \dot{H}_{Abgas} + \Delta \dot{H}_{Kat} - \dot{H}_B - \dot{H}_{Luft} \quad (4-17)$$

Der Enthalpiestrom des einströmenden Kraftstoffes \dot{H}_B ergibt sich aus der Temperatur t_B , der sich daraus ergebenden Dichte $\rho_B(t)$, des spezifischen Wärmekapazität $c_B(t)$ und dem Massenstrom \dot{m}_B des Kraftstoffes.

$$\dot{H}_B = c_B(t) * t_B * \dot{m}_B \quad (4-18)$$

Der Enthalpiestrom der angesaugten Luft \dot{H}_{Luft} errechnet sich mit Hilfe der Temperatur der angesaugten Luft t_{Luft} , die spezifische Wärmekapazität $cp_{Luft}(t)$ der Frischluft und dem Massenstrom der Luft \dot{m}_{Luft} . Der Frischluftmassenstrom wird in diesem Versuch über das im

Abgas gemessene Luftverhältnis λ_{Abgas} , den aus der Kraftstoffanalyse bekannten stöchiometrischen Luftbedarf L_{St} und über den Massenstrom des Kraftstoffes \dot{m}_B ermittelt.

$$\dot{m}_{Luft} = L_{St} * \dot{m}_B * \lambda_{Abgas} \quad (4-19)$$

$$\dot{H}_{Luft} = cp_{Luft}(t) * t_{Luft} * \dot{m}_{Luft} \quad (4-20)$$

Für den Enthalpiestrom des Abgases \dot{H}_{Abgas} wird mit dem Massenstrom des Abgases \dot{m}_{Abgas} gerechnet, welcher sich aus dem Massenstrom des Kraftstoffes \dot{m}_B und der angesaugten Frischluft \dot{m}_{Luft} zusammensetzt.

$$\dot{m}_{Abgas} = \dot{m}_B + \dot{m}_{Luft} \quad (4-21)$$

Weiters wird mit der Temperatur des Abgases t_{Abgas} und der spezifischen Wärmekapazität $cp_{Abgas}(t)$ des Abgases der Enthalpiestrom ermittelt.

$$\dot{H}_{Abgas} = cp_{Abgas}(t) * t_{Abgas} * \dot{m}_{Abgas} \quad (4-22)$$

Für die Berechnung der im Katalysator umgesetzten Enthalpie \dot{H}_{Kat} wird über die Temperaturdifferenz vor und nach dem Katalysator ΔT_{Kat} , die spezifische Wärmekapazität des Abgases $cp_{Abgas}(t)$ und über den Abgasmassenstrom \dot{m}_{Abgas} die Enthalpie im Katalysator berechnet.

$$\dot{H}_{Kat} = cp_{Abgas}(t) * \Delta T_{Kat} * \dot{m}_{Abgas} \quad (4-23)$$

In Abbildung 4-22 ist der Messstellenplan für die Versuche am Rollenprüfstand mit erweiterter Messtechnik dargestellt. Alle oben definierten Messgrößen, welche in Tabelle 4-7 zusammengefasst sind, wurden in die jeweiligen Energiekreisläufe des Modellabbildes eingesetzt und adäquate Sensoren für die Messaufgaben gewählt. Am realen Versuchsobjekt wurde nun versucht, passende Messstellen für die Platzierung der Sensoren zu finden. Anschließend erfolgte die Planung und Konstruktion von Adaptervorrichtungen zum Implementieren der Sensoren in die jeweiligen Komponenten des Antriebsstranges.

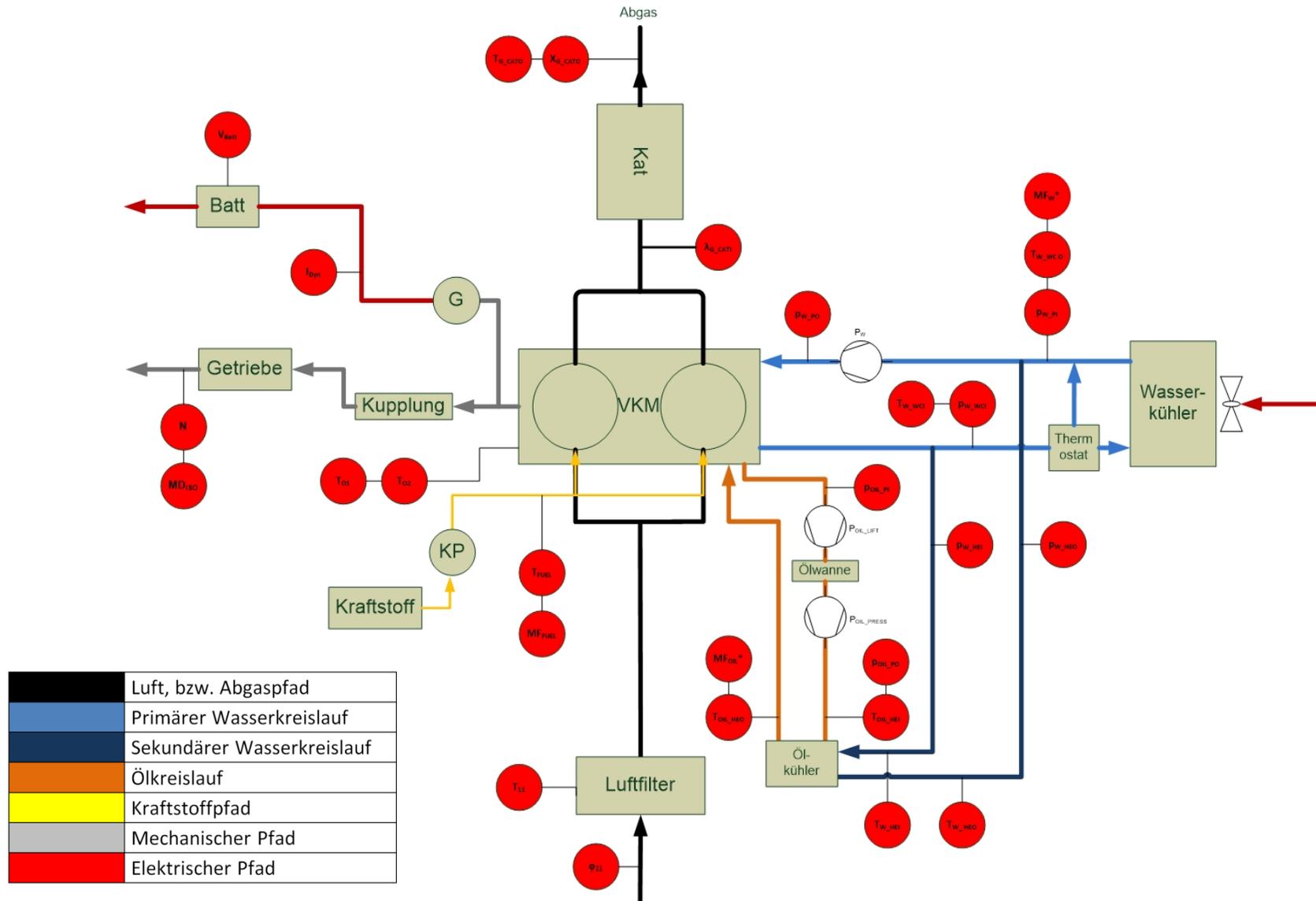


Abbildung 4-22: Messstellenplan Motorrad

Tabelle 4-7: Messgrößen Rollenprüfstand

Bezeichnung Messgröße	Beschreibung der Messgröße	Messgerät
$\mathbf{MF_{FUEL}}$	Massenstrom Kraftstoff	Coriolisdurchflussmesser
$\mathbf{T_{FUEL}}$	Temperatur Kraftstoff	Thermocouple
$\mathbf{T_{11}}$	Temperatur Frischluft	Thermocouple
$\mathbf{MD_{ISO}}$	Ausgangsmoment	Dremomentmessflansch
\mathbf{N}	Ausgangsdrehzahl	Induktiver Sensor mit Zahnscheibe
$\mathbf{T_{W_WCI}}$	Wassertemperatur vor Kühler	Thermocouple
$\mathbf{T_{W_WCO}}$	Wassertemperatur nach Kühler	Thermocouple
$\mathbf{P_{W_WCI}}$	Wasserdruck vor Kühler	Druckmessdose
$\mathbf{P_{W_PI}}$	Wasserdruck vor Pumpe	Druckmessdose
$\mathbf{P_{W_PO}}$	Wasserdruck nach Pumpe	Druckmessdose
$\mathbf{T_{OIL_HEI}}$	Temperatur Öl vor Wärmetauscher	Thermocouple
$\mathbf{T_{OIL_HEO}}$	Temperatur Öl nach Wärmetauscher	Thermocouple
$\mathbf{P_{W_HEO}}$	Wasserdruck nach Wärmetauscher	Druckmessdose
$\mathbf{P_{OIL_PO}}$	Öldruck nach Pumpe	Druckmessdose
$\mathbf{P_{W_HEI}}$	Wasserdruck vor Wärmetauscher	Druckmessdose
$\mathbf{P_{OIL_PI}}$	Öldruck vor Pumpe (Kurbelgehäuse)	Druckmessdose
$\mathbf{T_{W_HEI}}$	Wassertemp. vor Wärmetauscher	Thermocouple
$\mathbf{T_{W_HEO}}$	Wassertemp. nach Wärmetauscher	Thermocouple
$\mathbf{U_{BATT}}$	Spannung Batterie	Multimeter
$\mathbf{I_{DYN}}$	Ladestrom Batterie	Stromzange
$\mathbf{\lambda_{G_CATI}}$	Lambda vor Kat	Abgasanalyse
$\mathbf{T_{G_CATI}}$	Temperatur vor Kat	Thermocouple
$\mathbf{T_{G_CATO}}$	Temperatur nach Kat	Thermocouple

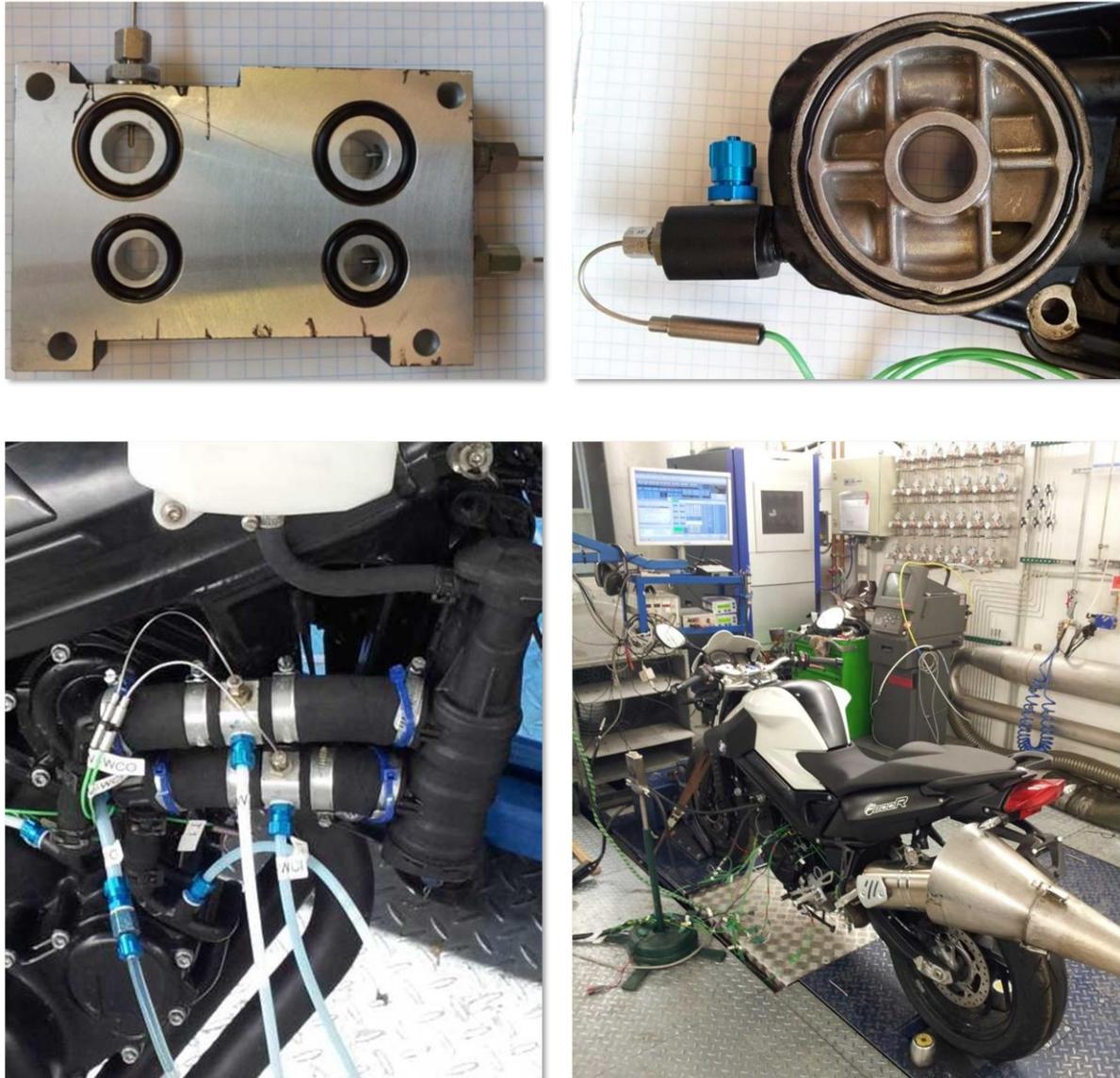


Abbildung 4-23: Messadapter für den Öl-Wasser Wärmetauscher (links oben), am Ölfilter (rechts oben) und im Kühlkreislauf (links unten); Prüfstands-aufbau Rollenprüfstand (rechts unten)

In Abbildung 4-23 links oben ist der Messadapter für den Öl-Wasser Wärmetauscher zu sehen. Dieser wurde zwischen dem Wärmetauscher und dem Motorgehäuse verbaut und ermöglichte die Platzierung von Temperatur- und Drucksensoren im Öl- und Kühlmittelfluss. Zu sehen ist auch, dass bereits Thermocouples vom Typ K für die Temperaturmessung installiert waren. Das Bild rechts oben zeigt einen in die Halterung des Ölfilters eingesetzten Messadapter. Die Verschraubung in Blau nimmt einen druckfesten Plastikschlauch auf, der die Verbindung zum Drucksensor am Prüfstandsboard bildet. Im Bild links unten sind Adapter und applizierte Sensoren im Kühlkreislauf zu sehen und unten rechts ist der gesamte Aufbau des Motorrads am Rollenprüfstand dargestellt.

In den Grafiken in Abbildung 4-24 sind die Ergebnisse der Stationärfahrten am Rollenprüfstand aufgetragen. Die obere Darstellung zeigt die Aufteilung der Absolutwerte der einzelnen Leistungen, welche weiter oben bei den Datenkategorien beschrieben sind. Die unterschiedlichen Fahrzustände entsprechen wiederum den im ersten Rollenprüfstandsversuch getroffenen Einteilungen.

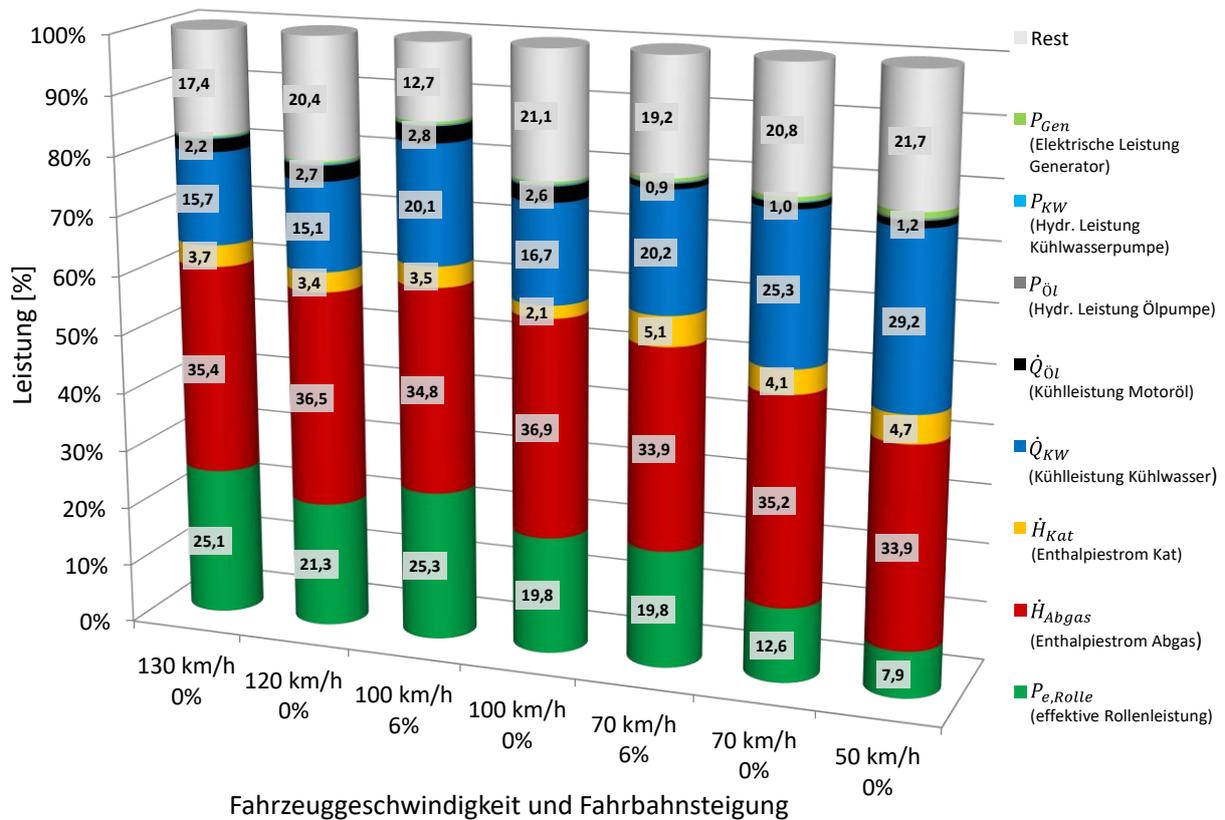
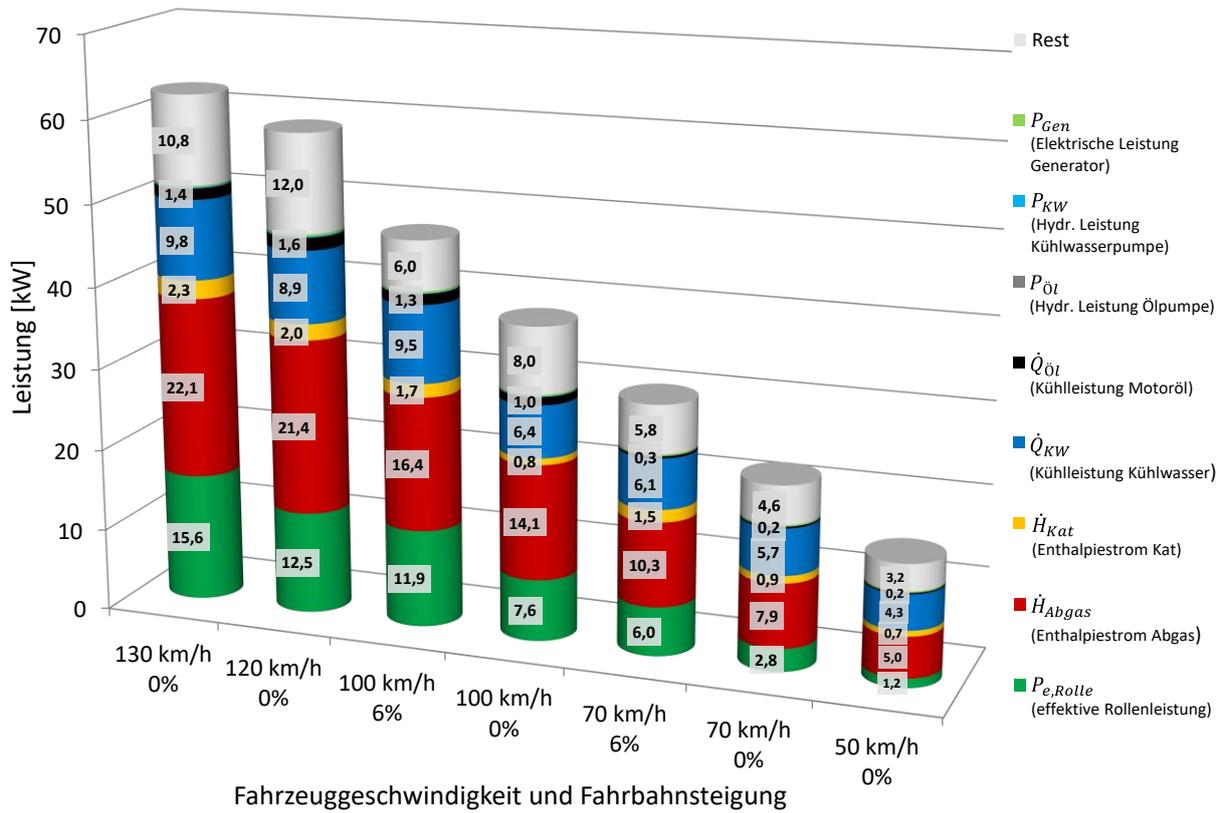


Abbildung 4-24: Absolute Aufteilung (oben) und relative Aufteilung (unten) der zugeführten Brennstoffleistung

Die maximal eingesetzte Brennstoffleistung beträgt dabei etwa 60 kW bei 130 km/h und ebener Fahrbahn und die minimale knapp über 10 kW bei 50 km/h ohne Steigung. Die untere Grafik gibt die prozentuelle Aufteilung der gemessenen Energieflüsse im Antriebsstrang wieder. Klar

zu sehen ist dabei die abnehmende Kühlleistung des Kühlwassers mit steigender Last aber auch die deutlich größeren Anteile des thermischen Umsatzes im Katalysator bei geringeren Lastpunkten. Eine steigende Tendenz des Wärmeeintrages in das Motoröl mit steigender Last ist auch zu beobachten. Es kann jedoch durch die in Motorradmotoren übliche integrale Bauweise von Motor und Getriebe nicht zwischen den beiden Wärmequellen unterschieden werden. Auch gut zu erkennen ist, dass der Anteil der Enthalpie im Abgas über die verschiedenen Lastpunkte nicht sonderlich schwankt. Die Leistungen von Kühlwasser- und Ölpumpe sowie dem elektrischen Generator sind im Vergleich zu den großen Energieflüssen vernachlässigbar klein. Der nicht geringe Anteil der restlichen Verlustenergie, welcher nicht über eine Messung erfasst werden konnte, wird der Wirkungskette im gesamten Antriebsstrang bis hin zu effektiven Rollenleistung sowie die über die Bauteile abgegebene Wärmestrahlung und Konvektion zugeschrieben. Die in den Schätzungen üblicherweise angenommene Drittelregelung der Energien kann hier nicht bestätigt werden. Die im Abgas enthaltene Leistung bewegt sich durchgehend nahe der 35 % Marke und die effektive Nutzleistung kommt in diesen Konstantfahrpunkten nicht über rund 25 % hinaus.

Bei der Analyse der Prüfstandsdaten fällt die Menge der Energie im Abgas auf. Zum einen ist diese Energie prozentuell konstant über die sich verändernde Last verfügbar und zum anderen ist die Quantität nicht unerheblich. Auch in der Abwärme des Kühlkreislaufs ist eine bedeutende Menge an Energie enthalten, hier kommt jedoch die qualitative Bewertung der vorliegenden Energie und somit die Exergiebetrachtung zum Tragen. Laut thermodynamischer Definition beschreibt die Exergie die Arbeitsfähigkeit der betrachteten Energie. Im Spezialfall der Exergie e eines Stoffstroms [18] errechnet sich diese aus der Enthalpie- und Entropiedifferenz zum Umgebungszustand nach den Gleichungen

$$e = h - h_u - T_u(s - s_u) \quad (4-24)$$

$$\dot{E} = e \cdot \dot{m} \quad (4-25)$$

Für ideale Gase gilt

$$h - h_u = \bar{c}_p \Big|_{T_u}^T (T - T_u) \quad (4-26)$$

$$s - s_u = \bar{c}_p \Big|_{T_u}^T \ln \left(\frac{T}{T_u} \right) - R \cdot \ln \left(\frac{p}{p_u} \right) \quad (4-27)$$

$$e = \bar{c}_p \Big|_{T_u}^T (T - T_u) - T_u \left[\bar{c}_p \Big|_{T_u}^T \ln \left(\frac{T}{T_u} \right) - R \cdot \ln \left(\frac{p}{p_u} \right) \right] \quad (4-28)$$

Unter der Annahme einer Umgebungstemperatur von $T_u = 298,15 \text{ K}$ errechnet sich im Betriebspunkte 130 km/h und 0 % Steigung der Exergiestrom des Abgases von

$$\dot{E}_{Abgas} = 11,75 \text{ kW} \quad (4-29)$$

Im Kühlwasser kann die Exergie der aufgebrauchten Kühlleistung, also der über den Wasser-Luft Kühler abgegebenen Wärme für eine Rückgewinnung genutzt werden. Somit errechnet sich ein nutzbarer Exergiestrom im Kühlwasser aus der Differenz über den Wasserkühler von

$$\dot{E}_{KW} = \dot{E}_{KW,ein} - \dot{E}_{KW,aus} = 2,5 \text{ kW} \quad (4-30)$$

Diese Ergebnisse zeigen, dass der Enthalpiestrom im Abgas den größten exergetischen Verlust im Motorrad darstellt und die Nutzung dieses Potentials am sinnvollsten erscheint.

Weiters wurde aus den Daten der transienten Tests des WMTC Fahrzyklus der Gesamtwirkungsgrad ausgewertet. Abbildung 4-25 zeigt den Verlauf des Wirkungsgrades in Prozent über den WMTC Zyklus in Grün, in Schwarz ist dabei die Fahrgeschwindigkeit eingetragen. Gut zu erkennen sind die teilweise unter 5 % liegenden Werte im langsamen Stadtanteil. Nur einzelne Beschleunigungen mit leicht gesteigerten Lasten heben die Effizienz kurzfristig, aber reichen nicht aus, um das Leistungspotential des Motorrads nur annähernd abzurufen und somit die Lasten in einen optimalen Wirkungsgradbereich zu verschieben. Erst die höheren Fahrgeschwindigkeiten mit den daraus resultierenden Fahrtwiderständen bringen die Effizienz in Bereiche um 20 % und darüber.

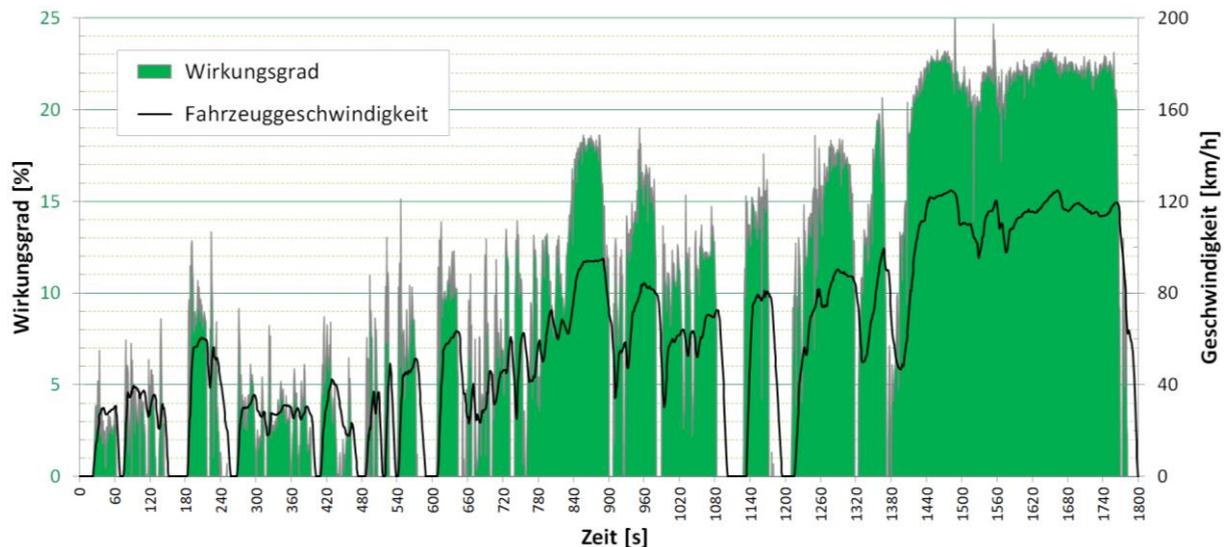


Abbildung 4-25: Wirkungsgrad über WMTC Zyklus

4.2.2.2 Rasenmäher:

In Abbildung 4-26 ist die vertiefte Modellabbildung der Energieflüsse im Rasenmäher veranschaulicht. Das System Rasenmäher ist etwas einfacher im Aufbau und setzt sich aus den Untergruppen, Motor, Mähmesser, Fahrtrieb, Ventiltrieb, Ölpumpe und Abgasstrang zusammen. Der Input in das System erfolgt wiederum über Kraftstoff und angesaugte Luft in den Motor. Mechanische Nutzenergie wird an das Mähmesser, den Fahrtrieb, den Ventiltrieb und die Ölpumpe weitergeleitet. Die Verlustenergie geht in Form von Wärmestrahlung und -konvektion direkt an die Umgebung. Hier wird das Ölbad des Motors über Kühlrippen an der Unterseite auch direkt über Konvektion gekühlt. Der Pfad Abgas über den Abgasstrang ist ähnlich wie beim Motorrad, es fehlt allerdings ein System zur Abgasnachbehandlung. Die Nutzenergie wird in Form von Schnittleistung des Mähmessers und Vortrieb über den Radantrieb abgegeben. Eine Definition der Qualität der Übergabe von mechanischer Energie über einen Wirkungsgrad ist auch hier möglich.

Im Rasenmäher folgte zuerst die Analyse der bestehenden Daten aus den bereits durchgeführten Realtests. Während der Tests wurden unterschiedliche, denkbare Fahrzustände nachgefahren und die dadurch gesammelten Daten konnten nun auch für eine genauere Energiebilanzierung zur Verlustteilung verwendet werden. Mit Hilfe des Modellabbildes des Systems wurde die Nutzenergie, das mittlere Motormoment über einen Test, unterschiedlichen Energieflüssen zugeordnet.

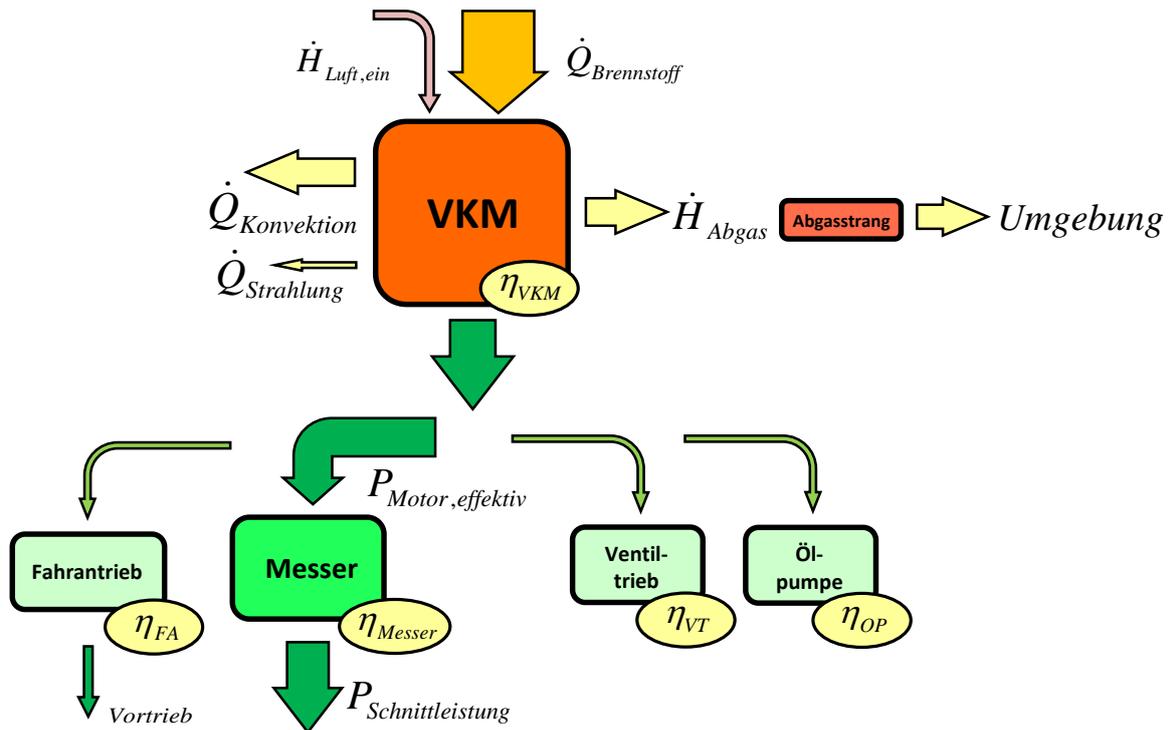


Abbildung 4-26: Modell Energiefluss im Rasenmäher

Zuerst auf ein für den Fahrtrieb auf einer ebenen, geschnittenen Rasenfläche notwendiges Drehmoment. Mit der Differenz aus Fahrtrieb und gesamten Moment im Mähbetrieb erhält man das Schnittmoment des Messers. Zusätzlich wurde das Drehmoment für den Fahrtrieb auf ebener Asphaltfläche analysiert. Weiters konnte das Drehmoment für den Leerlauf mit laufendem Mähmesser auf einer geschnittenen Rasenfläche beschrieben werden. Bei den Versuchen wurden nicht nur unterschiedliche Rasenarten getestet, sondern auch die zwei verfügbaren Messertypen verwendet. Das erste Messer ist ein klassisches Mähmesser mit Flügelfortsatz an der Messerhinterkante (Flügelmesser), um das Schnittgut mit Hilfe eines durch den Flügelfortsatz erzeugten Luftstroms in den Fangkorb zu transportieren. Das zweite Messer ist ein zum Mulchen konzipiertes doppeltes Mähmesser ohne Flügelfortsatz (Mulchmesser), um das Schnittgut zu zerkleinern und als Dünger am Rasen zu belassen. Zusätzlich wird beim Mulchen der Auswurfkanal mit einem Aufsatz verschlossen, somit fällt der Luftstrom in die Grasfangbox weg.

Das Leerlaufdrehmoment mit laufendem Flügelmesser auf gemähtem Rollrasen beträgt dabei etwa $1,8 \text{ Nm}$ bei 2800 min^{-1} . Das Mulchmesser zeigt einen deutlich geringeren Widerstand und kommt auf rund 1 Nm bei leicht höherer Drehzahl. Die Fahrt im 2. Gang mit laufendem Flügelmesser ohne Grasschnitt auf Rollrasen ergibt ein mittleres Motormoment von rund $2,4 \text{ Nm}$ über den Test. Das ergibt eine Differenz und somit einen Aufwand von etwa $0,6 \text{ Nm}$ für den Fahrtrieb im 2. Gang. Bezieht man die Anteile der einzelnen Lasten auf eine durchschnittliche Gesamtschnittlast von 6 Nm im Mähbetrieb auf Rollrasen, ergeben sich in der Verlustteilung die unten in der Tabelle aufgelisteten prozentuellen Anteile an der Gesamtlast. Daraus ist zu erkennen, dass bei einer Fahrt im 2. Gang der Fahrtrieb ca. 10 % des Motormoments benötigt und dass das notwendige Drehmoment, um das Flügelmesser im Rasenschnitt zu betreiben, etwa einen Anteil von 90 % ausmacht.

Tabelle 4-8: Drehmomentbedarf für verschiedene Lastzustände am Rasenmäher

Rollrasen	Nm
Leerlauf Mulchmesser bei 2850 min ⁻¹	0,98
Leerlauf Flügelmesser bei 2812 min ⁻¹	1,79
Fahrt im 2. Gang mit Flügelmesser ohne Grasschnitt bei 2809 min ⁻¹	2,38
Fahrtrieb im 2. Gang auf Rollrasen	0,59
Asphalt	Nm
Leerlauf Flügelmesser bei 2799 min ⁻¹	1,66
Leerlauf Mulchmesser bei 2856 min ⁻¹	0,62
Fahrt im 3. Gang mit Mulchmesser bei 2849 min ⁻¹	1,41
Fahrtrieb im 3. Gang auf Asphalt	0,79
Lasten in der Verlustteilung	Anteil
Durchschnittliche Gesamtschnittlast von 6 Nm auf Rasenfläche	100 %
Fahrtrieb auf Rasenfläche im 2. Gang	9,8 %
Schnittkraft mit Flügelmesser auf Rasenfläche	90,2 %

Für die Untersuchung des Rasenmähermotors am Motorprüfstand war zuerst die Planung und Konstruktion eines passenden Prüfstandsbaus vorzunehmen. Abbildung 4-27 zeigt die CAD Konstruktionszeichnung für die Installation des Motors auf der Prüfstandsplattform und die Kraftübertragung des Kurbelwellenmomentes an die Bremseinrichtung. Als Prüfstandsbremse fungierte eine hochdynamisch regelbare Asynchronmaschine, welche über eine Kardanwelle zum Ausgleich des Winkelversatzes und ein 90° Winkelgetriebe zur Umlenkung an die Kurbelwelle des Motors angebunden war. Das Bauteil in Rot-Schwarz stellt den Sensor für die Drehmomentmessung dar und die darüber angeordnete Klauenkupplung mit Gummielementeinlage dient zur Drehschwingungsdämpfung der starken Unwucht des Einzylindermotors. In Abbildung 4-28 ist der realisierte Aufbau am Motorprüfstand zu sehen. Die Leitung in Gelb stellt die Kraftstoffleitung dar, vom Durchflussmessgerät kommend hin zum Vergaser. Der schwarze, gerippte Schlauch links mit dem 90° Edelstahlrohrstück ist die Abgasabsaugung, die zur Vollstromverdünnungsanlage (Constant Volume Sampling - CVS) und weiter zur Abgasanalyse führt. Die rechten beiden Bilder zeigen oben den induktiven Drehzahlsensor, der die vorbeistreichenden Zähne und Lücken der Zahnringe am Schwungrad zu einem sinusförmigen Signal wandelt. Zwei Zahnringe mit unterschiedlichen Zahnanzahlen ermöglichen die Auswertung in verschiedenen Hardware-Software Paarungen. Rechts unten ist die Positionierung der Lambdasonde und des Abgastemperatursensors im Abgasschalldämpfer zu sehen. Die Position ist dabei möglichst nahe am Zylinderkopfaustritt, um ein unverfälschtes Messergebnis zu gewährleisten.

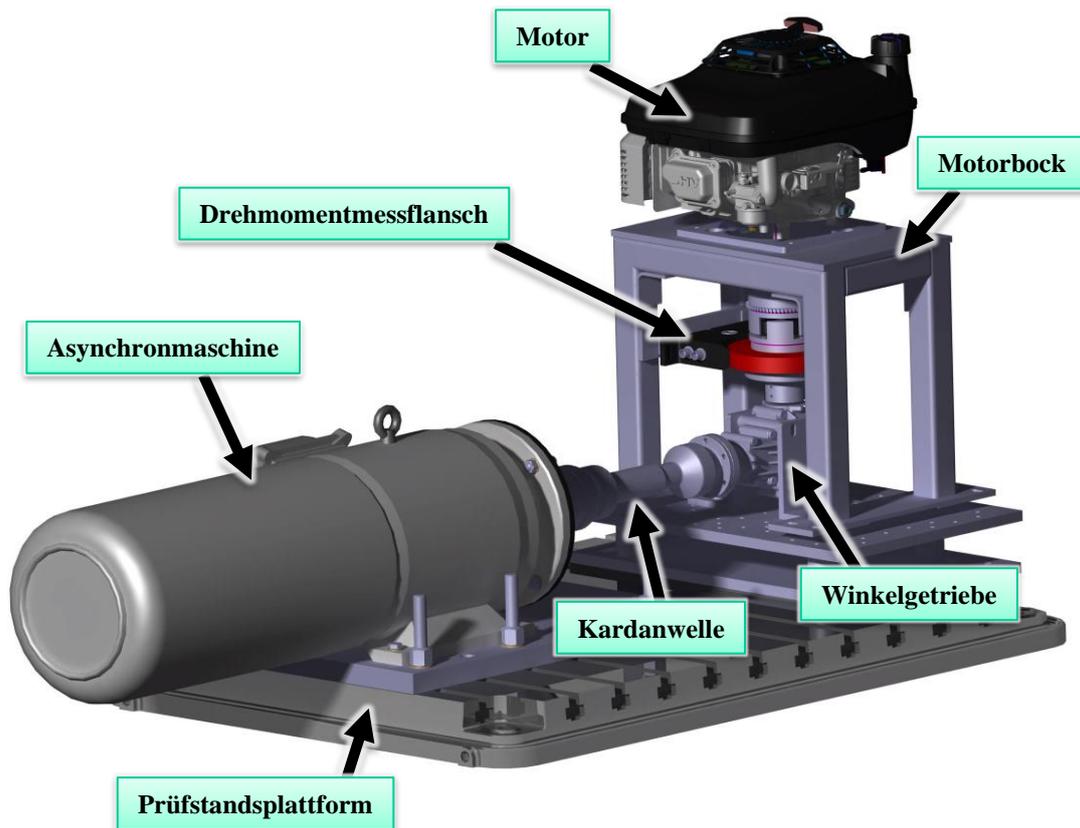


Abbildung 4-27: CAD Konstruktion Motorprüfstands Aufbau Rasenmäher

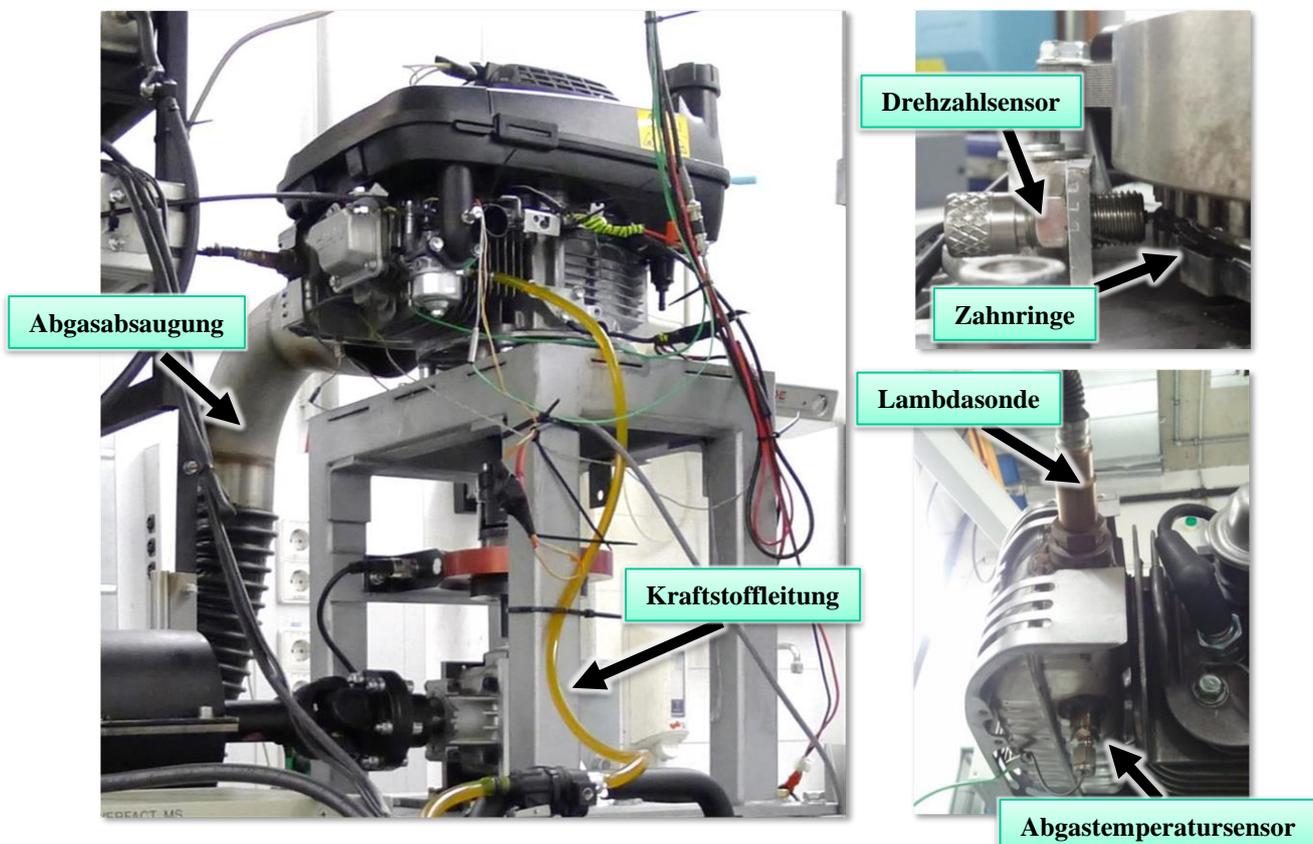


Abbildung 4-28: Rasenmähermotor am Prüfstand (links), Drehzahlsensor mit Zahnring an der Schwungscheibe (rechts oben), Lambdasonde und Abgastemperaturfühler (rechts unten)

Bei der Analyse des Motors am Prüfstand wurden für eine Bewertung relevante Daten wie Drehzahl, Drehmoment, der Kraftstoffmassenstrom, der Lambdawert und der Zylinderdruck erfasst. Weiters wurden die Abgaskomponenten NO_x , CO und HC in einer Abgasanalyseeinheit ausgewertet. Ein Hochgeschwindigkeits-Datenloggersystem, speziell entwickelt um die Datenerfassung bei Verbrennungskraftmaschinen durchzuführen, verarbeitete die am Prüfstand aufgezeichneten Werte.

- Drehmoment M

Das Drehmoment wurde über den Drehmomentmessflansch des Prüfstandes direkt erfasst und musste nur im Datenlogger aufgezeichnet werden.

- Drehzahl n

Ein magnetischer Zahnring an der Schwungmasse des Motors in Kombination mit einem induktiven Sensor ermöglichte die Aufzeichnung der Drehzahl im Datenlogger.

- Kraftstoffmassenstrom \dot{m}_{FUEL}

Der Kraftstoffmassenstrom wurde mit Hilfe eines speziell für Kleinmotoren mit Vergaser entwickelten Durchflussmesssystems erfasst. Der Ausgabewert bedurfte wiederum keiner weiteren Nachbearbeitung.

- Verbrennungsluftverhältnis λ

Das Verbrennungsluftverhältnis Lambda wurde über eine Breitbandlambdasonde und eine dazugehörige Auswerteeinheit gemessen und konnte auch direkt im Datenlogger aufgezeichnet werden.

- Verbrennungsanalyse, Verbrennungsschwerpunkt

In dieser Untersuchung für die Beurteilung der Qualität der Wärmeausnutzung im Zylinder ist vor allem der Schwerpunkt der Verbrennung von Bedeutung. Der Verbrennungsschwerpunkt ist definiert als der auf den Kurbelwinkel bezogene Zeitpunkt, an dem 50% des eingebrachten Kraftstoffes verbrannt wurden. Dieser wurde in der Datenloggersoftware aus dem Verlauf des Zylinderdruckes berechnet, welcher mit einem speziellen, hitzebeständigen Hochdrucksensor kurbelwinkelabhängig erfasst wurde.

- Abgasanalyse

Die in der motorischen Verbrennung wichtigen Abgaskomponenten Stickoxyde NO_x , Kohlenmonoxyd CO und Kohlenwasserstoffe HC wurden über eine am Prüfstand verbaute Abgasanalyseeinheit gemessen und aufgezeichnet.

Abbildung 4-29 zeigt das Verbrauchskennfeld des Motors über das gesamte Kennfeld in Gramm zugeführten Kraftstoffs pro erzeugter Kilowattstunde effektive Wellenleistung. Das Kennfeld ist aufgetragen über die Drehzahl auf der x-Achse und das Drehmoment auf der y-Achse und in einem Muscheldiagramm dargestellt, wobei Werte gleichen Verbrauchs als Isolinien in Schwarz eingetragen sind. Bestwerte dieses Motors von 430 g/kWh sind im Bereich um 2000 min^{-1} und 7,5 Nm auszumachen. Im Schnittbetrieb auf Rollrasen bei 2700 min^{-1} und 6,5 Nm können Werte von 460 g/kWh erwartet werden.

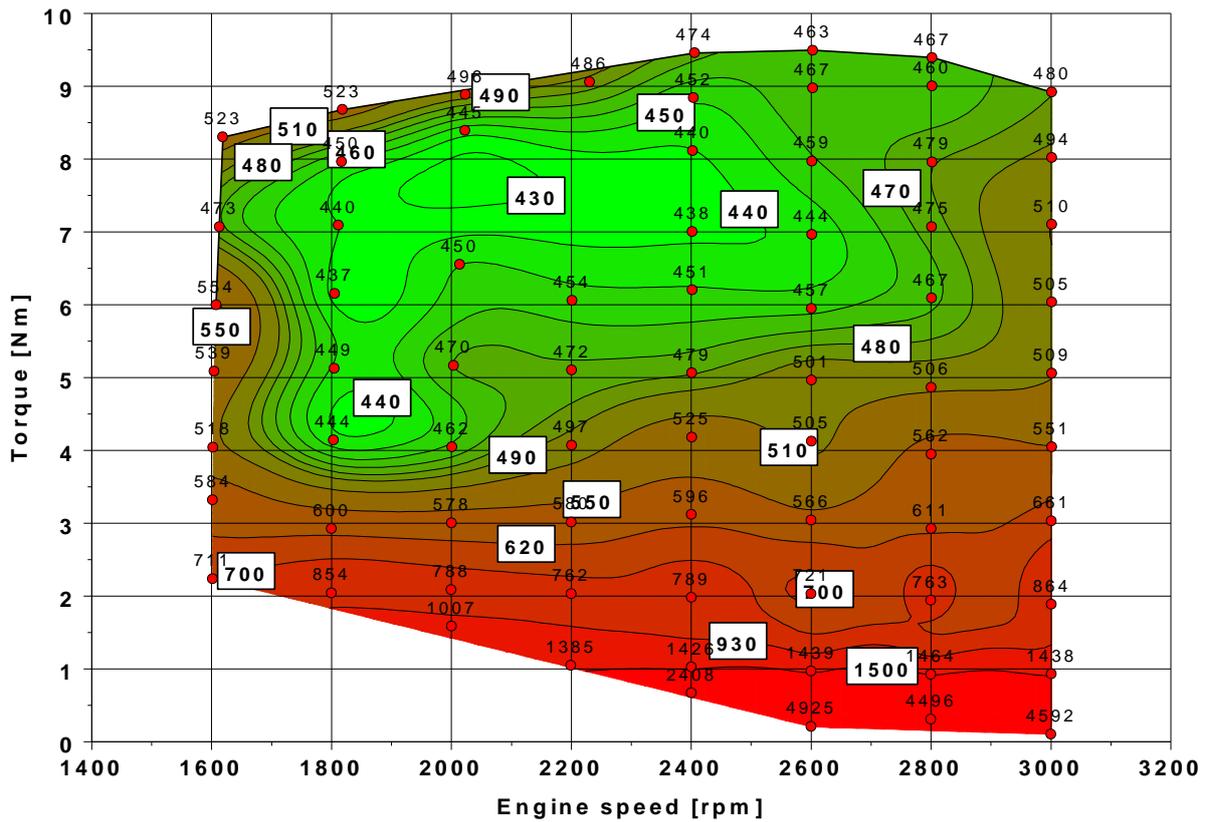


Abbildung 4-29: Verbrauchskennfeld Rasenmäher in g/kWh

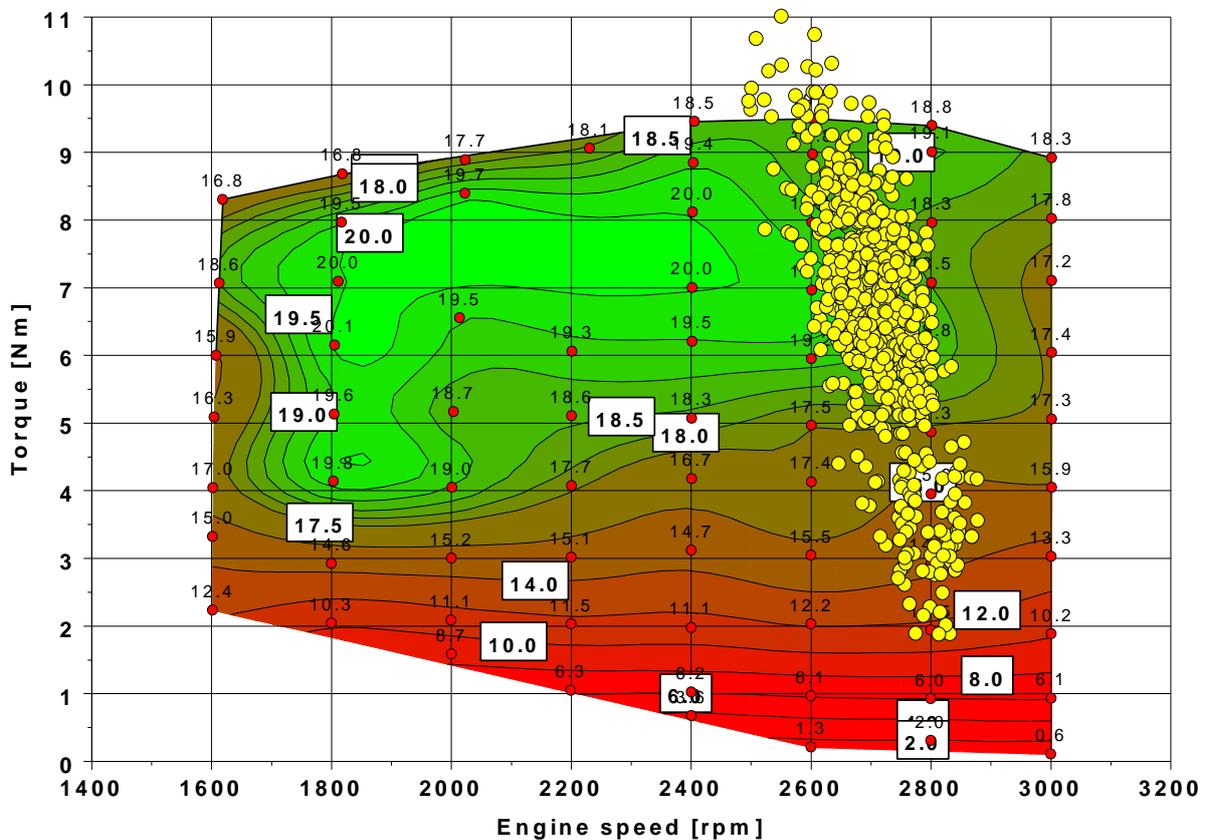


Abbildung 4-30: Wirkungsgradkennfeld Rasenmäher in Prozent - in Kombination mit Lastpunkten auf Rollrasen

In weiterer Folge wurden die Daten aus den Versuchen am Motorprüfstand ausgewertet. Abbildung 4-30 verdeutlicht dies mit dem Überblenden der im Realschnitt erfassten Lastpunkte in Gelb in das Wirkungsgradkennfeld, welches Angaben in Prozent beinhaltet. Die Fläche mit dem Wirkungsgradoptimum kommt auf rund 20 % und der Maximalwert beträgt dabei 20,1 %. Die Lastpunkte im Versuch fallen bei Leerlauf in einen Bereich von 12 % und bei mittlerer Schnittlast auf ca. 19 %. Gut zu sehen sind auch die Ausreißer der Maximallastpunkte, die über das stationäre Kennfeld hinaus reichen und rein durch die transienten Drehmomente der Schwungmassen gedeckt sind. Weiters kommt der Motor im Realbetrieb in dieser Abstimmung nicht in den Bereich des Wirkungsgradoptimums und bewegt sich bei Spitzenlasten etwa am Punkt des maximal möglichen Drehmoments.

Wie sich der Motor daher bei anhaltender Spitzenlast verhält zeigt Abbildung 4-31 rechts unten. Bei Spitzenlast wird augenblicklich das Drehmomentmaximum überschritten und es besteht keine Reserve mehr, um der Last entgegen zu wirken. Dadurch bricht die Drehzahl weiter ein und der Motor wird sehr schnell zum Stillstand gebracht. Weiters sind in dieser Abbildung die Resultate der Abgasanalyse über das Motorkennfeld dargestellt. Der Lambdawert bewegt sich durchgehend in fetten Bereichen von ca. 0,8 und bei Spitzenlasten werden dabei auch Werte von 0,7 erreicht. Beim Verbrennungsschwerpunkt zeigt sich der Nachteil der nicht adaptiv arbeitenden, rein mechanischen Zündung. Eine Einstellung für den Zündzeitpunkt muss daher für alle Verbrennungsgeschwindigkeiten über das Kennfeld reichen. Dadurch werden Werte von 6° bis 40° Kurbelwinkel nach dem oberen Totpunkt (OT) erreicht. Für einen optimalen Energieumsatz sollte sich der Verbrennungsschwerpunkt jedoch um ca. 10° nach OT befinden. Die Stickoxidwerte zeigen durch das fette Gemisch geringe Werte von 2 – 3 Gramm pro Kilowattstunde. Lediglich im Bereich von Lambdawerten nahe 0,9 steigen sie deutlich an. Der Kohlenwasserstoffausstoß, gezeigt im Kennfeld unten links, bewegt sich größtenteils zwischen 6 und 10 g/kWh. Im Kennfeld der Kohlenmonoxidwerte spiegelt sich wiederum die Lambdakarakteristik wieder und das Minimum von 240 g/kWh befindet sich im Bereich der mageren Gemischzusammensetzung, da mehr Sauerstoff für die Verbrennung zur Verfügung steht.

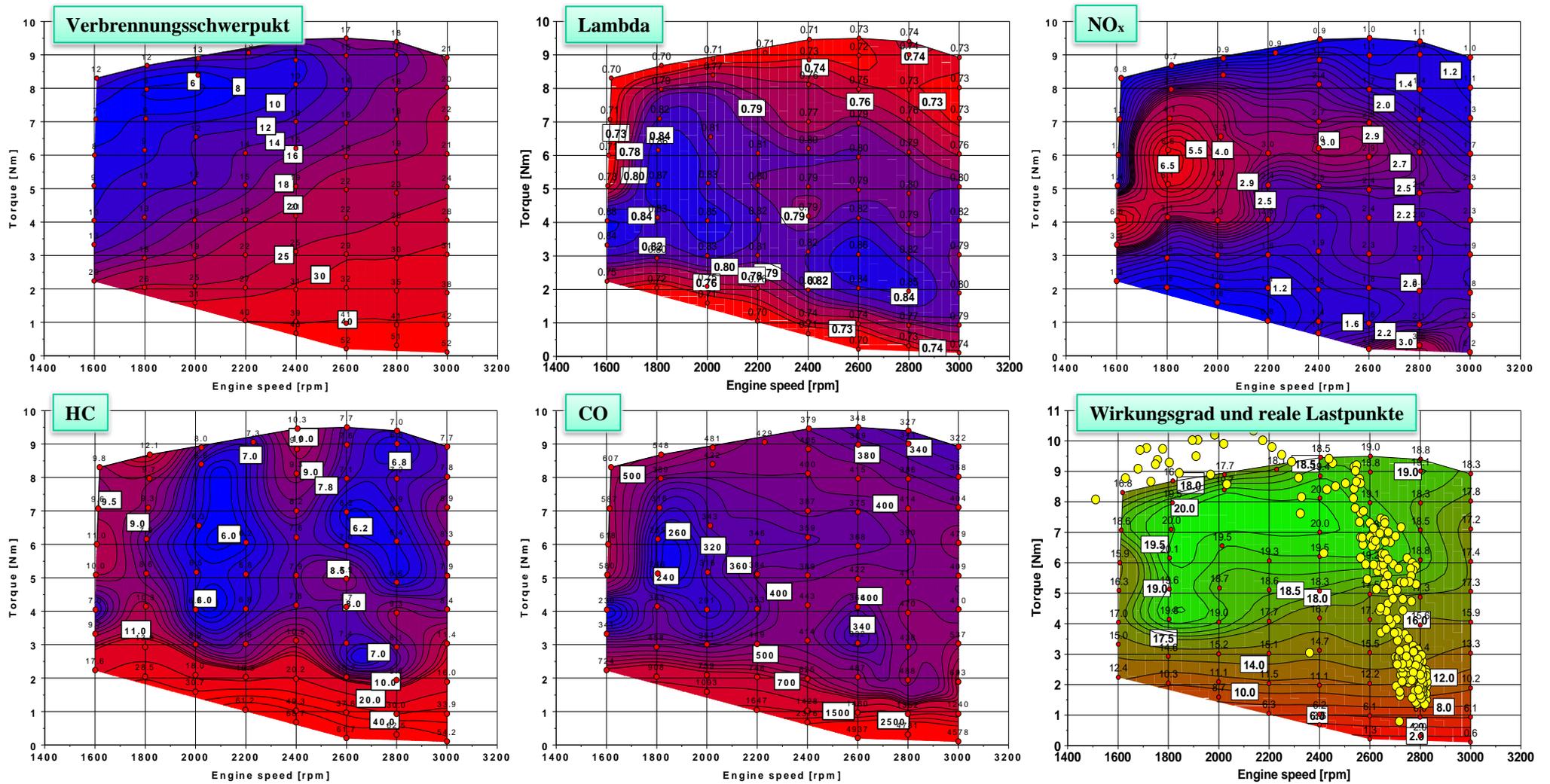


Abbildung 4-31: Kennfelder Rasenmäher von links oben nach rechts unten: Verbrennungsschwerpunkt [°KW], Lambda [-], NO_x [g/kWh], HC [g/kWh], CO [g/kWh], Wirkungsgradkennfeld mit Lastpunkten bei zum Stillstand gebrachten Motor

Zur Bewertung des Rasenmähers konnte zuerst das Wirkungsgradkennfeld beurteilt werden. Aus den Lasterhebungen durch die Realversuche ergibt sich im Leerlauf von 2800 min^{-1} und $1,8 \text{ Nm}$ ein Wirkungsgrad von rund 11 % und unter durchschnittlicher Schnittlast bei 2700 min^{-1} und 7 Nm ein Wirkungsgrad von rund 19 %. Weiters fällt der deutlich unter eins liegende Lambdawert im Motorkennfeld auf, was einen Luftmangel in der Verbrennung darstellt. Aus diesem Luftmangel resultiert auch der hohe Kohlenmonoxidwert im Kennfeld. Kohlenmonoxid kann in einer Verbrennungsreaktion weiter exotherm oxidiert und daraus thermische Energie gewonnen werden. Aus den Lastpunkten der Realmessungen ergibt sich für den Leerlauf eine ungefähre Menge Kohlenmonoxid von $500 \frac{\text{g}}{\text{kWh}}$ und für den Rasenschnitt von $380 \frac{\text{g}}{\text{kWh}}$. Diese chemische Energie geht an die Umwelt verloren und könnte bei vollständiger Verbrennung für die Umwandlung in mechanische Energie genutzt werden.

Betrachtet man weiter den Verlauf der Verbrennung und im Speziellen den Verbrennungsschwerpunkt, ergeben sich für den Leerlauf Werte von 38° Kurbelwinkel nach oberem Totpunkt und für die Schnittlast Werte von 17° KW nach OT. Daraus lässt sich weiter schließen, dass durch die Anpassung des Zündzeitpunktes eine verbesserte Ausnützung der inneren Energie der Zylinderfüllung zu erzielen ist. Die weiter oben bereits erwähnte fehlende Reserve zum Punkt des maximalen Drehmoments bei hohen Lasten stellt zwar keinen direkten Energieverlust dar, zeigt aber einen klaren Nachteil im Einsatzverhalten des Geräts auf. Das Regelverhalten der Laststeuerung, mit dem Drehzahleinbruch als Regelgröße bringt weiteres Potential für eine höhere Leistungsausbeute bei gleichem Basismotor.

4.2.3 Vertiefte Untersuchung ausgewählter Systemgruppen

Es folgten nun vertiefte Untersuchungen ausgewählter Systemgruppen der Versuchsträger. Ein Längsdynamiksimulationsmodell, welches am Institut für einen anderen Einsatzzweck erarbeitet wurde, wurde in einer Überarbeitung auf das Versuchsmotorrad und dessen Energiefluss adaptiert. Für den Rasenmäher erfolgte der Umbau der Messtechnik des Rasenmähermotors vom Prüfstand auf den für die Realtests bereitstehenden Rasenmäher. Nach der Durchführung der Realversuche wurden erneut die gewonnenen Daten ausgewertet. Des Weiteren erfolgt eine Untersuchung des Einlasskanals am Strömungsprüfstand für Zylinderköpfe, welcher am Institut zur Verfügung stand.

4.2.3.1 Motorrad

Wie schon erwähnt, wurde eine vertiefende Analyse des Zusammenspiels der Systemuntergruppen und der daraus folgenden Energieflüsse im Realbetrieb nach den Vorgaben des WMTC Zyklus angestrebt. Ein aus einem Vorprojekt vorhandenes Längsdynamiksimulationsmodell, welches auf dem Prinzip der Vorwärtssimulation beruht, wurde auf den Versuchsträger angepasst und für eine Energieflusssimulation erweitert. Die in der Detailuntersuchung durchgeführte Energieflussanalyse fließt dabei das Simulationsmodell mit ein. Kennfelddaten aus den Messungen am Motorprüfstand bildeten hierfür die Datengrundlage für die Simulation.

In Abbildung 4-32 ist die oberste Ebene des Matlab-Simulink Modells dargestellt. Das Fahrzeug wurde dabei in unterschiedlichen Modellblöcken über mathematische Beschreibungen in der Software abgebildet und somit möglichst nahe der physikalischen Realität abgebildet. Zusätzlich erfolgte im Block „*Drive Cycle*“ der Aufbau eines virtuellen Fahrers, der die Vorgaben aus dem Fahrzyklus an das Fahrverhalten eines menschlichen Fahrers annähert.

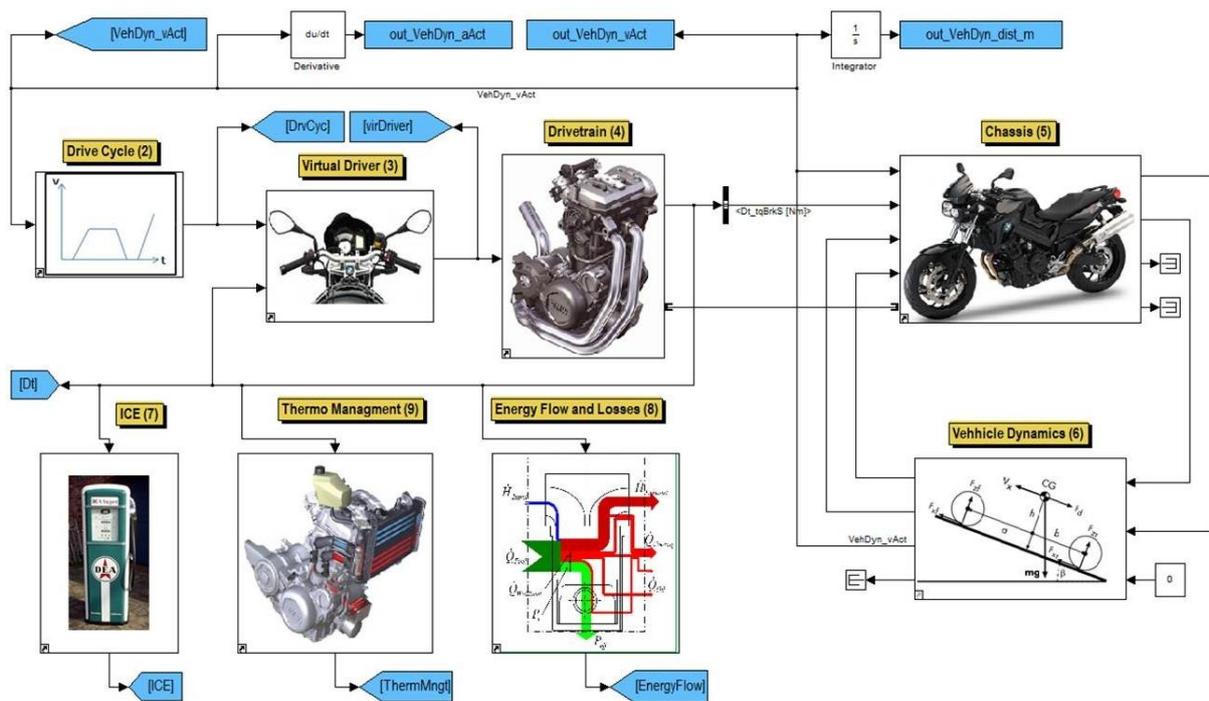


Abbildung 4-32: Matlab Simulink Modell BMW [48]

In den Blöcken „*Drivetrain*“, „*Chassis*“ und „*ICE*“ wurden die mechanischen und physikalischen Eigenschaften der Komponenten und deren Bauteile gemäß den realen Gegebenheiten implementiert. Der Block „*Vehicle Dynamics*“ simuliert die Dynamik des Fahrzeuges während der Fahrt, wie etwa die Lastwechselbewegungen des Aufbaus und die dadurch verursachten Änderungen der Aufstandskräfte an den Rädern. Im Block „*Thermo Management*“, welcher im Schwesterprojekt „*HyPower*“ und der darin enthaltenen Diplomarbeit [31] bearbeitet wurde, erfolgt die Simulation eines thermischen Managements im System. Der Block „*Energy Flow and Losses*“ bildete den Schwerpunkt der Arbeit von *Eta+* an diesem System. Das Konzept dazu wurde in einer Diplomarbeit [48] komplett neu entwickelt und in die Programmierung eingebunden. Die weiter oben gezeigte thermodynamische Analyse der Energieflüsse im Motorrad wurde dabei basierend auf am Motorprüfstand gewonnenen Kennfelddaten in der Simulation abgebildet und in der Längsdynamiksimulation errechnet. Dadurch wurde ermöglicht, das Verhalten von beliebigen Motorconfigurationen ausgehend von stationären Prüfstandsdaten im dynamischen Betrieb zu simulieren.

Ähnlich wie in der Analyse des realen Betriebs des Rasenmähers konnte mit Hilfe der Längsdynamiksimulation nun auch für das Motorrad eine Lastpunktverteilung im simulierten Realbetrieb mit den Vorgaben des WMTC dargestellt werden. Abbildung 4-33 zeigt in Gelb die gemittelten Lastpunkte aus der Simulation, welche über das Verbrauchskennfeld eines Referenzmotorrades gelegt sind. Zu erwähnen ist, dass Motorkennfelder am Prüfstand meist nur bis zu einer gewissen unteren Grenzdrehzahl erfassbar sind. Die mechanischen Belastungen durch Drehmomentungleichförmigkeit im Motorbetrieb unterhalb dieser Grenze führen am starren Prüfstands Aufbau zu Beschädigungen der Komponenten. Im Realbetrieb erlauben die vorhandenen Freiheitsgrade des Antriebsstranges auch einen Betrieb in tieferen Drehzahlbereichen. Daher fallen in der Simulation viele Lastpunkte in den linken unteren Bereich des verfügbaren Kennfeldes. Es ist zu erkennen, dass kaum Lastpunkte über 6 bar Mitteldruck (BMEP) vorkommen. Auch werden Drehzahlen über 5000 min^{-1} nicht überschritten. Last und Drehzahl hängen bei realer Fahrt sehr individuell vom Fahrerverhalten ab. Auch in der Simulation konnte das Schaltverhalten des virtuellen Fahrers auf bestimmte Drehzahlgrenzen angepasst werden. In diesem Beispiel wurden die Schaltpunkte nach der Vorgabe der Gesetzgebung im WMTC ausgelegt. Die Last über die Geschwindigkeit und Beschleunigung ist jedoch exakt vom

Fahrzyklus vorgegeben und spiegelt ein reales Lastkollektiv wider. Sehr gut zu erkennen ist, dass im Realbetrieb das Motorrad vorwiegend in moderaten Wirkungsgradbereichen betrieben wird.

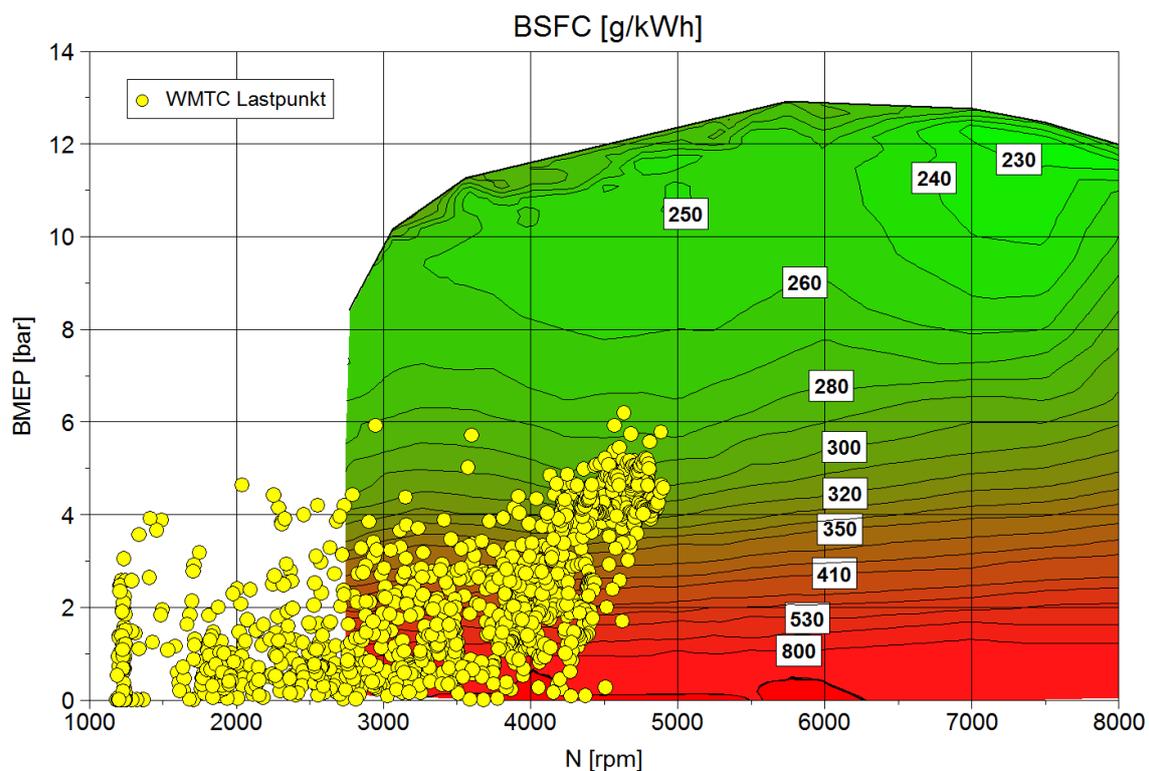


Abbildung 4-33: Simulierte Betriebspunkte im Verbrauchskennfeld des Referenzmotorrades

Nur wenige Lastpunkte bewegen sich bei den in diesem Kennfeld guten Werten von 300 g/kWh und ein großer Anteil befindet sich unter 500 g/kWh. Die Bestwerte von 230 g/kWh werden in diesem Kennfeld klar verfehlt und eine Vollastfahrt bei ca. 7000 min^{-1} im realen Betrieb ist nur zu geringen Teilen zu erwarten. Dies zeigt ein Potential zur Optimierung auf. Eine Auslegung der Antriebe auf Spitzenleistung ergibt zwar ein gutes Argument für emotional getriebene Verkaufsentscheidungen, ist jedoch hinsichtlich Effizienz klar nachteilig. In der Optimierungsphase wird eine Lösung für diesen Zielkonflikt erarbeitet.

4.2.3.2 Rasenmäher

Die Lastregelung erfolgte in diesem Versuchsobjekt wie in ähnlichen, mit konstanter Arbeitsdrehzahl laufenden Arbeitsmaschinen über eine Regeleinrichtung, die über Fliehkraft betätigt wird. Dieser Fliehkraftregler wurde bereits 1788 von James Watt [89] zur Drehzahlregelung von Dampfmaschinen eingesetzt und hat sich seither im Funktionsprinzip nicht maßgeblich verändert. Als Regelgröße benötigt dieser Regler eine Drehzahldifferenz zwischen Solldrehzahl und aktueller Drehzahl. Dies bewirkt eine Abweichung der Arbeitsdrehzahl im Grasschnitt und somit ein ungenütztes Potential zur möglichen Arbeitsdrehzahl bei Einhaltung der Lärmemissionsvorschriften. Weiters besitzt das mechanische Prinzip des Reglers eine physikalische Trägheit und ermöglicht somit eine begrenzte Reaktionsgeschwindigkeit auf Lastsprünge. Um dem entgegen zu wirken, werden zum Beispiel aufwändige Zwischengetriebe entworfen, um Einfluss auf die Regelcharakteristik zu nehmen, wie bei Fukushima [30] gezeigt wird. Für die Gemischaufbereitung im Vergaser gilt ähnliches. Das Funktionsprinzip ist lange bekannt und es wurde bereits umfangreich versucht, über immer komplexere Systeme die Eigenschaften der Gemischaufbereitung auf steigende Anforderungen der Verbrennung in Ottomotoren anzupassen, siehe dazu Eichlseder [19]. Aufwändige Vergasersysteme sind jedoch empfindlich im

Einsatz und benötigen eine regelmäßige Wartung, wodurch sie für diesen Einsatzbereich nicht brauchbar sind. Die Zündanlage im Rasenmäher ist ein elektromechanisches System auf Basis von Induktion. Ein an einer Spule vorbeistreichender Permanentmagnet induziert dabei eine Spannung im Zündkreis, welche zur Entladung eines Funkens an der Zündkerze führt. Der Permanentmagnet ist an der Schwungmasse des Motors befestigt und die Spule an einem geeigneten Ort am Gehäuse [41]. Durch dieses sehr einfache System kann der Zeitpunkt der Zündung nur über die relative Winkelposition des Magneten oder der Spule zur Kurbelwelle festgelegt werden und ist im Betrieb nicht veränderbar. Was auch die Ausprägung des im Kennfeld dargestellten Verbrennungsschwerpunktes erklärt.

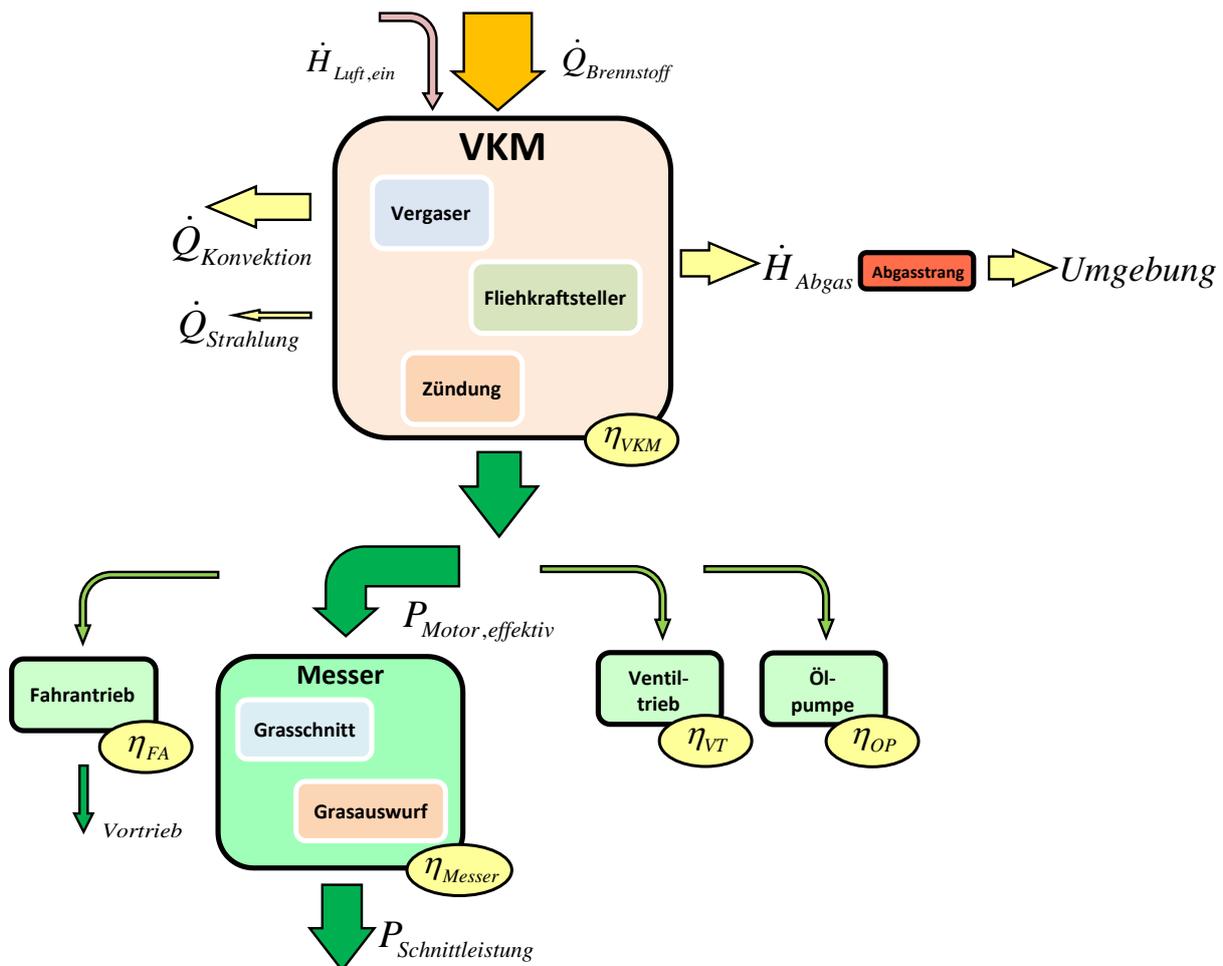


Abbildung 4-34: Erweitertes Modellabbild Rasenmäher

Abbildung 4-34 zeigt das vertiefte Modellabbild des Rasenmähers. Gezeigt sind die Komponenten im Rasenmähermotor, die für die Lastregelung, die Gemischaufbereitung und Zündung verantwortlich sind. Weiters ist der im Zylinderkopf verlaufende Einlasskanal und dessen Ausformung entscheidend für die Füllung des Zylinders mit frischem Kraftstoff-Luft Gemisch. Im Rasenschnitt konnte eine Aufteilung des Energieflusses auf Schneide- und Auswurfvorgang getroffen werden.

Der Einbau der bereits am Motorprüfstand verwendeten Messdatenerfassung in den Versuchsrasenmäher, ermöglichte eine umfangreiche Messgrößenerfassung im Realbetrieb. Um das Regelverhalten des Fliehkraftreglers beurteilen zu können, wurden die aus dem vorhergehenden Realversuch bekannten Messgrößen um eine Erfassung der Drosselklappenbewegung erweitert. Dazu wurde, wie in Abbildung 4-35 dargestellt ist, ein Winkelpotentiometer mit der Drehwelle der Drosselklappe verbunden und dessen Ausgangssignal im Datenlogger aufgezeichnet. Die Durchführung der Realversuche erfolgte analog zum in Kapitel 4.2.1 dargestellten Vorgehen.

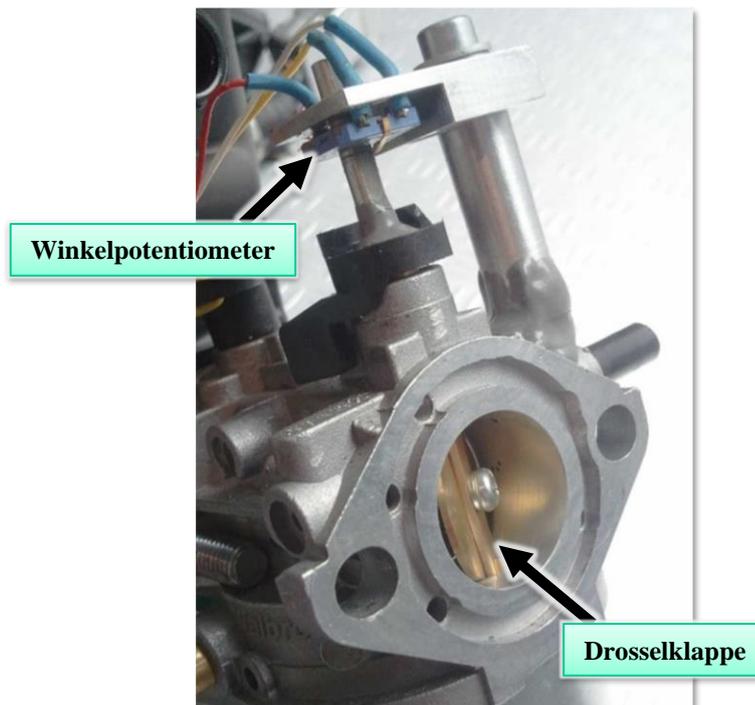


Abbildung 4-35: Winkelgeberanbau für die Drosselklappenstellung

Wertet man die Daten aus den Realversuchen im Rasenmäher hinsichtlich der Aufteilung der Schnittkraft auf die benötigte Kraft für den Grasschnitt und jene für den Luftwiderstand und somit näherungsweise für den Grasauswurf des Flügelmessers aus, wurden folgende Aussagen möglich.

Tabelle 4-9: Erweiterte Verlustteilung im Rasenmäher

Lasten	Anteil
Durchschnittliche Gesamtschnittlast von 6 Nm auf der Rasenfläche	100 %
Fahrtrieb auf der Rasenfläche im 2.Gang	9,8 %
Leerlauf mit Flügelmesser auf der Rasenfläche (näherungsweise Grasauswurf)	29,8 %
Resultierende Last für Grasschnitt auf der Rasenfläche	60,4 %

Für den Fahrtrieb im 2. Gang auf Rasen konnte der in diesem Versuch bereits bekannte Anteil von ca. 10 % herangezogen werden. In Addition mit der Last des Flügelmessers im Leerlauf auf bereits gemähter Rasenfläche ergab sich eine resultierende Last für den Grasschnitt auf Rollrasen von rund 60 % oder 3,6 Nm. Eine Ungenauigkeit ergab sich hierbei im Leerlauf auf Rasenfläche, welcher zwar den erzeugten Luftstrom für den Grastransport erzeugt, jedoch die mechanische Reibung mit dem Schnittgut nicht enthält, da im Leerlauf kein Schnittgut vorhanden ist. Dieser Anteil wurde in dieser Verlustteilung dem Grasschnitt zugerechnet.

Abbildung 4-36 zeigt die aus Kapitel 4.2.1 bereits bekannte Darstellung der Zyklennittelwerte und die dazugehörigen Histogramme im Realbetrieb. In Blau ist nun jedoch die Drosselklappenposition wiedergegeben und die schwarze strichpunktierte Linie zeigt die zeitliche Abfolge der Mittelwerte. In Rot und auf der x-Achse ist wiederum die Drehzahl aufgetragen. Klar zu erkennen ist die Häufung der Drosselklappenstellung im Bereich zwischen 15 % und 30 % mit einer ausgeprägten Spitze bei rund 23 %.

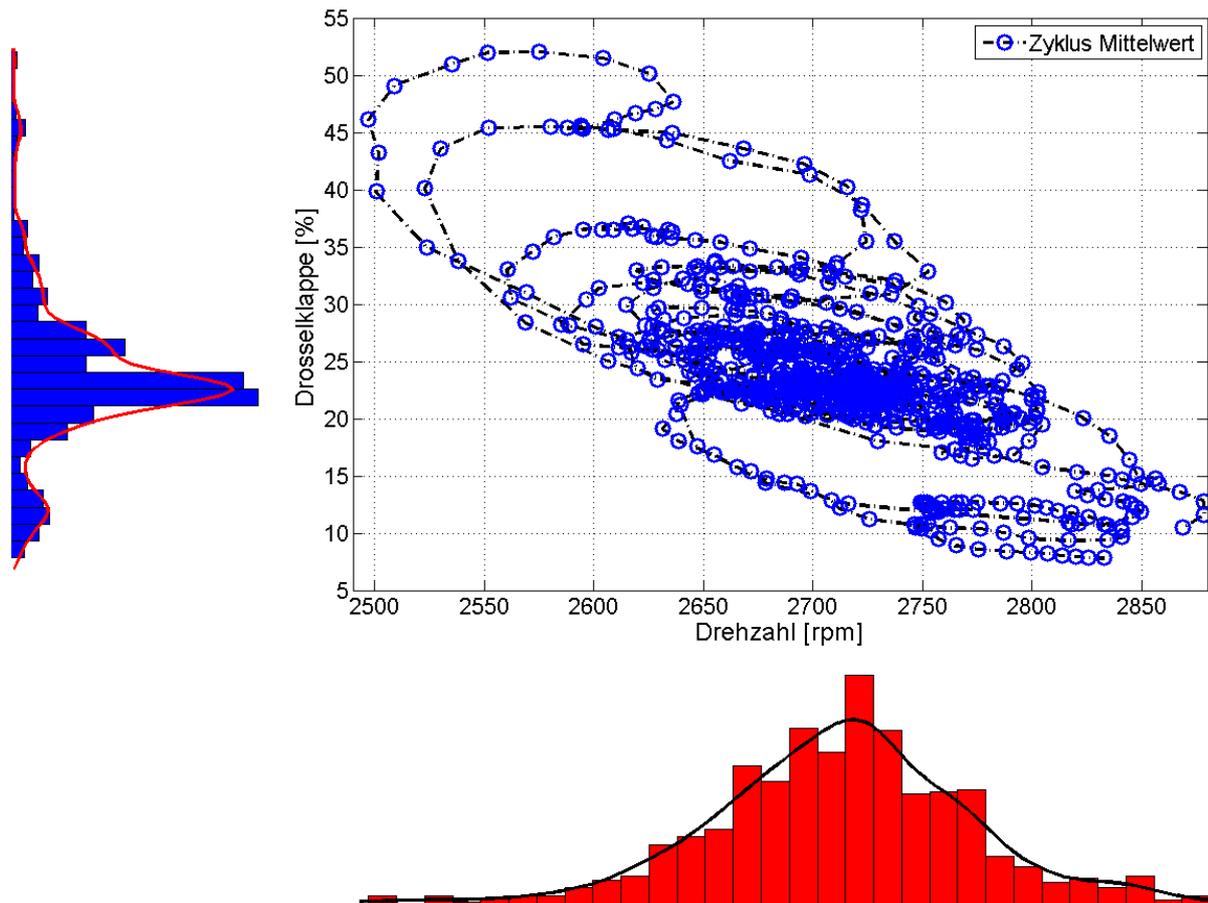


Abbildung 4-36: Verteilung der Drosselklappenstellung auf Rollrasen

Dies zeigt im Vergleich mit der Lastpunktverteilung aus der ersten Analyse, dass ein weiter Bereich der Motorlast über einen geringen Bereich der Drosselklappenstellung abgedeckt wird. Nur bei Lastspitzen mit einem Drehzahleinbruch auf bis zu 2500 min^{-1} ist die Regelgröße ausreichend, um die Drosselklappe auf 45 – 50 % zu öffnen. Gut zu erkennen sind auch der Verlauf der Hochlastpunkte und die Antwort des Reglers darauf. Dabei kann eine maximale Öffnungsgeschwindigkeit der Drosselklappe von ca. 7 % pro Zyklus respektive zwei Motorumdrehungen gefunden werden. Die weiten Kurven, die die Reglerantwort auf die Lastspitzen beschreibt, zeigen ein klares Potential für eine Beschleunigung des Regelverhaltens und somit für eine Produktverbesserung.

Abbildung 4-37 gibt das Histogramm des Verbrennungsschwerpunktes auf Rollrasen wieder. Der Gutteil der Verteilung liegt im Bereich zwischen 16° und 26° nach oberem Totpunkt mit einem Maximalwert der Verteilung bei ca. 23° . Dies zeigt deutlich die zu späte Verbrennungslage und somit einen energetischen Verlust, woraus sich wiederum ein Verbesserungspotential ergibt. Eine variable Zündung, die über das Kennfeld angepasst wird, kann hier eine deutliche Verbesserung in Richtung des Optimums von $8 - 10^\circ$ bringen.

In Abbildung 4-38 ist der Verlauf des Lambdawertes im Realversuch auf Rollrasen zu sehen. Zusätzlich ist das Histogramm mit der Verteilungskurve in Schwarz gezeigt. Wiederum bestätigten sich die vom Prüfstandsversuch erhaltenen Werte. Der Lambdawert bewegt sich mehrheitlich im Bereich zwischen 0,85 und 0,74 mit einem Häufigkeitsmaximum bei 0,8. Einzelne Spitzen, verursacht durch Lastwechsel können auch unter 0,67 fallen. Diese sehr fette Gemischeinstellung zeigt einen deutlichen Verlust an und bietet großes Potential für eine Verbesserung hin zum stöchiometrischen Luftverhältnis von 1. Auch der in der Literatur angegebene Wert von 0,9 für eine optimale Leistungsabgabe des Motors liegt noch deutlich über 0,8 und bietet immer noch gute Optimierungsmöglichkeiten.

Während der Arbeiten am Versuchsmotor fiel die Gestaltung des Einlasskanals im Zylinderkopf ins Auge. Diese weicht deutlich von der standardmäßig angewendeten Form für Ottomotoren mit Vergaser oder Saugrohreinspritzung ab. Es konnte durch die rechtwinkelige Form und durch gut erkennbare Kanten und Grate eine Erhöhung des Strömungswiderstandes im Einlasskanal vermutet werden. Weiters kann die asymmetrische Anordnung von Einlass- und Auslassventil eine für einen klassischen Ottomotor ungünstige Einstromsituation in den Zylinder im Ansaugtakt verursachen. Durch die einfache Verfügbarkeit eines Strömungsprüfstandes für Zylinderköpfe am Institut, konnte eine ergänzende Detailuntersuchung des Einlasskanals erfolgen.

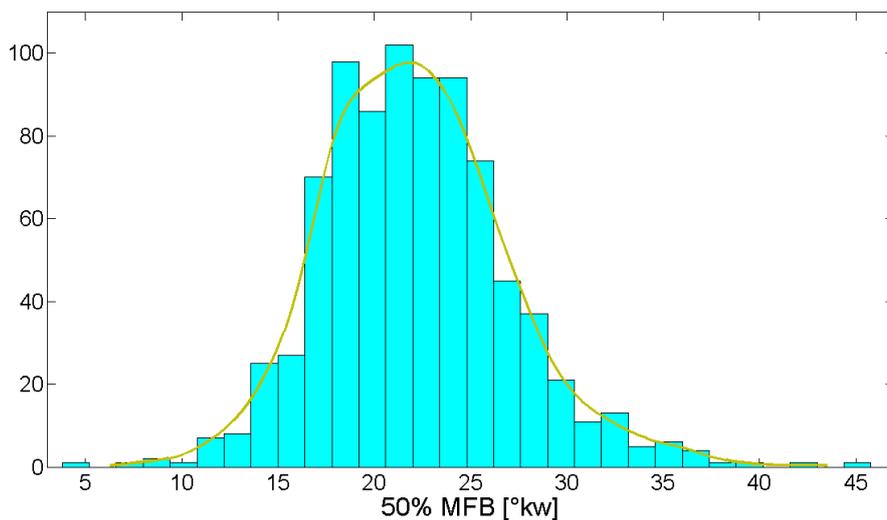


Abbildung 4-37: Histogramm Verbrennungsschwerpunkt auf Rollrasen

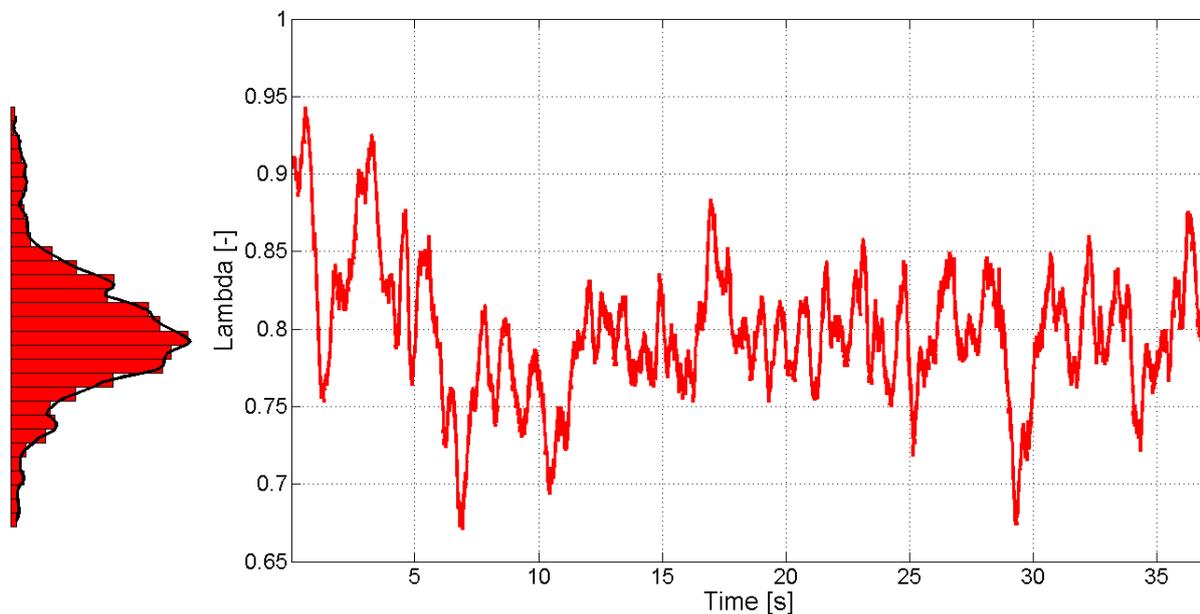


Abbildung 4-38: Lambdaverlauf auf Rollrasen



Abbildung 4-39: Zylinderkopf des Rasenmähermotors am Strömungsprüfstand

Abbildung 4-39 zeigt den am Prüfstand angebrachten Zylinderkopf. Mit diesem Prüfstand wurden die Einströmeigenschaften der Ansaugluft über die Einlasskanäle in den Motor analysiert und bewertet. Dabei geben die ermittelten Werte beim Einströmen ein Maß für die Qualität der Zylinderfüllung im Ansaugtakt wieder. Diese wird über den Durchflusskennwert $\mu\sigma$ nach der Formel

$$\mu\sigma = \frac{\dot{m}_e}{\dot{m}_{th}} \quad (4-31)$$

bewertet, siehe dazu Pischinger [60]. Der effektive, am Prüfstand gemessene Massenfluss der einströmenden Luft \dot{m}_e wird dabei auf den über die Durchflussgleichung berechneten, bei vorliegenden Bedingungen theoretisch möglichen Massenfluss \dot{m}_{th} bezogen. Dieser theoretische Durchfluss berechnet sich aus

$$\dot{m}_E = \mu\sigma_E A_{VE} \frac{p_E}{RT_E} \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} \left[\left(\frac{p_Z}{p_E} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{p_Z}{p_E} \right)^{\frac{(\kappa+1)}{\kappa}} \right]} \quad (4-32)$$

mit A_{VE} als Querschnitt des Einlasses am Ventilsitz, mit den Drücken p_E und p_Z für den Einlasskanal und den Zylinder, mit der spezifischen Gaskonstante R von Luft, mit der Lufttemperatur T_E im Einlass und dem Isentropenexponent κ von Luft.

Als weitere Bewertungsgrößen für den Einlasskanal können die Drall- und Tumblezahl, Dz und Tz , hinzugezogen werden. Diese Kennzahlen beschreiben den Strömungszustand der Frischladung im Zylinder, wobei der Drall eine Luftströmung um die senkrechte Zylinderachse darstellt und der Tumble eine liegende Walze mit einer Rotationsachse 90° zur Zylinderachse beschreibt, siehe dazu Eichlseder [16].

Am Strömungsprüfstand werden diese zwei Kenngrößen mit Hilfe eines Tippelmann-Messsystems erfasst. Dieses beinhaltet einen sphärischen Messkopf mit Drehmomenterfassung in drei Achsenrichtungen. Aus den erfassten Momenten lässt sich über die Formeln

$$Dz = \frac{M_Z \cdot R_{Zyl}}{\dot{V}^2 \cdot \rho} \quad (4-33)$$

beziehungsweise

$$Tz = \frac{M_{XY} \cdot R_{Zyl}}{\dot{V}^2 \cdot \rho} \quad (4-34)$$

die Intensität der Luftbewegung in Bezug auf die genannten Achsenrichtungen errechnen, siehe dazu Winkler [95]. In diesem Fall beschreibt M_{XYZ} das Moment in jeweiliger Achsenrichtung, R_{Zyl} den Zylinderradius, \dot{V} den Volumenstrom und ρ die Dichte der Luft.

Die Ergebnisse der Untersuchungen am Strömungsprüfstand sind in den folgenden Darstellungen gezeigt. In Abbildung 4-40 ist der Durchflusskoeffizient des Einlasskanals vom Rasenmähermotor in Blau gegenüber einem Referenzkanal in Rot aufgetragen. Der auf eine verbesserte Zylinderfüllung ausgelegte Referenzkanal stammt aus einem Motorrad-Ottomotor und zeigt Durchflusswerte bis 0,6. Die Werte vom Einlasskanal des Rasenmähers flachen ab einem Ventilhub von 3 mm deutlich ab und steigern sich bis 8 mm Ventilhub nur mehr zu einem Maximalwert von 0,4. Dies zeigt einen klar verschlechterten Durchfluss im Einlasskanal des Rasenmähers gegenüber Werten von besser ausgelegten Kanälen.

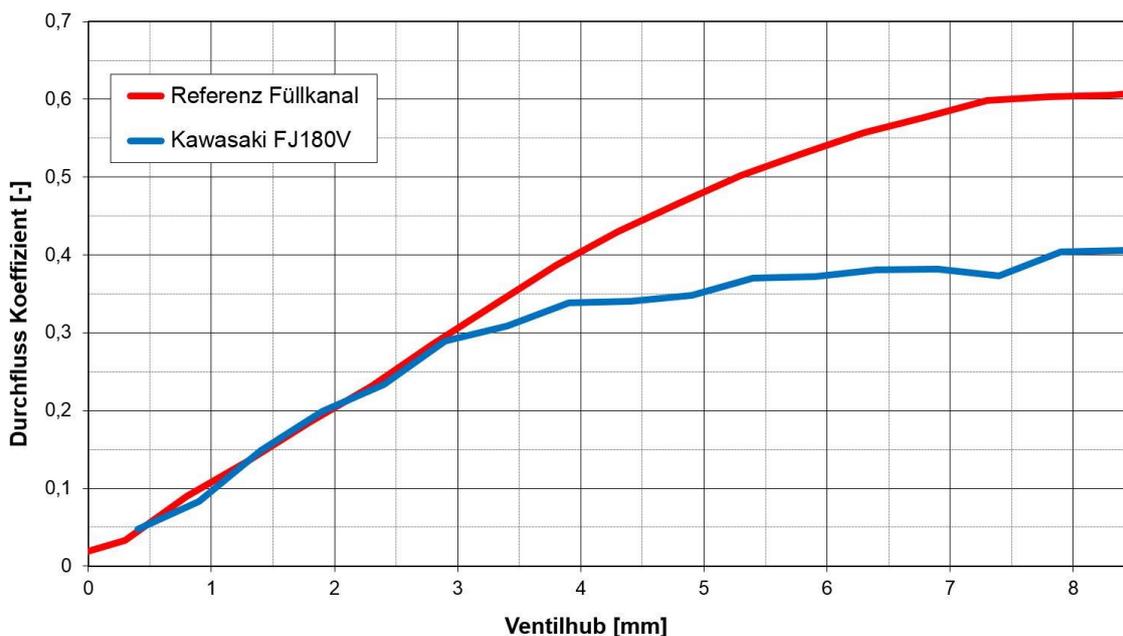


Abbildung 4-40: Vergleich der Durchflusskoeffizienten

Vergleicht man dazu die in Abbildung 4-41 aufgetragene Drallzahl, ist sehr gut zu sehen, dass eine verstärkte Drehbewegung mit vertikaler Drehachse vorhanden ist. Für einen klassischen Ottomotor mit Gemischaufbereitung über einen Vergaser ist eine solche Zylinderströmung nicht anzustreben und bringt Nachteile in der möglichen Zylinderfüllung mit Frischgasmasse mit sich. Eine Überarbeitung des Zylinderkopfes auf eine bessere Zylinderfüllung stellt daher ein weiteres Potential für die Produktoptimierung dar.

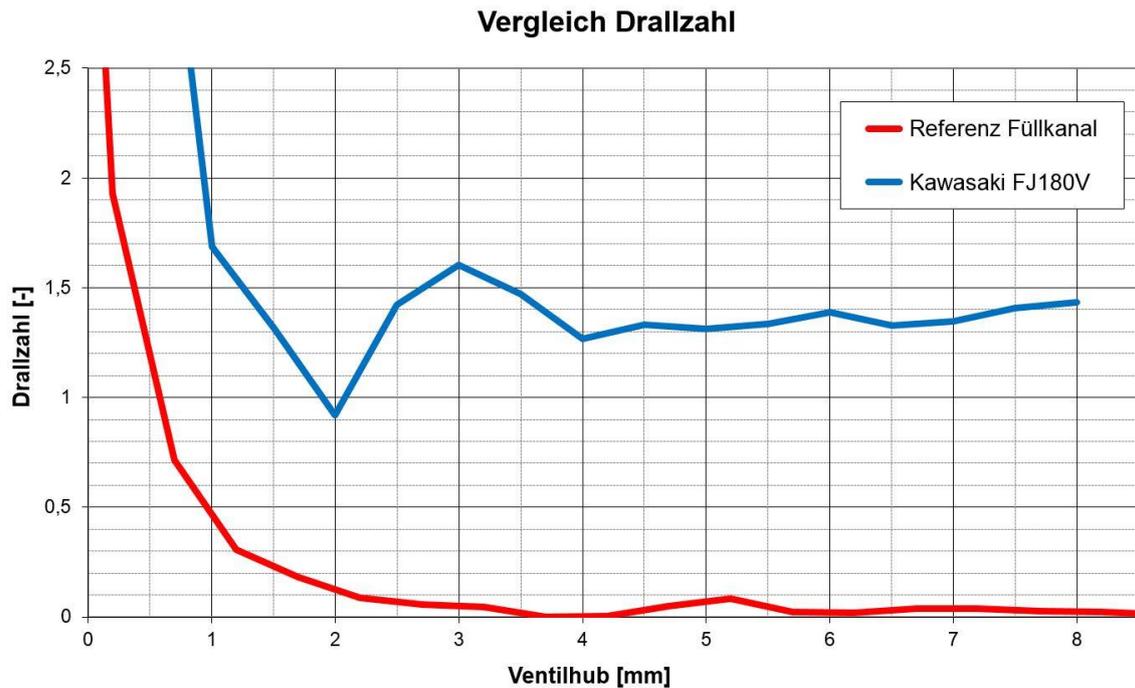


Abbildung 4-41: Vergleich der Drallzahlen

Review

Die Längsdynamiksimulation des Motorrades und die daraus abgeleiteten Lastpunkte über den Fahrzyklus zeigten im Referenzkennfeld klar die Nachteile der sportlichen Auslegung und der großen Kraftreserve in der Motorisierung von Fahrzeugen dieser Art. Fahrzustände mit optimalen Wirkungsgrad werden nur selten erreicht und wenn, dann nur für äußerst begrenzte Zeit. Lediglich bei Fahrten über Passstraßen mit Gepäck und Beifahrer können höhere Lastpunkte erwartet werden. Auch lassen die Geschwindigkeitsbeschränkungen auf Landstraßen in Europa keine hohen Lasten zu. Viele Motorradpiloten bevorzugen ein etwas agileres Dahingleiten mit kurzen Beschleunigungsphasen aus dem unteren Drehzahlbereich. Eine entsprechende Kraftreserve dazu ist ein wichtiges Kriterium für die Kaufentscheidung. Wie schon in der Detailuntersuchung gezeigt, bietet der Abgasstrom den größten Exergieinhalt der Verlustenergie im Motorrad. Diesen nutzbar zu machen, kann ein möglicher Weg für einen effizienteren Antrieb sein. Die intensivere Analyse des Systems Rasenmäher zeigte viele Potentiale zur Verbesserung des Produktes. Eine mögliche Anhebung der Schnittdrehzahl gemeinsam mit der Optimierung des Reglerverhaltens für die Laststeuerung ist eine erste Möglichkeit. Weiters kann über die Verbesserung der Verbrennungseigenschaften mit Verbrennungsschwerpunkt, Luftverhältnis, Abgaszusammensetzung und Steigerung der Zylinderfüllung eine Verbesserung erzielt werden. Auch in einer möglichen Reduktion der Schnittkraft über eine Überarbeitung des Messers sind Optimierungsmöglichkeiten zu erkennen. Der Realversuch zeigte, dass der Nutzer dieses Gerät meist bei möglichst hoher Fahrgeschwindigkeit und somit hoher Last betreibt. Zusätzliche Lastspitzen durch dichtere Rasenpassagen oder Erdhaufen brachten den Motor dabei rasch an seine Grenzen. Eine schnelle Reglerreaktion und ein größerer Spielraum hin zum maximal möglichen Drehmoment, zeigen Potentiale zur Verbesserung und sollten daher angestrebt werden. Die Literaturrecherche sowie Gespräche mit Herstellern und Nutzern zeigten, dass der Kraftstoffverbrauch in diesem Produktsegment nur zu einem geringen Teil bewusst wahrgenommen wird. Geräteperformance, oft unter erschwerenden Einsatzbedingungen sowie der Produktpreis sind hier die klar dominierenden Kriterien. Das nicht gerade optimale Abgasverhalten und somit die Luftverschmutzung durch das Gerät wird vom Nutzer nicht wahrgenommen und ist daher kein Verkaufsargument.

4.3 Optimierungsphase Eta+

Abbildung 4-42 stellt nochmals die Verbindung zum entsprechenden Kapitel 3.5.3 auf Seite 47 in der Methodik *MEta+* her.

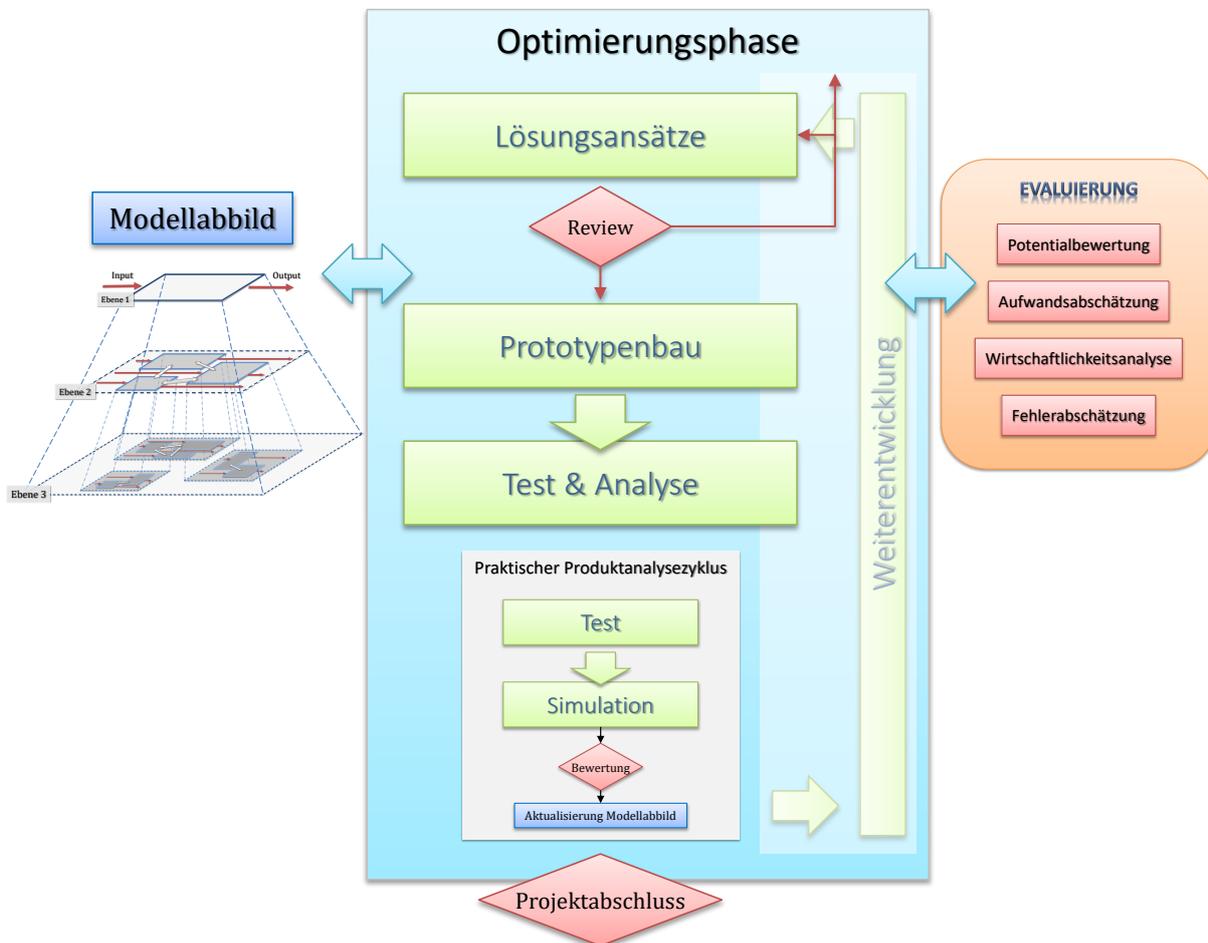


Abbildung 4-42: Optimierungsphase im Detail

Zuerst wurden Lösungsansätze für die gefundenen Verlustenergien zu erarbeitet. Anschließend folgte das Umsetzen dieser Ideen in Prototypen, welche in einer abschließenden Test- und Analysephase bewertet wurden. Die mögliche Weiterentwicklung der Prototypen in einer zusätzlichen Optimierungsschleife war nicht mehr Gegenstand dieser Dissertation.

4.3.1 Lösungsansätze erarbeiten

4.3.1.1 Motorrad

Für das Motorrad ergaben die bisherigen Ergebnisse, dass die Verlustenergie im Abgas, welche auch über unterschiedliche Fahr- und Lastzustände konstant nutzbar ist, für Lösungsansätze betrachtet werden sollte. Hepke [37] untersucht die Möglichkeiten zur direkten Nutzung der Abgasenergie für die Erwärmung der Antriebsstrangkomponenten oder der Fahrgastzelle im Warmlauf des Fahrzeugs. Pucher [65] beschäftigt sich unter anderem mit der Aufladung von Verbrennungsmotoren und der Wandlung der im Abgas enthaltenen Enthalpie in mechanische Energie mit Hilfe eines Abgasturboladers. Dabei wird auch Downsizing von Verbrennungskraftmaschinen thematisiert, bei dem bei gleichen Leistungsdaten eine Verringerung der Motorgröße, z. B. um einen Zylinder angestrebt wird. Dies wird unter anderem durch eine Aufladung des Motors erzielt. Weiters besteht die Möglichkeit über die Aufladung des Motors ein höheres Drehmoment im unteren Drehzahlbereich zu realisieren, was wie schon zuvor gezeigt,

zu einem effizienteren Realeinsatz des Motorrads beitragen kann. Für die Aufladung kommen verschiedene Bauarten von Verdichtern wie z.B. ein Roots-Verdichter, ein Spiral- oder Scrollverdichter oder ein Turboverdichter in Frage. Um die Abgasenthalpie für die Aufladung nutzen zu können, sind wiederum verschiedene Technologien verfügbar. Zum einen die klassische Abgasturbine, welche den Verdichter direkt mechanisch antreiben kann oder die mechanische Energie über einen Generator in speicherbare elektrische Energie wandeln kann. Zum anderen existiert auch das Complex bzw. Hyprex System, welches einen Teil der Abgasenthalpie über rotierende Zellen direkt zur Kompression an die angesaugte Frischluft überträgt. Weiters besteht die Möglichkeit die thermische Energie über thermoelektrische Generatoren, den sogenannten Seebeck-Zellen direkt in elektrische Energie zu wandeln. Auch ein Betrieb eines Dampf- oder Gaskreisprozess ist möglich. Inhalte zu diesen Themen finden sich unter anderem bei Feulner [27], Bredel [7], Seifert [74] oder Freymann [29]. Im hier untersuchten Versuchsmotorrad wird eine Lösung auf Basis eines Abgasturboladers im Schwesterprojekt *LOCO₂* untersucht.

4.3.1.2 Rasenmäher

Im Rasenmäher konnten viele Verbesserungspotentiale im Bereich der Verbrennungskraftmaschine gefunden werden. Der Zündzeitpunkt und die Verbrennungslage liegen nicht ideal und können über eine elektronisch gesteuerte Zündanlage beeinflusst werden. Um eine aktive Gemisch- und somit Lambdaeinstellung über das gesamte Kennfeld vorzunehmen, kann eine Saugrohreinspritzung des Kraftstoffes in Kombination mit einer elektronischen Motorsteuerung zum Einsatz kommen. Dadurch besteht die Möglichkeit zur Einflussnahme auf den Verbrauch, das Abgasverhalten sowie die optimierte Leistungsabgabe über Hochlast- und Beschleunigungsanreicherung. Mit einer Motorsteuerung kann auch eine elektronisch geregelte Drosselklappe verwendet werden. Diese zeichnet sich durch eine sehr schnelle Reaktionsgeschwindigkeit aus und benötigt lediglich eine kleine Drehzahldifferenz als Regelgröße. Somit konnte versucht werden, die Differenz zur maximal möglichen Schnittdrehzahl zu verringern und die Reaktionsgeschwindigkeit zu erhöhen. Die Kühlung des Motors erfolgte über die Luftkühlung des Gehäuses und ist somit anfällig auf Überhitzung bei hohen Lasten. Darum wurde die Motortemperatur zusätzlich über fettes Gemisch und somit geringere Verbrennungstemperaturen in problemlosen Bereichen gehalten. Möglichkeiten dem zu begegnen sind zum einen eine Senkung der Verbrennungstemperatur über eine gesteuerte Abgasrückführung und zum anderen die aktive Kühlung des Zylinders durch einen Kühlmantel. Für die Kühlung kann das bereits zur Schmierung eingesetzte Öl verwendet werden, welches im betrachteten Motor bereits durch eine Ölpumpe umgewälzt wurde. Der mögliche Einsatz der Abgasrückführung und somit Reduktion der Verbrennungstemperatur bringt auch eine Minderung der durch die magere Verbrennung entstehenden Stickoxide, welche ansonsten zu einem Problem im Schadstoffausstoß führen. Die Überarbeitung des Zylinderkopfes und eine Optimierung des Einlasskanals birgt Potential für ein verbessertes Einströmverhalten. Das Resultat kann eine gesteigerte Zylinderfüllung und eine schnellere Verbrennung mit mehr Stabilität sein. Vielfältige Informationen zu all diesen Themen finden sich zum Beispiel bei Eichlseder [16][19], Pischinger [60], Sams [70] oder Stoffregen [81].

Die Entscheidung ist in diesem Projekt auf eine elektronische Motorsteuerung mit elektronischer Zündung, einem vereinfachten Umbau der Ansaugstrecke auf Saugrohreinspritzung und einer elektronisch geregelten Drosselklappe gefallen.

4.3.2 Prototypenbau

In dieser Phase der Forschungsarbeit erfolgten die Planung und Konstruktion sowie die Fertigung und der Aufbau der Prototypen.

4.3.2.1 Motorrad

Die Konzeptionierung, Untersuchung und Optimierung der Abgasturboaufladung erfolgte zur Gänze im Projekt *LOCO₂*. Die Arbeit in diesem Projekt mündete ebenfalls in einer Dissertation, welche zum Verfassungszeitpunkt dieser Dissertation noch in Arbeit war und es wird an dieser Stelle an die daraus folgende Veröffentlichung verwiesen. Aus diesen Gründen erfolgt hier lediglich eine Beschreibung der in der Forschungsarbeit im Zuge des Projektes *Eta+* durchgeführten Untersuchungen und der dafür notwendigen Arbeiten am Prototyp in der Test- und Analysephase.

4.3.2.2 Rasenmäher

Als erstes erfolgte die Neukonstruktion der Ansaugstrecke, um den Kraftstoffinjektor und die neue Drosselklappe samt Aktuator aufzunehmen. Geplant wurde eine Niederdruck-Saugrohrinspritzung mit einem Arbeitsdruck von 5 bar. Dazu wurde ein passender Injektor ausgewählt und ein Kraftstoffsystem mit Pumpe, Druckbegrenzer und Filter zusammengestellt. Für die elektronische Drosselklappensteuerung wurde eine elektromechanische Drosselklappeneinheit verwendet. Abbildung 4-43 zeigt die Einbauposition des Injektors und der Drosselklappeneinheit am Flanschstück zum Einlasskanal.

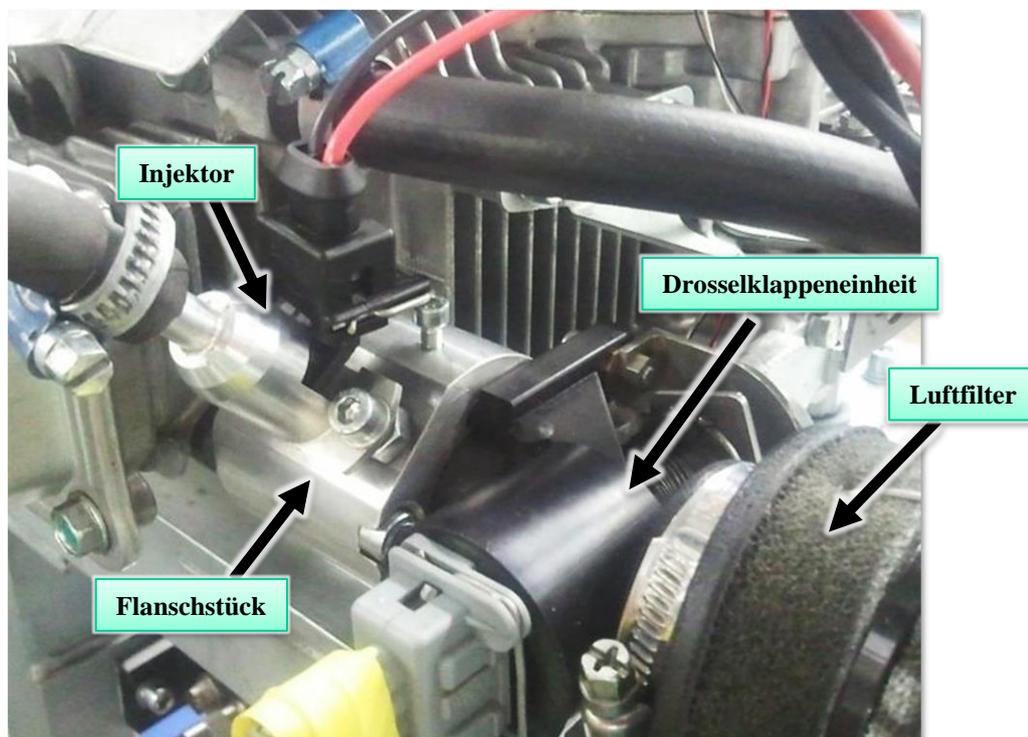


Abbildung 4-43: Injektor und Drosselklappenaktuator am Rasenmähermotor-Prototyp

Im linken Bildabschnitt kann man den im Flanschstück integrierten Injektor mitsamt der Steckeranbindung und der angeschlossenen Kraftstoffleitung erkennen. Rechts auf der äußeren Seite des Flanschstücks sind das schwarze Gehäuse der Drosselklappeneinheit, die dazugehörige Verkabelung und der Luftfilter zu sehen. Weiters wurde ein Kabelbaum entworfen, um das Motorsteuergerät mit den Sensoren und den anzusteuern den Komponenten zu verbinden.

In Abbildung 4-44 ist der Prüfstands Aufbau mit allen modifizierten Einbauten am Prototyp abgebildet. Rechts im Bild ist der Kabelbaum inklusive Motorsteuergerät zu erkennen, welcher für Modifikationen noch möglichst leicht zugänglich neben dem Motorbock montiert ist. Abbildung 4-45 zeigt den fertigen Zusammenbau des Prototypen im Rasenmäher. Der Motorelektronik wurde dabei in einem spritzwasserdichten Gehäuse an der Stirnseite des Rasenmähers

angebracht, um die Versuche bei jeder Witterung problemlos durchführen zu können. Die Stromversorgung des Gerätes erfolgt über Netzteile, welche am Messgerätewagen mitgeführt und von einem mobilen Stromgenerator versorgt werden.

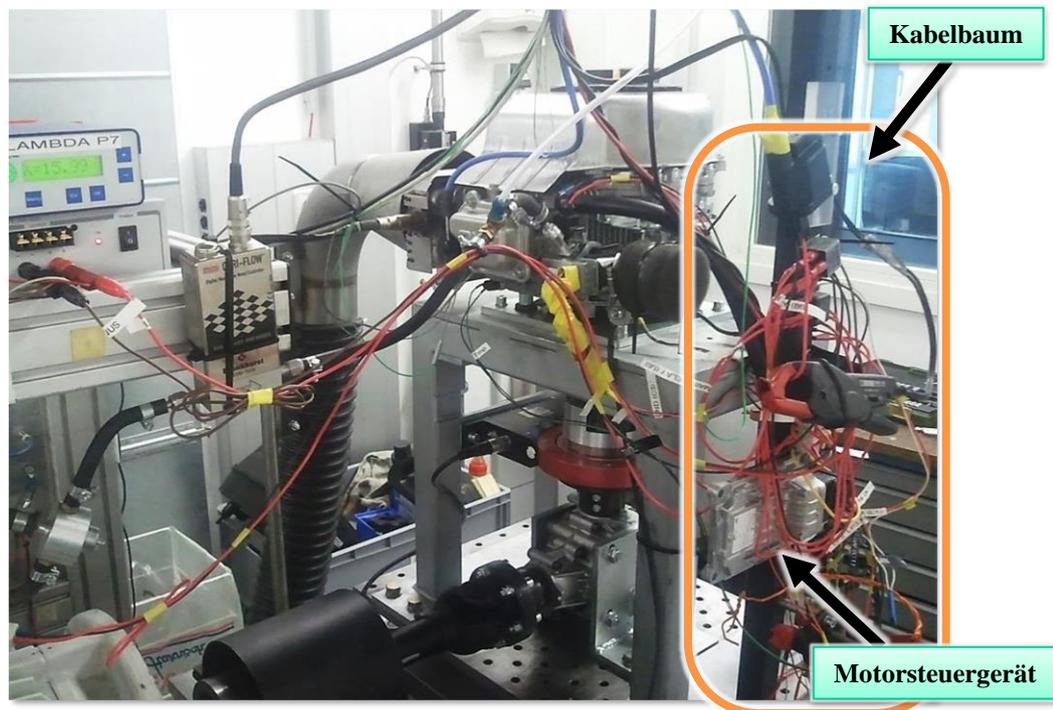


Abbildung 4-44: Prüfstands-aufbau Rasenmähermotor-Prototyp



Abbildung 4-45: Rasenmäher Prototyp im fertigen Zusammenbau

4.3.3 Test und Analyse des Prototyps

4.3.3.1 Motorrad:

Die Prüfstandsmessungen am Turbomotor gestalteten sich sehr ähnlich zu den zuvor durchgeführten Untersuchungen am Serienmotorrad. Es mussten dabei lediglich die bereits gefertigten und erprobten Messeinrichtungen vom alten auf den neuen Motor umgebaut werden. Am Motorprüfstand wurden wiederum die Daten aller wichtigen Energieflüsse erfasst und aufgezeichnet. Das Motorkennfeld wird dazu in einem vordefinierten Raster über Mitteldruck und Drehzahl abgefahren und die Messdaten erhoben. Für die Längsdynamiksimulation erfolgte im Anschluss die Bedatung des Modells mit den am Motorprüfstand erfassten Werten. Abbildung 4-46 zeigt den Prüfstands Aufbau des Turbomotorprototypen. Die bei hoher Last entstehenden hohen Temperaturen im Abgasstrang sind gut durch den rotglühenden Abgaskrümmter und Turbolader zu erkennen.

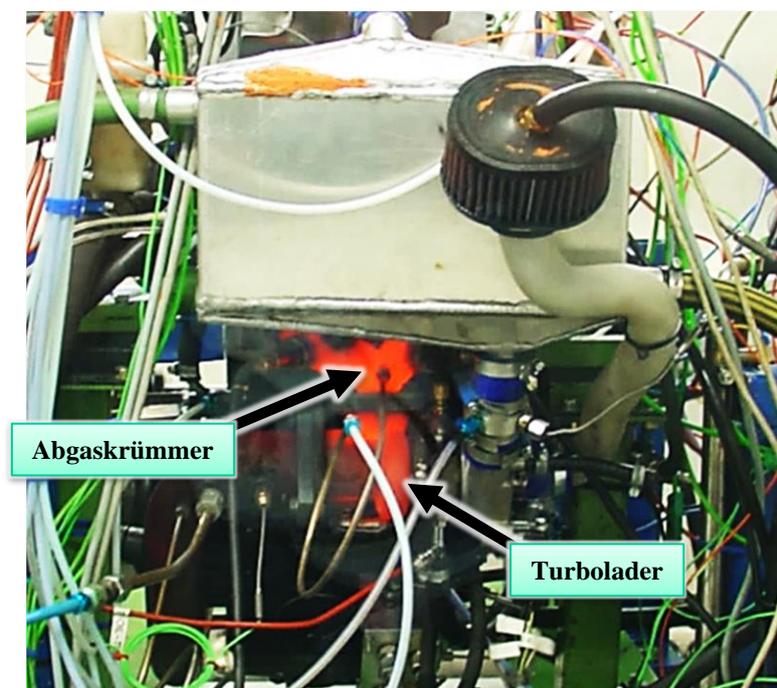


Abbildung 4-46: Turbomotor am Prüfstand

In Abbildung 4-47 ist ein Vergleich der Leistungs- und Drehmomentkurven bei Vollast des Serienmotors mit dem Turbomotor dargestellt. Der Serienmotor ist in Schwarz dargestellt und mit „*BMW F800R*“ bezeichnet, der Prototypenmotor ist in Grün abgebildet und mit „*LOCO₂-TC*“ beschriftet.

Sehr gut zu erkennen ist die deutliche Steigerung von Leistung sowie Drehmoment im unteren Drehzahlbereich. Vor allem das bedeutend höhere Drehmoment bei niedrigen Drehzahlen zeigt eine positive Entwicklung in Hinsicht auf den weiter oben gezeigten Aspekt der Betriebspunkte im realen Fahreinsatz. Durch diese Motorcharakteristik wird eine Fahrt mit geringeren Drehzahlen bei höheren Lasten möglich.

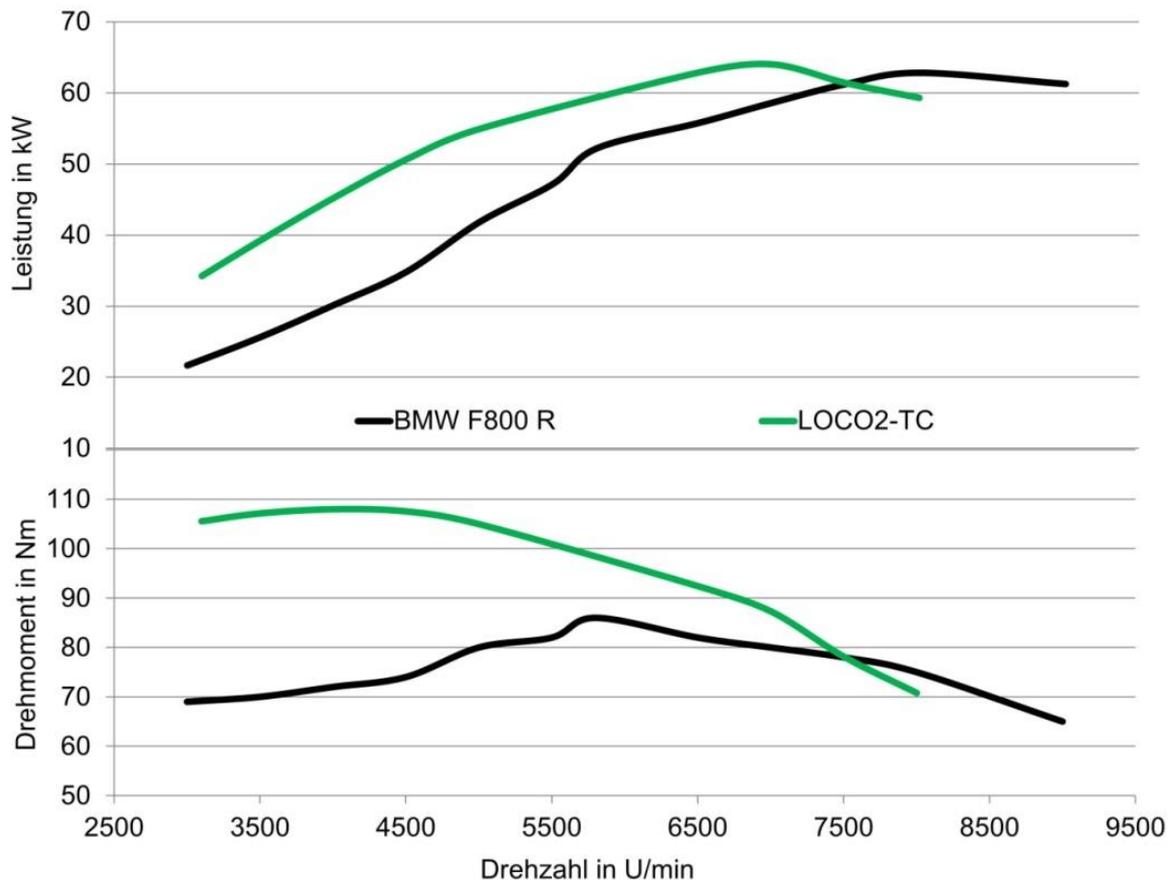


Abbildung 4-47: Vergleich von Leistung und Drehmoment der Motorvarianten bei Vollast [48]

Abbildung 4-48 zeigt das stationäre Motorkennfeld des spezifischen Kraftstoffverbrauchs vom Prototypenmotor in der zuvor schon verwendeten Kombination mit den Lastpunkten aus der Längsdynamiksimulation des WMTC Zyklus. Hier ist zu erkennen, dass sich der Bereich mit höchster Effizienz bei diesem Prototyp bei deutlich niedrigeren Drehzahlen befindet als beim oben gezeigten Referenzmotor. Wiederum ermöglicht das eine Nutzung von Betriebszuständen mit höherer Effizienz im Realbetrieb. Die hier eingetragenen Lastpunkte aus dem WMTC Normzyklus entsprechen nicht immer den realen Fahrverhältnissen, was von den Testpiloten dieses Fahrzeugs bei den Versuchsfahrten bestätigt wird. Beschleunigungen aus Kurven oder Geschwindigkeitsbeschränkungen können gut mit einem höheren Gang bei geringerer Drehzahl erfolgen, wobei bei sportlicher Fahrweise das Potential des Motors auch ausgeschöpft wird. Des Weiteren bringen Reisefahrten mit Beifahrer und höherer Zuladung sowie über Pässe höhere Lastzustände mit sich, welche mit diesem Motor wesentlich effizienter sowie komfortabler bereitgestellt werden können.

Der Bereich stark steigenden Verbrauchs bei großer Last und hoher Drehzahl kann mit der notwendigen Reduktion der Verbrennungstemperaturen über ein fettes Kraftstoff-Luft Gemisch erklärt werden. Bei diesen Lastzuständen steigt das Temperaturniveau in Folge des Einflusses der Abgasturbine drastisch an und dem kann bei diesem Prototyp nur durch eine Innenkühlung über den Kraftstoff begegnet werden.

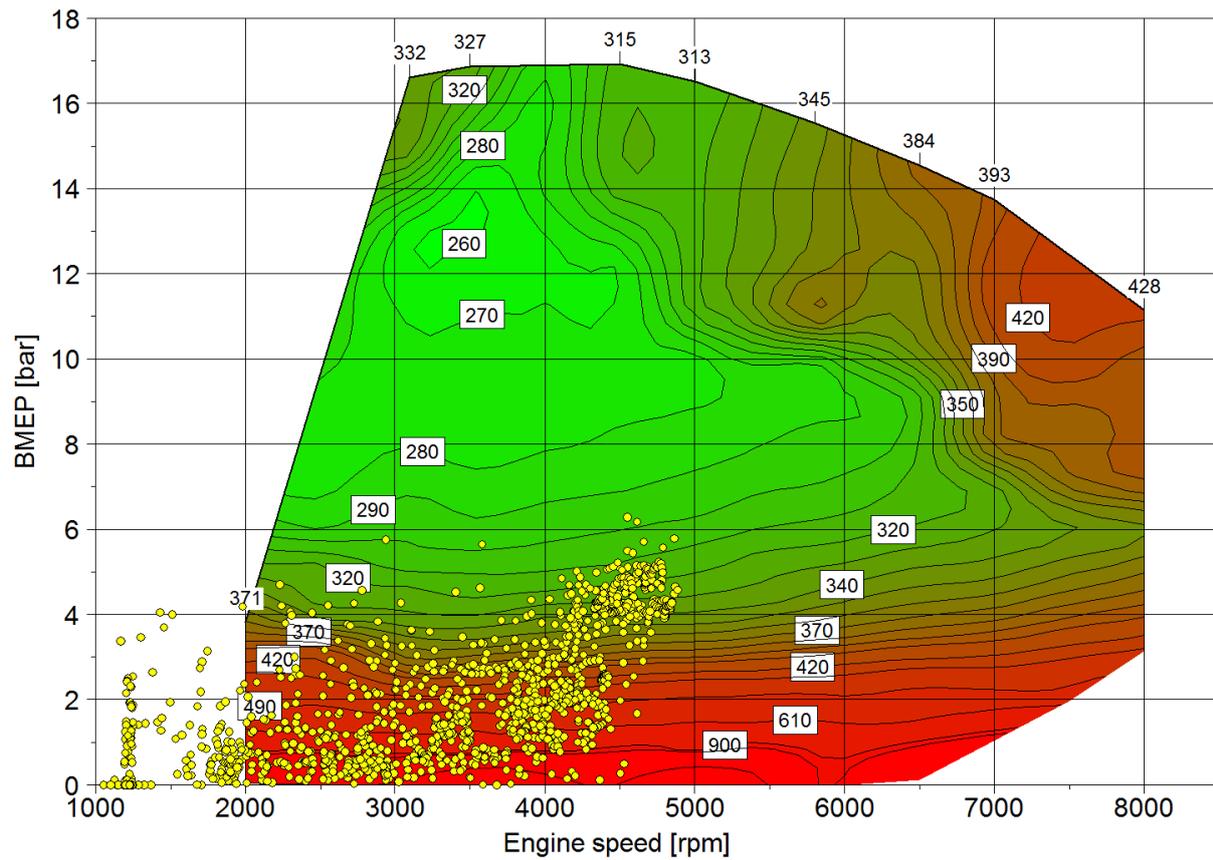


Abbildung 4-48: Verbrauchskennfeld in g/kWh für LOCO₂-TC mit WMTC Lastpunkten

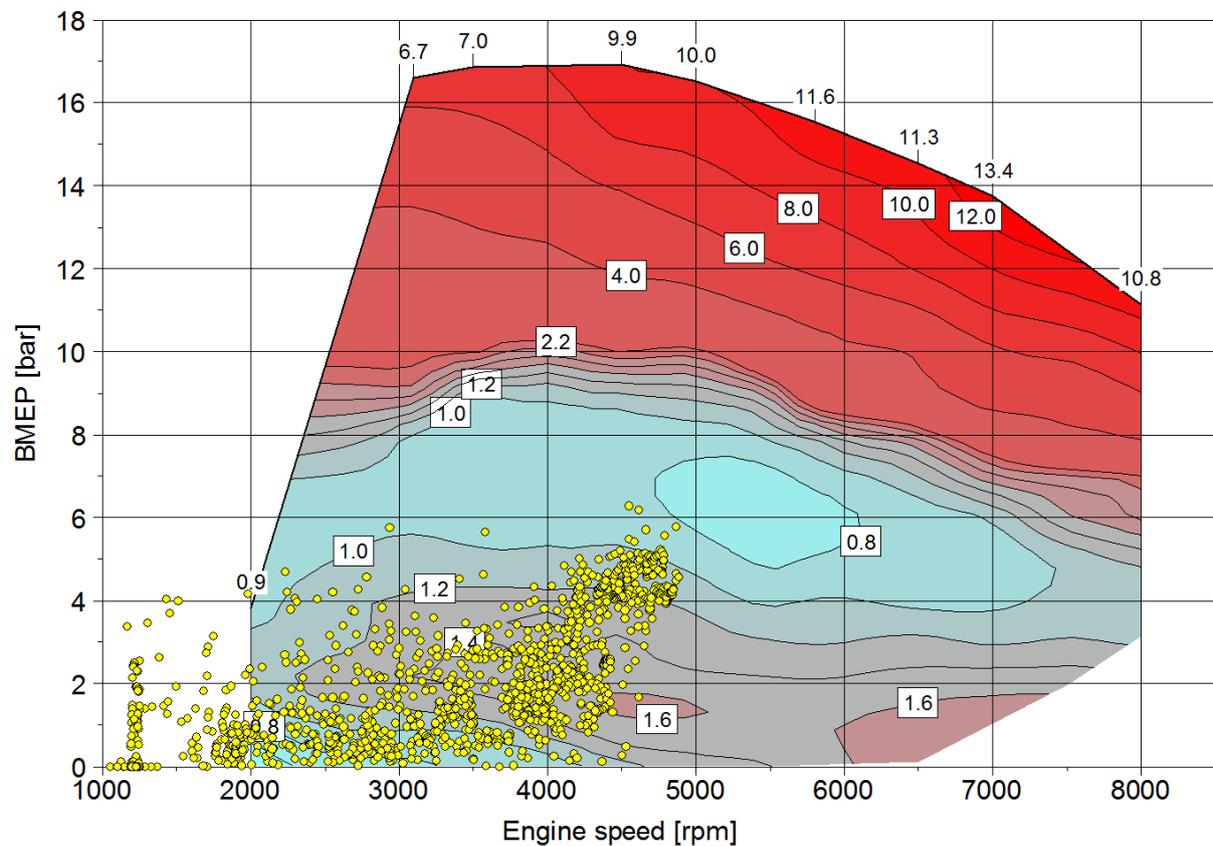


Abbildung 4-49: Differenzkennfeld des Enthalpiestroms in Kilowatt an der Abgasturbine des Turbomotors, überlagert mit WMTC Lastpunkten

In Abbildung 4-49 ist die Differenz des Enthalpiestroms vor und nach der Abgasturbine über das gesamte Motorkennfeld dargestellt. Dies zeigt die Menge der Abgasenthalpie, welche über die Komponente Abgasturbolader dem Abgasmassenstrom entzogen wird. Die Berechnung der Enthalpieströme und somit Leistungen erfolgte analog zur Vorgehensweise in Kapitel 4.2.2. Die Verluste über das Bauteilgehäuse durch Strahlung und Konvektion wurden hier mitefassen und können nicht näher angegeben werden. Die Leistung der verwendeten Turbine bewegt sich somit bei Anfahren der WMTC Lastpunkte im stationären Kennfeld zwischen rund 0,8 bis 1,6 kW.

Der Enthalpiestrom in der Turbine konnten nun über die Längsdynamiksimulation des Prototypenmotorrads auch im transienten Fahrverhalten abgebildet werden, wie in Abbildung 4-50 anhand des WMTC Zyklus gezeigt ist. Die am Motorprüfstand erfassten Daten des Motors wurden dabei in Kennfeldform in die Längsdynamiksimulation integriert, welche in weiterer Folge über den dynamischen Betrieb Lastanforderungen generiert haben. Auf Basis der Last und Drehzahl dieser Betriebspunkte konnten wiederum die für die Berechnung der Energieflüsse notwendigen Werte aus den Kennfeldern ausgelesen werden. Dadurch wurde ermöglicht, mit stationären Kennfeldern aus dem Betrieb am Motorprüfstand, dynamische Fahrzustände des Motorrads und die dabei auftretenden Energieflüsse darzustellen. Somit konnte das energetische Verhalten des Systems in verschiedenen realen Betriebszuständen abgeschätzt werden.

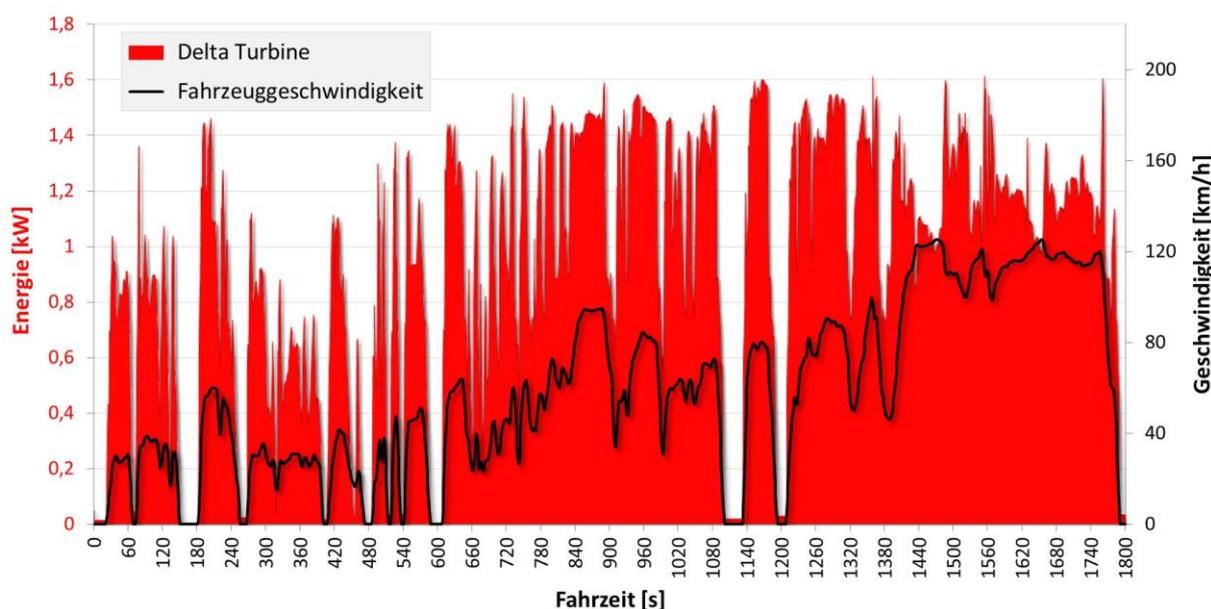


Abbildung 4-50: Simulation des Enthalpiestroms über die Turbine (Delta Turbine) LOCO₂-TC über WMTC

In Abbildung 4-51 sind die Ergebnisse der Längsdynamiksimulation ausgewertet nach dem Gesamtwirkungsgrad über den WMTC Zyklus zu sehen. In der transienten Simulation des Prototypenmotors konnten deutlich höhere Wirkungsgrade, als die mit dem Serienmotor am Rollenprüfstand gemessenen, erzielt werden. Im Bereich des Autobahnabschnittes mit Geschwindigkeiten um 120 km/h ab Sekunde 1380 ergeben sich Werte von rund 26 %, was eine Steigerung im Vergleich zum Serienfahrzeug von ca. 3 % bedeutet. Die starken Ausschläge der Simulation bei den Anfahrvorgängen werden auf das noch nicht optimal abgestimmte Fahrer- und Kupplungsmodell zurückgeführt. Diesem Umstand auf den Grund zu gehen ist jedoch aufgrund der Komplexität des Simulationsmodells nicht mehr Inhalt dieser Dissertation.

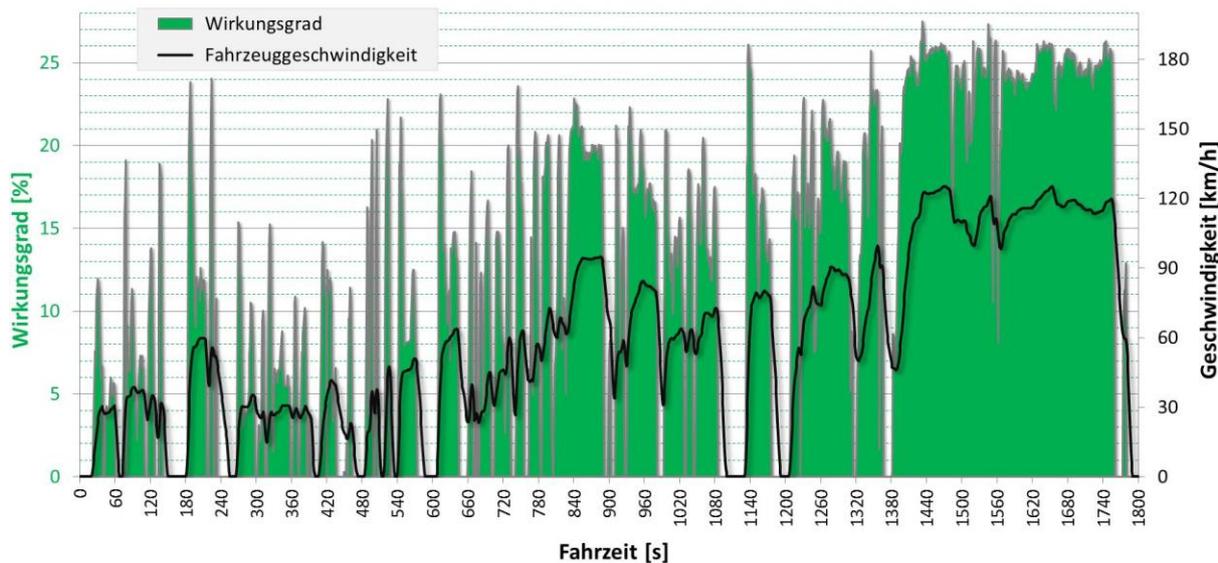


Abbildung 4-51: Simulation Gesamtwirkungsgrad LOCO₂-TC über WMTC

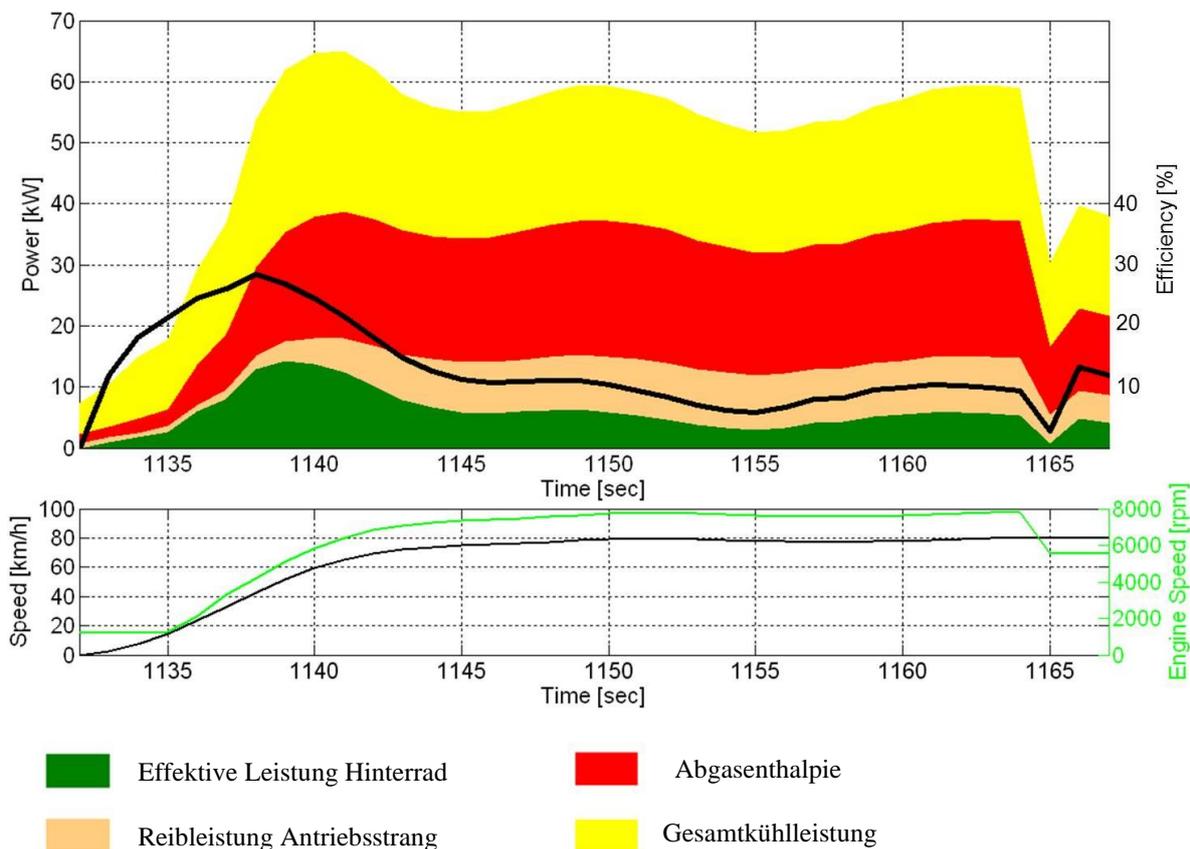


Abbildung 4-52: Simulation WMTC Beschleunigung 0 – 80 km/h
Energieverteilung LOCO₂-TC [48]

Abbildung 4-52 zeigt die Aufteilung der Energieflüsse in der dynamischen Simulation des WMTC ab Sekunde 1132 bei einer Beschleunigungsfahrt von 0 auf 80 km/h im gleichen Gang, einer Phase mit leicht wechselnder Geschwindigkeit um 80 km/h und eines abschließenden Schaltvorganges auf den nächsthöheren Gang bei Sekunde 1165. Im oberen Diagramm sind die einzelnen Energieflüsse abgebildet: effektive Leistung am Hinterrad (in Grün), Reibleistung über den gesamten Antriebsstrang (in Beige), Abgasenthalpie im Krümmer (in Rot) und Gesamtkühlleistung inklusive Strahlung und Konvektion (in Gelb). Zusätzlich ist in Schwarz der

Wirkungsgrad über den Beschleunigungsvorgang dargestellt. Im unteren Diagramm sind die Motordrehzahl in Grün und die Fahrzeuggeschwindigkeit in Schwarz aufgetragen.

Gut zu erkennen ist der hohe Wirkungsgrad bei steigender Last durch den Beschleunigungsvorgang. Wohingegen das Halten der Geschwindigkeit in einem niedrigen Gang wenig Last und viel Drehzahl bedeutet und einen ineffizienten Betriebszustand darstellt. Der Schaltvorgang am Ende ergibt durch den Drehzahlsprung eine Verbesserung dieses Umstandes. Weiters zeigt sich der hohe Reibungsverlust des Antriebsstranges bei Drehzahlen ab rund 4000 min^{-1} , welcher bei einer Drehzahl von 8000 min^{-1} einen deutlichen Anteil der Verluste einnimmt. Über die mechanische Leistung am Hinterrad ist auch zu erkennen, dass die Konstantfahrt bei 80 km/h nur rund ein Drittel der Leistung benötigt, die maximal für die Beschleunigung auf diese Geschwindigkeit aufzuwenden ist.

In Abbildung 4-53 ist die oben erklärte Darstellung der Energieverteilung im WMTC über den gesamten Autobahnzyklus aufgetragen. In der unteren Grafik ist hier jedoch in Schwarz die Motorlast an der Kurbelwelle mit der Einheit *effektiver Mitteldruck* und der englischen Bezeichnung *brake mean effective pressure* – BMEP aufgetragen. Weiters ist in Grün der spezifische Verbrauch mit der englischen Bezeichnung *brake specific fuel consumption* – BSFC über die dynamische Simulation eingezeichnet. Die Simulation bestätigte auch hier wieder die am Rollenprüfstand mit dem Serienmotorrad erhaltenen Energieverteilungen und die für den Turbolader zur Verfügung stehende Abgasenthalpie von rund 20 kW , welche bereits bei Lasten im unteren Viertel der Leistungsfähigkeit des Motors vorliegt.

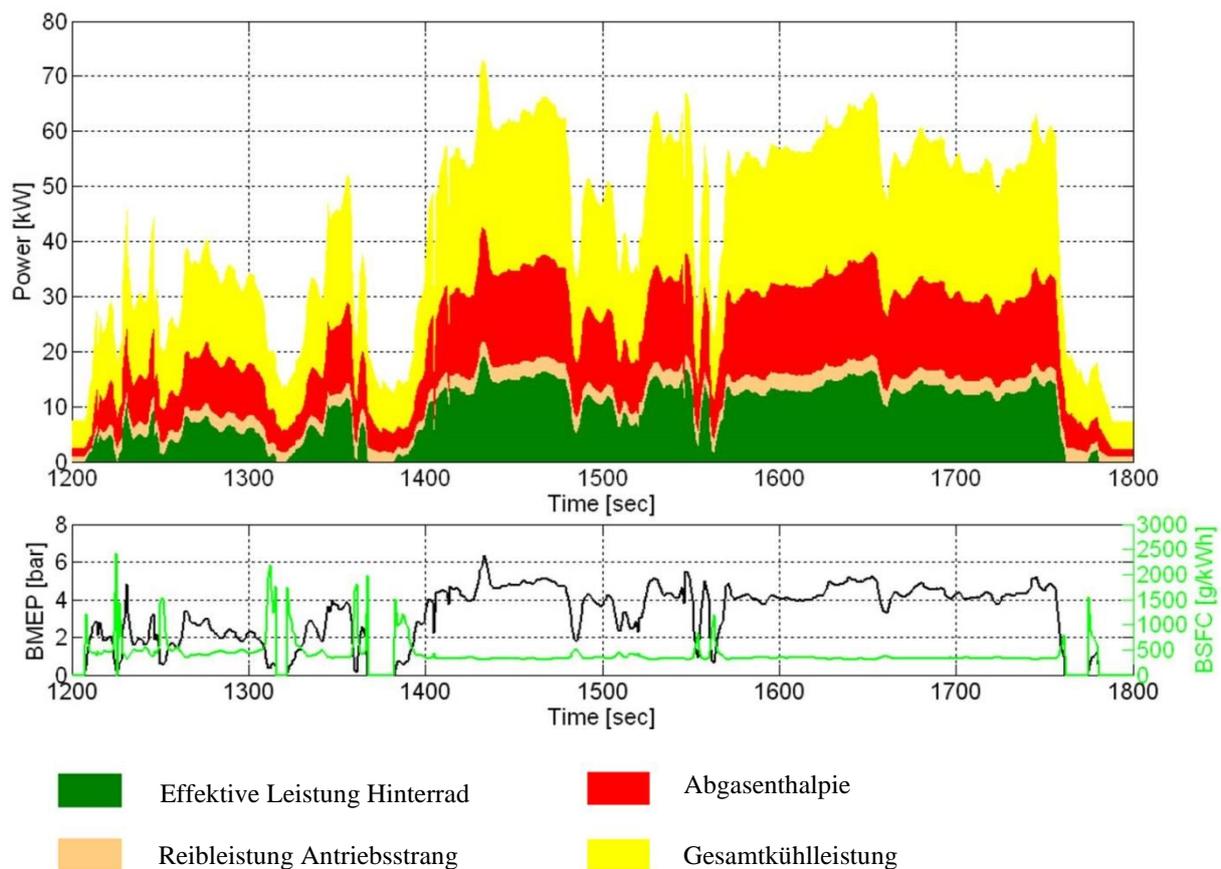


Abbildung 4-53: Simulation WMTC Autobahnzyklus, Energieverteilung LOCO₂-TC [48]

4.3.3.2 Rasenmäher

Beim Rasenmäher wurde zuerst mit den Versuchen am Motorprüfstand begonnen. Die neuen Komponenten waren so zu integrieren, dass ein stabil lauffähiges System entsteht. Dazu wurde die Kraftstoffeinspritzung und Zündung zuerst an den Grundmotor angepasst. Anschließend erfolgte eine erste Sondierung des Motorverhaltens mit einer Variation der Einspritzmenge und somit des Luftverhältnisses und des Zündzeitpunktes, um die Schwerpunktslage der Verbrennung zu verändern. Die Analyse der Daten dieser ersten Versuchsreihen ermöglichte in der Folge eine Strategie zur Abstimmung des gesamten Motorkennfelds. Die Software und Hardware der elektronischen Komponenten musste dabei in Iterationsschleifen für den Grundmotor adaptiert werden. Alle verwendeten Komponenten, auch die Software der Motorsteuerung waren ursprünglich für andere Einsatzgebiete konzipiert und benötigten eine spezifische Anpassung an die Anforderungen des Rasenmähers. Nach den ersten erfolgreichen Versuchen am Motorprüfstand erfolgte die Implementierung und Bedienung der dynamischen Drosselklappenregelung. Dabei wurde ein geeigneter Regler entworfen und in transienten Versuchsreihen im Regelverhalten optimiert. Um den zur Verfügung stehenden Zeitumfang im Forschungsprojekt nicht zu überschreiten, mussten bei einigen Anpassungen, wie zum Beispiel dem Regelverhalten der Drosselklappensteuerung oder der transienten Stabilität des Lambdawertes Kompromisse akzeptiert werden. Nach Erreichen zufriedenstellender Laufeigenschaften wurden die Prototypenkomponenten in den Rasenmäher integriert und es erfolgten die abschließenden Messungen im Realbetrieb, ähnlich den ersten Realtests am Original-Rasenmäher.



Abbildung 4-54: Projektteam während den Realtests am Rasenmäher-Prototyp

Abbildung 4-54 zeigt das Projektteam während der Versuche am Prüfgelände. Es wurde dabei auch ein Originalmodell zum subjektiven Vergleich mitherangezogen, um die persönlichen Erfahrungen der Mitarbeiter des Projektpartners direkt einfließen zu lassen. Dadurch konnte die zuvor am Motorprüfstand vorbereitete Bedienung des Systems für den Realbetrieb weiter verbessert werden. Der Versuchsaufbau für die Realtests entsprach wiederum der Zusammenstellung in den ersten Versuchen mit dem Originalmäher. Als erster Schritt in der Test- und Analysephase des Rasenmäher-Prototypen erfolgte die Grundabstimmung des Motors am

Prüfstand. Dazu brachte eine Sondierungsuntersuchung mit der Variation von Verbrennungsschwerpunkt und Lambdawert bei konstanten Lastpunkten Aufschlüsse über das Verhalten des Basismotors im Zusammenspiel mit den neu integrierten Komponenten. Es wurden dabei der Verbrauch und die Emissionswerte über die Variation beurteilt und daraus folgend mögliche Strategien für eine Bedatung des Motorkennfeldes im Betrieb abgeleitet.

Abbildung 4-55 zeigt vier Kennfelder in 3D-Darstellung mit spezifischen Verbrauch und den Abgasemissionswerten von Stickoxiden NO_x , Kohlenwasserstoffen HC und Kohlenmonoxid CO bei einem Lastpunkt von 2600 min^{-1} und 7 Nm . Das Kennfeld des spezifischen Verbrauchs zeigt, dass die Werte unter Lambda 1 deutlich ansteigen aber darüber keiner großen Veränderung unterliegen. Der Verbrennungsschwerpunkt kann ohne allzu große Veränderungen zwischen früh und spät verschoben werden. Bei den NO_x Emissionen zeigt sich ein klares Bild der Verschlechterung bei höheren Lambdawerten und früheren Umsatzpunkten. Dies ist auf die steigenden Verbrennungstemperaturen bei diesen Verhältnissen zurückzuführen. Bei sinkenden Lambdawerten nimmt der Einfluss des Verbrennungsschwerpunktes jedoch ab, da sich die Brennraumtemperaturen durch den Kraftstoffüberschuss grundsätzlich auf ausreichend tiefem Niveau befinden.

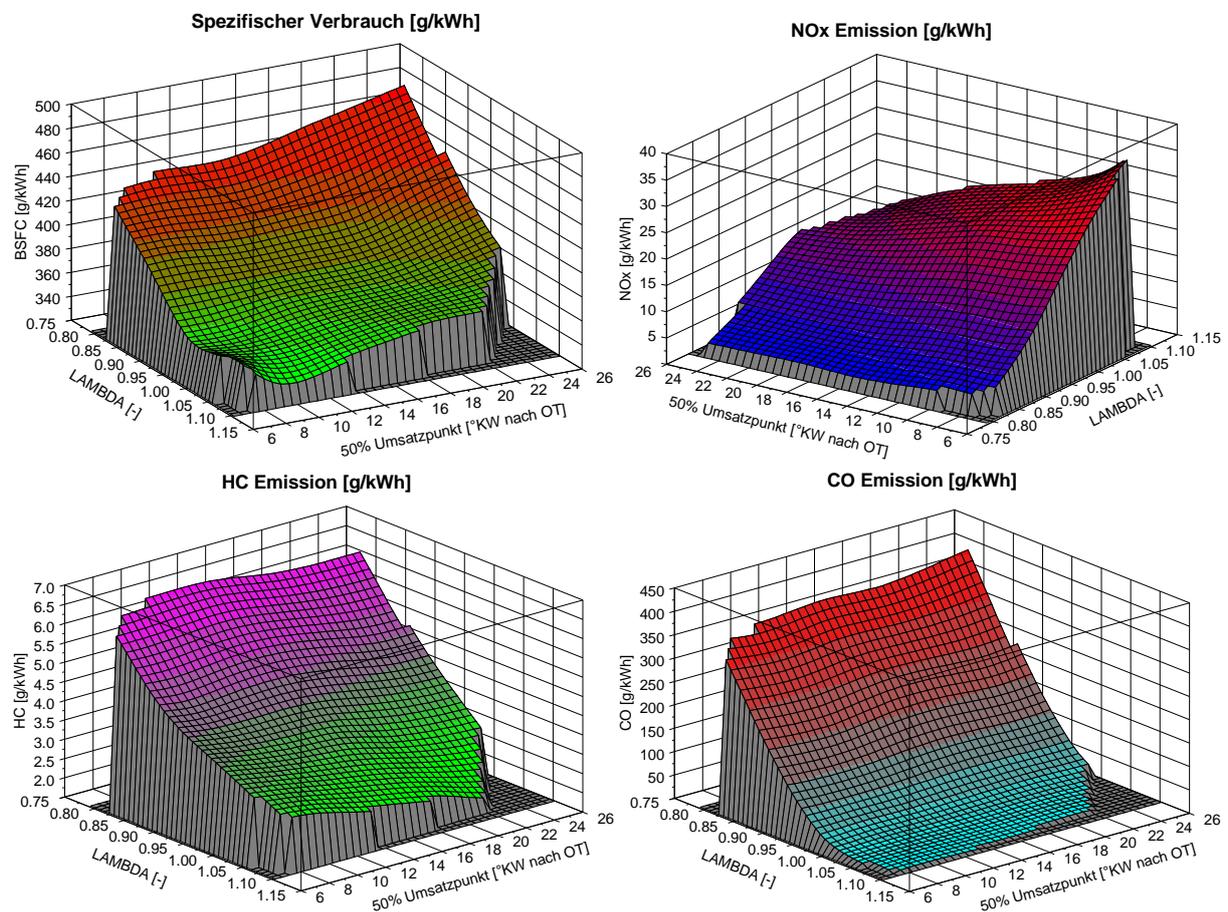


Abbildung 4-55: Motorkennfelder mit Variation von Verbrennungsschwerpunkt über Lambdawert im Rasenmähermotor-Prototyp bei 2600 min^{-1} und 7 Nm

Betrachtet man das Kennfeld der HC Emissionen, so ist wiederum ein deutlicher Anstieg bei niedrigeren Lambdawerten zu beobachten. Dies beruht auf dem Fehlen von ausreichend Sauerstoff, um die Verbrennung vollständig ablaufen zu lassen. Das Kennfeld der Kohlenmonoxidemissionen zeigt eine ganz klare Abhängigkeit vom Lambdawert und eine Unempfindlichkeit gegenüber dem Verbrennungsschwerpunkt. Bei diesem Schadstoff ist die Auswirkung durch den Mangel an Sauerstoff bei unterstöchiometrischer Verbrennung noch sehr viel deutlicher ausgeprägt. Werte unter Lambda 1 bringen einen sofortigen und deutlichen Anstieg der CO

Emissionen.

An diesem Punkt der Analyse muss kurz auf die Abgasgesetzgebung für mobile Maschinen und Arbeitsgeräte laut der EU Richtlinie 97/68/EG eingegangen werden [23]. Dazu sind in Tabelle 4-10 die Abgasgrenzwerte für die hier relevante Motorenklasse aufgelistet. Für Kohlenwasserstoffe ist kein gesonderter Grenzwert ausgewiesen, lediglich ein mit den Stickoxiden kumulierter. Der für diesen Motor kritische Grenzwert ist der von NO_x , was auch die niedrigen Lambdawerte zur Senkung der Verbrennungstemperatur erklärt. Wie man anhand der vorhergehenden Variation gut erkennt, gelangen die Emissionswerte der Stickoxide sehr schnell an die vorgegebenen Grenzen. Der Spielraum für die Lage des Verbrennungsschwerpunktes aber besonders für den Lambdawert wird durch diesen Umstand deutlich eingeschränkt. Die Abgaswerte der HC Emissionen stellen nur bei niedrigen Lambdawerten ein Problem dar und die Grenzwerte der CO Emissionen werden in der Variation in keinem Punkt nur annähernd erreicht. Durch diese Analyse ist klar zu erkennen, dass ein Trade-Off zwischen Effizienz und Stickoxidemission gegeben ist und in der weiteren Arbeit ein Kompromiss dazu gefunden werden musste.

Tabelle 4-10: Abgasgrenzwerte nach Richtlinie 97/68/EG [23]

Motorenklasse	Hubraum [cm ³]	CO [g/kWh]	NO _x [g/kWh]	HC + NO _x [g/kWh]
SN: 3	100 - 225	610	10	16,1

Tabelle 4-11: Prüfzyklus nach Richtlinie 97/68/EG [23]

Cycle G2

Mode number	1	2	3	4	5						6
Engine speed	Rated speed					Intermediate Speed					Low-idle speed
Load % ¹⁾	100	75	50	25	10						0
Weighting factor	0.09	0.2	0.29	0.3	0.07						0.05

Tabelle 4-11 zeigt einen Auszug aus der Veröffentlichung zum Prüfzyklus nach der Richtlinie 97/68/EG. Für die Motoren mit konstanten Arbeitsdrehzahlen (rated speed) werden insgesamt sechs Prüfpunkte vorgeschrieben, welche bei den angegebenen prozentuellen Anteilen der Nennlast und bei Leerlauf abgenommen werden. Die erfassten Werte sind anschließend mit Hilfe der Gewichtungsfaktoren nach der Formel (4-35) aufzusummieren. Dies ergibt den im Prüfzyklus ermittelten Wert, der den vorgeschriebenen Grenzwert nicht überschreiten darf.

$$\text{Abgaswert} = \frac{\sum_{i=1}^n (Gas_{mass_i} \times WF_i)}{\sum_{i=1}^n (P_i \times WF_i)} \quad (4-35)$$

Mit Hilfe der Variation und deren Analyse konnte nun eine Strategie für die Kennfeldbedatung des Motorsteuergerätes vorgenommen werden. Das Erstellen eines Motorkennfeldes nimmt zwar Zeit in Anspruch, der Vorteil die Datensätze im Versuch sehr einfach tauschen zu können sprach aber für das Erarbeiten von zumindest zwei Datensätzen, um diese in der Analyse zu vergleichen. Dabei wurde in der Abstimmung lediglich der Lambdawert variiert und die Lage des Verbrennungsschwerpunktes bei einem Wert von ca. 10°KW nach OT gehalten, was dem Optimum für Effizienz und Leistung entspricht. Demnach wurden zwei Datensätze für das komplette Kennfeld, mit einmal einem Lambdawert von 1 und einmal einem Wert von 0,9 in

der Abstimmungsarbeit am Prüfstand erstellt. Lambda 1 sollte für eine optimale Effizienz sorgen und ein Lambda von 0,9 bringt bei Ottomotoren üblicherweise die maximale Leistungsentfaltung mit sich. Im Anschluss erfolgte eine Messung des originalen Vergasermotors und des Prototypenmotors mit den zwei Datensätzen nach dem oben gezeigten EU-Prüfzyklus. Abbildung 4-56 zeigt die Auswertung dieser Messungen im Vergleich.

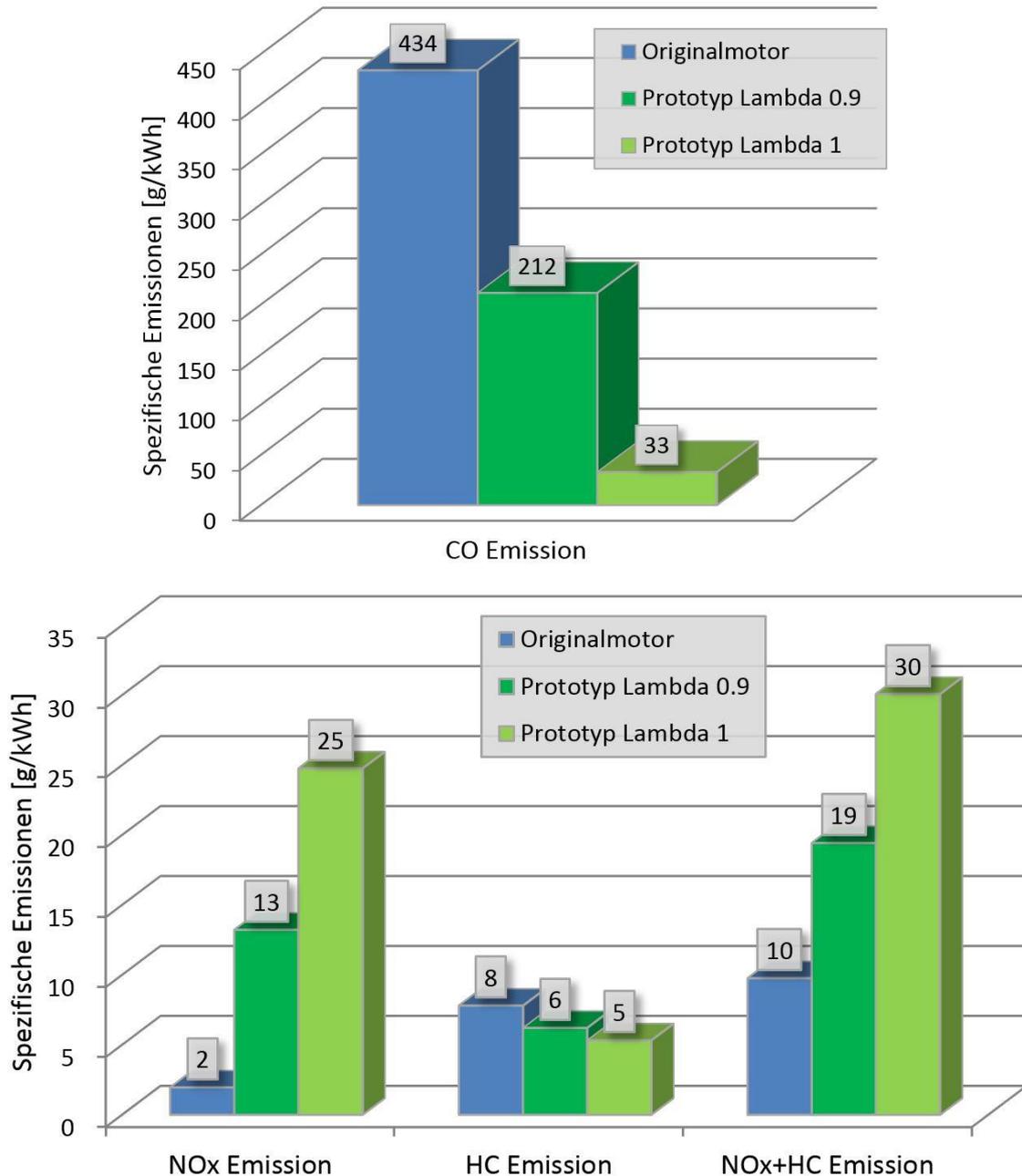


Abbildung 4-56: Vergleich der spezifischen Abgasemissionen nach EU Prüfzyklus [23]

Der Ausstoß von Kohlenmonoxid konnte bei Lambda 1 von 434 g/kWh auf 33 g/kWh reduziert werden, was einem Minus von 92 % entspricht. Bei Lambda 0,9 ergibt sich immerhin ein Wert von 212 g/kWh, was etwa einer Halbierung entspricht. Die Emissionen von Kohlenwasserstoffen sinken ebenso von 8 auf 5 g/kWh, wobei bei Lambda 0,9 der Wert lediglich um 1 g/kWh höher ist als bei Lambda 1. Das zuvor schon erkannte Problem der Stickoxidemissionen wird hier klar ersichtlich. Auch bei Lambda 0,9 wurde der Grenzwert bereits deutlich überschritten und könnte eventuell mit einem späteren Verbrennungsschwerpunkt noch unterschritten werden. Der Grenzwert für Stickoxidemissionen ist jedoch bei Lambda 1 ohne weiterführende Maßnahmen für die Reduktion der Verbrennungstemperatur nicht zu realisieren. Abbildung

4-57 zeigt den Vergleich des spezifischen Verbrauchs der drei Motoroptionen in zwei ausgewählten Kennfeldpunkten. Im Leerlauf bei 2 Nm und 2800 min^{-1} ergibt sich eine deutliche Verbrauchsreduktion ebenso wie bei Lambda 0,9 als auch bei Lambda 1. 7 Nm und 2800 min^{-1} repräsentiert etwa den Lastpunkt im Schnittbetrieb. Die Wirkungsgradsteigerung fällt hier mit 22 % bei Lambda 1 wie erwartet hoch aus. Bei Lambda 0,9 ergibt sich immerhin noch eine Verbesserung von 13 %, was einen guten Kompromiss für die Kennfeldabstimmung darstellt. Für die weitere Entwicklung wurde beschlossen die Bedatung mit Lambda 0,9 zu verwenden und somit den Motor auf eine optimale Leistungsabgabe einzustellen.

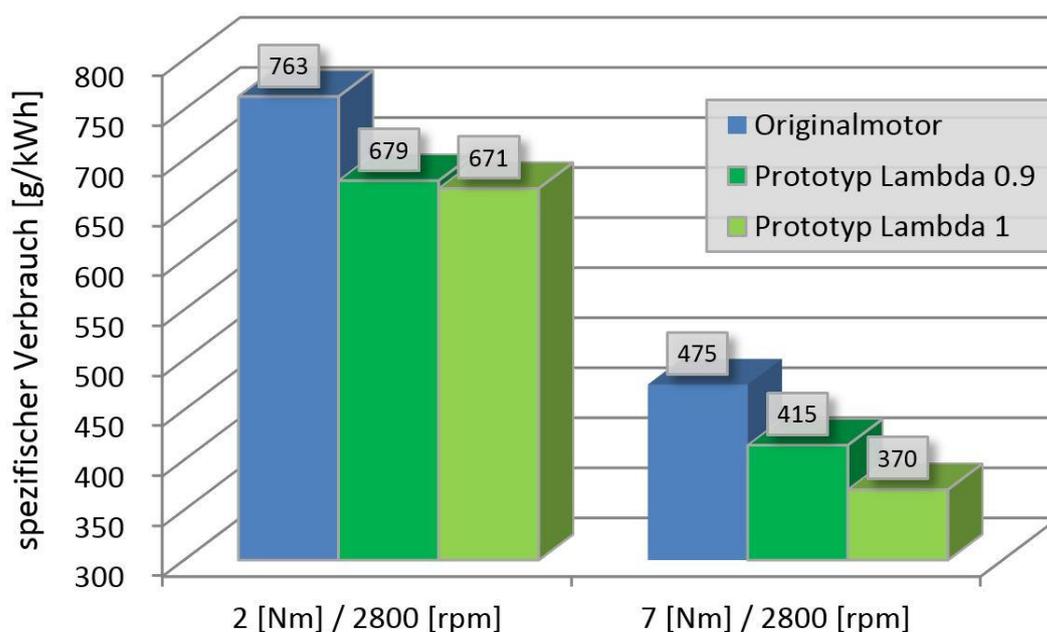


Abbildung 4-57: Vergleich des spezifischen Verbrauchs an ausgewählten Kennfeldpunkten

Als nächster Schritt erfolgte die Abstimmung des PID-Reglers für die autonome Drosselklappensteuerung. Dabei wurde das Verhalten der Regelstrecke mit Grundwerten aus der Literatur in erster Näherung abgeschätzt und der Regler mit den daraus ermittelten Startwerten bedatet. Anschließend konnten die einzelnen Parameter im Versuch am Prüfstand Schritt für Schritt verbessert werden. In Abbildung 4-58 ist die Sprungantwort der beiden Motoren auf einen plötzlichen Lastwechsel von 2 auf 8 Nm gezeigt. In Grün ist die Drehzahl des Prototypenmotors aufgezeichnet und in Blau die des Originals. Klar ersichtlich ist der Drehzahleinbruch auf 2500 min^{-1} des Vergasermotors mit dem ursprünglichen Fliehkraftsteller, wohingegen der elektronische Regler wieder auf die Solldrehzahl von 2800 min^{-1} ausregelt. Bei der Lastbeaufschlagung reduziert sich die Motordrehzahl des Prototypen lediglich um 120 min^{-1} , die des Originals um 350 min^{-1} . Abbildung 4-59 zeigt diese Sprungantwort ausgewertet nach der Leistungsabgabe der Motoren. Zum einen ist die schnellere Reaktionsgeschwindigkeit des elektronischen Systems zu erkennen, zum anderen zeigt der Prototyp eine klar höhere Leistungsabgabe als das Original, bedingt durch den Drehzahlunterschied. Der kurzfristige Leistungseinbruch unmittelbar nach dem Lastanstieg ist auf den noch nicht optimal abgestimmten Regler zurückzuführen, welcher noch ungefähr 2 Sekunden zum Ausregeln dieser Stoßbeaufschlagung benötigt. Im Rahmen dieser Dissertation konnte nur eine Grundabstimmung des Reglers durchgeführt werden. Das Regelverhalten ist daher noch nicht optimal und zeigt Potential zur Verbesserung.

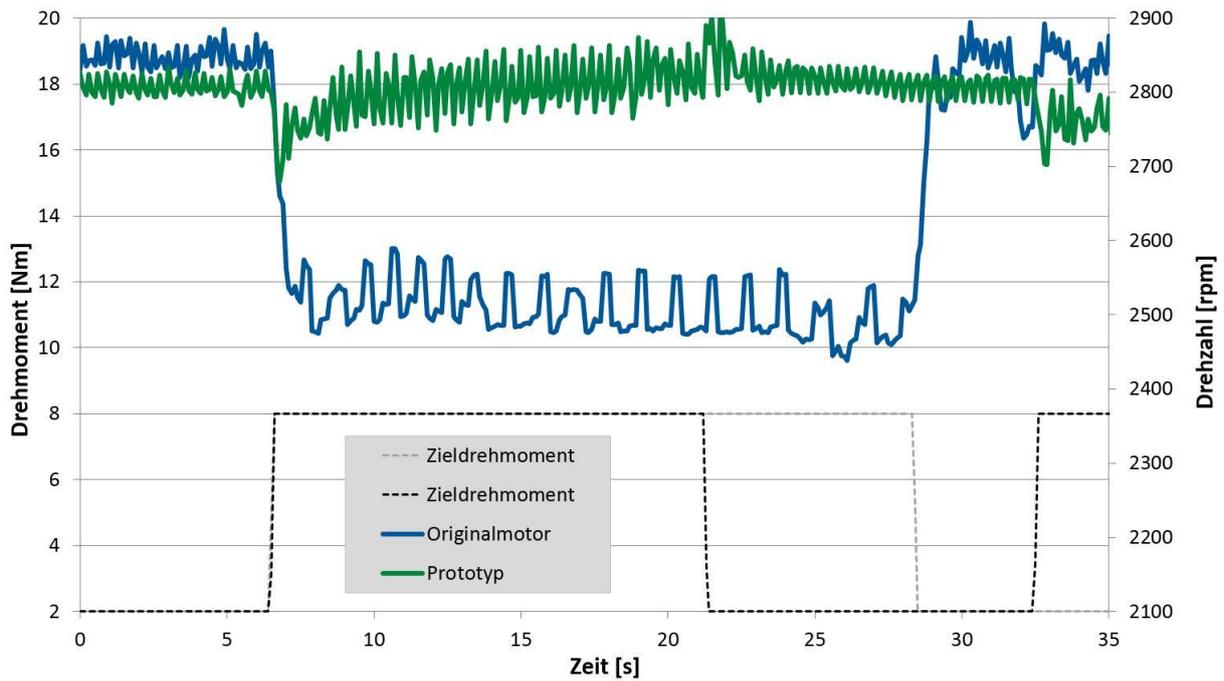


Abbildung 4-58: Vergleich Drehzahl bei Lastsprung von 2 Nm auf 8 Nm

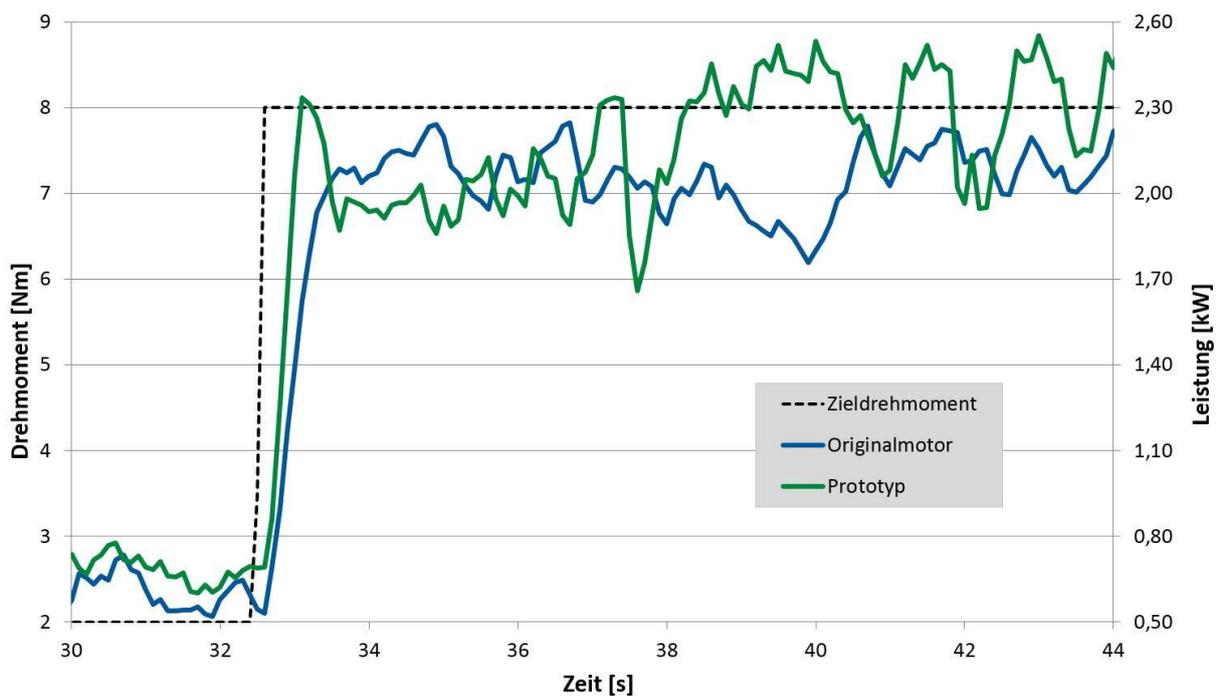


Abbildung 4-59: Vergleich Wellenleistung bei Lastsprung von 2 Nm auf 8 Nm

Nun konnte ein erster Test des Prototypensystems unter realen Lastbedingungen erfolgen. Dazu wurde der Bremseinrichtung des Prüfstands der aufgezeichnete Drehmomentverlauf aus den Freilandversuchen mit dem Originalrasenmäher vorgegeben. Dies wurde wiederum mit beiden Motoren durchgeführt, um die Ergebnisse vergleichen zu können. Abbildung 4-60 zeigt den Drehzahlverlauf dieser Tests in der gleichen Farbgebung wie oben. Die zuvor erhaltenen Ergebnisse in der Sprungantwort konnten auch hier, im transienten Versuch wiedergegeben werden. Die Differenz in der Drehzahl der beiden Motoren ist klar zu erkennen und lediglich bei Lasten im Bereich des maximalen Motordrehmoments kommt es auch beim Prototypen zu einem Drehzahleinbruch. Zudem ist ein deutlich konstanterer Drehzahlverlauf zu erkennen und auch akustisch ist dem Motor am Prüfstand der Lastwechsel nur bei den Spitzen anzumerken.

Der maximale Drehzahlunterschied zwischen den beiden Motoren ist hier mit rund 400 min^{-1} sogar noch gravierender als beim zuvor gezeigten Lastsprung.

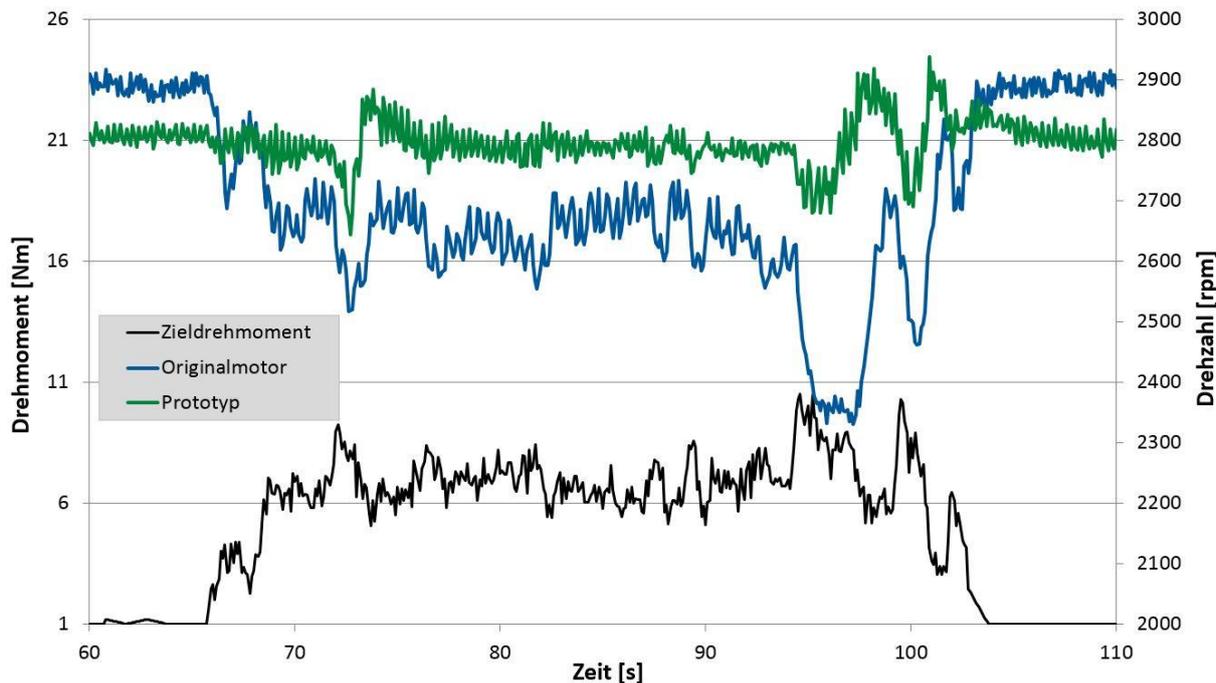


Abbildung 4-60: Vergleich Drehzahlverlauf über Drehmomentvorgabe

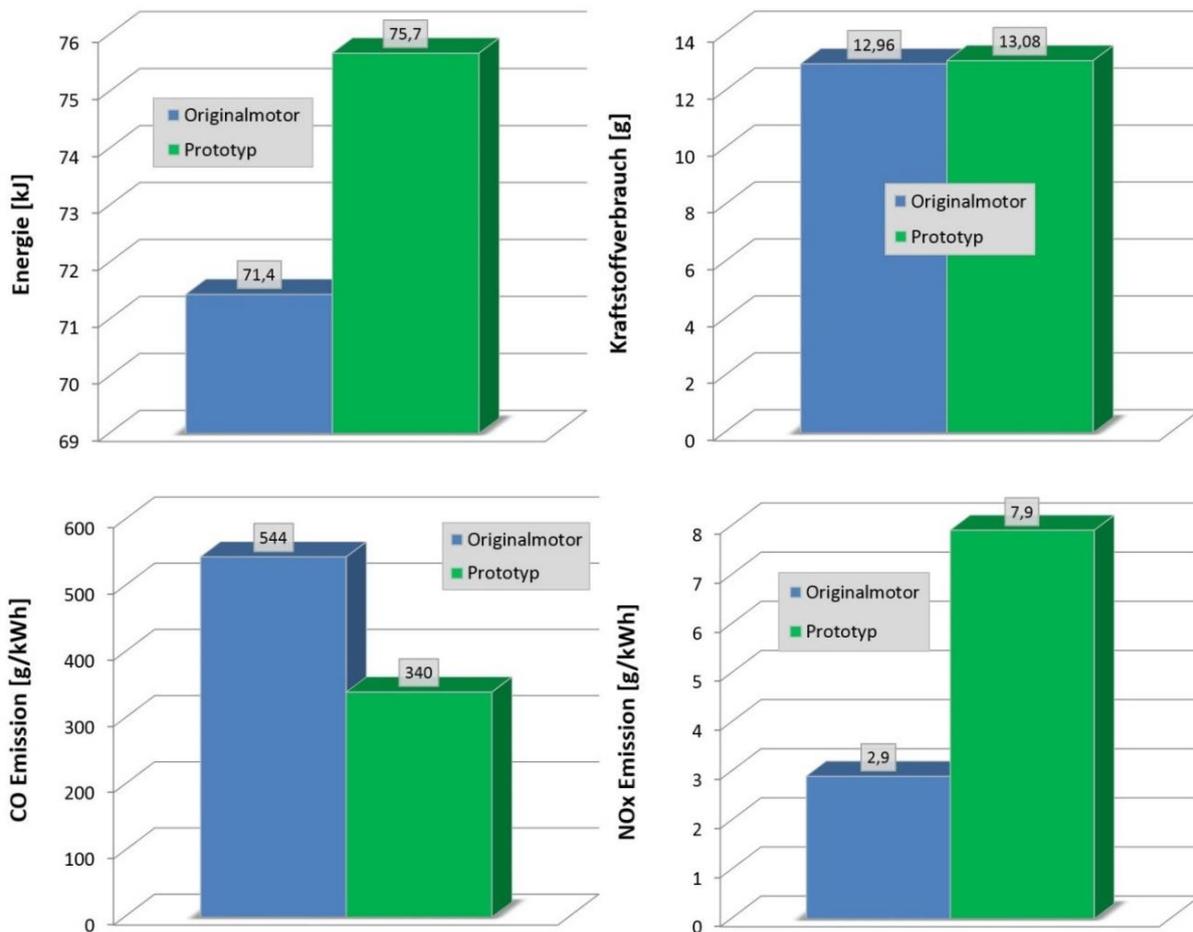


Abbildung 4-61: Verrichtete Arbeit, Kraftstoffverbrauch und Emissionen im Vergleich

Vergleicht man nun die verrichtete Arbeit beider Motoren über diesen Mähzyklus, wie in

Abbildung 4-61 dargestellt, kann eine Steigerung von 5,9 % festgestellt werden. Gleichzeitig steigt der Kraftstoffverbrauch aber nur um 0,86 %, was eine deutliche Verbesserung der Effizienz des Motors aufzeigt. Die Kohlenmonoxidemissionen konnten bei diesem Versuch um 38 % reduziert werden, die Stickoxidwerte steigen jedoch wie erwartet deutlich an.

Als nächster Schritt erfolgte der Umbau des Prototypenmotors in den Rasenmäher und im Anschluss daran wurden die Versuche am Testgelände durchgeführt. Innerhalb der verfügbaren Zeit für diese Forschungstätigkeiten konnten die Motorparameter des Rasenmäher-Prototypen nur teilweise in die gewünschten Bereiche gebracht werden. Daher entsprechen die Resultate des Rasenmäher-Prototypen im Realversuch nicht ganz den Ergebnissen aus den Prüfstandsversuchen.

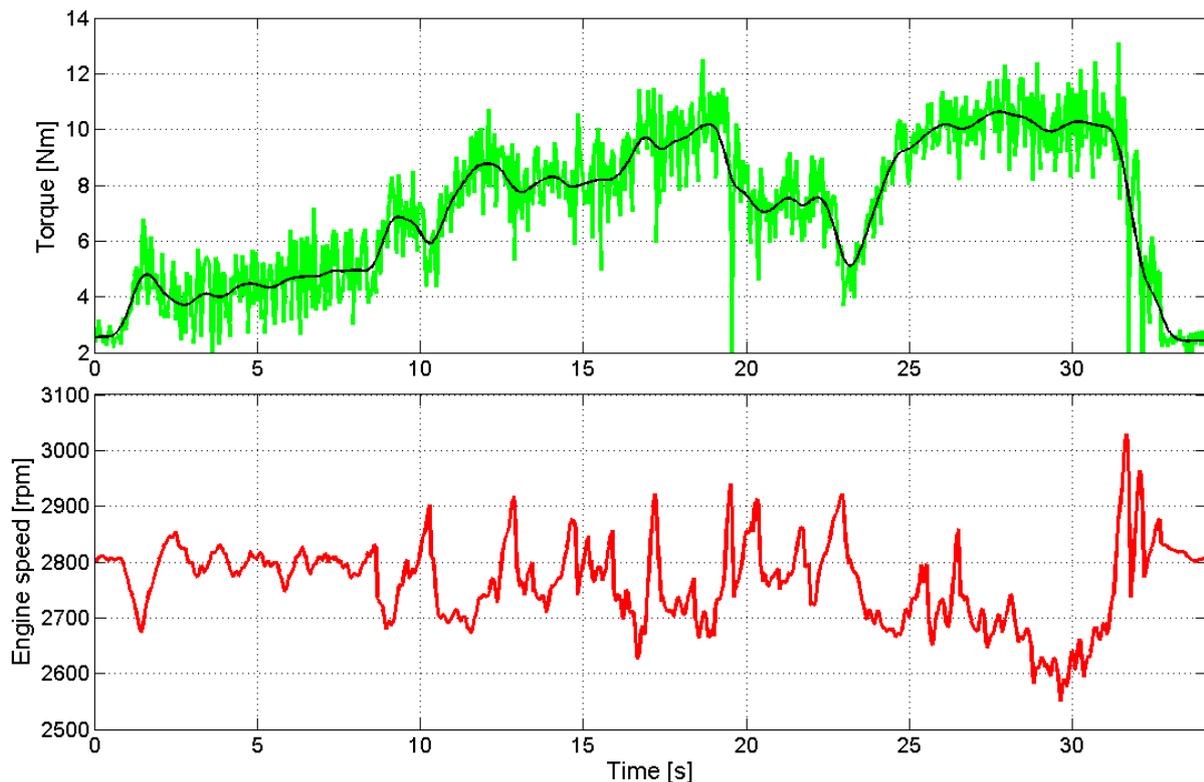


Abbildung 4-62: Prototyp - Verlauf von Drehmoment und Drehzahl am Rollrasen

Abbildung 4-62 zeigt den Verlauf von Drehmoment in Grün und Drehzahl in Rot über die Zeit im Prototypenversuch am Rollrasen. In Schwarz ist zusätzlich der Mittelwert des Drehmoments aufgetragen. Der Rasenwuchs war bei diesen Feldversuchen deutlich dichter als bei den Versuchen mit dem Original-Rasenmäher zu Beginn der Forschungsarbeiten. Es befanden sich auch mehr Inhomogenitäten wie z.B. Maulwurfshügel in der zur Verfügung stehenden Versuchsfläche. Gut zu sehen ist die richtige Funktion des Drosselklappenreglers bei moderaten Lasten und geringeren Schwankungen bis Sekunde 8. Danach treten bei plötzlichen, stark wechselnden Lasten immer wieder Drehzahlspitzen auf, die durch die noch nicht optimale Reglerabstimmung zu erklären sind. Ab Sekunde 25 ist das deutlich gesteigerte Drehmomentvermögen des Motors durch die verbesserte Abstimmung zu erkennen, wodurch Lasten von über 10 Nm auch konstant gehalten werden können. Kurz vor Sekunde 20 und auch bei Sekunde 32 zeigt sich ein Problem mit der elektronischen Zündung, das innerhalb der Projektzeit nicht gelöst werden konnte. Der Zündfunken für eine Zündung fehlt komplett und es findet keine Verbrennung statt. Dadurch geht auch das abgegebene Drehmoment auf null zurück. Dies macht sich in den Drehzahlschwankungen zu Ende des Versuchs deutlich bemerkbar.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass über den Versuch ein mittleres Drehmoment von

7,06 Nm und eine mittlere Motordrehzahl von 2763 min^{-1} gemessen wurde. Dabei beträgt die abgegebene Wellenarbeit 69,3 kW und die theoretische Wellenarbeit 70,6 kW. Was eine Differenz von 1,3 kW ergibt und somit einem verbleibenden, noch nutzbaren Potential von 1,87 % entspricht.

Abbildung 4-63 zeigt die Verteilung der Lastpunkte am Rollrasen, mit einem Mittelwert pro Motorzyklus, welche durch einen roten Kreis dargestellt sind. Zusätzlich sind an den Achsen die Verteilungen von Drehmoment in grün und Drehzahl in Rot als Histogramm abgebildet. Durch die starken Lastwechsel streuen die Lastpunkte im Diagramm stark. Gut zu sehen ist, dass sich eine erhebliche Anzahl davon zwischen 10 und 12 Nm befindet und manche sogar auch darüber hinausgehen. Dies gibt die bereits am Prüfstand sichtbare Steigerung der Leistungsfähigkeit des Motors wieder, was auch durch das Histogramm des Drehmoments gut gezeigt wird. Demnach hat sich das Maximum der Drehmomentverteilung von ursprünglich rund 7 Nm im Originalmotor auf rund 9 Nm verschoben. Das Drehzahlmaximum der Verteilung befindet sich nun auch am Sollwert von 2800 min^{-1} .

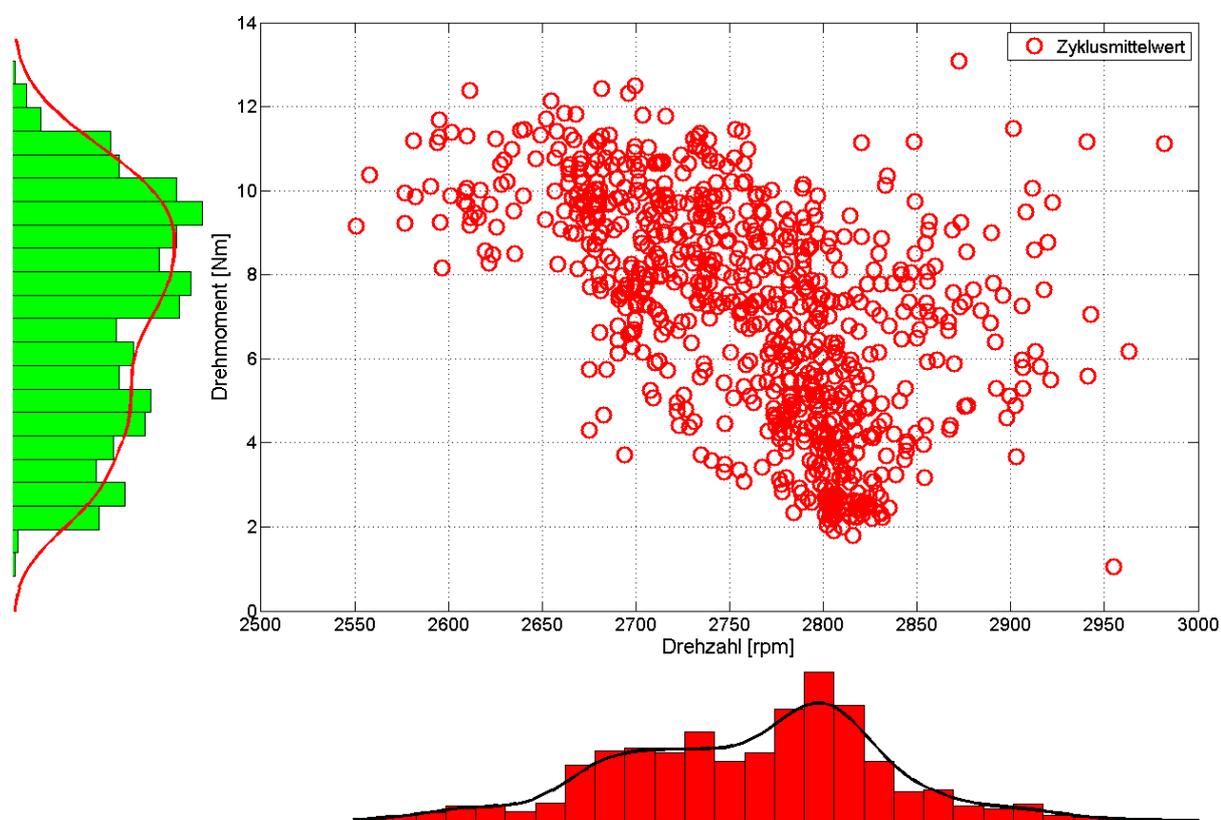


Abbildung 4-63: Prototyp – Drehmoment über Drehzahl auf Rollrasen

In Abbildung 4-64 ist der Verlauf des Lambdawertes und die Verteilung des Verbrennungsschwerpunktes für den Versuch am Rollrasen gezeigt. Die starken Schwankungen in der Motorlast schlagen sich auch im Lambdaverlauf nieder. Der Startwert im Leerlauf liegt in diesem Fall bei 0,85 und nicht bei den angestrebten 0,9, was auf die noch notwendigen Verbesserungen in der Kennfeldbedatung im Rasenmäher zurückzuführen ist. Zu bemerken ist jedoch dass der Spitzenwert in der Histogrammverteilung nur knapp unter dem Sollwert dieser Bedatung, ein Lambda von 0,85 liegt und somit die Regelung bereits zufriedenstellend funktioniert. Bei Sekunde 20 und 32 sind die Auswirkungen der Verbrennungsaussetzer durch die fehlende Zündung zu erkennen, welche den Lambdawert stark Richtung niedrige Lambdawerte sinken lassen. Das Histogramm des Verbrennungsschwerpunktes zeigt auch eine deutliche Veränderung gegenüber dem Originalmotor und der Spitzenwert liegt hier bei rund 16°KW nach OT, was

einen um 7°KW früheren Verbrennungsschwerpunkt ergibt. Zudem ist die Verteilung deutlich konzentrierter in Richtung des Maximalwertes.

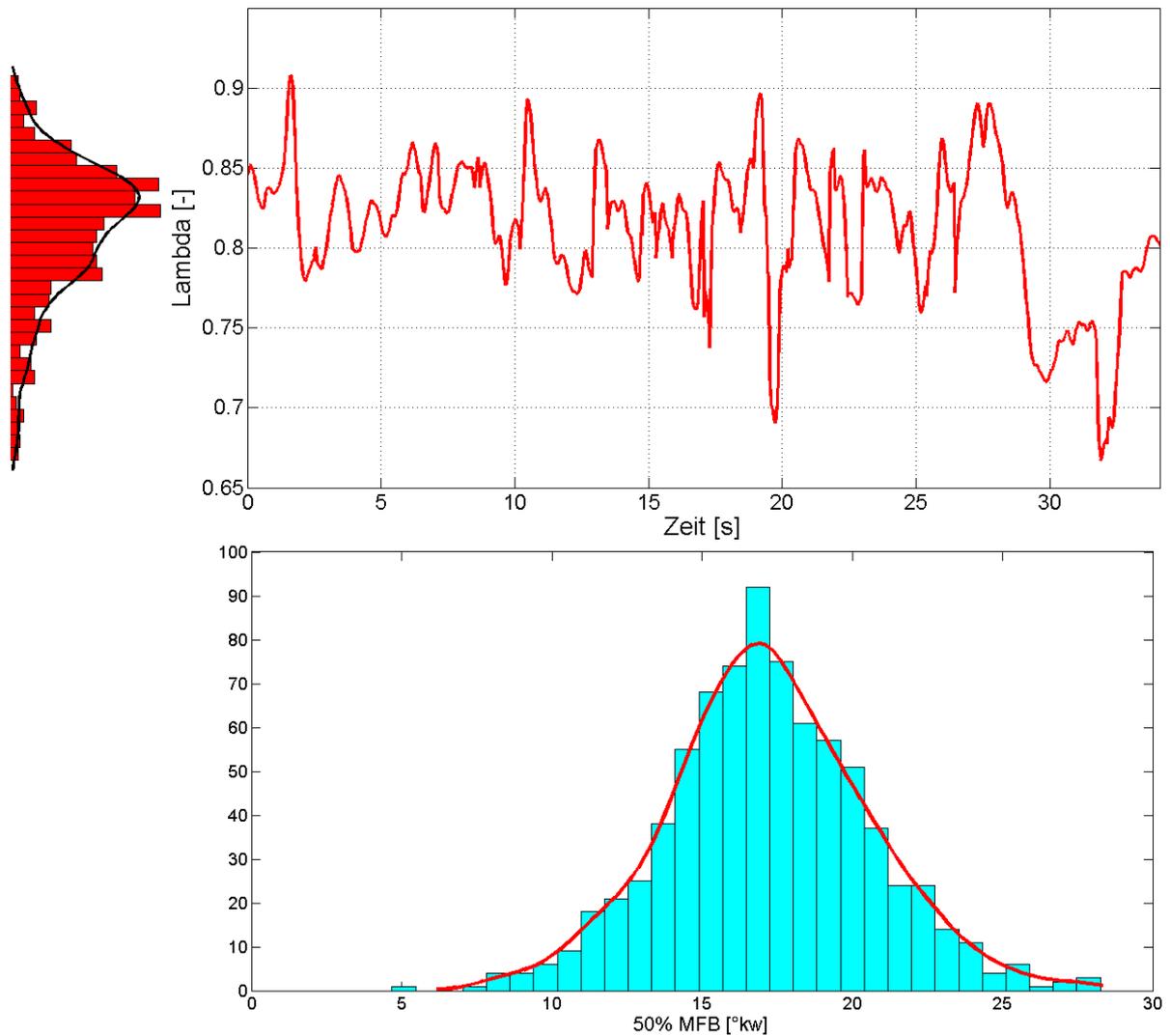


Abbildung 4-64: Prototyp – Lambdaverlauf und Verteilung 50% Verbrennungsschwerpunkt auf Rollrasen

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

In den Energieflussanalysen beider Versuchsträger konnten über eine thermodynamische Analyse, in Kombination mit einer entwicklungsmethodisch geleiteten technischen Produktgestaltung, erfolgreich energetische Potentiale in technischen Systemen ermittelt werden. Die thermodynamische Untersuchung zeigte die Energieflüsse und Energieverluste in den Systemen auf. Das methodische Entwickeln technischer Produkte aus der Entwicklungsmethodik in Kombination mit dem systematischen Denkprinzip des Systems Engineering ermöglichte es, in den komplexen technischen Systemen koordiniert bis in tiefe Analyseprozesse vorzudringen, ohne dabei den Überblick über das Gesamtsystem und dessen Zusammenhänge zu verlieren. Es konnte eine gezielte Optimierung der Versuchsträger und deren Untergruppen erarbeitet und die gefundenen Potentiale genutzt werden.

Durch den im Projekt *LOCO₂* untersuchten abgasturboaufgeladenen Prototypenmotor für das Motorrad war es möglich, die in der Forschungsarbeit im Zuges des Projekts *Eta+* erkannten energetischen Potentiale zu nutzen. Wie in den Ergebnissen der Simulationsrechnung dargestellt, wurde über die Abgasturbine Verlustenergie dem Abgasmassenstrom zu entziehen und über die Verdichtung der angesaugten Frischluft wieder nutzbar zu machen. Des Weiteren zeigte sich durch die Untersuchungen im Vergleich, dass sich das Verbrauchsoptimum sowie ein hohes Drehmomentpotential des Motors bei geringeren Drehzahlen als bei üblichen Motor-konzepten für Motorräder befinden. Diese verbesserten Eigenschaften bringen die Möglichkeit und auch den Anreiz für den Nutzer mit sich, das Motorrad in der realen Fahrt in einer wesentlich effizienteren Art und Weise zu betreiben. Die Verbindung der verbesserten Alltagstauglichkeit durch das höhere Drehmoment in unteren Drehzahlen mit dem geringeren Fahrzeuggewicht und dem verbesserten Verbrauch, kann durchaus als positives Verkaufsargument dargestellt werden. Als Gegenargument muss zu dieser Motorkonzeption gesagt werden, dass die Entwicklung eines Turbomotorrades eine sehr anspruchsvolle Aufgabe darstellt. Wo neben den rein konstruktiven Problemen in der Motorentechnik wie zum Beispiel die Handhabung der thermischen Belastung des Systems durch den Turbolader die komplexen Rahmenbedingungen eines Zweirades wie zum Beispiel die Fahrbarkeit zu beachten sind. Für umfangreiche Ergebnisse zur Untersuchung des Turbomotorrades, welche nicht Inhalt dieser Dissertation waren, wird an dieser Stelle an die aus dem Projekt *LOCO₂* folgenden Veröffentlichungen verwiesen.

Die Optimierungsarbeiten am Rasenmähermotor ergaben eine verbesserte thermodynamische Ausnutzung der Verbrennungsenergie durch die Verlagerung der Verbrennungsschwerpunkts-lage über die elektronische Zündung. Weiters brachte die Abmagerung des Kraftstoff-Luft Gemischs auf $\lambda 0,9$ einen besseren Umsatz des aufgewendeten Kraftstoffes, vor allem durch die vollständigere Verbrennung und somit Reduktion von Kohlenmonoxid. Diese Maßnahmen führten zu einer höheren effektiven Energiebereitstellung bei nahezu gleichbleibendem Verbrauch was sich auch in einem höheren Drehmoment und somit einer verbesserten Schnittleistung bei gleichem Grundmotor auswirkt. Zur Schnittleistungssteigerung trug auch die elektronisch gesteuerte Drosselklappenregelung bei, welche als Regelgröße eine wesentlich geringere Drehzahlabweichung vom Vorgabewert benötigt und auch das System auf diesen hin regeln kann. Weiters war die Reaktionsgeschwindigkeit der Motorregelung durch die elektronische Drosselklappe sowie durch die Freiheitsgrade der elektronisch gesteuerten Kraftstoffeinspritzung deutlich erhöht, was im realen Betrieb deutlich höhere Lastspitzen erlaubte. Durch das konstante Halten der Vorgabedrehzahl auch bei wechselnden Lasten erfährt der Nutzer ein deutlich verbessertes subjektives Empfinden der Leistungsfähigkeit des Rasenmähers im Betrieb. Im Weiteren bestehen noch einige weiterführende Möglichkeiten zur Verbesserung des Systems wie zum Beispiel die Option unterschiedlicher Strategien der Kennfeldabstimmung der Motorsteuerung. Es können verschiedene Eigenschaften wie hohe Motorleistung, optimierte Lastwechselreaktion, geringer Verbrauch, verbesserte Abgasemissionen, eine optimierte Lebensdauer oder eine hybride Kennfeldabstimmung für einen Kompromiss aus diesen

Parametern realisiert werden. Die Variabilität der Lehlaufdrehzahl ermöglicht zudem eine schnelle und zuverlässige Anpassung an den jeweiligen Zielmarkt. Wie auch beim Motorrad-Prototypen sind hier noch weitere und umfangreiche Arbeiten notwendig, um dieses System in einen marktfähigen Rasenmähermotor überzuführen. Dabei ist vor allem noch eine Verbesserung der Softwarebedatung für die Drosselklappenregelung sowie für die Kraftstoffeinspritzung notwendig. Weiters ist die Position des Injektors noch nicht optimal und auch der Zylinderkopf samt Einlasskanal bedarf einer Überarbeitung, um eine verbesserte Verbrennungsstabilität und Lastwechselreaktion zu erzielen. Alle Komponenten der Motorsteuerung und Kraftstoffeinspritzung sind Prototypenbauteile und aus Versuchsaufbauten anderer Motorkategorien übernommen. Diese müssen für das hier vorliegende Einsatzgebiet angepasst und serientauglich weiterentwickelt werden. Konstruktive Maßnahmen zur Reduktion der Verbrennungstemperatur, wie etwa eine Abgasrückführung bei Teillast oder eine Zylinderkühlung mit Motoröl bieten Möglichkeiten um das Problem der Stickoxidemissionen bei Kraftstoff-Luft Gemischen nahe $\lambda = 1$ zu lösen. Weiters ist durch den $\lambda = 1$ Betrieb auch der Einsatz eines konventionellen Dreiwege- Katalysators zur Abgasnachbehandlung denkbar.

Technische Produkte werden zu immer komplizierteren und komplexeren Systemen, wobei viele Fachgebiete von Bedeutung sind und dem interdisziplinären Zusammenspiel zwischen diesen eine zentrale Rolle zuteil wird. Die Entwicklung beziehungsweise Weiterentwicklung dieser Systeme benötigt eine koordinierte und gezielte Vorgehensweise, um diese herausfordernden Problemstellungen handhaben zu können. Ein Leitfaden zur gezielten und selektiven Arbeit wobei gleichzeitig ein holistischer Systemansatz mit einbezogen wird, kann dazu einen sinnvollen und gangbaren Weg darstellen. Der effektive Einsatz der verfügbaren Ressourcen sowie das Systemdenken ermöglichen dabei den Projektausführenden das System im Ganzen und im Detail zu verstehen und auch zu analysieren, ohne dabei den notwendigen Überblick zu verlieren. Die immer wiederkehrende Reflektion der zuvor durchgeführten Schritte gewährleistet zudem eine laufende Qualitätssicherung. Weiters ist eine prädiktive Abschätzung von Auswirkungen der durchgeführten Veränderungen durch den Einbezug der Umgebung des Produktes sowie der Umgebung der Untersysteme und dessen Beziehungen zueinander und nach Außen machbar. In *MEta+* ist das methodische Entwickeln technischer Produkte sowie das Systemdenken speziell zugeschnitten auf das Arbeiten mit thermodynamischen Grundprinzipien und Methoden. Die Energieflüsse erklären einen Teil des Systems und deren Analyse zeigt die Stärken und Schwächen darin auf. Wenngleich die Methodik *MEta+* trotz der Bemühungen zu Effektivität noch immer eine umfangreiche Vorlage für die Systemoptimierung darstellt, kann sie als gute Richtlinie gesehen werden, sollte aber auch immer an die speziellen Bedürfnisse von Projekten angepasst werden. Dabei können Teile davon weggelassen oder hinzugefügt werden, um die flexible Anwendung der Methodik gewährleisten zu können.

Eine weitere Schlussfolgerung besteht aus der Erkenntnis, welche Bedeutung das frühe Projektstadium für den erfolgreichen Verlauf eines Projektes darstellt. Maßgebliche Entscheidungen werden in dieser Phase bereits getroffen, die die Weichen für die Entwicklung des gesamten Projektes stellen. Zum einen sollten diese Entscheidungen wohlüberlegt getroffen werden und zum anderen ist es wichtig das für eine Produktverbesserung sehr wichtige kreative Denken durch ein zu schnelles Voranschreiten in den Arbeiten nicht zu vernachlässigen. Wenn es gelingt, die Sichtweise und den Lösungsraum nicht zu früh einzuengen, kann das Potential der Projektbeteiligten voll genutzt werden. Kreatives Denken sowie Neugier und Herz bringen Motivation und somit auch Innovation mit sich. Dies stellt wiederum eine Form der intelligenten und wirkungsgradorientierten Handlungsweise dar. Projektkritische Entscheidungen sollten daher auf Basis von fundierten Ergebnissen und gut durchdachten Lösungsansätzen gefällt werden. Leider wird in der Praxis oft dem Bauchgefühl sowie den schnell verfügbaren Lösungen der Vorrang gegenüber dem systematischen, rationalen Denken gegeben.

Für einen Projekterfolg ist es zudem wichtig, sich intensiv mit der gegebenen Fragestellung

auseinanderzusetzen und bereits vorhandenes Wissen aus der Wissenschaft und Wirtschaft zu nutzen. Dazu ist eine ausreichende Disziplin für die notwendige Literaturrecherche notwendig und betont weiter die Bedeutung des frühen Projektstadiums. Das Denken und Arbeiten mit Modellabbildungen des betrachteten Systems, ermöglicht das schnelle Wechseln zwischen den Detaillierungsgraden und somit die Nachverfolgung von Vorgängen im Kleinen sowie im Großen. Der modulare Aufbau des Modellbildes über Untergruppen bringt die relativ einfache Hinzunahme oder Wegnahme von Systembestandteilen mit sich, ohne den Überblick über die Auswirkungen durch die Veränderungen zu verlieren. Die Erarbeitung von Varianten für unterschiedliche Lösungen schafft Zugang zu einer Bewertung der zur Verfügung stehenden Lösungen und nach der Auswahl einer bestimmten Vorgehensweise stehen noch immer weitere Lösungen als Backup zur Verfügung.

Die hier entwickelte Methodik *MEta+* besitzt Potential um ein erfolgreiches Arbeiten in wissenschaftlichen Projekten zu unterstützen. Sie besitzt jedoch zweifellos noch einige Schwächen und sollte über die Anwendung in der aktiven Projektarbeit weiter verbessert werden. Der Umgang mit den Inhalten der Methodik ist noch immer nur teilweise intuitiv und zu kompliziert, wodurch das sicherlich ambitionierte Ziel eines intuitiv anwendbaren Leitfadens noch nicht erreicht ist. Die sehr umfangreichen Vorgaben zu Handlungsmöglichkeiten sollten vereinfacht werden und eine klarere Darstellung dieser ist notwendig.

Die globale Wirtschaft bringt Herausforderungen mit sich, die weitreichende soziale und gesellschaftliche Auswirkungen darstellen. Dafür müssen die richtigen Antworten gefunden werden. Nachhaltiger wirtschaftlicher Erfolg braucht Innovation. Innovation jedoch braucht nachhaltige und qualitativ hochwertige Arbeit durch hoch qualifizierte Fachkräfte. Know-How, technische und wissenschaftliche Qualität und Innovation sind große Zukunftschancen für die Staaten Europas. Daraus lässt sich eine lokale und regionale Wertschöpfung, wirtschaftliche Sicherheit und somit Arbeitsplatzsicherheit erreichen. Weiters ist der verantwortungsvolle Umgang mit Ressourcen, in welcher Art auch immer dringend notwendig. Europa kann hier eine Vorreiterrolle einnehmen und daraus eine Wertschöpfungsquelle generieren. Der Klimawandel ist Fakt, diese Tatsache und die Folgen daraus werden noch nicht ausreichend wahrgenommen. Die Verantwortung für unseren Lebensraum und vor allem für dessen Erhaltung für unsere Nachfahren trägt jeder Einzelne. Jedem ist die Möglichkeit gegeben, diese Verantwortung zu übernehmen, nur der Wille dazu ist noch zu gering. Dies zu verbessern stellt auch eine Form der Optimierung eines Systems dar.

Literaturverzeichnis

- [1] Atkins A., Feulner P.: Der mechanische Hybridantrieb von Ricardo, Motortechnische Zeitschrift 72. Jahrgang, 02/2011
- [2] Bauer U.: Enzyklopädie Betriebswirtschaftslehre, Vorlesungsskriptum, Technische Universität Graz, 2006
- [3] Bildl A., Ebberg J., Schmieder Th.: Benzinverbrauch bei Motorrädern, MOTORRAD 17/2008
- [4] Birnbreier H.: Energetische und ökologische Bilanzierung des Einsatzes eines Elektro-Omnibusses auf Rügen, Automobiltechnische Zeitschrift 100 (1998) 7/8
- [5] BMW Motorrad GmbH, <http://www.bmw-motorrad.at/at/de/index.html>, http://www.bmw-motorrad.at/at/de/index.html?content=http://www.bmw-motorrad.at/at/de/bike/model_overview.html¬rack=1, abgerufen 2011-02
- [6] Bohinc T.: Führung im Projekt, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-642-22625-0, 2012
- [7] Bredel E., Nickl J., Bartosch St.: Abwärmenutzung im Antrieb von heute und morgen, Motortechnische Zeitschrift, Volume 72, Issue 4, 04/2011
- [8] Bronner A., Herr St.: Vereinfachte Wertanalyse, 4. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-540-33136-0, 2006
- [9] California Environmental Protection Agency Air Resources Board, <http://www.arb.ca.gov/msprog/offroad/sore/sorectp/sorectp.htm#reg>, 2004
<http://www.arb.ca.gov/homepage.html>, 2012
- [10] Conceptboard GmbH, Conceptboard, <https://conceptboard.com/>, 11-2013
- [11] Das Umweltbundesamt: EU sagt Leerlaufverlusten den Kampf an, <http://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/energiesparen/leerlaufverluste>, 2/2012
- [12] Dobler H.: Zweitaktmotor mit Spülvorlage von Stihl, Motortechnische Zeitschrift, Jahrgang 68, 03/2007
- [13] Döring E., Schedwill H., Dehli M.: Grundlagen der technischen Thermodynamik, 7. Auflage, Springer Vieweg, ISBN 978-3-8348-1026-7, 2012
- [14] Dropbox Inc.: Dropbox, <https://www.dropbox.com/>, 02/2016
- [15] Edtmayer H., Trattner A., Schidt St., Kirchberger R.: Real World Operation of a Standard Lawn Mower Engine from a Scientific Perspective, Small Engines Technology Conference 2013, SAE International, DOI 10.4271/2013-32-9124, 10/2013
- [16] Eichlseder H., Klütting M, Piock W.F.: Grundlagen und Technologien des Ottomotors; ISBN 978-3-211-25774-6, SpringerWienNewYork, 2008
- [17] Eichlseder, H., Klell, M.: Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik, Erzeugung, Speicherung und Anwendung. 3. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag Wiesbaden,

- ISBN 9783834817549, 2012
- [18] Eichlseder, H.: Thermodynamik, Vorlesungsskriptum, Technische Universität Graz, 2013
- [19] Eichlseder, H.: Verbrennungskraftmaschinen – Vertiefte Ausbildung, Vorlesungsskriptum, Technische Universität Graz, 2005
- [20] Engwer R.: Vergleichstest Benzinverbrauch, MOTORRAD online, <http://www.motorradonline.de/vergleichstest/vergleichstest-benzinverbrauch/482104> , 09/2013
- [21] Europäische Union: Richtlinie 2000/14/EG des europäischen Parlaments und des Rates, das europäische Parlament und der Rat der europäischen Union, <http://eur-lex.europa.eu//de.htm> , 2000
- [22] Europäische Union: Richtlinie 2002/51/EG des europäischen Parlaments und des Rates, zur Verminderung der Schadstoffemissionen von zweirädrigen und dreirädrigen Kraftfahrzeugen und zur Änderung der Richtlinie 97/24/EG, <http://eurlex.europa.eu//de.htm> , 2002
- [23] Europäische Union: Richtlinie 97/68/EG des europäischen Parlaments und des Rates, 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, <http://eurlex.europa.eu//de.htm> , 16/12/1997
- [24] Europäischen Union: Verordnung (EU) Nr. 168/2013 des europäischen Parlaments und des Rates, über die Genehmigung und Marktüberwachung von zwei- oder dreirädrigen und vierrädrigen Fahrzeugen, http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2013.060.01.0052.01.DEU , 15/01/2013
- [25] Evernote Corporation, Evernote, <https://evernote.com/intl/de/>, 11/2013
- [26] Feldhusen J., Grote K-H. (Hrsg.): Pahl/Beiz Konstruktionslehre, 8.Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-642-29568-3 ,2013
- [27] Feulner P.: Zusätzliche Energiewandler in zukünftigen Antrieben, Motortechnische Zeitschrift, 69. Jahrgang, 09/2008
- [28] Flik M., Edwards S., Pantow E.: Emissionssenkung bei Nutzfahrzeugen durch Thermomanagement, 30. Internationales Wiener Motorensymposium 2009
- [29] Freymann R., Strobl W., Obieglo A.: Der Turbosteamer: Ein System zu Kraft-Wärme-Kopplung im Automobil, Motortechnische Zeitschrift, Jahrgang 69, 05/2008
- [30] Fukushima T., Matsuda H., Shinogi Y., Taniguchi Y.: Governor System for General Purpose Engine Using Adaptive Control Theory, Small Engine Technology Conference 2006, 11/2006.
- [31] Girstmair J.: Erstellung und Validierung eines thermischen Modells für ein Zweizylinder-Motorrad, Diplomarbeit, Technische Universität Graz, 2013

- [32] Glück St.: Praxistest Benzinverbrauch Verbrauchsberatung, MOTORRAD, 19/2009
- [33] GUEM GmbH: <http://www.guem-kaercher-shop.at>, abgerufen 11/2012
- [34] Gumpesberger M., Landerl Ch., Miritsch J., Mosmüller E., Müller P., Ohrenberger G.: Der Antrieb der neuen BMW F 800, Motortechnische Zeitschrift, Jahrgang 67, 06/2006
- [35] Haberfellner R., Fricke E., de Weck O., Vössner S.: Systems Engineering, Grundlagen und Anwendung, 13. Auflage, Orell Füssli Verlag AG, ISBN 978-3-280-04068-3, 2015
- [36] Haberfellner R.: Projektmanagement, Vorlesungsskriptum, Technische Universität Graz
- [37] Hepke G.: Direkte Nutzung von Abgasenthalpie zur Effizienzsteigerung von Kraftfahrzeugen, Dissertation, Technische Universität München, 2010
- [38] Jakoby W., Projektmanagement für Ingenieure, Springer Vieweg, ISBN 978-3-8348-1862-1, 2013
- [39] Johannsen R.: Zukünftige Anforderungen der Abgasgesetzgebung an Motorräder, Automobiltechnische Zeitschrift, 05/2013
- [40] Kaschel St.: BMW F 800 R und Husqvarna Nuda 900 im Technikvergleich, MOTORRAD online, <http://www.motorradonline.de/vergleichstest/bmw-f-800-r-und-husqvarna-nuda-900-die-technik-dahinter-technische-daten/423708?seite=3>, 31.08.2012
- [41] Kawasaki Heavy Industries Ltd.: Service Manual FJ180V, 08/2010
- [42] Kawasaki Motors Europe N.V.: FJ180V STD, <http://www.kawasaki-engines.eu/de/engines/4-stroke-vertical/fj-series/fj180v-std/>, 04/2014, <http://www.kawasaki-engines.eu/de/>, 2014
- [43] Klell, M.: Höhere Thermodynamik, Vorlesungsskriptum, Technische Universität Graz, 2013
- [44] Kliffken M., Ehret Ch., Geerling G.: Hydrostatisch Regeneratives Bremssystem (HBR), Tagung Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen, 02/2007
- [45] Konsumenteninfo AG: Lampenwechsel nur für Profis, Ktipp, 11/2004, www.ktipp.ch, <https://www.ktipp.ch/artikel/d/lampenwechsel-nur-fuer-profis/>, abgerufen 11/2014
- [46] Kupnick M., Rothschädl D.: Energieflussbestimmung von Zweiradantrieben, Projekt Verkehrstechnik, Technische Universität Graz, 2012
- [47] Langeheinecke K., Jany P., Thielke G.: Thermodynamik für Ingenieure, 7. Auflage, Vieweg+Teubner, ISBN 978-3-8348-0418-1, 2008
- [48] Lehner R. (1): Energieflussanalyse von Sport- und Freizeitfahrzeugen,

- Diplomarbeit, Technische Universität Graz, 2013
- [49] Lehner R. (2): Experimentelle Untersuchungen zur Energieflussbestimmung von Sport- und Freizeitfahrzeugen, Projekt Verkehrstechnik, Technische Universität Graz, 2011
- [50] Liebl J.: BMW EfficientDynamics – Emissionsreduzierung kann auch faszinieren, 4. Emission Control. Dresden, 2008
- [51] Lindemann, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte, 3. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-642-01422-2, 2009
- [52] Microsoft Corporation, Microsoft One Note, <http://www.microsoft.com>, <http://office.microsoft.com/de-at/onenote/>, 11-2013
- [53] Microsoft Corporation: Microsoft Onedrive for Business, <http://www.microsoft.com>, <https://onedrive.live.com/about/de-at/business/>, 02/2016
- [54] Mindjet GmbH, www.mindjet.at/de, 2013
- [55] National Institute of Standards and Technology NIST, NIST Chemistry WebBook, <http://www.nist.gov> , <http://webbook.nist.gov/chemistry>
- [56] Ninaus M., Winkler R.: Kreativitätstechniken, Vorlesungsskriptum, Technische Universität Graz, 2008
- [57] Ophey L.: Entwicklungsmanagement, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, ISBN 3-540-20652-3, 2005
- [58] Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft, COMET Programm, <https://www.ffg.at/>, <https://www.ffg.at/comet/>, 11-2013
- [59] Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft, Leitfaden für K-Projekte, <https://www.ffg.at/>, <https://www.ffg.at/content/comet-compentence-centres-excellent-technologies-k-projects>, 11-2013
- [60] Pischinger R., Klell, M., Sams, Th.: Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine, 3. Auflage, In der Reihe: List, H. (Hrsg.): Der Fahrzeugantrieb, Springer Verlag Wien New York, ISBN 9783211992760, 2009
- [61] Ponn J., Lindemann U.: Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte, 2. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-642-20579-8, 2011
- [62] Pott E.: Energieflussmanagement zur Kraftstoffverbrauchs-, Emissions- und Heizkomfortoptimierung, Automobiltechnische Zeitschrift 100 (1998) 7/8
- [63] Priest M.W., Williams D.J., Bridgman H.A.: Emissions from in-use lawn-mowers in Australia, Atmospheric Environment, Volume 34, Issue 4, DOI: 10.1016/S1352-2310(99)00192-2, 1/2000
- [64] Prossliner V.: Experimentelle Untersuchungen eines modifizierten Rasenmähermotors, Bachelorarbeit, Technische Universität Graz, 2014

- [65] Pucher H., Zinner K.: Aufladung von Verbrennungsmotoren, 4. Auflage, Springer Vieweg, ISBN 978-3-642-28989-7, 2012
- [66] Radtke M.: Vergleichstest – Rasenmäher, ETM Testmagazin, 06/2010
- [67] Rieberer R.: Energie- und umwelttechnisches Mess- und Versuchswesen, Vorlesungsskriptum, Technische Universität Graz, 2012
- [68] Rossegger B.: Experimentelle Untersuchungen bestehender Gemischbildungssysteme am Motorprüfstand und konstruktiver Transfer auf einen 4-Takt Ottomotor, Bachelorarbeit, Technische Universität Graz, 2012
- [69] Rumbolz Ph., Baumann G., Reuss H.: Messung der fahrzeuginternen Leistungsflüsse im Realverkehr, Automobiltechnische Zeitschrift 113. Jahrgang 5/2011
- [70] Sams Th.: Schadstoffbildung und Emissionsminimierung bei KFZ Teil 1, Vorlesungsskriptum, Technische Universität Graz, 2007
- [71] Schalcher H.R.: Systems Engineering, Vorlesungsskriptum, ETH Zürich, 2008
- [72] Schmidt St.: Förderprojektantrag EcoPowerDrive, Technische Universität Graz, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, 2009
- [73] Schmieder Th.: MOTORRAD-Testverbrauch 200 Verbrauchswerte in der Übersicht, MOTORRAD online, <http://www.motorradonline.de/news/liste-motorrad-testverbrauch/96600>, 28.07.2008
- [74] Seifert M., Ringler J., Guyotot V., Freymann R.: Potential der Abwärmerückgewinnung mittels eines Rankine-Prozesses beim PKW, 12. Tagung "DER ARBEITSPROZESS DES VERBRENNUNGSMOTORS", 09/2009
- [75] Siebertz K., Bebbler D., Hochkirchen T.: Statistische Versuchsplanung, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-642-05492-1, 2010
- [76] Spahni D.: Problemlösungsmethodik und Projektmanagement, Vorlesungsskriptum, Berner Fachhochschule, 2000
- [77] Spiegel Online GmbH: Gaspedal-Panne: Toyota muss in den USA Milliardenstrafe zahlen, Spiegel Online, 03/2014, [www.spiegel.de](http://www.spiegel.de/wirtschaft/unternehmen/toyota-muss-in-den-usa-milliardenstrafe-zahlen-a-959680.html), <http://www.spiegel.de/wirtschaft/unternehmen/toyota-muss-in-den-usa-milliardenstrafe-zahlen-a-959680.html>, abgerufen 11/2014
- [78] Stan C.: Alternative Antriebe für Automobile, 2. Auflage, Springer Berlin Heidelberg New York, ISBN 3-540-24192-2; 2005
- [79] Steven H.: Worldwide Harmonised Motorcycle Emissions Certification Procedure - Draft Technical Report, 01/2003, www.unece.org, abgerufen 05/2011
- [80] Stiftung Warentest: Krach am Gartenzaun, Stiftung Warentest, Test.de, Test 4/2013
- [81] Stoffregen J.: Motorradtechnik, 8. Auflage, Springer Vieweg, ISBN 978-3-8348-1716-7, 2012

- [82] Technische Universität Graz: Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, ECO-PowerDrive, <http://www.ecopowerdrive.at/index.php?id=4> , 11/2014
- [83] The MathWorks Inc.: MathWorks Matlab, <http://www.mathworks.de/products/matlab/>, abgerufen 10/2014
- [84] Tuckman B. W.: Developmental sequence in small groups, Psychological Bulletin Vol. 63, 1965
- [85] Viking GmbH, www.viking.at, 2013
- [86] Weigand B., Köhler J., von Wolfersdorf J.: Thermodynamik Kompakt, 3. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-642-37232-2, 2013
- [87] Wesselak V., Schabbach T.: Regenerative Energietechnik, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-540-95881-9, 2009
- [88] Wikimedia Foundation Inc.: Carnot-Prozess, <http://de.wikipedia.org/wiki/Carnot-Prozess> , 01/2015
- [89] Wikimedia Foundation Inc.: Fliehkraftregler, <http://de.wikipedia.org/wiki/Fliehkraftregler>, 12/2014
- [90] Wikimedia Foundation Inc.: Systems Engineering, http://de.wikipedia.org/wiki/Systems_Engineering , 01/2015
- [91] Wikimedia Foundation Inc.: Thermodynamik, <http://de.wikipedia.org/wiki/Thermodynamik> , 01/2015
- [92] Wikimedia Foundation Inc.: Zulässige Höchstgeschwindigkeit, http://de.wikipedia.org/wiki/Zul%C3%A4ssige_H%C3%B6chstgeschwindigkeit, 01/2014
- [93] Willems M.: Potentialabschätzung zur Rekuperation der Stoßdämpferenergie, Automobiltechnische Zeitschrift 114. Jahrgang 9/2012
- [94] Wimmer A.: Fahrzeug und Motorenmesstechnik, Vorlesungsskriptum, Technische Universität Graz, 2005
- [95] Winkler F.: Laborübung Verkehrstechnik, Kapitel 9 Strömungsprüfstand, Skriptum, Technische Universität Graz, 2007
- [96] Winzer P.: Generic Systems Engineering, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-642-30364-7, 2013
- [97] Zahoransky R.: Energietechnik, Vieweg+Teubner, ISBN 978-3-8348-0488-4, 2009

Abbildungsverzeichniss

Abbildung 2-1: Carnot Prozess im Ts-Diagramm [88].....	8
Abbildung 2-2: Pkw-Ottomotor, Verlustanalyse über der Last bei 3000 min ⁻¹ [18]	10
Abbildung 2-3: Historie der Entwicklungs- und Konstruktionshilfsmittel angelehnt an Pahl/Beiz [26].....	11
Abbildung 2-4: Arbeitsschritt „Reibkraft bestimmen“ [26].....	12
Abbildung 2-5: Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren nach VDI 2221 [26]	13
Abbildung 2-6: Entwicklungs- und Konstruktionsprozess mit Begleitprozessen nach Pahl/Beiz [26].....	14
Abbildung 2-7: Systemdarstellung nach Haberfellner [35]	15
Abbildung 2-8:Komponenten des SE Vorgehensmodells nach Haberfellner [35]	16
Abbildung 3-1: Skizze Energiefluss in einem KFZ Antriebsstrang.....	20
Abbildung 3-2:Entwurf zum Energiefluss im Motorrad	20
Abbildung 3-3: Die drei Säulen von MEta+	21
Abbildung 3-4: Phasen des Methodikblocks.....	22
Abbildung 3-5: Motorrad am Rollenprüfstand.....	23
Abbildung 3-6: Realversuch am Rasenmäher	24
Abbildung 3-7: Blackbox Darstellung in mehreren Ebenen	25
Abbildung 3-8: Phasen des Modellblocks.....	26
Abbildung 3-9: Inhalte des Evaluierungsblocks	28
Abbildung 3-10: Definitionsphase	31
Abbildung 3-11: Ebene 1 Black Box	33
Abbildung 3-12: Ebene 1 Blackbox Motorrad	33
Abbildung 3-13: Definitionsphase mit Modellentwicklung und Evaluierung	35
Abbildung 3-14: Analysephase	36
Abbildung 3-15: Produktanalysezyklus	37
Abbildung 3-16: Handskizze, Energieflussmethodik für ein Motorrad	40
Abbildung 3-17: Erweiterung des Modells auf Ebene 2	40
Abbildung 3-18: Modellabbild der Energieflüsse über die Systemgrenze in der Verbrennungskraftmaschine des untersuchten Motorrads	41
Abbildung 3-19: Erweiterung des Modellabbildes auf Ebene 3	44
Abbildung 3-20: Energieflussdiagramm eines hochbelasteten aufgeladenen LKW- Dieselmotors nach Pischinger [60]	45
Abbildung 3-21: Komponentenprüfstand, thermisches Modell [31]	46
Abbildung 3-22: Analysephase im Detail	47
Abbildung 3-23: Optimierungsphase	48
Abbildung 3-24: Praktischer Produktanalysezyklus	50
Abbildung 3-25: Optimierungsphase im Detail	52
Abbildung 4-1: Definitionsphase mit Modellentwicklung und Evaluierung	54
Abbildung 4-2: BMW F800R [5].....	55
Abbildung 4-3: Viking MB 755 KS [85]	56
Abbildung 4-4: Motorkennlinie Kawasaki FJ180V [42]	57
Abbildung 4-5: Mindmap Energie im KFZ.....	59
Abbildung 4-6: Modellbildung in Ebene 1 für das Motorrad	60
Abbildung 4-7: Mindmap Ziele.....	62
Abbildung 4-8: Europäische Emissionsgesetzgebung	64
Abbildung 4-9: Förderantrag Projektplanung mit Work Packages und Milestones [72].....	66
Abbildung 4-10: Projektablauf Eta+	67
Abbildung 4-11: Analysephase im Detail	69
Abbildung 4-12: Absoluter Anteil der effektiven Rollenleistung an der zugeführten	

Kraftstoffleistung	72
Abbildung 4-13: Prozentueller Anteil der effektiven Rollenleistung an der zugeführten Kraftstoffleistung	73
Abbildung 4-14: Drehmomentmessflansch.....	76
Abbildung 4-15: Rasentypen; links Rollrasen, Mitte Bauernwiese, rechts hohes Gras.....	76
Abbildung 4-16: Verlauf von Motormoment und Drehzahl auf Rollrasen	77
Abbildung 4-17: Verlauf von Motormoment und Drehzahl auf der Bauernwiese	78
Abbildung 4-18: Verlauf von Motormoment und Drehzahl in hohem Gras.....	78
Abbildung 4-19: Lastpunktverteilung auf Rollrasen.....	80
Abbildung 4-20: Modellabbildung - Energiefluss im Motorrad	82
Abbildung 4-21: WMTC Zyklus [48]	83
Abbildung 4-22: Messstellenplan Motorrad	87
Abbildung 4-23: Messadapter für den Öl-Wasser Wärmetauscher (links oben), am Ölfilter (rechts oben) und im Kühlkreislauf (links unten); Prüfstands Aufbau Rollenprüfstand (rechts unten).....	89
Abbildung 4-24: Absolute Aufteilung (oben) und relative Aufteilung (unten) der zugeführten Brennstoffleistung	90
Abbildung 4-25: Wirkungsgrad über WMTC Zyklus.....	92
Abbildung 4-26: Modell Energiefluss im Rasenmäher.....	93
Abbildung 4-27: CAD Konstruktion Motorprüfstands Aufbau Rasenmäher	95
Abbildung 4-28: Rasenmähermotor am Prüfstand (links), Drehzahlsensor mit Zahnring an der Schwungscheibe (rechts oben), Lambdasonde und Abgastemperaturfühler (rechts unten)	95
Abbildung 4-29: Verbrauchskennfeld Rasenmäher in g/kWh	97
Abbildung 4-30: Wirkungsgradkennfeld Rasenmäher in Prozent - in Kombination mit Lastpunkten auf Rollrasen.....	97
Abbildung 4-31: Kennfelder Rasenmäher von links oben nach rechts unten: Verbrennungsschwerpunkt [$^{\circ}$ KW], Lambda [-], NO _x [g/kWh], HC [g/kWh], CO [g/kWh], Wirkungsgradkennfeld mit Lastpunkten bei zum Stillstand gebrachten Motor.....	99
Abbildung 4-32: Matlab Simulink Modell BMW [48]	101
Abbildung 4-33: Simulierte Betriebspunkte im Verbrauchskennfeld des Referenzmotorrades	102
Abbildung 4-34: Erweitertes Modellabbild Rasenmäher.....	103
Abbildung 4-35: Winkelgeberanbau für die Drosselklappenstellung	104
Abbildung 4-36: Verteilung der Drosselklappenstellung auf Rollrasen	105
Abbildung 4-37: Histogramm Verbrennungsschwerpunkt auf Rollrasen.....	106
Abbildung 4-38: Lambda verlauf auf Rollrasen	106
Abbildung 4-39: Zylinderkopf des Rasenmähermotors am Strömungsprüfstand.....	107
Abbildung 4-40: Vergleich der Durchflusskoeffizienten.....	108
Abbildung 4-41: Vergleich der Drallzahlen.....	109
Abbildung 4-42: Optimierungsphase im Detail	110
Abbildung 4-43: Injektor und Drosselklappenaktuator am Rasenmähermotor-Prototyp	112
Abbildung 4-44: Prüfstands Aufbau Rasenmähermotor-Prototyp	113
Abbildung 4-45: Rasenmäher Prototyp im fertigen Zusammenbau.....	113
Abbildung 4-46: Turbomotor am Prüfstand.....	114
Abbildung 4-47: Vergleich von Leistung und Drehmoment der Motorvarianten bei Vollast [48]	115
Abbildung 4-48: Verbrauchskennfeld in g/kWh für LOCO ₂ -TC mit WMTC Lastpunkten ..	116
Abbildung 4-49: Differenzkennfeld des Enthalpiestroms in Kilowatt an der Abgasturbine des Turbomotors, überlagert mit WMTC Lastpunkten	116

Abbildung 4-50: Simulation des Enthalpiestroms über die Turbine (Delta Turbine) LOCO ₂ -TC über WMTC	117
Abbildung 4-51: Simulation Gesamtwirkungsgrad LOCO ₂ -TC über WMTC	118
Abbildung 4-52: Simulation WMTC Beschleunigung 0 – 80 km/h Energieverteilung LOCO ₂ -TC [48]	118
Abbildung 4-53: Simulation WMTC Autobahnzyklus, Energieverteilung LOCO ₂ -TC [48]	119
Abbildung 4-54: Projektteam während den Realtests am Rasenmäher-Prototyp	120
Abbildung 4-55: Motorkennfelder mit Variation von Verbrennungsschwerpunkt über Lambdawert im Rasenmähermotor-Prototyp bei 2600 min ⁻¹ und 7 Nm.....	121
Abbildung 4-56: Vergleich der spezifischen Abgasemissionen nach EU Prüfzyklus [23]....	123
Abbildung 4-57: Vergleich des spezifischen Verbrauchs an ausgewählten Kennfeldpunkten	124
Abbildung 4-58: Vergleich Drehzahl bei Lastsprung von 2 Nm auf 8 Nm	125
Abbildung 4-59: Vergleich Wellenleistung bei Lastsprung von 2 Nm auf 8 Nm.....	125
Abbildung 4-60: Vergleich Drehzahlverlauf über Drehmomentvorgabe	126
Abbildung 4-61: Verrichtete Arbeit, Kraftstoffverbrauch und Emissionen im Vergleich.....	126
Abbildung 4-62: Prototyp - Verlauf von Drehmoment und Drehzahl am Rollrasen	127
Abbildung 4-63: Prototyp – Drehmoment über Drehzahl auf Rollrasen	128
Abbildung 4-64: Prototyp – Lambdaverlauf und Verteilung 50% Verbrennungsschwerpunkt auf Rollrasen	129

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1: Testverbrauch BMW F 800 R [32]	70
Tabelle 4-2: Testverbrauch Vergleichsmotorräder [73].....	71
Tabelle 4-3: Durchschnittliche Steigung ausgewählter Pässe in Österreich	72
Tabelle 4-4: Messdaten und Wirkungsgrad Rollenprüfstandsversuch.....	73
Tabelle 4-5: Auflistung vergleichbarer Rasenmäher [33].....	75
Tabelle 4-6: Gegenüberstellung der theoretischen und praktischen Schnittwerte auf verschiedenen Untergründen.....	79
Tabelle 4-7: Messgrößen Rollenprüfstand	88
Tabelle 4-8: Drehmomentbedarf für verschiedene Lastzustände am Rasenmäher	94
Tabelle 4-9: Erweiterte Verlustteilung im Rasenmäher	104
Tabelle 4-10: Abgasgrenzwerte nach Richtlinie 97/68/EG [23].....	122
Tabelle 4-11: Prüfzyklus nach Richtlinie 97/68/EG [23].....	122
Tabelle 0-1: Technische Daten F800R [5]	143
Tabelle 0-2: Technische Daten Viking MB 755 KS [86].....	145
Tabelle 0-3: Technische Daten Kawasaki FJ180V [42].....	145

Anhang

Motorrad BMW F800R

Tabelle 0-1: Technische Daten F800R [5]

Motor	
Bauart	Wassergekühlter Zweizylinder-Viertakt-Reihenmotor, vier Ventile pro Zylinder, zwei obenliegende Nockenwellen, Trockensumpfschmierung
Bohrung x Hub	82 mm x 75,6 mm
Hubraum	798 cm ³
Nennleistung	64 kW (87 PS) bei 8.000 U/min (Leistungsreduktion 25 kW (34 PS) bei 6.000 U/min möglich)
max. Drehmoment	86 Nm bei 6.000 U/min (Leistungsreduktion: 58 Nm bei 3.250 U/min)
Verdichtungsverhältnis	12,0 : 1
Kraftstoffaufbereitung / Motorsteuerung	Elektronische Einspritzung, digitale Motorelektronik (BMS-K+)
Abgasreinigung	geregelter 3-Wege-Katalysator, Abgasnorm EU-3
Fahrleistung / Verbrauch	
Höchstgeschwindigkeit	über 200 km/h
Verbrauch auf 100 km bei konst. 90 km/h	3,6 l
Verbrauch auf 100 km bei konst. 120 km/h	4,8 l
Kraftstoffart	Superbenzin bleifrei, Mindestoktanzahl 95 (ROZ)
Elektrik	
Lichtmaschine	Drehstromgenerator 400 W
Batterie	12 V / 14 Ah, wartungsfrei
Kraftübertragung	
Kupplung	Mehrscheibenkupplung im Ölbad, mechanisch betätigt
Getriebe	Klauengeschaltetes Sechsgang-Getriebe im Motorgehäuse integriert
Sekundärantrieb	Endlos O-Ring-Kette mit Ruckdämpfung in der Hinterradnabe
Fahrwerk / Bremsen	
Rahmen	Brückenrahmen aus Aluminium, Motor mittragend

Vorderradführung / Federelemente	Teleskopgabel, Ø 43 mm
Hinterradführung / Federelemente	Aluminiumguss-Zweiarmschwinge, Zentralfederbein, Federvorspannung mittels Handrad
Federweg vorne / hinten	125 mm / 125 mm
Radstand	1.520 mm
Nachlauf	90,7 mm
Lenkkopfwinkel	65°
Räder	Aluminium-Gussräder
Felgenmaß vorne	3,50 x 17"
Felgenmaß hinten	5,50 x 17"
Reifen vorne	120/70 ZR 17
Reifen hinten	180/55 ZR 17
Bremse vorne	Doppelscheibenbremse, schwimmend gelagerte Bremsscheiben, Durchmesser 320 mm,
Bremse hinten	Einscheibenbremse, Durchmesser 265 mm, Ein-Kolben Schwimmsattel
ABS	Serienmäßig
Maße / Gewichte	
Länge	2.145 mm
Breite (über Spiegel)	905 mm
Höhe (ohne Spiegel)	1.150 mm
Sitzhöhe bei Leergewicht	800 mm (über Sonderausstattung oder -zubehör variabel von 775 mm bis 825 mm erhält-
Schrittbogenlänge bei Leergewicht	1770 mm (über Sonderausstattung oder -zubehör variabel von 1720 mm bis 1820 mm er-
Leergewicht fahrfertig, vollgetankt 1)	202 kg
Trockengewicht 2)	177kg
zulässiges Gesamtgewicht	405 kg
Zuladung (bei Serienausstattung)	203 kg
nutzbares Tankvolumen	16,0 l
davon Reserve	ca. 3,0 l

Rasenmäher Viking MB 755 KS

Tabelle 0-2: Technische Daten Viking MB 755 KS [85]

Rasenmäher Typ	Handgeführter Mäher Selbstfahrer
Antrieb	3 Gang
Schnittbreite	53 cm
Schnitthöhe	30 - 85 mm
Rasenfläche	bis 2.500 m ²
Lehrlaufdrehzahl	2800 min ⁻¹
Gewicht	62 kg
Schalldruckpegel gemessen	89 dB(A)
Schalldruckpegel garantiert	98 dB(A) [21]
Unsicherheitsfaktor	1 KpA dB(A)
Vibrationswert	2,50 / 1,25 ahw m/s ²

Tabelle 0-3: Technische Daten Kawasaki FJ180V [42]

Motortyp	Luftgekühlt 4-takt OHV Benzin Ottomotor
Zylinderzahl	1
Bohrung x Hub	65 x 54 mm
Hubvolumen	179 cm ³
Verdichtungsverhältnis	8,5 : 1
Leistung	3,4 kW (4,5 PS) / 3600 min ⁻¹ 2,9 kW (3,9 PS) / 2800 min ⁻¹
Drehmoment	10 Nm / 2400 min ⁻¹
Drehzahlregelung	Fliehgewicht Regler
Gemischaufbereitung	Schwimmervergaser
Zündung	Magnet-Induktions-Zündung am Schwungrad
Abgasnachbehandlung	-
Trockengewicht	17 kg
Abgaswerte NOx + HC	9,7 g/kWh [9]
Betriebsstunden laut CEPA Zertifizierung	500 h [9]