



Lukas Karl Wilfinger BSc.

Untersuchungen zur Energieverbrauchsoptimierung an automotiven Prüfständen

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades
Diplom-Ingenieur (Dipl.-Ing.)
Masterstudium Telematik

eingereicht an der
Technischen Universität Graz

Institute of Electrical Measurement and Measurement Signal Processing
Vorstand: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Georg Brasseur

Betreuer: Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Bretterklieber
Betreuer Firmenpartner: Dipl.-Ing. Peter Priller (AVL List GmbH, Graz)

Hart bei Graz, Januar 2016

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.

Graz, _____
Date

Signature

Eidesstattliche Erklärung¹

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.

Graz, am _____
Datum

Unterschrift

¹Beschluss der Curricula-Kommission für Bachelor-, Master- und Diplomstudien vom 10.11.2008; Genehmigung des Senates am 1.12.2008

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen herzlich bedanken, die mich bei meiner Masterarbeit fachlich oder durch Leihgaben von Geräten unterstützt haben.

Bei den Mitarbeitern der AVL:

DI Peter Priller (Betreuung), DI Alexandra und Ing. Alois Prochart, DI Herbert Kelz, Niko Maier, Lukas Grill und DI Daniela Beiser.

Bei den Angehörigen der TU Graz:

Weiters möchte ich mich durch die Betreuung am Institut für elektrische Messtechnik und Messsignalverarbeitung bei meinem Betreuer DI Dr. Thomas Bretterklieber und bei DI Dr. Markus Neumayer bedanken. Für seine kompetente und fachliche Hilfestellung möchte ich Herrn DI Dr. Bernhard Schweighofer (ebenfalls EMT, TU Graz) ein herzliches Dankeschön aussprechen.

Ein besonderer Dank gilt auch Herrn DI Thomas Wieland vom Institut für elektrische Antriebe an der TU Graz für die Bereitstellung und seiner Unterstützung bei den Messgeräten.

Im Abschluss möchte ich mich um die moralische Unterstützung bei meiner Familie und insbesondere bei meiner Freundin Lisa bedanken.

DANKE

Kurzfassung

Viele Komponenten (Motor, Antriebsstrang, etc.) eines Kraftfahrzeuges werden mithilfe von Prüfständen entwickelt und verifiziert. Ein Prüffeld bzw. ein Prüfstand besteht aus einer Vielzahl elektrischer und mechanischer Einzelkomponenten und Systeme. Diese können beispielsweise Messsysteme, Konditioniereinheiten sowie Geräte für die Datenverarbeitung und oder Steuer- und Regelungssysteme sein. Aus der Charakterisierung des Energieverbrauchs dieser Geräte, kann der erforderliche Energiebedarf nach vorgegebenen Verwendungsmustern und Einsatzszenarien berechnet und simuliert werden. In weiterer Folge wird gezeigt, dass eine gezielte Abschaltung von Teilkomponenten des Prüfstandes, je nach Geräteeigenschaft und Dauer der Ruhephase, zur Energieeinsparung führt. Ein weiteres Einsparungspotential kann in Systemen mit Wärmespeichercharakter, abhängig vom verwendeten Medium und unter Berücksichtigung der thermischen Zeitkonstante, nachgewiesen werden. Durch intelligente Betriebssteuerung der einzelnen Komponenten kann der Energieverbrauch eines Prüfstandes minimiert und damit die Energiebilanz optimiert werden.

Abstract

Automotive testing is done by means of test bed setups (e.g. engine, powertrain or vehicle test bed). Such test beds typically include a variety of systems (measurement devices for exhaust gas, environmental conditions, electrical and mechanical properties, consumption measurements...) as well as conditioning (oil, coolant, air, fuel) and process control hardware. The aim of this master thesis is to analyze and characterize the (electrical) energy consumption of such devices and subsystems in order to calculate and simulate the consumption behavior of typical test sequences. It is shown, that individual process control could result in a significant saving of energy. Further potential is expected in systems, which have a thermal storage system-behaviour because of their high heat capacity of the medium used. Intelligent control of the power-on time of each device or subsystem leads into the final goal, the reduction of the overall electrical energy consumption of test beds.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	vi
Abstract	vii
1. Einleitung	1
1.1. Optimierung der Energieeffizienz bei Prozessanlagen	2
1.2. Zielsetzung	5
1.3. Gliederung	6
1.4. Prüfstände für die Fahrzeugentwicklung	7
1.4.1. Aufbau	9
1.4.2. Prüfstandstypen für Verbrennungsmotoren	12
1.4.3. Weitere Prüfstände für die Antriebsstrangentwicklung	15
2. Analyse und Charakterisierung der Komponenten am Prüfstand	17
2.1. Verbrennungsmotorprüfstand	17
2.1.1. Konditioniergeräte	18
2.1.2. Messsysteme	19
2.2. Beschreibung der Komponenten am Prüfstand	20
2.2.1. Prüfstandssteuerung (AVL PUMA Open Automation Platform)	20
2.2.2. Öl-Konditionierung (AVL ConsysLube 25/50)	21
2.2.3. Kraftstoff-Konditionierung (AVL FuelExact Mass Flow & PLU)	22
2.2.4. Verbrennungsluft-Konditionierung (AVL ConsysAir 1600)	23
2.2.5. Emissionsmessgerät (AVL AMA i60 Exhaust Measu- rement System)	25
2.2.6. Rußmessgerät (AVL Smokemeter 415SE)	26

2.3.	Leistungsmessung an den Komponenten	27
2.3.1.	Verwendete Messgeräte	27
2.3.2.	Messschaltung für 3-phasige Verbraucher	29
2.4.	Messdaten der Prüfstandskomponenten	30
2.4.1.	Messdaten AVL PUMA-Tower	30
2.4.2.	Messdaten AVL ConsysLube 25/50	30
2.4.3.	Messdaten AVL FuelExact	31
2.4.4.	Messdaten AVL AMA i60	32
2.4.5.	Messdaten AVL HSS (für AMA i60)	34
2.4.6.	Messdaten AVL ConsysAir 1600	34
2.4.7.	Messdaten AVL Smokemeter	36
2.4.8.	Sonstige Geräte	36
3.	Erarbeitung des Energiesparkonzepts	39
3.1.	Zusammenfassung des Ist-Zustandes	39
3.2.	Entwicklung des Konzepts	40
3.3.	Messdatenanalyse an den ausgewählten Prüfstandskomponenten	42
3.3.1.	Analyse Öl-Konditionierung - AVL ConsysLube 25/50	42
3.3.2.	Analyse Kraftstoff-Konditionierung - AVL FuelExact	44
3.3.3.	Analyse Ansaugluft-Konditionierung - AVL Consy- sAir 1600	45
3.3.4.	Analyse Emissionsmessgerät - AVL AMA i60	46
3.3.5.	Analyse Vorfilter (HSS) für AMA i60	49
3.3.6.	Analyse Rußmessgerät - AVL Smokemeter SE415	50
3.4.	Fallstudie zur Berechnung des Einsparungspotentials	52
3.4.1.	Getroffene Annahmen für die Geräteverwendung	52
3.4.2.	Ergebnisse der Fallstudie	53
3.4.3.	Diskussion	58
4.	Optimierung des Energiebedarfs beim Prüflauf	60
4.1.	Berücksichtigung der thermischen Zeitkonstante	60
4.2.	Steuerstrategie zur Optimierung des Energiebedarfs	62
4.3.	Entwicklung des Modells	64
4.3.1.	Simulation mit Matlab/Simulink®	66
4.4.	Resultate und gewonnene Informationen	69
4.4.1.	Einsparungspotential bei der Öl-Konditionierung	72
4.4.2.	Vergleich des Einsparungspotentials und Diskussion	75

Inhaltsverzeichnis

5. Implementierung des Analysetools und Berechnung der Energie-sparpotentiale	77
5.1. Messwertanalyse	77
5.2. Algorithmus zur Bestimmung des optimalen Abschaltzeit-punkts	78
5.2.1. Fallbeispiel	80
5.3. Berechnung des Einsparungspotentials	80
6. Zusammenfassung und Ausblick	86
6.1. Ausweitung des Konzepts am Gesamtprüfstand	87
6.2. Gerätekonstruktion	87
6.3. Verfeinerung des Modells zur Bestimmung der thermischen Zeitkonstante	88
6.4. Einflussfaktor Strompreis	88
6.5. Implementierung der Ein-/Ausschaltsteuerung am Prüfstand	89
6.6. Kompromiss: Einsparpotential/Machbarkeit	89
Anhang	89
A. Konfigurationsdatei Framework	92
B. Ausgabe der Ergebnisse in Excel	94
Literaturverzeichnis	96

Abbildungsverzeichnis

1.1.	Produktentstehungsprozess	7
1.2.	Zusammenhang MiL - SiL - HiL	8
1.3.	Prüfstand - Struktur	9
1.4.	Prüfstand - Aufbau	11
2.1.	Geräteauswahl am Prüfstand	18
2.2.	Motorprüfstand	19
2.3.	AVL Bedienpult mit PUMA-Tower	20
2.4.	AVL ConsysLube 25/50	21
2.5.	Prinzip Ölkonditionierung	22
2.6.	AVL FuelExact	23
2.7.	AVL ConsysAir 1600	24
2.8.	Prinzip Ansaugluftkonditionierung	24
2.9.	AVL AMA i60 Exhaust Measurement System	25
2.10.	AVL Smokemeter 415SE	26
2.11.	Prinzip Smokemeter	26
2.12.	Messschaltbild am 3-phasigen Verbraucher	29
2.13.	Messergebnis Öl-Konditionierung	31
2.14.	Messergebnis Kraftstoff-Konditionierung	32
2.15.	Messergebnis emissionsmesseinheit, Phasen separat	33
2.16.	Messergebnis Emissionsmesseinheit, Gesamtleistungsbedarf	33
2.17.	Messergebnis Vorfilter	34
2.18.	Messergebnis ACS 1600, Phasen separat	35
2.19.	Messergebnis ACS 1600, Leistung gesamt interpoliert	36
2.20.	Messergebnis Smokemeter	37
3.1.	Zeitsteuerung der Komponenten für einen typischen Prüfablauf	40
3.2.	Einsparungskonzept	41
3.3.	Analyse Öl-Konditionierung	43

Abbildungsverzeichnis

3.4.	Analyse Kraftstoff-Konditionierung	44
3.5.	Analyse Verbrennungsluft-Konditionierung	45
3.6.	Analyse AVL AMA i60	46
3.7.	Analyse Vorfilter	49
3.8.	Analyse Smokemeter	50
3.9.	Smokemeter, gefiltert	51
4.1.	Zeitzusammenhänge für die Methode	61
4.2.	Prinzip zur optimalen Wahl der Zeitsteuerung	63
4.3.	Schaltbild thermisches Modell	66
4.4.	RC-Parallelschaltung in Simulink modelliert	67
4.5.	Regelkreis Thermomodell	68
4.6.	Vergleich Messsignal - Modell	69
4.7.	Abkühlkurve Modell Öl-Konditionierung	70
4.8.	Aufheizdauer über Pausenzeit in 60 s Schritten	71
4.9.	Energieaufnahme über Pausenzeit in 60 s Schritten	71
4.10.	Energieaufnahme nach 600 s Abkühldauer (15-Minuten-Pause)	74
4.11.	Energieaufnahme nach 1310 s Abkühldauer (30-Minuten-Pause)	74
5.1.	Ermittlung ssp: Grafische Darstellung	81
A.1.	Beispiel: Konfigurationsfile	92
B.1.	Beispiel: Excel-File	95

Tabellenverzeichnis

2.1. Leistungsaufnahme PUMA	30
2.2. Leistungsaufnahme sonstiger Geräte	38
3.1. Charakteristische Kennwerte, Öl-Konditionierung	43
3.2. Charakteristische Kennwerte, Kraftstoff-Konditionierung	44
3.3. Charakteristische Kennwerte, Ansaugluft-Konditionierung	45
3.4. Detaillierte Analyseergebnisse, Emissionsmessgerät	48
3.5. Charakteristische Kennwerte, Vorfilter des AMA i60	49
3.6. Charakteristische Kennwerte, Smokemeter	51
3.7. Tastverhältnisse abhängig vom Referenz-Zeitintervall	54
3.8. Einsparungspotentiale pro Tag bezogen auf den Dauerbetrieb	55
3.9. Einsparungspotentiale pro Tag bezogen auf den Doppelschichtbetrieb	56
3.10. Zusammenfassung Einsparungspotentiale im Jahr (Dauerbetrieb)	57
3.11. Zusammenfassung Einsparungspotentiale im Jahr (Doppelschichtbetrieb)	57
3.12. Vergleich Einsparungspotentiale in Prozent	59
4.1. Erläuterung für Abbildung 4.1	62
4.2. Vergleich Energieverbrauch und Einsparungspotential	76
5.1. Emissionsfaktoren der wichtigsten automobilen Industrieländer	83
A.1. Parameterliste Konfigurationsfile	93

1. Einleitung

Testen nimmt in der Entwicklung moderner Kraftfahrzeuge einen hohen Stellenwert ein. Während Testläufe an so genannten Prüfständen einerseits der Informationsgewinnung bei Neuentwicklungen dienen, sind weitere Anwendungsfälle durch die Verifikation von bereits fertig entwickelten Produkten sowie Integrationstests gegeben. Ein Prüfstand kann als individuelle Anlage für genau spezifizierte Tests charakterisiert werden. Einen Verbund aus mehreren Prüfständen nennt man ein Prüffeld. Diese Anlagen bestehen selbst wiederum aus mehreren Komponenten und Subsystemen.

(Teil-) Geräte eines Prüfstandes können sein:

Messsysteme für

- Messsysteme für Abgase,
- Emissionen,
- elektrische und mechanische Eigenschaften,
- Verbrauch etc.

Konditioniersysteme für

- (Motor-)Öl,
- (Kühl-)wasser,
- Ansaugluft und
- Kraftstoff

Steuercomputer für

- Datenverarbeitung und
- Steuerung

1. Einleitung

Die hohe Anzahl an Einzelkomponenten und Systemen, die Vielfalt von Prüfständen und Prüffeldern, die Tatsache immer knapper werdender Ressourcen als auch der Bedarf Produktions- und Entwicklungskosten massiv zu senken, sind Faktoren für einhergehende Untersuchungen für die Entwicklung und Anwendung von Energieminimierungsmaßnahmen. Damit soll eine weitere, nachhaltigere Entwicklung von immer zuverlässigeren Fahrzeugen auch in der Zukunft gewährleistet werden. Da jeder Prüfstand eine individuelle Anlage darstellt und speziell auf die Applikation und die Kundenbedürfnisse maßgeschneidert ist, richtet sich der Fokus dieser Masterarbeit auf die Einsparungspotentiale der Komponenten innerhalb der Messzelle und des Prüfraumes. Dadurch bleiben Maßnahmen zu Minimierungen des Energiebedarfs auf weitere Prüfstandsarten übertragbar.

Momentan wird mit diesen Geräten zwar über die Anlagensteuerung während des Betriebes kommuniziert, eine Steuerung des Betriebszustandes wie z.B. Ein, Aus, Ready, Standby etc. fehlt jedoch teilweise, oder wurde bei der Entwicklung der Komponenten zugunsten höher priorisierter Funktionen bislang nicht implementiert. Daher bleiben alle Komponenten meist einen gesamten produktiven Tag über aktiv, unabhängig von dessen Nutzung. Üblicherweise ist ein typisches Verwendungsmuster durch Gliederung in Verwendungs- und Pausenperioden vorgegeben. Den Pausen wird bislang keine Beachtung beigemessen was zu einem ineffizienten Anlagenverhalten führt. Im Rahmen dieser Arbeit sollen Methoden untersucht und gefunden werden, welche eine verbesserte Energieeffizienz unter Ausnutzung von Einsparungspotentialen generiert.

1.1. Optimierung der Energieeffizienz bei Prozessanlagen

Energieoptimierung in den Prozessen der Industrie wird immer mehr zum Thema und leistet seinen Beitrag für den Klimaschutz. Einerseits wird der globale Energiebedarf immer höher und andererseits fallen durch die ineffiziente Nutzung von Maschinen in der Produktion massive Kosten für die Unternehmen und deren Kunden an.

1.1. Optimierung der Energieeffizienz bei Prozessanlagen

In [swi] wird der so genannte „Betrieb ohne Nutzen - BON“ angesprochen, in welchem besonderer Wert auf die Vermeidung von Betriebszuständen ohne Wertschöpfung gelegt wird. Das ist insbesondere im Kontext von Produktionsmaschinen von großer Bedeutung, da jedes Zeitintervall in dem nicht produziert wird, als verloren gilt. Das kann natürlich auch auf (Kunden-)Prüfstände übertragen werden, wo die Nutzzeit und die Effizienz eine große Rolle spielt. Beispielfhaft werden Werkzeugmaschinen, unter anderem auch in [Haa12] untersucht und analysiert.

Laut [swi] hat der Bearbeitungsprozess selbst meist sehr wenig Optimierungspotential, da die Funktion gewährleistet bleiben muss. Ziel ist es daher, die prozessabhängigen Funktionen zu optimieren. Die Autoren beschreiben ein grundsätzliches Konzept, welches von der Systemdefinition, Relevanzklärung (Einsatzszenario, Mess- und Betrachtungszeiträume) bis zu den Maßnahmen (Analysen, Auswertung und Wahl der Betriebszustände) reicht und für diese Arbeit interessante Aspekte für die Findung einer geeigneten Methodik liefert.

In [Haa12] werden die auftretenden Betriebszustände einer Werkzeugmaschine analysiert. Der Leistungsbedarf variiert dabei stark und ist davon abhängig, in welcher Betriebsphase sich die Maschine gerade befindet. Die Erzielung der gewünschten Optimierung wird durch Einsatz von modellbasierten Methoden und eines geeigneten, überwachenden Automatisierungssystems erreicht. Das dafür notwendige Energieverbrauchsmodell setzt sich aus der Generierung eines zustandsabhängigen, eines bewegungsabhängigen und eines prozessabhängigen Energieverbrauchs zusammen, welcher den einzelnen Komponenten und Verbrauchern der Maschine zugeordnet werden kann. Damit ist man in der Lage, prognosefähige Energieverbrauchsmodelle zu erstellen, welche den vorgesehenen Verbrauch über Simulation berechnen können. Eine gesteigerte Energieeffizienz wird durch intelligentes Scheduling und Wahl der geeigneten Komponenten einer Anlage zum optimalen Zeitpunkt erreicht.

Energieverbrauchsmodelle der vorkommenden Komponenten eines Systems bilden in Kombination mit Nutzungsszenarien eine geeignete Basis für die Erstellung von Konzepten zur Energieverbrauchsoptimierung. Solche Maßnahmen können aufgrund der Ähnlichkeit solcher Maschinen bzw. Anlagen auch auf einem automotiven Prüfstand transferiert werden.

[Gmb12] beschäftigt sich neben der Analyse der einzelnen Betriebszustände

1. Einleitung

und der Erstellung einer optimalen Nutzungsstrategie auch mit der Frage, wie man den Energieverbrauch überwachen kann. Es wird eine Methode vorgestellt, welche die Analyse der Anforderungen und des bestehenden Systems sowie die Optimierung der Energieflüsse bei der Konzeption einer neuen Maschine berücksichtigt. Aus der Maschinenstruktur kann ein Gesamtenergiemodell, bestehend aus den Betrachtungen des Energieverbrauchs einzelner Komponenten, einem Steuerungsmodell zur Abbildung der Betriebsstrategie und einer Modellierung des technischen Prozesses erstellt werden. Für die Optimierung wird eine wiederkehrende Validierung und Anpassung des Modells und der Nutzungsszenarien als notwendig erachtet. Diese Aufgabe kann von einem Energiemonitoring, welches durch Softwareerweiterung der Steuerung nachträglich in solche Anlagen integriert werden kann, unterstützt werden. Als Informationslieferanten können die schon vorhandenen Sensoren der Maschine genutzt werden.

Eine solche Vorgangsweise ist auch im Hinblick auf eine Realisierung an einem Prüfstand interessant, wo ein zentralisiertes Steuersystem, Zugriff auf sämtliche Sensorik und Messtechnik aufweist.

Als Maßnahme für eine erhöhte Energieeffizienz wird die Optimierung von Steuerungsabläufen durch Änderung der Betriebsstrategie genannt. Auch das temporäre Abschalten von Verbrauchern erweist sich darin als sinnvoll.

In [BCL⁺14] wird das dynamische Energieverhalten einer Produktionslinie unter Berücksichtigung seiner Aufheizphase untersucht, um auf den Energieverbrauch der Einzelkomponenten zu schließen. Eine ähnliche Vorgangsweise ist auch auf einen Prüfstand im Kontext dieser Arbeit anwendbar, da dort ebenfalls dynamische Aufheizevorgänge in den Einzelkomponenten auftreten.

Dabei wird zwischen dem transienten Abschaltverhalten und den statischen Energieaufwänden bei unterschiedlichen Betriebszuständen unterschieden. Durch eine eingeführte Methode zur Ermittlung des so genannten „Energy Profit Bottleneck“ kann jene Maschine aufgespürt werden, welche sich negativ auf den Profit durch einen hohen Energieverbrauch oder niedrige Auslastung auswirkt. Durch Simulation konnte bewiesen werden, dass sich ein Abschalten in unproduktiven Zeitfenstern positiv auf die Energiebilanz gesamt und pro Stück, sowie auf die Kosten auswirkt.

In [MYT07] werden praktische Methoden bzw. Algorithmen vorgestellt, wel-

1.2. Zielsetzung

che zur Reduktion des Gesamtenergieverbrauchs von Produktionsmaschinen führt. Die Maßnahmen basieren auf der Erkenntnis, dass einige Maschinen in Phasen, in denen sie nicht produktiv eingesetzt werden, dennoch hohe Energiemengen verbrauchen. Dieses Verhalten spiegelt sich exakt mit der momentanen Situation wider, wie sie auch an Prüfständen auftritt. Durch intelligentere Arbeitsschrittverteilungen und Zeitsteuerungen wird eine Reduktion der Idle-Zeit erwirkt.

In [LHW⁺14] wird ein Framework zur bestimmungsgemäßen Charakterisierung des Energieverbrauchs einer Produktionsanlage vorgestellt. Durch Informationen über das Systemverhalten von Maschinen können geeignete Ansätze für Einsparungsmaßnahmen entwickelt werden. Dieser Ansatz ist auch für die Bewertung der Betriebszustände und deren Leistungsbedarf über die Zeit, für die Analyse der Prüfstandskomponenten von Bedeutung.

1.2. Zielsetzung

Bisher spielte Energiesparen in der Prüftechnik eine eher untergeordnete Rolle. Die präzise Untersuchung des Prüflings für dessen Einsatzzweck nach modernsten Methoden und mit ausreichender Genauigkeit stand bislang immer im Vordergrund. Aufgrund des komplexen Gesamtsystems eines Prüfstandes, der hohen Anzahl an Teilkomponenten und individuellen Prüfprozeduren sowie des Wettbewerbs Produktionskosten zu minimieren, ist es umso verständlicher, vermehrt Anstrengungen in den effizienteren Energieverbrauch einer solchen Anlage zu investieren. Ziel dieser Arbeit ist es daher den elektrischen Verbrauch aller Teilsysteme und Komponenten zu analysieren und zu charakterisieren. In weiterer Folge soll durch die Berechnung von systembeschreibenden Kennwerten, Strategien und Algorithmen gefunden werden, mit deren Hilfe der Energieverbrauch von typischen Prüfprozeduren und Tests in der Automobilindustrie optimiert werden. Um Ergebnisse unter realen Bedingungen generieren zu können, werden an einem typischen Motorenprüfstand Leistungsmessungen durchgeführt und auf Basis der gewonnenen Informationen Berechnungen angestellt. Zur Eingrenzung des Themengebietes, gilt es den elektrische Energiekonsum

1. Einleitung

eines Prüfstandes bzw. eines Prüffeldes „nur“ im Bereich der Niederspannungsseite, also der Messzelle und deren Verbrauchern, zu minimieren. Die korrekte Analyse und anschließende Auswertung von Messdaten soll als Maß für die Effizienz von möglichen Einsparungsmaßnahmen dienen. Was wird benötigt, um eine signifikante Änderung des benötigten Energieaufwandes zu erzielen? In welcher Relationen stehen Einsparungspotentiale bei technisch und verhältnismäßig einfacheren zu aufwändigeren Lösungen bei Optimierungsfragen? Zur Vergleichbarkeit wird die erzielte Energieeinsparung, in Bezug auf eine festgelegte Referenzbetriebsart, in folgenden Kategorien charakterisiert:

- **Gesparte Energie in Kilowattstunden**
- **Gesparte Menge CO₂ in Kilogramm**
- **Kostensparnis**
- **Einsparung in Prozent**

1.3. Gliederung

In Kapitel 1 werden die Idee und die Ursache erläutert, welche zu dieser Arbeit geführt haben. Es folgt außerdem eine kurze Einführung zur Mess- und Prüfstandstechnik automobiler Prüfstände und eine Beschreibung der Prüfstandsarten.

Im Kapitel 2 wird der ausgewählte, praxisgerechte Motorenprüfstand beschrieben, die Charakterisierung seiner Komponenten durch Leistungsmessungen vorgenommen und die Ergebnisse diskutiert.

Unter Kapitel 3 wird ein Konzept zur Einsparung von Energie vorgestellt und auf die Prüfstandskomponenten angewandt.

Es folgt in Kapitel 4 eine Maßnahme zur Optimierung des bisherigen Einsparpotentials. Sie wird exemplarisch an einem Gerät durchgeführt und mit den Ergebnissen aus Kapitel 3 verglichen und diskutiert.

Im Kapitel 5 wird die Implementierung des Analysetools sowie die Berechnungen zu den Einsparungspotentialen mithilfe von Matlab/Simulink[®] detailliert beschrieben.

Im letzten Kapitel 6 werden die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst und ein Überblick zu weiterführenden Themen gegeben.

1.4. Prüfstände für die Fahrzeugentwicklung

Moderne Produktentstehungsprozesse werden in der Automobilindustrie als sogenanntes V-Modell dargestellt (siehe Abbildung 1.1) [PL14]. Dabei werden die Phasen System-Design und Simulation, Komponentnentwicklung und Systemintegration und Validierung durchlaufen. Prüfstände sind nach diesem Modell den beiden letzteren zugeordnet. Je nach Entwicklungsaufgabe gibt es eigens dafür ausgelegte Prüfstandstypen (siehe Abschnitt 1.4.2). In den Tests werden unter anderem die Bereiche Entwicklung/Betriebsfestigkeit, Kalibrierung zur Fahrbarkeit, Emissionen und Verbrauchsoptimierung, sowie Geräusch und Vibration (NVH), abgedeckt.

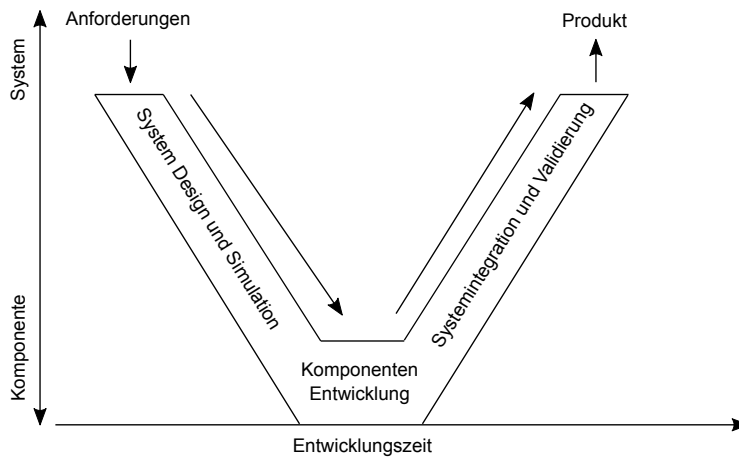


Abbildung 1.1.: Produktentstehungsprozess [PL14]

Innovationsdruck und kürzer werdende Entwicklungszeiten stellen an die Entwicklungsmethoden neue Anforderungen [PL14]. Beim sogenannten „Frontloading“ werden Entwicklungsaufgaben in frühere Phasen des Entwicklungsprozesses verschoben. Der Vorteil besteht in der vorzeitigen Validierung und somit einer Früherkennung von Fehlern in der Konzipierungsphase. Es ist daher naheliegend, dass Teilsysteme oder Komponenten simuliert werden müssen, da diese zu diesem Zeitpunkt noch nicht existieren. Die Schwierigkeit besteht darin, dass die Simulation durch die

1. Einleitung

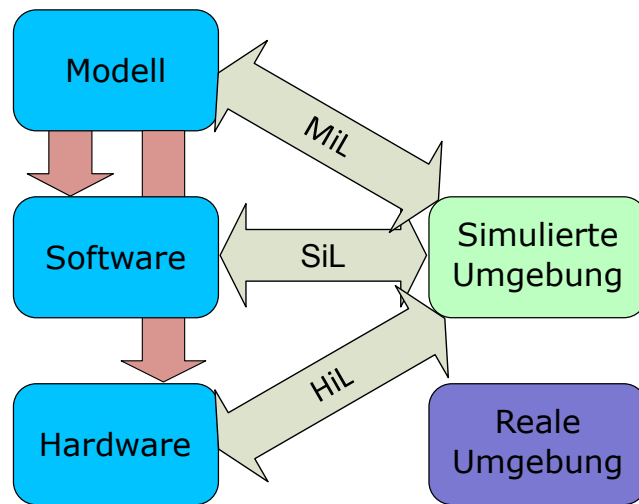


Abbildung 1.2.: Zusammenhang MiL - SiL - HiL

Kombination von virtuellen und realen Komponenten nur durch die Echtzeitfähigkeit durchgeführt werden kann. Solche Prüfstände werden als „XiL - X in the Loop“ bezeichnet. Es wird zwischen „HiL“, „SiL“ oder „MiL“ für Hardware-, Software- oder Model- in the Loop unterschieden (Abbildung 1.2). Durch die hohe Interaktion aller Teilsysteme eines Fahrzeuges ist es notwendig geworden, Entwicklungs- und Testaufgaben den realen Einsatzszenarien anzupassen. Dabei werden sowohl simulierte als auch reale Komponenten verwendet. Die Auswahl des Setups der Prüfumgebung (was ist real bzw. virtuell?) richtet sich nach der spezifischen Zielsetzung unter den Gesichtspunkten von der Reproduzierbarkeit, der Genauigkeit, den Kosten und der Flexibilität und reicht von Tests in der Simulation über Motorenprüfstände bis zu Straßentests. Dabei spielt die Vernetzung von Entwicklungsumgebungen insbesondere bei zukünftigen Entwicklungen eine große Rolle da sämtliche Daten in unterschiedlichen Ebenen generiert und benötigt werden können.[PL14]

1.4. Prüfstände für die Fahrzeugentwicklung

1.4.1. Aufbau

In Abbildung 1.3 wird die grundlegende Struktur eines Prüfstandes dargestellt, welche in mehreren Ebenen unterteilt ist.

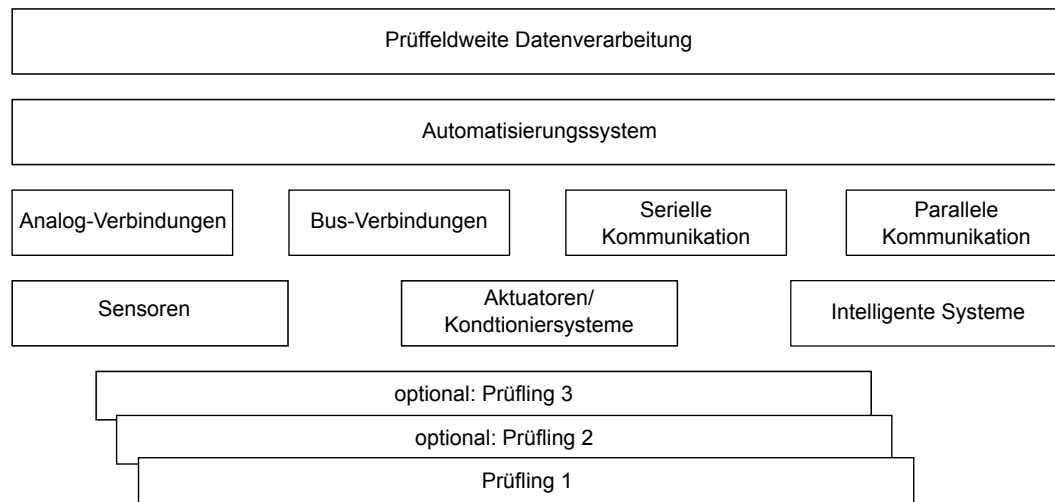


Abbildung 1.3.: Prüfstand - Struktur [PL14]

Die drei übergeordneten Schichten bestehen aus:

- *Hardware Ebene*: Enthält den Prüfling, sowie Sensoren, Datenerfassungs- und Aktuatormodule, welche über Bussysteme an ein Automatisierungssystem gekoppelt sind.
- *Automatisierungsebene*: Zur Messdatenerfassung, Signalverarbeitung und Datenmanagement. Sie umfasst auch die Regelungs- und Simulationsfunktionen, sowie die notwendigen Sicherheitsfunktionen.
- *Ebene für prüffeldweite Datenspeicherung, Datenintegration und Datenverarbeitung*: Kommt vor allem bei Prüffeldern zum Einsatz, wobei mehrere Prüfstände in so genannten Entwicklungszentren kombiniert werden.

Entwicklungsprüfstände für Verbrennungsmotoren bestehen aus den nachfolgend aufgezählten Hauptbestandteilen. Diese Liste richtet sich nach Motorenprüfständen der Firma AVL und umfasst neben den wesentlichen

1. Einleitung

Komponenten auch eine Reihe an Eigenentwicklungen. In Abbildung 1.4 sind die wichtigsten Komponenten und deren Interaktion an einem typischen Prüfstand grafisch dargestellt.

- Belastungseinrichtung (Dyno AVL)
- Prüfstandsmechanik (Fundamentplatte, Montageaufnahmen etc.)
- Konditioniereinheiten für Motormedien (Wasser, Öl, Kraftstoff, Luft)
- Verbrauchsmesseinrichtungen für Kraftstoff, Verbrennungsluft oder Harnstoff (bei Diesel mit SCR¹)
- Temperatur- und Druckmessketten
- Messtechnik zur Verbrennungsdiagnose
- Blow-by-(Leckgas-)Messeinrichtung
- Abgasmesstechnik
- Kommunikationsschnittstelle zum Motorsteuergerät (ECU)
- Automatisierungstechnik (AVL PUMA)
- Kalibrierwerkzeuge zur Optimierung der Steuergerätebedatung

¹SCR - selective catalytic reduction; Selektive katalytische Reduktion ist eine Technik zur Reduktion von Stickoxiden als Maßnahme zur Abgasnachbehandlung

1.4. Prüfstände für die Fahrzeugentwicklung

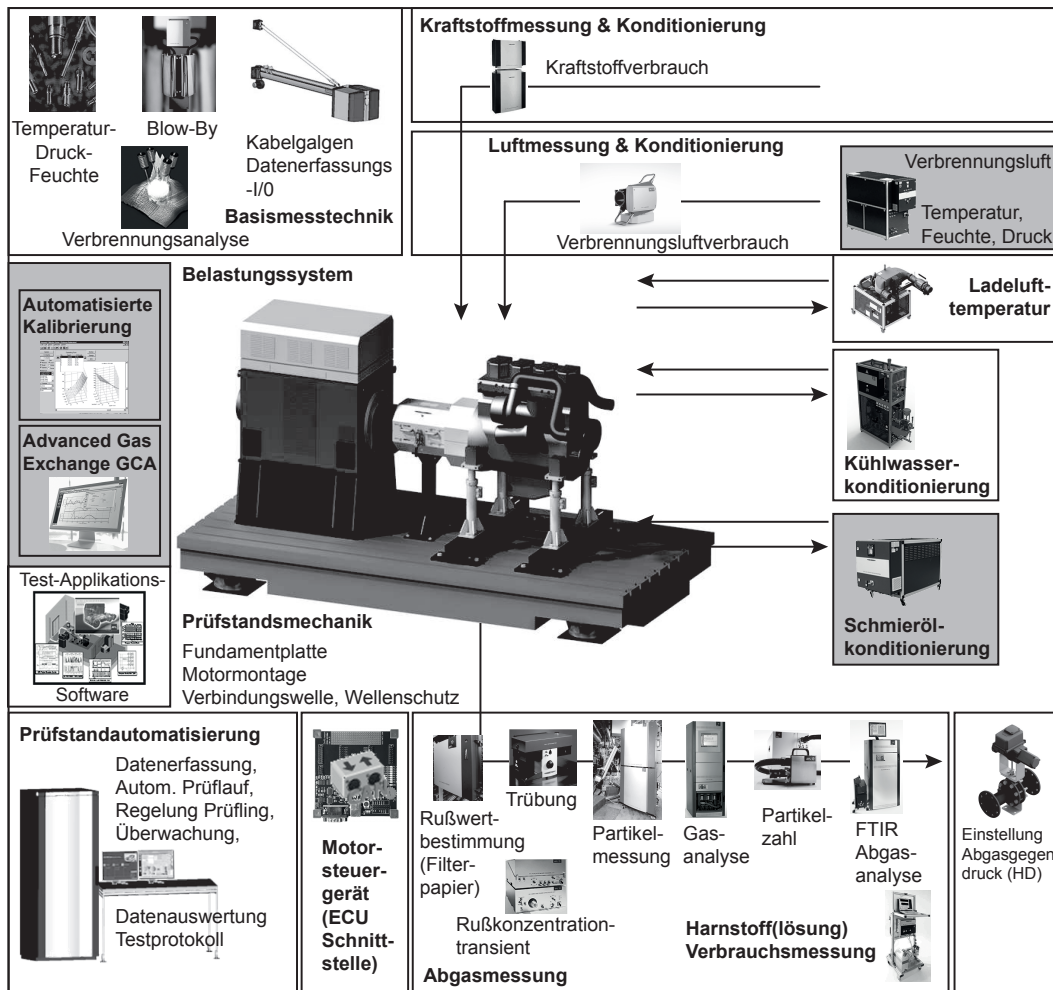


Abbildung 1.4.: Prüfstand - Aufbau, aus [PL14]

1. Einleitung

1.4.2. Prüfstandstypen für Verbrennungsmotoren

Es gibt abhängig von der Zielsetzung des Einsatzes folgende Prüfstände für Verbrennungsmotoren:

- **Forschung**, z.B. Einzylindermotorenprüfstand (Glasmotor für optische Erfassung des Verbrennungsvorgangs)
- **Entwicklung**, z.B. Leistungs-, Dauerlauf-, Kalibrier-, Abgaszertifizierungs- etc. Prüfstände
- **Produktion**, z.B. End of Line-Produktionsmotorprüfstand
- **Sondermotorenprüfstände**, z.B. Schwenkprüfstand, Klimaprüfstand, Höhen-/Klimaprüfstand

Da Forschungsprüfstände oftmals reine Prototypen darstellen, wird im Rahmen dieser Masterarbeit der Fokus auf Entwicklungsprüfstände gelegt, welche nachfolgend näher beschrieben werden.

Leistungsprüfstand

Ziel des Leistungsprüfstandes ist es, die vom Prüfling abgegebene Leistung P über den gesamten Arbeitsbereich aufzuzeichnen. Prüfläufe sollten für den angedachten Einsatz repräsentativ und unter den angestrebten Umgebungsbedingungen erfolgen. Die Leistung berechnet sich aus folgendem mathematischen Zusammenhang (siehe Formel 1.1). Am Prüfstand werden dabei die Größen des Motordrehmoments M_d und der Motordrehzahl ω messtechnisch erfasst.

$$P = \vec{M}_d \cdot \vec{\omega} \quad (1.1)$$

Funktionsprüfstand

Der Funktionsprüfstand wird für die Optimierung, die Kontrolle und die Absicherung von Gesamtsystemfunktionen verwendet. Neben der Motorleistung wird außerdem der Kraftstoffverbrauch, das Abgasverhalten nach

1.4. Prüfstände für die Fahrzeugentwicklung

dem Abgaskrümmer bzw. von Abgasnachbehandlungsmaßnahmen und das Ansprechverhalten des Motors bei Lastzustandsänderungen geprüft.

Dauerlaufprüfstand

Ein Dauerlaufprüfstand findet Anwendung bei Untersuchungen zur Haltbarkeit und Langzeitstabilität von Verbrennungsmotoren für die Serie. Hauptmerkmal sind Prüfprozeduren, welche einen Zeitrahmen von mehreren hundert Betriebsstunden umfassen. Der Ablauf erfolgt daher meist automatisiert und erfordert verlässliche Überwachungssysteme.

Kalibrierprüfstand

Hier wird das Motorverhalten an den Motorsteuergeräten optimiert. Beispielsweise werden variable Parameter am Einspritzsystem (Diesel), wie Menge, Zeitpunkt und Druck eingestellt. Spezifisch konzipierte Kalibrierprüfstände werden vor allem in der Serienfertigung eingesetzt.

Abgaszertifizierungsmotorprüfstand

Solche Prüfstände werden bei Nutzfahrzeugen und Off-Highway-Anwendungen eingesetzt um gesetzlich vorgegebene Abgasgrenzwerte zu erfüllen. Im Unterschied zu Personenkraftwagen mit einem maximalen Gesamtgewicht von 3500 kg, wo Abgastests am Rollenprüfstand durchgeführt werden, wird hingegen bei dieser Fahrzeugkategorie nur der Motor am Prüfstand betrieben. Dieser Umstand ist dadurch gekennzeichnet, dass solche Fahrzeuge unterschiedliche Aufbauarten besitzen und daher realitätsnahe Tests zu umfangreich wären.

Bandende (End of Line)-Produktionsmotorprüfstand

Dabei werden bereits produzierte Motoren stichprobenartig und hinsichtlich den Qualitätsanforderungen überprüft. Diese Prüfstände, samt Mess-

1. Einleitung

und Prüftechnik, sind Teil des gesamten motorspezifischen Produktionsprozesses. Tests erfolgen auch im gefeuerten Betrieb und unter Last um die Funktionalität des Motors sicherzustellen. Bei dieser Prüfstandgattung handelt es sich nicht mehr um Entwicklungsprüfstände (siehe Anfang Abschnitt 1.4.2).

Schwenkmotorenprüfstand

Solche Prüfstände dienen zur Optimierung von ölführenden Komponenten, Aeration, sowie zur Entwicklung des Ölkreislaufs, der Kurbelgehäuseentlüftung oder für Reibungsuntersuchen eines Motors. Der Motor wird dabei auf einem auf zwei Achsen schwenkbaren Vorrichtung montiert und kontinuierlich dynamisch im gefeuerten und geschleppten Betrieb geschwenkt.

Klimamotorenprüfstand

Im Vordergrund der Untersuchungen steht das Verhalten des Motors bei unterschiedlichen Umgebungslufteinflüssen. Die Temperatur kann dabei im Bereich -40 °C bis ca. $+50\text{ °C}$ variiert und simuliert werden. Ein weitere Einflussgröße ist die Luftfeuchtigkeit. Mögliche Prüfzenarien umfassen das Zündverhalten und die Abgasemissionen beim Kaltstart. Die Klimatisierung wird entweder innerhalb der gesamten Zelle (hoher Energiebedarf), oder als Klimahaube realisiert.

Höhen-/Klimaprüfstände

Dabei wird zusätzlich zur Temperatur auch der Umgebungsluftdruck berücksichtigt und das Motorenverhalten untersucht und optimiert. Diese Prüfstände sind ähnlich des Klimamotorenprüfstandes entweder als Gesamtkammeranlage oder durch druckdichte Ver- und Entsorgung der Luft an allen relevanten Motorenanschlüssen und Teilen ausgeführt.

1.4.3. Weitere Prüfstände für die Antriebsstrangentwicklung

Eine weitere große Gruppe von Prüfständen ist nach [PL14] jene der **Komponentenprüfstände**. Ein Antriebsstrang umfasst nachfolgende fünf Elemente. Da diese Teil des Entwicklungsprozesses (V-Modells) sind, ist die Durchführung von Integrations- und Validierungstests in Form von geeigneten Prüfsystemen notwendig.

- Getriebe: Bauteilkomponentenprüfstände: Dichtringprüfstand, Schwenkprüfstände für Schmierstoffe, CVT-Schubgliederbandprüfstände, Antriebsstrang-Komponenten-Prüfstände: Schaltungs-, Kupplungs-, Zwei-Massen-Schwungrad- und Wandlerprüfstände
- Verbrennungsmotor: auch Zusatzkomponenten, wie Öl- oder Wasserkreis bzw. Heißgaskomponenten für Aufladung
- Elektrische Energiequelle: Inverter-/Batterie-/Brennstoffzellenprüfstände
- Steuerstrategie: Steuergeräte-Prüfstände (HiL), Steuergeräte-Komponententest
- Elektromotor: Startmotorprüfstände, Elektromotorenprüfstände für Elektro- bzw. Hybridantriebe

Eine weitere Prüfstandsart umfasst den gesamten **Antriebsstrang**, welcher aufgrund der gestiegenen Komplexität und der hohen Anzahl von Steuergeräten, sowie deren Management und Interaktion untereinander, eine frühzeitige Validierung erfordert. Dabei wird laut [PL14] zwischen Anlagen mit realem Verbrennungsmotor bzw. so genannten „Prime Movern“ unterschieden. Bei letzteren handelt es sich um eine elektrische Maschine. Aufgrund kürzerer Entwicklungszeiten werden heutzutage der Verbrennungsmotor und das Getriebe parallel entwickelt. Befindet sich allerdings der Motor noch im Prototypenstadium, kommt die E-Maschine zum Einsatz. Der Vollständigkeit halber sollen an dieser Stelle auch Hybridantriebsstrangprüfstände genannt werden, welche sich nicht von herkömmlichen unterscheiden, da auch ein Elektromotor ein Moment und eine Drehzahl liefern und das Antriebspaket als Einheit gesehen wird.

Ein nächster Schritt in der Fahrzeugentwicklung umfasst das Testen des Gesamtfahrzeuges in sogenannten **Fahrzeugprüfständen** (siehe [PL14]). Sie sind meist als Rollensprüfstände ausgeführt und dienen zur Messung von

1. Einleitung

Verbrauch, Abgasemissionen, Leistung, Fahrgeräusch und der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV). Abgastests müssen dabei auf der Rolle, EMV-Untersuchungen können und Fahrgeräuschzertifizierungen müssen hingegen gesetzlich auf der Straße durchgeführt werden. Neben der ursprünglichen Verwendung als Zertifizierungsprüfstände wandert das Einsatzgebiet öfter hin zur Verwendung als mechatronische Entwicklungsplattform für Kalibrierungs- und Systemoptimierungs- und Systemvalidierungsaufgaben. Als Prüflinge eignen sich Motorräder, PKWs, sowie schwere Nutzfahrzeuge und mobile Arbeitsmaschinen. Die Anzahl der Rollen sowie die Ausführung der Antriebe variiert dabei.

Rennsportprüfstände sind nach [PL14] jenen bei der Serienentwicklung eingesetzten, sehr ähnlich. Allerdings sind die Anforderungen an die Technik unterschiedlich und der Produktlebenszyklus ist oft erheblich kürzer. Diese Prüfstände sind für diese Arbeit nicht näher relevant, da nur die Prioritätensetzung der eingesetzten Prüftechnik anders verteilt wird.

Die letzte wichtige Gruppe von Prüfständen sind die **Abgasprüfstände**. Jeder neu entwickelte Verbrennungsmotor muss die gültigen Emissions-, Klimagas- und Kraftstoffverbrauchsvorschriften des jeweiligen Landes einhalten und stellt somit eine eigene Disziplin in der Fahrzeugentwicklung dar und daher hohe Anstrengungen des Herstellers abverlangen. Es werden vom Gesetzgeber nicht nur die Emissionsgrenzwerte bestimmt, sondern auch Vorschriften, Regeln und Gesetze erlassen, wie das Testen, Messen und Berechnen der Endergebnisse zu erfolgen hat. Für die Typfreigabe erfolgen für PKW Abgasprüfungen am Rollenprüfstand, für Nutzkraftfahrzeuge und „Non-Road“-Motoren wird nur der Motor mit Abgasnachbehandlungssystem getestet und zertifiziert.

2. Analyse und Charakterisierung der Komponenten am Prüfstand

Wie unter Abschnitt 1.2 beschrieben, sollen im Rahmen dieser Arbeit Optimierungsstrategien zur Minimierung des Energieverbrauchs für automotiv Prüfstände entwickelt und diskutiert werden. Im Kapitel 1 wurde bereits ein umfassender Überblick über sämtliche eingesetzte Prüfstandstypen und deren Anwendungsgebiete dargelegt.

Um Lösungsansätze zur Energieoptimierung zu generieren, benötigt man ein genaues Abbild der derzeitigen Situation an einem Prüfstand. Exemplarisch dafür werden an einem Verbrennungsmotorenprüfstand, Leistungsmessungen an einigen relevanten Verbrauchern durchgeführt, um davon auf den Energieverbrauch schließen zu können. Durch diese Vorgangsweise können große Verbraucher charakterisiert, deren Verhalten analysiert und eventuell erste Erkenntnisse auf alternative Verwendungsstrategien gewonnen werden.

2.1. Verbrennungsmotorprüfstand

In den Abbildungen 2.1 und 2.2 ist die Komponentenanzordnung und der reale Aufbau jenes Prüfstandes abgebildet, an welchem nachfolgend alle abgebildeten Geräte und Systeme untersucht werden. Die Auswahl der Geräte umfasst typische und vor allem Verbraucher mit hohem Energiebedarf an einem Verbrennungsmotorenprüfstand. Die Komponenten können in zwei Kategorien unterteilt werden:

2. Analyse und Charakterisierung der Komponenten am Prüfstand

- Konditioniergeräte
- Messgeräte

Das Automatisierungssystem ist das übergeordnete Verwaltungssystem aller Komponenten am Prüfstand und abhängig von seiner Konfiguration maßgeblich selbst oder steuernd am Energieverbrauch beteiligt.



Abbildung 2.1.: Geräteauswahl am Prüfstand

2.1.1. Konditioniergeräte

Konditioniersysteme haben je nach Heizstrategie unterschiedliche Betriebszustände. Sie sind selbst kleine Anlagen und haben mehrere Verbraucher integriert. Eine solche Anlage besteht meist aus einer Heizeinheit, einem Steuerungssystem, einer oder mehreren Pumpen, Ventilen, Sensorik und Messeinrichtungen. Der Energieverbrauch wird sinnvollerweise vom Gesamtsystem einer Konditioniereinheit betrachtet. Aufgrund der hohen Anzahl von Teilkomponenten und der Drehstromversorgung des Geräts, kann von einem unsymmetrisch belasteten System ausgegangen werden. Für eine

2.1. Verbrennungsmotorprüfstand



Abbildung 2.2.: Motorprüfstand

präzise Analyse des Energieverbrauchs eines Konditioniergerätes ist ein Messgerät notwendig, welches jede einzelne Phase der Zuleitung misst und auch in der Lage ist, über einen längeren Zeitraum aufzuzeichnen. Letzteres spielt insbesondere bei längeren Prozessen, wie bei Heizvorgängen, eine Rolle. An dieser Stelle muss erwähnt werden, dass bereits eine so genannte Vorkonditionierung für alle Medien, die in der Messzelle bereitgestellt werden, durchgeführt wird. Das geschieht aber außerhalb der Prüfwelle eines Prüfstands und wird zentral innerhalb eines Prüffeldes verwaltet. Eine Optimierung dieser Aufgabe ist für diese Arbeit nicht von Bedeutung, da sich der Fokus an die Komponenten innerhalb der Messzelle richtet.

2.1.2. Messsysteme

Die getroffene Auswahl an Messgeräten trägt ebenfalls maßgeblich zum Gesamtenergieverbrauch bei, da sie ähnlich zu den Konditioniergeräten, aufgrund ihrer Messprinzipien, intern mit Heizeinheiten ausgestattet sind. Der Energieverbrauch unterscheidet sich von den Konditioniergeräten durch abweichende Betriebsintervalle und Anwendungsszenarios. Die Heizelemente sind meist kleiner dimensioniert und sind oft als Zusatzfunktion je nach Messprinzip in den Geräten integriert.

2. Analyse und Charakterisierung der Komponenten am Prüfstand

2.2. Beschreibung der Komponenten am Prüfstand

Aufgrund der Fülle an Einzelkomponenten eines Prüfstandes sind nur jene von Bedeutung, welche einen maßgeblichen Anteil am Gesamtenergieverbrauch haben. Nachfolgend werden die ausgewählten Komponenten und deren Funktionsweise vorgestellt.

2.2.1. Prüfstandssteuerung (AVL PUMA Open Automation Platform)

Das Herz eines Prüfstandes übernimmt das Automatisierungssystem, welches abseits seiner individuellen Konfiguration zumeist mit sämtlicher Peripherie für diverse Sensorik und Messsysteme, der Anlagensteuerung via umfangreicher Rechnersysteme und einer USV ausgestattet ist.



Abbildung 2.3.: AVL Bedienpult mit PUMA-Tower (www.avl.com)

2.2.2. Öl-Konditionierung (AVL ConsysLube 25/50)

Das Öl-Konditioniergerät vom Typ „AVL ConsysLube 25/50“ ist in Abbildung 2.4 dargestellt. Der Öl-Kreis ist für eine Betriebstemperatur von 20 °C bis 150 °C ausgelegt. Die gesamte Leistungsaufnahme ist für die am 3-phasen Netz betriebene Anlage mit 12 kVA angegeben, wobei für die Heizung 9 kW entfallen.



Abbildung 2.4.: AVL ConsysLube 25/50 [AVL15b]

Die Öltemperatur beeinflusst das Betriebsverhalten eines Motors maßgeblich. Aus diesem Grund wird für die Reproduzierbarkeit von Messergebnissen bei Prüfläufen ein Konditioniergerät eingesetzt. Es dient dazu die Temperatur des Schmiermediums während eines Prüflaufes zu regeln, oder das Öl nach einem Motorstillstand auf Betriebstemperatur zu bringen. Es ist für den Betrieb und Regelung via Prüfstandsrechner (Abschnitt 2.2.1) vorgesehen und wird in den Ölkreislauf des Verbrennungsmotors integriert. Das System (Abbildung 2.5) beinhaltet 2 Medienkreise, den so genannten Öl-Kreislauf (Primärkreis) und den Kühlwasser-Kreislauf (Sekundärkreis). Das Öl kann je nach Regelwunsch über ein Ventil über einen Wärmetauscher gekühlt, oder an diesem vorbei über eine Heizung geführt werden, bis der Sollwert erreicht wurde. [AVL15b]

Neben der Öl-Konditionierung existiert auch eine Wasser-Konditionierung (Typ AVL ConsysCool) um einen Verbrennungsmotor am Prüfstand zu

2. Analyse und Charakterisierung der Komponenten am Prüfstand

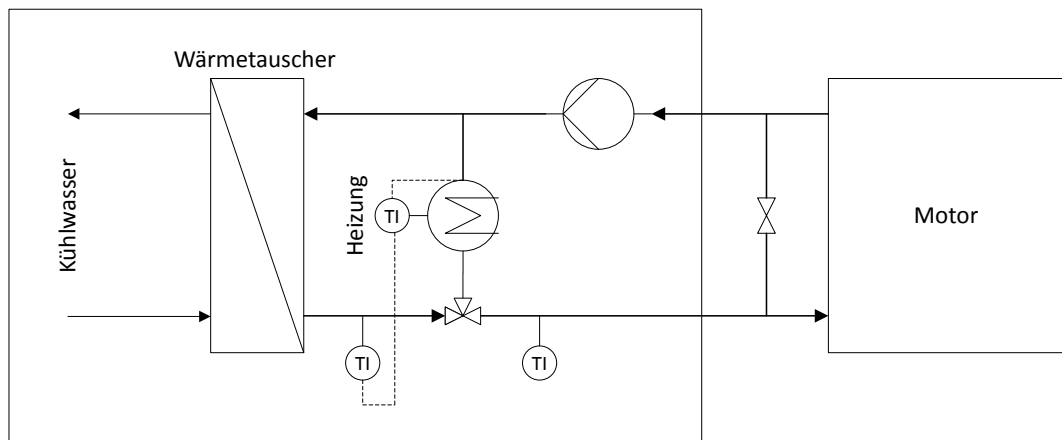


Abbildung 2.5.: Prinzip Ölkonditionierung [PL14]

betreiben. Diese funktioniert ähnlich und ist deshalb für detailliertere Betrachtungen nicht weiter relevant.

2.2.3. Kraftstoff-Konditionierung (AVL FuelExact Mass Flow & PLU)

Bei dem AVL FuelExact (Abbildung 2.6) handelt es sich einerseits um ein Präzisionsmessgerät zur Bestimmung des Kraftstoffverbrauchs und andererseits um ein Konditioniergerät zum Regeln der Kraftstoffeigenschaften bei einer eingestellten Temperatur. Dadurch ist es möglich dieses Gerät flexibel und insbesondere bei transienten und hochdynamischen Prüfläufen einzusetzen. Es vereint 2 Messprinzipien: PLU¹- & Massenstrommessprinzip und deckt einen Regelbereich zwischen 10 °C und 80 °C ab. Die Versorgung erfolgt über ein 3-phasen Drehstromnetz (3x400 VAC, 50 – 60 Hz), die Leistungsaufnahme beträgt für das Grundgerät 3,5 kVA bzw. je nach Optionen bis 8 kVA, wobei die Heiz(-Kühl)leistung mit 3 kW bzw. 6 kW angegeben ist. Die Anlage besteht aus zwei Teilen: der Elektrikbox oben mit der Steuerelektronik bei 24 VDC, sowie der Hydraulikbox unten. [AVL14]

¹Pierburg Luftfahrt Union Messprinzip

2.2. Beschreibung der Komponenten am Prüfstand



Abbildung 2.6.: AVL FuelExact Typ 740 [AVL14]

2.2.4. Verbrennungsluft-Konditionierung (AVL ConsysAir 1600)

Die Ansaugluftkonditionierung (Abbildung 2.7) ermöglicht eine Anpassung der Verbrennungsluft am Saugrohr und gleichzeitig des Auspuffgedrucks eines Verbrennungsmotors am Prüfstand, unabhängig von der Umgebungsluft. Es kann damit die Temperatur, der Luftdruck und optional auch die Luftfeuchtigkeit eingestellt werden und diese Eigenschaften haben einen direkten Einfluss auf das Motorverhalten. Ein Motor ändert beispielsweise sein Drehmoment durch Änderung des Luftdrucks, die Leistung wird durch die Temperatur beeinflusst und die Luftfeuchtigkeit bestimmt die Abgasemissionen.

In Abbildung 2.8 ist das Prinzipschema der Anlage und seinen Einzelkomponenten dargestellt. Die angesaugte Umgebungsluft wird über einen Wärmetauscher gekühlt oder kann über ein Heizgitter erwärmt werden. Die Luftfeuchtigkeit wird durch das Einstäuben von Wasser aus einem Dampfdruckkessel angepasst.

2. Analyse und Charakterisierung der Komponenten am Prüfstand



Abbildung 2.7.: AVL ConsysAir 1600 [AVL15a]

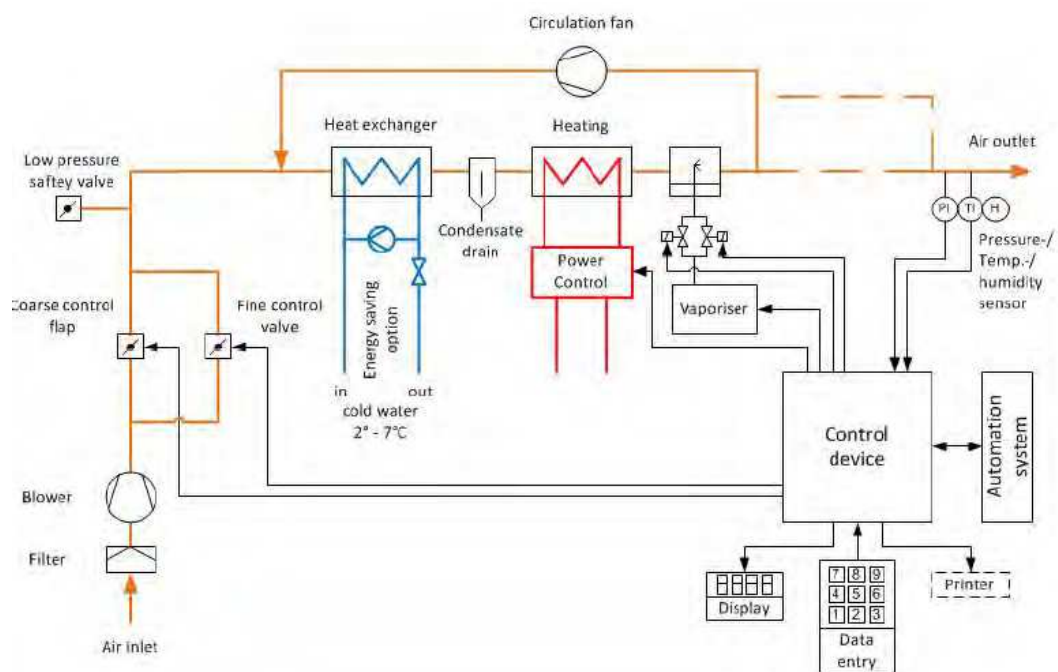


Abbildung 2.8.: Prinzip Ansaugluftkonditionierung [AVL15a]

2.2.5. Emissionsmessgerät (AVL AMA i60 Exhaust Measurement System)

In Abbildung 2.9 ist die Basisstation des Abgasmessgerätes vom Typ „AVL AMA i60“ dargestellt. Der Tower ist modular mit verschiedenen Auswerteeinheiten ausgestattet. Im vorliegenden Gerät waren insgesamt 8 Module, jedes davon in zweifacher Ausführung, eingebaut. Zur Steuerung und Visualisierung dient ein Panel-PC, welcher unabhängig vom Automatisierungssystem des Prüfstandes die Abgase auswertet. Es werden von der Prüfzelle zwei abgasführende Zuleitungen in das Gerät eingespeist und über einen Vorfilter auf ca. 180 °C aufgewärmt um Kondensation zu vermeiden.



Abbildung 2.9.: AVL AMA i60 Exhaust Measurement System [AVL10]

Ein Kraftstoff für Verbrennungsmotoren besteht vereinfacht dargestellt vorwiegend aus Kohlenwasserstoffverbindungen und ist entweder gasförmig oder flüssig. Bei der Verbrennung kommt es zu chemischen Reaktionen mit der Umgebungsluft, welche selbst zum größten Teil aus Stickstoff und

2. Analyse und Charakterisierung der Komponenten am Prüfstand

Sauerstoffmolekülen besteht. Somit entstehen bei Ottomotoren eher Kohlenmonoxid (CO) und Kohlenwasserstoffe (HC), während bei Dieselmotoren Partikel oder Stickoxide (NO_x) überwiegen. Abgase von moderne direkteinspritzende Turbobenziner sind prinzipbedingt ebenfalls mit Stickoxiden behaftet. [Eic14]

Für Partikel gibt es eigene Messgeräte und Methoden, wie zum Beispiel das Smokemeter (siehe Abschnitt 2.2.6). Für alle anderen Verbrennungsprodukte sind Auswerteeinheiten im Tower installiert.

2.2.6. Rußmessgerät (AVL Smokemeter 415SE)

Beim AVL Smokemeter (Abbildung 2.10) handelt es sich um ein Messgerät zur Partikelmessung des Abgases. Die Rußemission ist ein Indikator für die Bestimmung der Verbrennungsqualität. Die Messung basiert auf einem optischen Verfahren (Abbildung 2.11), bei dem ein Filterpapier über eine bestimmte Zeit mit Abgas beladen und seine Schwärzung ermittelt wird. [PL14] Die Anlage wird an 230 V und 50 Hz betrieben und ist mit einer Heizoption zum Beheizen der Gerätekammer und der Sample-Line ausgestattet. Die maximale Leistungsaufnahme ist laut Hersteller mit 700 VA angegeben. [AVL11]

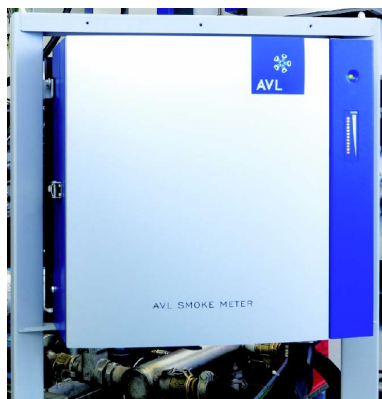


Abbildung 2.10.: AVL Smoke-
meter 415SE
[AVL11]

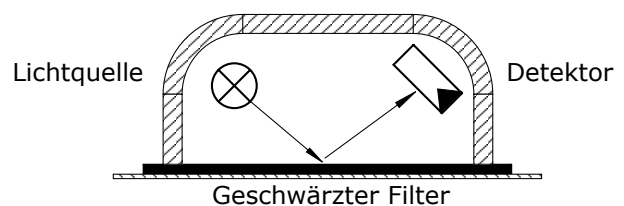


Abbildung 2.11.: Prinzip Smokemeter [PL14]

2.3. Leistungsmessung an den Komponenten

Um den Energieverbrauch an den in Abschnitt 2.2 aufgezählten Geräten zu charakterisieren, werden Leistungsmessungen an den typischen Betriebszuständen in einem Zeitintervall durchgeführt. Es wird bei den Konditioniergeräten der Aufheizvorgang sowie der Bedarf zum Halten eines vorgegebenen Sollwertes aufgezeichnet. Bei kleineren Geräten ohne Dynamik, reicht ein Messwert im Betriebsfall.

2.3.1. Verwendete Messgeräte

Die meisten Geräte haben nur zwei Betriebszustände (Ein/Aus) und stellen daher klassische Verbraucher mit einem konstanten Leistungsbedarf dar. Solche Komponenten sind oft einphasig ausgeführt oder werden über ein Netzteil mit Gleichstrom versorgt. Die Leistungsaufnahme solcher Geräte kann man durch Messen des Strombedarfs mit einer Strommesszange und anschließender Berechnung der Leistung abbilden. Für Konditioniergeräte oder umfangreiche Messsysteme am Prüfstand sind spezielle Leistungsmessgeräte oder Netzanalysatoren notwendig, welche den Einregelvorgang der Temperatur als Heizleistung aufzeichnen können.

N4L Power Analyzer

Ein Messgerät, welches in der Lage ist, gleichzeitig drei Phasen aufzuzeichnen, ist mit dem *N4L Power Analyzer PPA5530* gegeben. Der integrierte Datenlogger ermöglicht eine dynamische Aufzeichnung des Heizvorganges über einen längeren Zeitraum hinweg. Eingangsbegrenzungen, welche für die Spannung höchstens 600 V RMS und für den Strom 10 A RMS betragen, sind nach dem Datenblatt [New15] zu berücksichtigen. Da bei einigen Komponenten am Prüfstand leistungsfähige Hardware mit Typenschildangaben jenseits einiger kVA vorkommen, ist mit hohen Strömen zu rechnen, welche die Messeinheit ohne Vorschalten eines Stromwandlers beschädigen würde. Daher werden pro gemessener Phase noch je ein Stromwandler für die Messungen benötigt. Das Stromverhältnis aus dem Zusammenhang 2.1 kann

2. Analyse und Charakterisierung der Komponenten am Prüfstand

im Power Analyzer hinterlegt werden, sodass der Stromwert der Realität entspricht und die Leistung richtig berechnet wird. Damit das Gerät die gemessene Leistung richtig interpretiert, muss angegeben werden, wie der Prüfling mit dem Netz verbunden ist. Die Messung erfolgt ungefiltert und ohne Sondereinstellungen.

Laborstromwandler

Um den Power Analyzer aufgrund seiner begrenzten Stromeingänge nicht zu beschädigen, werden drei identische Laborstromwandler in die Messschaltung aufgenommen. Auf der Primärseite des Wandlers können Messbereiche bis zu 600 A in mehreren Abstufungen oder durch manuelle Erweiterung um Wicklungen realisiert werden. Sekundärseitig ist der Wandler in einem Bereich von 5 A ausgeführt und kann daher für oben genanntes Wattmeter verwendet werden.

Der Stromwandler funktioniert nach dem Transformator-Prinzip, wobei das proportionale Stromverhältnis der beiden Seiten über deren Wicklungszahl bestimmt wird. Mit seiner Hilfe ist es möglich, den hohen realen Primärstrom auf einen niedrigeren Wert, für den das Messwerk ausgelegt ist, herunterzutransformieren. Das Verhältnis aus diesen beiden Stromstärken wird durch den Proportionalitätsfaktor (Formel 2.1) angegeben. Der Power Analyzer ist in der Lage für die Anzeige bzw. Aufzeichnung den gemessenen Strom wieder um diesen Faktor hochzuskalieren. Ein Stromwandler muss sekundärseitig **immer** kurzgeschlossen betrieben werden. Außerdem ist dort auch auf eine Erdung zu achten.

Der Proportionalitätsfaktor ist wie folgt definiert:

$$k = \frac{\text{Primärstrom } I_1}{\text{Sekundärstrom } I_2} \quad (2.1)$$

2.3. Leistungsmessung an den Komponenten

Oszilloskop zur Leistungsmessung

Für die Konditionierung der Verbrennungsluft (siehe 2.2.4) wird ein Messgerät mit höherem Stromeingangsbereich benötigt, da hier mit Strömen mit bis zu 125 A zu rechnen ist. Dafür wird ein spezielles Oszilloskop mit Option zur Leistungsmessung verwendet, welches zusätzlich mit einer Strommesszange und einem Messbereich von bis zu 200 A ausgestattet ist. Bei diesem Gerät ist es nur möglich 1 Phase aufzuzeichnen. Ein 3-phasiger „Messwert“ erhält man infolge einer internen Berechnung, wenn von einer symmetrischen Belastung ausgegangen werden kann.

2.3.2. Messschaltung für 3-phasige Verbraucher

In Abbildung 2.12 ist das Schaltbild für den 3-phasigen Messaufbau mit Verschaltung des Power Analyzers (Wattmeter) und der Stromwandler dargestellt. Für 1-phasige Verbraucher wurde entweder analog dazu nur 1 Messpfad mit oder ohne Stromwandler verwendet.

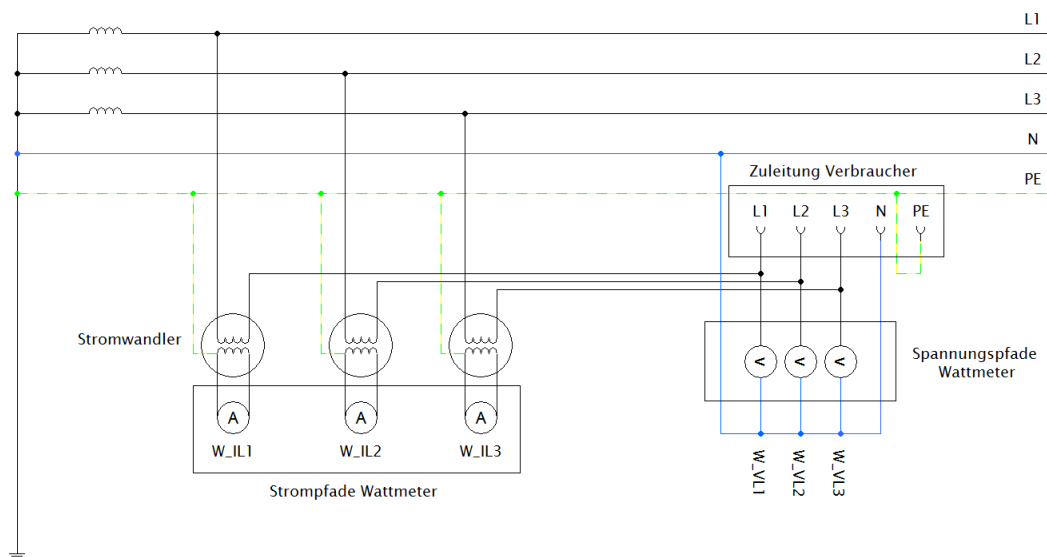


Abbildung 2.12.: Messschaltbild am 3-phasigen Verbraucher

2. Analyse und Charakterisierung der Komponenten am Prüfstand

2.4. Messdaten der Prüfstandskomponenten

Nachfolgend werden die durchgeführten Aufzeichnungen von der Leistungsmessung an den ausgewählten Komponenten des Motorenprüfstands angeführt und diskutiert.

2.4.1. Messdaten AVL PUMA-Tower

Da aufgrund der Prüfstandsauslegung kein Betrieb ohne Steuerung möglich ist, ist der Energieverbrauch des PUMA-Towers (siehe 2.2.1) nur von der Konfiguration, der Anzahl der Peripheriemodule (AVL FEM-Module) und vom Testszenario, welches eventuell weitere Steuer-PCs erfordert, abhängig und näherungsweise konstant. Die Messung erfolgt via Strommesszange direkt an den Zuleitungsklemmen aller 3 Phasen. Das Messergebnis ist in Tabelle 2.1 zusammengefasst. Der gemessene Leistungswert entspricht der Grundkonfiguration mit aktiviertem Tower, samt integrierter Peripherie und dem Zentralrechner.

	$I_1(A)$	$I_2(A)$	$I_3(A)$	$U_1(V)$	$U_2(V)$	$U_3(V)$
gemessen:	2,7	0	0,2	230	233	234
berechnet:	Leistungsaufnahme:					667,8W

Tabelle 2.1.: Leistungsaufnahme PUMA

2.4.2. Messdaten AVL ConsysLube 25/50

In Abbildung 2.13 ist das Messergebnis der Öl-Konditioniereinheit abgebildet. Beim Start wird das Medium mit hohem Energieeinsatz zur vorgegebenen Soll-Temperatur ($T_{soll} = 90\text{ °C}$) aufgeheizt. Nachdem diese erreicht wurde, wird die Heizleistung zurückgeregelt und der Energiebedarf pendelt

2.4. Messdaten der Prüfstandskomponenten

sich auf einen niedrigeren Wert ein, um gerade noch die gewünschte Temperatur beizubehalten. Der unruhige Verlauf im Stationär-Betrieb ist auf periodische Anteile, welche etwa durch die Regelintervalle des Heizers und des Regelventils zum Wärmetauscher verursacht werden, zurückzuführen.

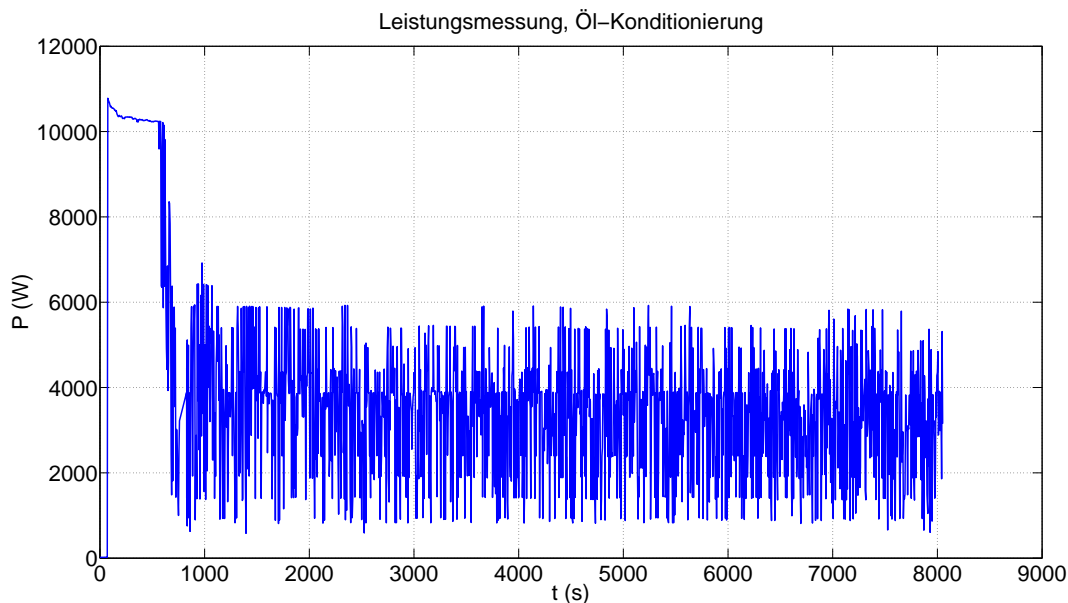


Abbildung 2.13.: Messergebnis Öl-Konditionierung

2.4.3. Messdaten AVL FuelExact

In Abbildung 2.14 ist das Messergebnis der Kraftstoff-Konditioniereinheit abgebildet. Zu Beginn sind energiearme Verbraucher wie das Steuerungssystem und das ebenfalls integrierte Messsystem sowie eine Pumpe aktiv. Der Aufheizvorgang auf $T_{soll} = 25\text{ °C}$ findet innerhalb der ersten ca. 500 s statt und hat einen gepulsten Ablauf. Ist die Soll-Temperatur erreicht, verläuft der Energiekonsum konstant. Die Unregelmäßigkeit zwischen 1000 s und 1500 s deutet einerseits auf leichtes Nachregeln der Temperatur und aufgrund des hybriden Systems (Konditionieren/Messen), auf einen durchgeführten Messvorgang hin.

2. Analyse und Charakterisierung der Komponenten am Prüfstand

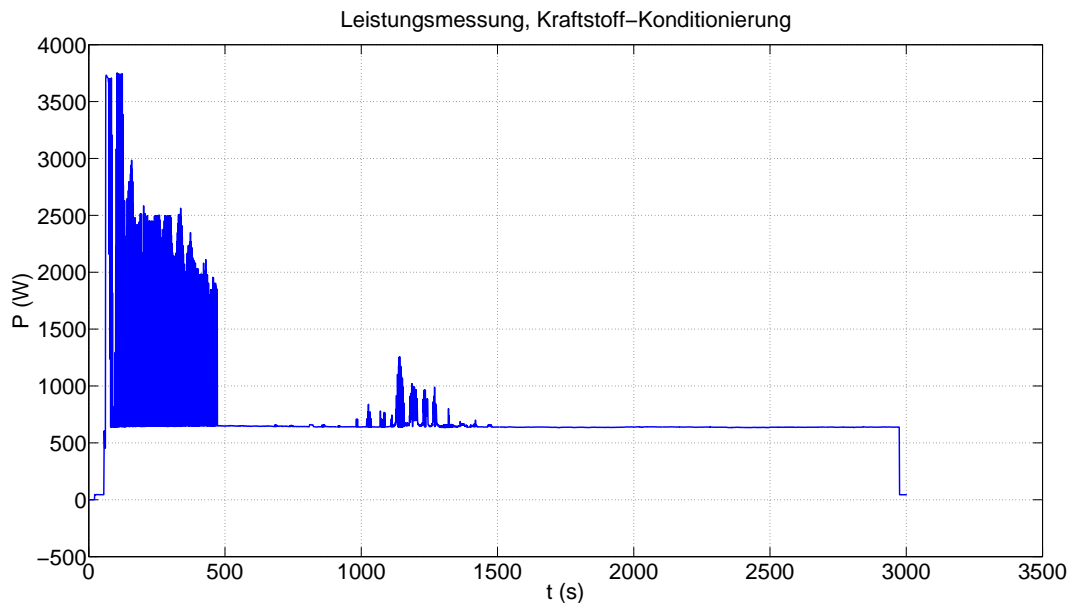


Abbildung 2.14.: Messergebnis Kraftstoff-Konditionierung

2.4.4. Messdaten AVL AMA i60

In Abbildung 2.15 ist das Messergebnis der einzelnen Phasen der Anlage abgebildet. Daraus kann die interne Phasenaufteilung für markante Abläufe, wie zum Beispiel die Taktung einer Pumpe oder einer Heizung abgelesen werden.

In Abbildung 2.16 ist der gesamte Leistungsbedarf der Anlage abgebildet. Das Emissionsmessgerät ist intern ebenfalls modular aufgebaut. Es besitzt je nach Konfiguration verschiedene Messmodule für unterschiedliche Abgasbestandteile. Die Anhebungen des Leistungspegels in definierten Zeitintervallen kennzeichnen den Zuschaltzeitpunkt eines weiteren Moduls. Im konkreten Fall werden zwei abgasführende Leitungen dem Messgerät zugeführt und jedes Messmodul ist doppelt vorhanden. Bis ein Modul einsatzbereit war, musste dieses aufgeheizt werden. Am Steuer-PC wird das Ende der Aufheizzeit und die Bereitschaft zum Messen visualisiert.

2.4. Messdaten der Prüfstandskomponenten

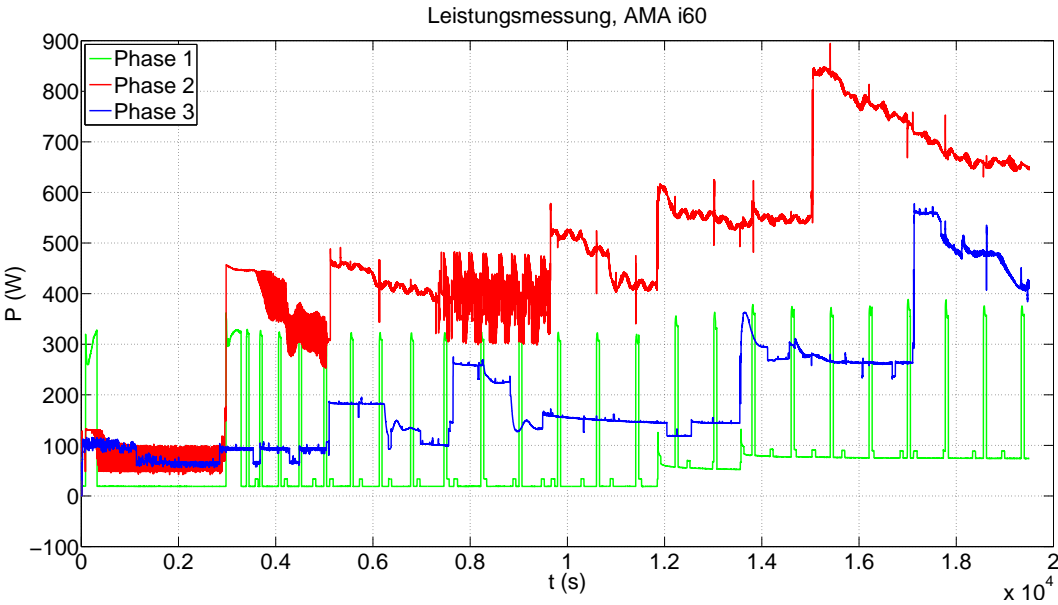


Abbildung 2.15.: Messergebnis Emissionsmeseinheit, Phasen separat

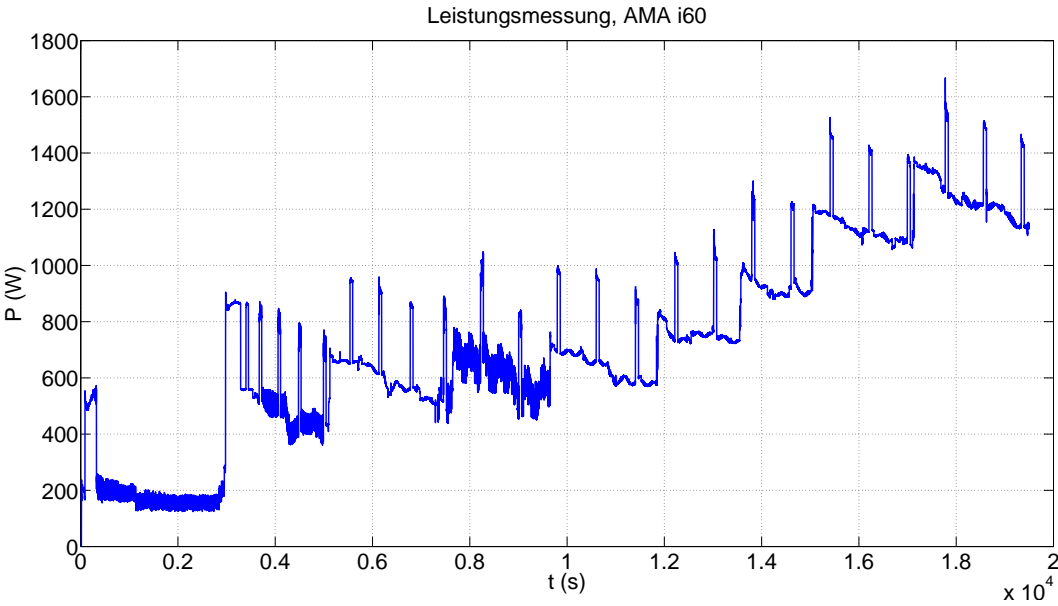


Abbildung 2.16.: Messergebnis Emissionsmeseinheit, Gesamtleistungsbedarf

2. Analyse und Charakterisierung der Komponenten am Prüfstand

2.4.5. Messdaten AVL HSS (für AMA i60)

In Abbildung 2.17 ist das Messergebnis über die Leistungsaufnahme des externen Vorfilters (HSS) des Emissionsmessgeräts abgebildet. Bevor der Abgasstrom dem Mess-Tower (Anm. AVL AMA i60) zugeführt werden kann, wird es durch einen beheizten Vorfilter geleitet, um so die geeignete Bedingung für die Auswerteeinheiten zu erfüllen. Dieses Zusatzgerät befindet sich ebenfalls in der Prü fzelle, während die Basisstation im Prüfraum aufgestellt ist. Die Heizung ist sofort aktiv, wenn das Gerät an 230 V angeschlossen wird und hat, wie an der Messung ersichtlich, eine relativ hohe Leistungsaufnahme.

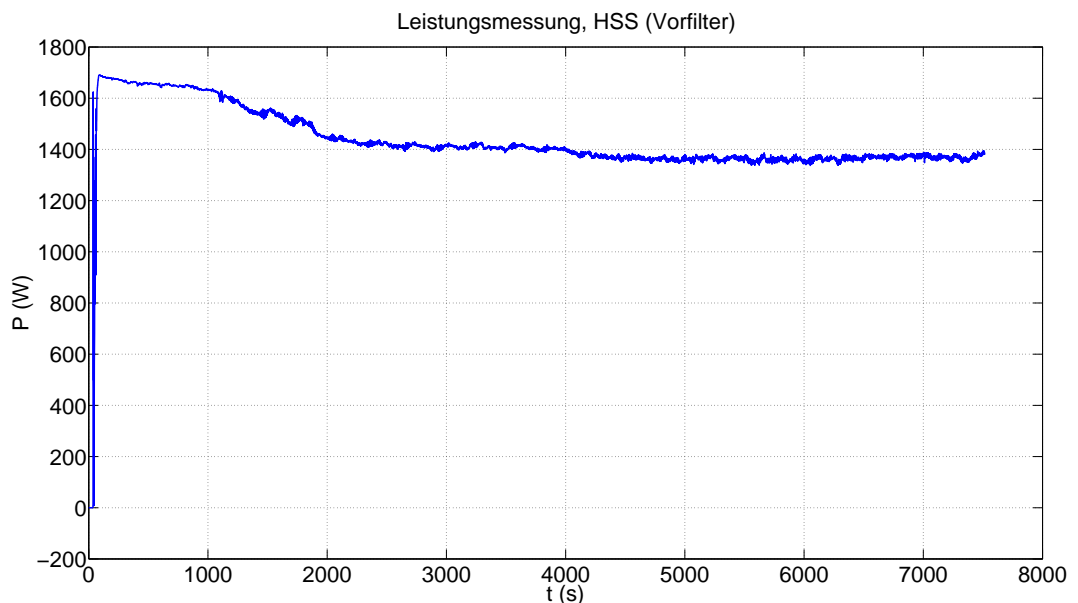


Abbildung 2.17.: Messergebnis Vorfilter

2.4.6. Messdaten AVL ConsysAir 1600

In Abbildung 2.18 ist das Messergebnis der einzelnen Phasen der Anlage abgebildet. Die Messung wurde jeweils für jede Phase separat mit dem

2.4. Messdaten der Prüfstandskomponenten

Fluke 43B durchgeführt. Die Steuerung der Anlage erfolgte im Handbetrieb und ist wie folgt charakterisiert:

Der konstante Leistungswert in den ersten 80 s entspricht dem Verbrauch der Steuerelektronik. Die darauf folgende Spitze und Absenkung resultiert vom Stern-Dreieck-Anlauf des Gebläse motors. Die Dampfkesselregelung (Druck und Temperatur) wird automatisch zugeschaltet und der Ventilator wird auf seinen niedrigsten Wert bei 20% eingestellt (ab ca. 170 s). Der nächste Anstieg bei ca. 250 s entspricht der maximalen Ventilator drehzahl bei 100%. Bei Phase 3 wurde zuerst bei voller Drehzahl gemessen. Die maximale Leistungsaufnahme ab ca. 300 s entspricht jenem Fall, bei voller Ventilator drehzahl und Heizlast. Der typische Regelvorgang vor Ende der Messaufzeichnung entspricht dem eingeschwungenen Zustand, wenn auf eine typische Spezifikation der Verbrennungsluft hin geregelt wurde und diese gehalten wird. Das Verhalten ähnelt einem Zweipunktregler.

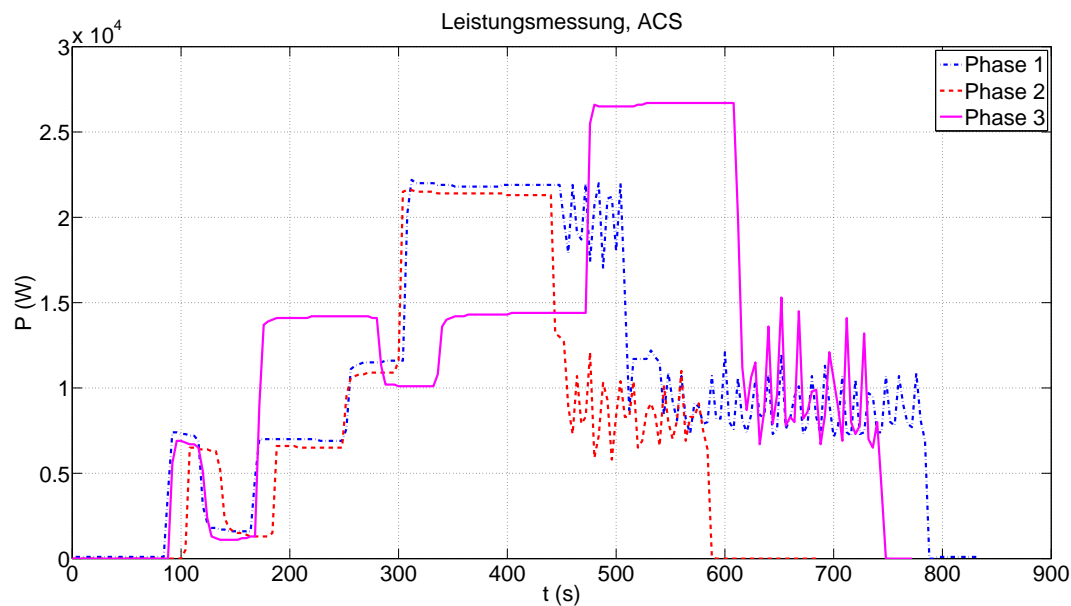


Abbildung 2.18.: Messergebnis ACS 1600, Phasen separat

In Abbildung 2.19 ist die Gesamtleistung abgebildet, indem alle Leistungspegel aus allen Betriebsstufen und Phasen aufsummiert wurden.

2. Analyse und Charakterisierung der Komponenten am Prüfstand

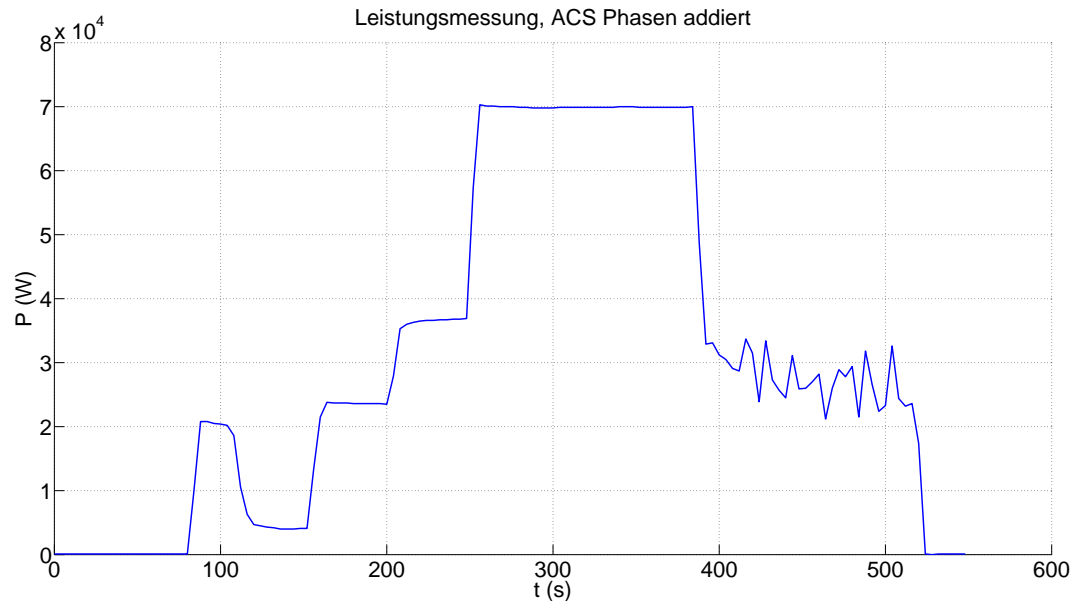


Abbildung 2.19.: Messergebnis ACS 1600, Leistung gesamt interpoliert

2.4.7. Messdaten AVL Smokemeter

In Abbildung 2.20 ist die Leistungsaufnahme des Rußmessgeräts abgebildet. Der Aufheizvorgang erfolgt in kurzer Zeit unter hohem Leistungspegel. Ist die Soll-Temperatur erreicht, wird der Heizleistungsbedarf zurückgeregelt. Die Taktung im Signal wird von den periodisch auftretenden Messvorgängen sowie der Temperaturregelung charakterisiert. Intern sorgt ein Motor für das stückweise Abrollen einer schmalen Papierrolle, welche für jede durchgeführte Messung die Partikel des Abgases an einer freien Stelle aufnimmt.

2.4.8. Sonstige Geräte

In diesem Abschnitt folgen der Vollständigkeit wegen, weitere Geräte an einem Motorenprüfstand, welche sich innerhalb einer relevanten Leistungsaufnahme, oder durch deren mehrfache Ausführung darin, bewegen. Diese

2.4. Messdaten der Prüfstandskomponenten

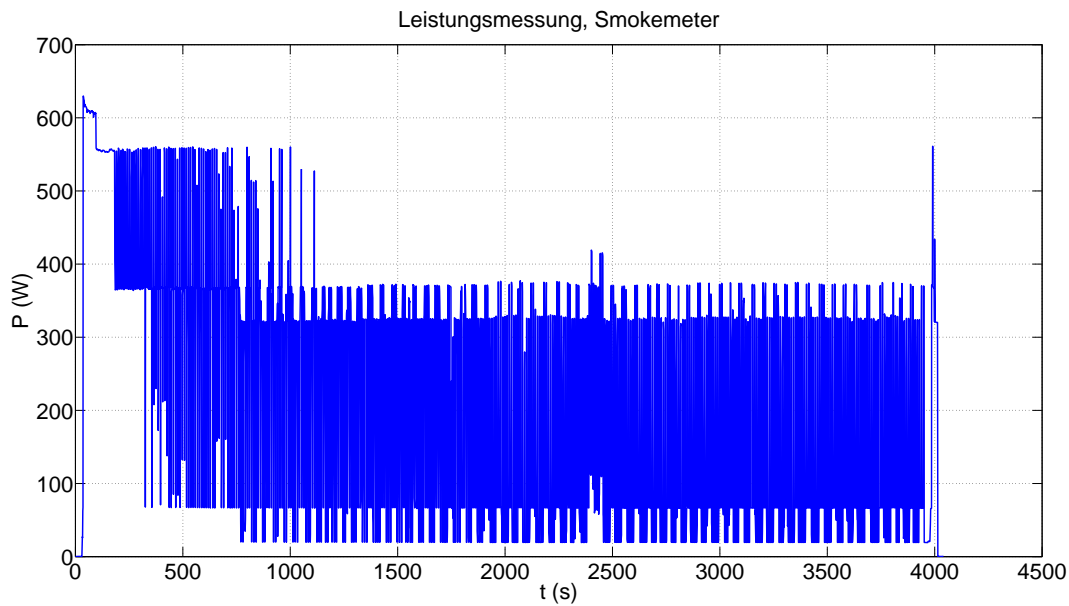


Abbildung 2.20.: Messergebnis Smokemeter

Geräte und Module (siehe Tabelle 2.2) besitzen einen Energieverbrauch, welcher als konstant angenommen wird.

Die Belastungsmaschine ist für weitere Betrachtungen dieser Arbeit nicht von Relevanz, da es bereits Konzepte und Ausführungen gibt, welche die abgegebene Energie wieder ins Netz zurückspeisen.

2. Analyse und Charakterisierung der Komponenten am Prüfstand

Bezeichnung:	I(A)	U(V)	P(W)
INDICOM PC (idle)	0,2	230	46
DRIVE PC (idle)	0,4	230	92
CAMEO PC (idle)	0,3	230	69
Application PC (idle)	0,4	230	92
AVL Flowsonix Air	-	-	38
Monitore	-	230	16,8
AVL Blow By Meter	-	24	35
Zusatzventilator	1,4	230 p.Str.	600,5
FAN Boom Box	0,6	230	85,8
FEM analog	-	-	20
FEM rest	0,5	24	12

Tabelle 2.2.: Leistungsaufnahme sonstiger Geräte

3. Erarbeitung des Energiesparkonzepts

Aus den gesammelten Informationen der getätigten Messungen und der technischen Ausrüstung des Prüfstandes wird in diesem Kapitel ein Konzept erarbeitet, welches basierend auf dem Vorwissen zum Verwendungsmuster eines Gerätes und seiner Eigenschaften zur Einsparung von Energie führt.

3.1. Zusammenfassung des Ist-Zustandes

Wie in den vorhergehenden Kapiteln bereits ausführlich aufgezeigt, ist ein Prüfstand eine Anlage, welche auf die Messzelle beschränkt, aus mehreren Einzelkomponenten aufgebaut ist. Der Großteil der Komponenten, Geräte oder Maschinen sind elektrische Verbraucher und müssen für ihre bestimmungsgemäße Funktion mit Energie versorgt werden.

Die Frage, zu welcher Betriebszeit, welcher Leistungsbedarf erforderlich ist, kann durch die Auswertung der Messdaten aus der Leistungsmessung im Abschnitt 2.3 bereits beantwortet werden. Weiters kann davon ausgegangen werden, dass die Einzelgeräte bei ihrer Entwicklung nach dem Stand der Technik entworfen und gefertigt wurden (vgl. Abschnitt 6.2). In Kapitel 1 wurde bereits auf das Problem der manuellen Betriebssteuerung der Geräte hingewiesen. Die meisten Geräte weisen leider keinen steuerbaren Bereitschafts-Modus auf und sind daher entweder eingeschaltet und aktiv oder ausgeschaltet. Dieses Verhalten wirkt sich insbesondere stark bei Konditioniereinheiten aus, welche durch ihre Heizfunktion hohe Energieverbräuche generieren. Ziel ist es daher zukünftig alle Komponenten mit den

3. Erarbeitung des Energiesparkonzepts

tatsächlichen Einsatzzeiten zu synchronisieren, dass ein Energieverbrauch auch tatsächlich nur in diesen Zeitintervallen stattfindet.

In Abbildung 3.1 ist ein mögliches Zeitdiagramm der verschiedenen Einsatzszenarien abgebildet. Üblicherweise wird im produktiven Umfeld ein Doppelschichtbetrieb zu 8 Stunden gefahren.¹ Im Dauerbetrieb sind alle Geräte unabhängig von deren funktionellen Nutzung über den gesamten Einsatzzeitraum aktiv. Für die beiden Gerätekategorien Messsysteme und Konditioniergeräte sind angenommene Betriebszyklen im Diagramm darunter dargestellt. Eine Einsparung kann nur in der Zeit zwischen zwei Nutzblöcken erzielt werden.

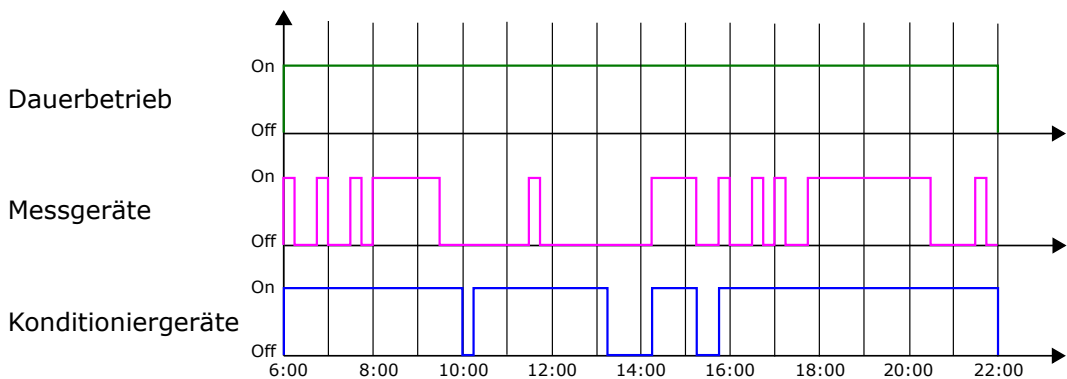


Abbildung 3.1.: Zeitsteuerung der Komponenten für einen typischen Prüfablauf

3.2. Entwicklung des Konzepts

Es bietet sich daher an, eine Steuerung zu entwickeln, welche dafür sorgt, dass das Gerät einerseits zum richtigen Zeitpunkt abgeschaltet wird und andererseits auch wieder für den nächsten Einsatz verfügbar ist. Dazu ist es notwendig zu erkennen, ob und zu welchem Zeitpunkt ein Ausschalten zu einer verbesserten Energiebilanz führen kann. Betrachtet man die

¹Daten und Annahmen zur Verfügung gestellt von AVL List GmbH

3.2. Entwicklung des Konzepts

Messergebnisse aus 2.3 im Detail, ist in allen Fällen ein Einregelverhalten erkennbar. Vereinfacht dargestellt entspricht das einer Regelkurve, an welcher in Abbildung 3.2 die Idee des Konzepts veranschaulicht wird.

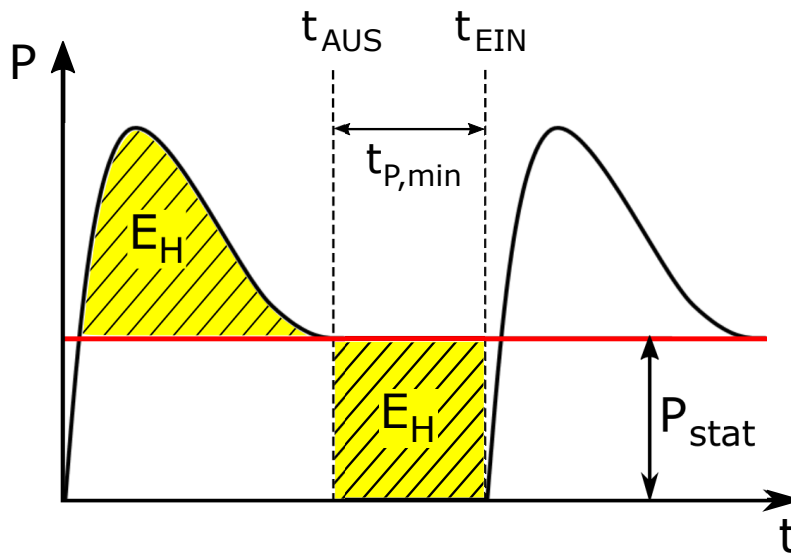


Abbildung 3.2.: Regelkurve: Konzept zur Bestimmung der minimalen Pausenzeit

Integriert man die Leistung über die Zeit, erhält man den Energieverbrauch. Wird bei einem Gerät der Sollwert (eine Temperatur) erreicht, wird der Leistungsbedarf zum Heizen zurückgeregelt. D.h. das System bezieht nur jenen Leistungsaufwand, welcher nötig ist, um die eingestellte Temperatur auf einen konstanten Wert zu halten. Ab diesem Zeitpunkt spricht man vom **stationären Zustand**. Jene Energie, welche zum Einregeln benötigt wird, kann als Heizenergie E_H interpretiert werden.

Aus dem Leistungsbedarf P_{stat} im stationären Zustand und der Heizenergie E_H (Abbildung 3.2) kann über den Zusammenhang 3.1 eine Zeit $t_{P,min}$ errechnet werden. Diese Zeit gibt an wie lange man das Gerät stationär betreiben könnte, um den selben Energieaufwand wie für eine Aufheizphase unter gleichen Bedingungen zu benötigen. Mit anderen Worten entspricht das der **minimalen Pausenzeit** $t_{P,min}$, ab welcher sich ein Abschalten der Anlage energetisch lohnen würde (Worst-Case). Diese Aussage gilt unter der

3. Erarbeitung des Energiesparkonzepts

Annahme, dass für einen erneuten Aufheizvorgang derselbe Energieeinsatz benötigt werden würde.

$$t_{P,min} = \frac{E_H}{P_{stat}} \quad (3.1)$$

Die Einsparung von Energie ist dadurch gegeben, dass das Betriebsverhalten aus einem Nutzungsszenario, wie unter Abbildung 3.1 gezeigt, analysiert und untersucht wird. Dabei gilt es zu bewerten, ob die vorgegebene Zeitspanne $t_{unproduktiv}$ zwischen dem Zeitpunkt an welchem die Funktion des Gerätes nicht mehr benötigt wird und der erneuten geforderten Verfügbarkeit des Gerätes ausreicht, dass das Gerät unter der Berücksichtigung des Aufheizvorganges abgeschaltet werden kann (siehe Abschaltbedingung 3.2).

$$\text{Abschalten?} \begin{cases} \text{Ja} & \text{wenn } t_P = t_{unproduktiv} - t_H > t_{P,min} \\ \text{Nein} & \text{sonst} \end{cases} \quad (3.2)$$

3.3. Messdatenanalyse an den ausgewählten Prüfstandskomponenten

Nachfolgend wird die so genannten „empfohlenen Ausschaltzeit“ - t_{aus} von allen ausgewählten Komponenten des Prüfstandes nach 3.1 berechnet, indem die Messdaten mit einem Analysetool untersucht werden. Die Implementierung dieses Tools ist in Kapitel 5 detailliert ausgeführt.

3.3.1. Analyse Öl-Konditionierung - AVL ConsysLube 25/50

In Abbildung 3.3 ist die Analyse der Öl-Konditionierung abgebildet.

Durch die Analyse der Messdaten werden alle Parameter der Formel 3.1 berechnet und sind in der Tabelle 3.1 eingetragen. Da die Messwerte eine hohe Standardabweichung von über 2000 W aufweisen, können die berechneten Werte stark streuen.

3.3. Messdatenanalyse an den ausgewählten Prüfstandskomponenten

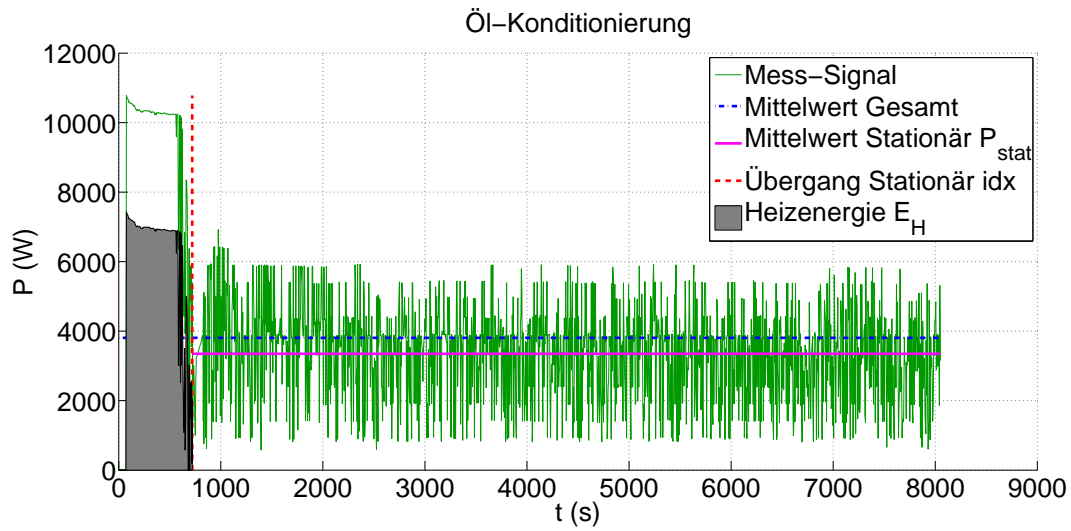


Abbildung 3.3.: Analyse Öl-Konditionierung

Mittlere stationäre Leistungsaufnahme P_{stat}	Heizenergie E_H	Minimale Pausenzeit $t_{p,min}$
3,3 kW	1,1 kWh	00:19:45

Tabelle 3.1.: Charakteristische Kennwerte, Öl-Konditionierung

3. Erarbeitung des Energiesparkkonzepts

3.3.2. Analyse Kraftstoff-Konditionierung - AVL FuelExact

Für die Kraftstoff-Konditionierung ist die Analyse des Messsignals in der nachfolgenden Abbildung 3.4 abgebildet. In Tabelle 3.2 sind die charakteristischen Parameter für diese Anlage gelistet.

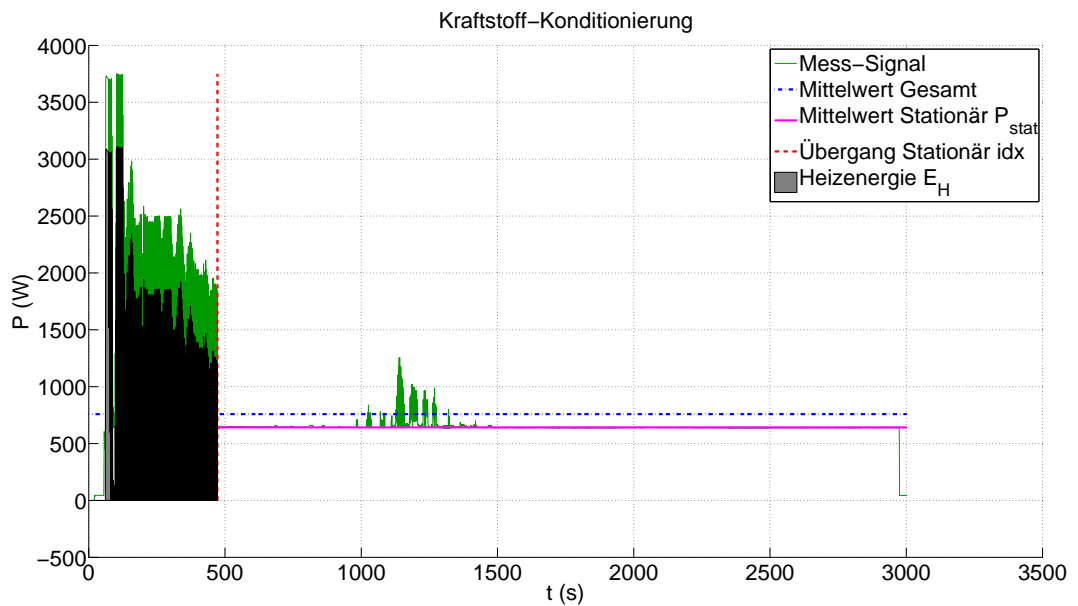


Abbildung 3.4.: Analyse Kraftstoff-Konditionierung

Mittlere stationäre Leistungsaufnahme P_{stat}	Heizenergie E_H	Minimale Pausenzeit $t_{P,min}$
642 W	0,107 kWh	00:10:00

Tabelle 3.2.: Charakteristische Kennwerte, Kraftstoff-Konditionierung

3.3. Messdatenanalyse an den ausgewählten Prüfstandskomponenten

3.3.3. Analyse Ansaugluft-Konditionierung - AVL ConsysAir 1600

In Abbildung 3.5 ist die Analyse des Messsignals für die Ansaugluft-Konditionierung abgebildet. Da die Leistungsmessung mit einem anderen Messgerät durchgeführt wurde (Abschnitt 2.3.1), musste für die Aufbereitung der Messdaten eine Matlab-Funktion (*ACS.m*) entwickelt werden, welche als Vorbereitung zur Auswertung der charakteristischen Parameter von Tabelle 3.3, dient.

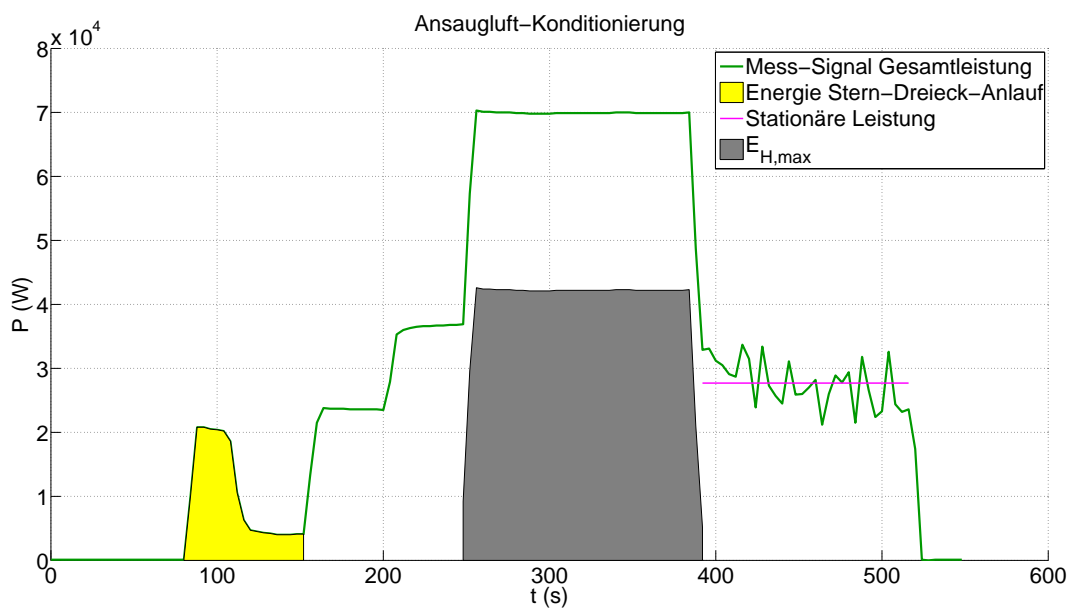


Abbildung 3.5.: Analyse Verbrennungsluft-Konditionierung

Mittlere stationäre Leistungsaufnahme P_{stat}	Heizenergie E_H	Minimale Pausenzeit $t_{P,min}$
27,7 kW	1,613 kWh	00:03:30

Tabelle 3.3.: Charakteristische Kennwerte, Ansaugluft-Konditionierung

3. Erarbeitung des Energiesparkonzepts

3.3.4. Analyse Emissionsmessgerät - AVL AMA i60

Die Analyse des Emissionsmessgerätes ist etwas komplexer, da es mit 8 Verbrennungsgas-Auswerteeinheiten bestückt ist. Die stufenförmigen Erhebungen (Abbildung 3.6), welche mit wechselnden Grüntönen versehen sind, stellen deren Einflüsse in der Gesamtverbrauchskurve dar. Das System muss daher selektiert und einzeln berechnet werden. Da in den meisten Fällen immer alle Geräte gleichzeitig verwendet werden, ist für die Berechnung der Kennwerte eine Addition aller Parameter der Teilsysteme ausreichend.

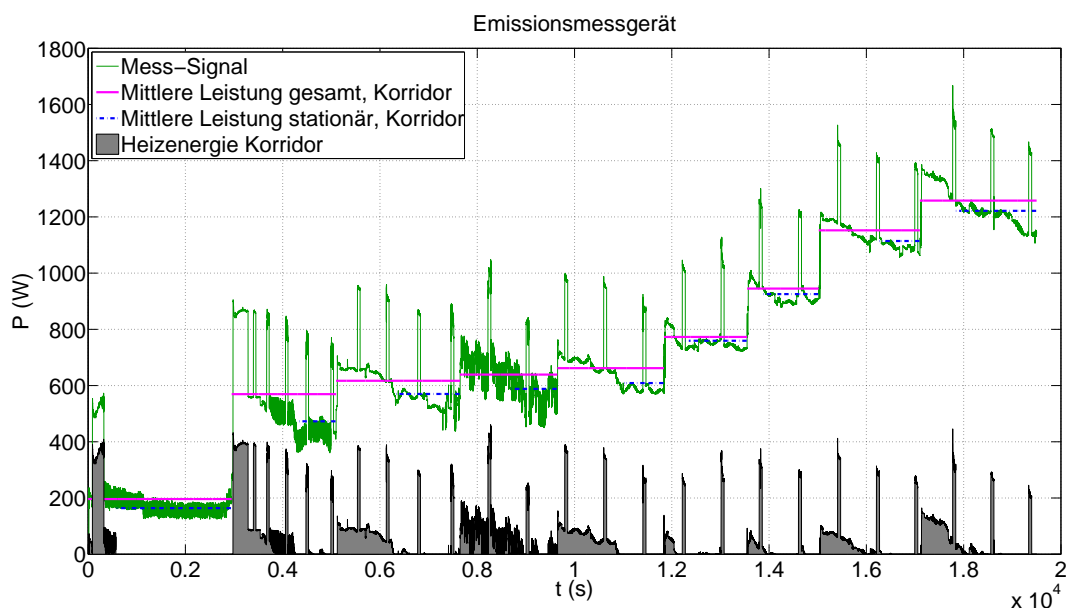


Abbildung 3.6.: Analyse AVL AMA i60

In Tabelle 3.4 sind sowohl die Teilergebnisse aller Auswertemodule, sowie das Gesamtergebnis abgebildet.

3.3. Messdatenanalyse an den ausgewählten Prüfstandskomponenten

Parameter	Ergebnis
Startphase	
Gerät hochfahren E_{Start}	0,027 kWh
Mittlere stationäre Leistungsaufnahme $P_{stat,Start}$	163,9 W
Minimale Pausenzeit $t_{P,min,Start}$	00:09:58
AVL IRD i60 CO L	
Heizenergie E_H	0,068 kWh
Mittlere stationäre Leistungsaufnahme P_{stat}	472,9 W
Minimale Pausenzeit $t_{P,min}$	00:08:41
AVL IRD i60 CO L	
Heizenergie E_H	0,043 kWh
Mittlere stationäre Leistungsaufnahme P_{stat}	261,1 W
Minimale Pausenzeit $t_{P,min}$	00:09:54
AVL COMBI i60 O₂/COH/CO₂ H	
Heizenergie E_H	0,036 kWh
Mittlere stationäre Leistungsaufnahme P_{stat}	182,1 W
Minimale Pausenzeit $t_{P,min}$	00:11:59
AVL COMBI i60 O₂/COH/CO₂ H	
Heizenergie E_H	0,037 kWh
Mittlere stationäre Leistungsaufnahme P_{stat}	184,6 W
Minimale Pausenzeit $t_{P,min}$	00:12:11
AVL Cutter CLD i60 HHD SLQ (NO_x)	
Heizenergie E_H	0,013 kWh
Mittlere stationäre Leistungsaufnahme P_{stat}	314,3 W
Minimale Pausenzeit $t_{P,min}$	00:02:27
AVL Cutter CLD i60 HHD SLQ (NO_x)	
Heizenergie E_H	0,014 kWh
Mittlere stationäre Leistungsaufnahme P_{stat}	330 W
Minimale Pausenzeit $t_{P,min}$	00:02:35

3. Erarbeitung des Energiesparkonzepts

Parameter	Ergebnis
AVL Cutter FID i60 HHD (HC, CH₄)	
Heizenergie E_H	0,028 kWh
Mittlere stationäre Leistungsaufnahme P_{stat}	352,9 W
Minimale Pausenzeit $t_{P,min}$	00:04:46
AVL Cutter FID i60 HHD (HC, CH₄)	
Heizenergie E_H	0,036 kWh
Mittlere stationäre Leistungsaufnahme P_{stat}	271,1 W
Minimale Pausenzeit $t_{P,min}$	00:07:53
Gesamtergebnis	
Heizenergie E_H	0,276 kWh
Mittlere stationäre Leistungsaufnahme P_{stat}	1,222 kW
Minimale Pausenzeit $t_{P,min}$	00:13:33

Tabelle 3.4.: Detaillierte Analyseergebnisse, Emissionsmessgerät

Anmerkung

Die mittlere stationäre Leistungsaufnahme P_{stat} der Teilgeräte enthält bereits die Grundlast der Anlage nach dem Einschalten. Daher können diese Kennwerte nicht für das Gesamtergebnis addiert werden. Ebenso ist die minimale Pausenzeit ein berechneter Wert nach Formel 3.1, welcher aus der Gesamtbetrachtung der Anlage resultiert.

3.3. Messdatenanalyse an den ausgewählten Prüfstandskomponenten

3.3.5. Analyse Vorfilter (HSS) für AMA i60

Das Abgasmesssystem besteht außerdem noch aus einem Vorfilter, welcher sich direkt in der Prüfzelle befindet. Sein nicht unerheblicher Leistungsanteil wird daher ebenfalls miteinbezogen. Das Simulationsergebnis in Abbildung 3.7 dient aufgrund seiner Kurvenform als Musterbeispiel für den gewählten Optimierungsansatz. Aus Tabelle 3.5 können die berechneten Kennwerte für dieses Gerät entnommen werden.

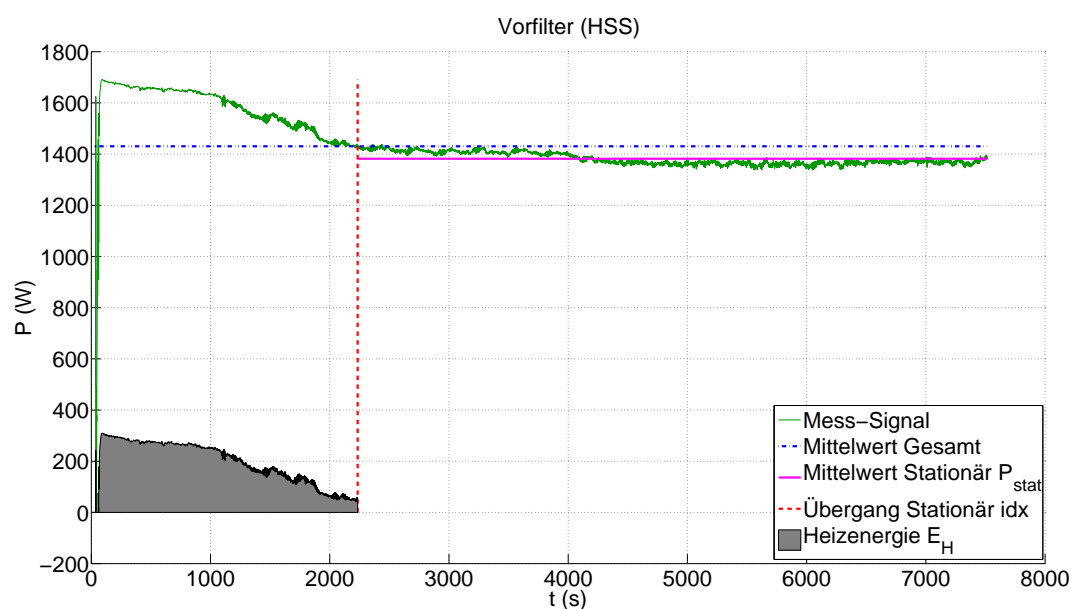


Abbildung 3.7.: Analyse Vorfilter

Mittlere stationäre Leistungsaufnahme P_{stat}	Heizenergie E_H	Minimale Pausenzeit $t_{P,min}$
1,382 kW	0,120 kWh	00:05:13

Tabelle 3.5.: Charakteristische Kennwerte, Vorfilter des AMA i60

3. Erarbeitung des Energiesparkonzepts

3.3.6. Analyse Rußmessgerät - AVL Smokemeter SE415

Das Rußmessgerät besitzt aufgrund seiner internen Struktur ebenfalls einen Aufheizvorgang. Die Analyse der Messdaten führt zu dem in Abbildung 3.8 gezeigten Bild. Da sich der Signalverlauf sehr stark ändert, ist der vom Algorithmus auserwählte Steady-State-Point (*ssp*, senkrecht strichlierte Linie) nicht unmittelbar nachvollziehbar. Aus diesem Grund ist in Abbildung 3.9 zusätzlich noch das (stark) gefilterte Messsignal, mit erkennbarem Übergang in den stationären Betrieb, abgebildet.

Die charakteristischen Parameter können in Tabelle 3.6 eingesehen werden.

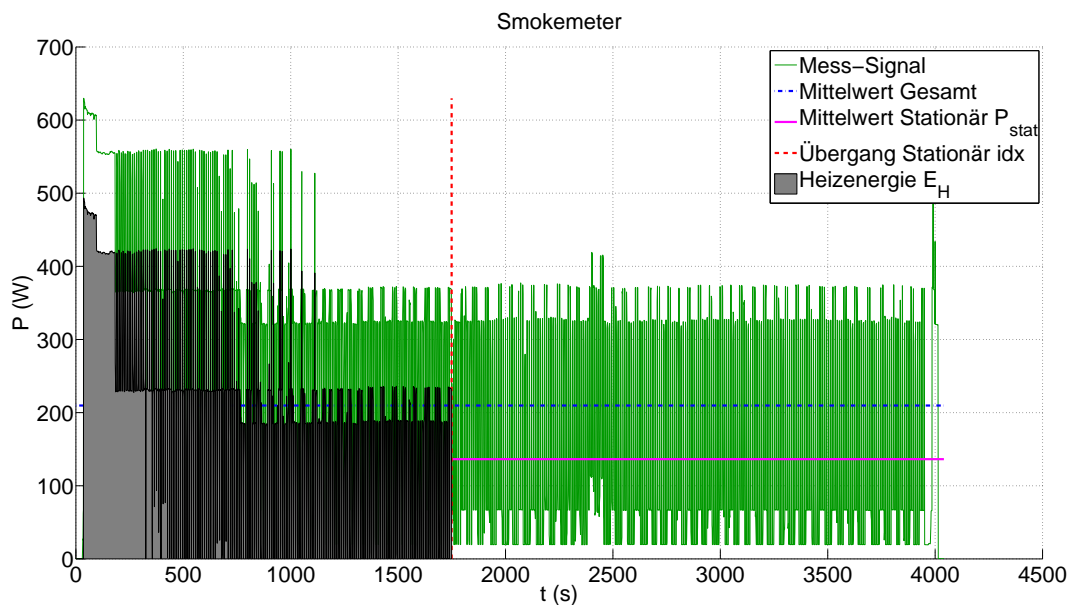


Abbildung 3.8.: Analyse Smokemeter

3.3. Messdatenanalyse an den ausgewählten Prüfstandskomponenten

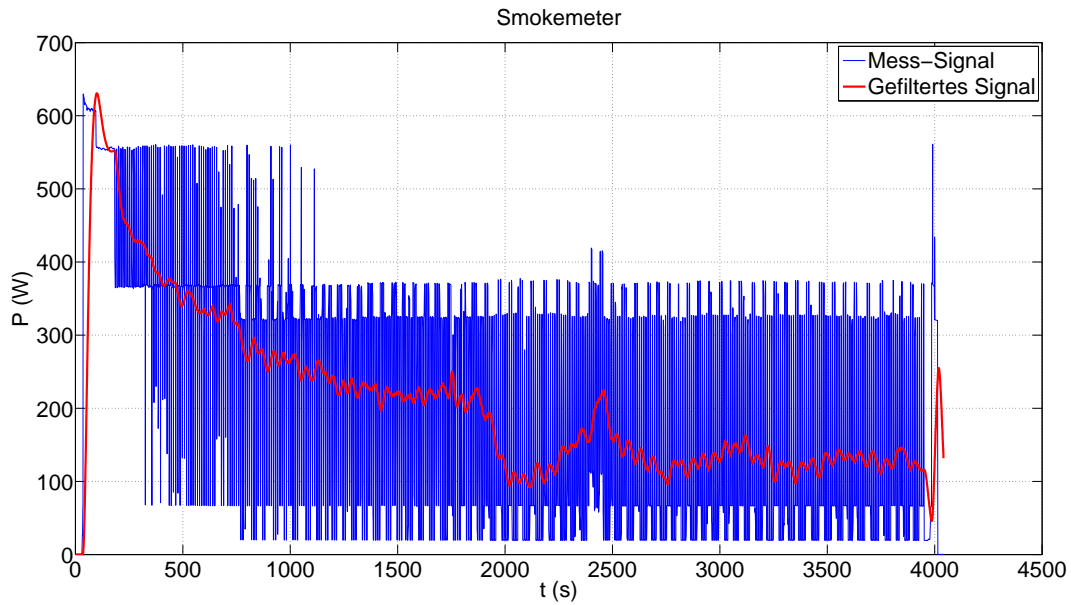


Abbildung 3.9.: Smokemeter, gefiltert

Mittlere stationäre Leistungsaufnahme P_{stat}	Heizenergie E_H	Minimale Pausenzeit $t_{P,min}$
136 W	0,094 kWh	00:41:26

Tabelle 3.6.: Charakteristische Kennwerte, Smokemeter

3. Erarbeitung des Energiesparkonzepts

3.4. Fallstudie zur Berechnung des Einsparungspotentials

Um das Potential der Energieeinsparung bewerten zu können, sind Informationen zu üblichen Verwendungsszenarien der einzelnen Komponenten eines Prüfstandes notwendig. Dafür wurden zusammen mit dem Prüfstandbetreiber mögliche Anwendungsfälle erörtert und aufgestellt. Als eine Referenz für die folgende Studie gilt als Bezugswert der Dauerbetrieb über 24 Stunden. Prüfstände werden wie in Abschnitt 3.1 kurz angesprochen im Doppelschichtbetrieb, typischerweise von 6 Uhr morgens bis 22 Uhr abends betrieben. Bis zum darauffolgenden Tag sollten die Geräte abgeschaltet sein (Vgl. Abbildung 3.1). Da eine Abschaltung manuell durchgeführt werden muss, ist ein ungewollter Dauerbetrieb in der Praxis keine Seltenheit. Daher werden für die Potentialanalyse die Einsparungen mit den konkreten Werten für den 24- bzw. maximal 16-Stunden-Betrieb des Dauerbetriebs bzw. der Doppelschicht miteinander verglichen.

Zu erwähnen ist außerdem noch, dass Optimierungsmaßnahmen im speziellen bei Konditioniergeräten an Dauerlaufprüfständen keinen Sinn machen, da diese Geräte ebenfalls durchgehend verwendet werden. Das würde nur bei Messgeräten von Vorteil sein, welche für Stationärpunktmessungen konzipiert sind.

3.4.1. Getroffene Annahmen für die Geräteverwendung

Für so genannte frei definierte Prüfzyklen oder Messprogramme, d.h. keine gesetzlichen oder Dauerlaufprüfstände, werden nachfolgend beschriebene Muster simuliert und berechnet. Bei der Vielzahl an individuellen Prüfverfahren ist es schwierig exakte Abläufe zu definieren. Für das Einsparungskonzept ist vor allem das Tastverhältnis zwischen Produktivzeiten und Pausen von großer Bedeutung.

Doppelschichtbetrieb:

- **Konditioniergeräte:**
Kleinere Rüst- bzw. Störungspausen von ca. 15 Minuten.

3.4. Fallstudie zur Berechnung des Einsparungspotentials

Bei umfangreicheren Umbauten ist eine unproduktive Zeit im Bereich von 30 Minuten bis ca. 2 Stunden möglich. Das ist wiederum abhängig von der Anzahl an Prüfläufen, welche an einem Tag geplant sind. Ein Dauerlauf, oder eine produktive Zeit von 12 Stunden innerhalb der Doppelschicht gilt dabei als Erfahrungswert.

- **Messgeräte:**

Eine Optimierung der AMA ist aufgrund des Gerätedesigns (Gefahr von Undichtigkeiten durch extreme Temperaturschwankungen beim oftmaligen Abkühlen und Aufheizen) nicht möglich. Die Anlage ist ausschließlich für den Permanentbetrieb entwickelt worden. Die Analyse in Abschnitt 3.3.4 zeigt allerdings das Energiesparpotential dieser Anlage.

Annahme für das *Smokemeter* mit Stationärpunktmessung: Die Dauer zur Aufnahme eines Messpunktes liegt im Sekundenbereich. Da das Aufheizen vor einer erneuten Messung berücksichtigt werden muss, ist dabei das Tastverhältnis besonders ausschlaggebend auf das Ergebnis. Eine Pausenzeit zwischen 2 Messpunkten von ca. 30 Minuten als Richtwert ist der Erfahrung des Prüfstandsbetreibers entnommen. Für die Potentialanalyse wird eine unregelmäßige Abfolge von Pausen angenommen.

Der externe *Vorfilter HSS* würde das gleiche Benutzungsprofil wie die AMA aufweisen. Da dieses Gerät, im Gegensatz zum Emissionsmessgerät selbst, jedoch technisch dazu in der Lage ist, Abschaltungen vorzunehmen, wird hier das idente Muster des Smokemeters angenommen.

3.4.2. Ergebnisse der Fallstudie

Das Einsparungspotential wird nachfolgend, unter Berücksichtigung der im vorherigen Abschnitt 3.4.1 getroffenen Annahmen, nach den in Abbildung 3.1 dargestellten Verwendungsmustern, für alle Komponenten berechnet. Es wird angenommen, dass vor Schichtbeginn, die Geräte vorbereitet,

3. Erarbeitung des Energiesparkonzepts

d.h. auf Temperatur gebracht und einsatzbereit gemacht sind. Der Energieaufwand, welcher dafür benötigt wird, ist ebenfalls berücksichtigt.

Eine Abschätzung über die Größenordnung der Einsparungspotentiale ist durch Kenntnis der Tastverhältnisse (aktive/unproduktive Perioden) in Tabelle 3.7 möglich.

Geräteklasse	Tastverhältnis 24h	Tastverhältnis 16h
Konditioniereinheiten:	14,25 : 9,75	14,25 : 1,75
Messgeräte:	7,25 : 16,75	7,25 : 8,75

Tabelle 3.7.: Tastverhältnisse abhängig vom Referenz-Zeitintervall

Energie kann einerseits dann gespart werden, wenn die entsprechenden Geräte nicht benötigt und daher abgeschaltet werden können und andererseits, wenn durch bewusste Fortführung des Betriebs innerhalb eines kurzen Zeitraums, ein Wegfallen eines neuerlichen Aufheizvorgangs, zu einer positiven Energiebilanz führt. Beim Ausschalten muss zusätzlich sichergestellt sein, dass das System spätestens zu Beginn der darauffolgenden Verwendungsperiode einsatzbereit ist. Diese Forderung führt zu einer tatsächlichen Abschaltzeit im Doppelschichtbetrieb, wie unter 3.3 angegeben ist. Vergleicht man den Schicht- mit dem Dauerbetrieb, so bleibt bei Ersterem das Gerät zusätzlich 8 Stunden ausgeschaltet.

$$t_{P,real} = \sum_{i=1}^{n_p} t_{i,unproduktiv} - t_H \quad \text{wenn 3.2 erfüllt} \quad (3.3)$$

3.4. Fallstudie zur Berechnung des Einsparungspotentials

In Tabelle 3.8 sind alle Ergebnisse und Potentiale dieser Fallstudie in Relation zum Dauerbetrieb erfasst.

	Dauerbetrieb in kWh	Energieverbrauch Abschaltbedingung in kWh	Gesparte Energie in kWh	Gesparte Kilogramm CO ₂ ² in kg CO ₂	Gesparte Kosten ³ in €
AVL ConsysLube 25/50	82,1	53,8	28,4	16,1	16,38
AVL ConsysAir 1600	667,8	406,7	261,1	148,6	66,74
AVL FuelExact	15,6	9,9	5,7	3,3	33,73
AVL Smoke- meter SE415	3,4	2,0	1,4	0,8	13,19
AVL Vorfilter HSS	34,1	18,1	16,1	9,1	-

Tabelle 3.8.: Einsparungspotentiale pro Tag bezogen auf den Dauerbetrieb

¹Emissionsfaktor am Beispiel Deutschlands, siehe Tabelle 5.1

²€0,20/kWh

3. Erarbeitung des Energiesparkonzepts

In Tabelle 3.9 sind analog alle Ergebnisse und Potentiale dieser Fallstudie in Relation zum Doppelschichtbetrieb erfasst.

	Doppelschichtbetrieb (durchgehend) in kWh	Energieverbrauch Abschaltung in kWh	Gesparte Energie in kWh	Gesparte Kilogramm CO₂ in kg CO₂	Gesparte Kosten in €
AVL ConsysLube 25/50	55,4	53,8	1,6	0,9	2,02
AVL ConsysAir 1600	446,2	406,7	39,5	22,5	10,22
AVL FuelExact	10,5	9,9	0,6	0,3	5,06
AVL Smoke-meter SE415	2,3	2,0	0,3	0,2	6,41
AVL Vorfilter HSS	23,1	18,1	5,0	2,9	-

Tabelle 3.9.: Einsparungspotentiale pro Tag bezogen auf den Doppelschichtbetrieb

Aufgerechnet auf ein Jahr⁴, liegen die Einsparungen, in jenen Größenordnungen, wie sie in den Tabellen 3.10 und 3.11, abgedruckt sind.

⁴Produktive Zeit: 50 Wochen, 5 Tage

3.4. Fallstudie zur Berechnung des Einsparungspotentials

	Gesparte Energie in kWh	Gesparte Kilogramm CO₂ in kg CO₂	Gesparte Kosten in €
AVL ConsysLube 25/50	7091,6	4035,1	4094,12
AVL ConsysAir 1600	65270,4	37138,9	16685,11
AVL FuelExact	1429,4	813,3	8432,48
AVL Smokemeter SE415	354,4	201,7	3297,86
AVL Vorfilter HSS	4016	2285,1	-

Tabelle 3.10.: Zusammenfassung Einsparungspotentiale im Jahr (Dauerbetrieb)

	Gesparte Energie in kWh	Gesparte Kilogramm CO₂ in kg CO₂	Gesparte Kosten in €
AVL ConsysLube 25/50	394,1	224,3	504,63
AVL ConsysAir 1600	9870,4	5616,3	2555,11
AVL FuelExact	145,2	82,6	1265,63
AVL Smokemeter SE415	81,7	46,5	1601,31
AVL Vorfilter HSS	1252,8	712,9	-

Tabelle 3.11.: Zusammenfassung Einsparungspotentiale im Jahr (Doppelschichtbetrieb)

3. Erarbeitung des Energiesparkonzepts

3.4.3. Diskussion

In den Tabellen 3.8, 3.9, 3.10 und 3.11 sind alle berechneten Ergebnisse der Fallstudie und somit des Einsparungspotentials abgebildet.

Würden alle Maschinen am Ende des 16-stündigen Doppelschichtbetriebes bestimmungsgemäß abgeschaltet werden, würde das Einsparungspotential bereits mindestens 33% bezüglich des Dauerbetriebes und wegen der kürzeren aktiven Zeitspanne ausmachen. Durch die Anwendung des zuvor entwickelten Konzeptes für eine intelligente Ein- und Abschaltsteuerung der einzelnen Komponenten, kann, wenn man die errechneten Werte in den Tabellen miteinander vergleicht, gezeigt werden, dass noch weiteres Potential für Einsparungen vorhanden ist. Wie unter 3.4.2 bereits erwähnt, setzt sich das Einsparungspotential aus mehreren Faktoren zusammen:

- Die gesamte Zeitdauer, in der das System tatsächlich abgeschaltet ist. (Anwendung von Bedingung 3.2 unter Berücksichtigung von Formel 3.3)
- Den Einfluss, welchen die Energiebilanz aus zusätzlichen Energieaufwänden bei öfter stattfindenden Aufheizvorgängen und Energieeinsparungen während der tatsächlicher Abschaltzeit, auf den Gesamtenergieverbrauch ausübt.

In Tabelle 3.12 sind alle, für die Fallstudie berechneten, tatsächlichen Abschaltzeitintervalle, sowie die prozentualen Einsparungspotentiale angeführt.

Laut dieser Fallstudie zeichnet sich insgesamt ein signifikant hohes Potential zur Energieeinsparung ab. Es ist umso größer, je öfter eine Komponente nicht genutzt wird. Diese Tatsache wird besonders im Vergleich des Dauerbetriebes mit dem Doppelschichtbetrieb sichtbar, wo nach dem 16-stündigem Betrieb alle Komponenten und Geräte abgeschaltet werden. Die individuellen Ergebnisse sind von der Aufheizdauer des jeweiligen Systems und jener, vom Nutzungsprofil zur Verfügung gestellten unproduktiven Zeit abhängig, anhand derer die Gerätesteuerung im Sinne einer Energieeinsparung eingreifen kann.

3.4. Fallstudie zur Berechnung des Einsparungspotentials

	Tatsächliche Abschaltzeit $t_{p,real}$ in h	Einsparungs- potential in % für Dauerbetrieb	Einsparungs- potential in % für Doppel- schichtbetrieb
AVL ConsysLube 25/50	0,8	34,6	2,9
AVL ConsysAir 1600	1,6	39,1	8,9
AVL FuelExact	1,24	36,5	5,7
AVL Smokemeter SE415	3,53	41,2	13,0
AVL Vorfilter HSS	3,64	47,2	21,6

Tabelle 3.12.: Vergleich Einsparungspotentiale in Prozent

4. Optimierung des Energiebedarfs beim Prüflauf

Das gesteuerte Ein- und Ausschalten wie es in Kapitel 3 gefordert wurde, kann durch weitergehende Analyse und der Berücksichtigung weiterer Einflussfaktoren noch angepasst bzw. optimiert werden. In diesem Kapitel wird eine Maßnahme zur weiteren Energieeinsparung vorgestellt und hinsichtlich deren Effizienz untersucht.

4.1. Berücksichtigung der thermischen Zeitkonstante

Ohne Berücksichtigung der thermischen Zeitkonstante wurde bisher davon ausgegangen, dass zum berechneten Zeitpunkt $t_{P,min}$ das Gerät vollständig abgekühlt ist und daher unter vollem Energieeinsatz $E_{H,max}$ wieder von Raumtemperatur auf die Soll-Temperatur aufgeheizt ist. Eine verfeinerte Methode zur Analyse des Energiekonsums einer Anlage am Prüfstand besteht durch Berücksichtigung der thermischen Zeitkonstante dieses Systems. Durch die Wärmekapazität des verwendeten Mediums bleibt Wärmeenergie nach dem Ausschalten gespeichert. Bildet man die Strecke einer Anlage in einem geeigneten Modell ab, kann daraus die Zeitkonstante ermittelt werden.

Das Einsparungspotential unter Berücksichtigung der thermischen Zeitkonstante ist unter folgenden Gesichtspunkten charakterisiert (vergleiche dazu Abbildung 4.1 sowie ergänzend Tabelle 4.1).

4.1. Berücksichtigung der thermischen Zeitkonstante

In der Praxis sind die Prüfzyklen und somit der Zeitpunkt der unproduktiven Nutzung t_{AUS} sowie die geforderte Verfügbarkeit t_{Bereit} eines Gerätes fest am Prüfstand vorgegeben. D.h. es existieren Zeitdiagramme nach dem Vorbild von Abbildung 3.1. Einsparungspotentiale sind daher unabdingbar an diese Einschränkung geknüpft und erfordern eine Analyse der gegenseitigen Verhältnisse innerhalb dieses Zeitraums. Die tatsächliche Pausenzeit t_p , in welcher Energie gespart werden kann, ist immer von der Dauer der Aufheizphase t_H abhängig. Um dieses Zeitintervall ist der Zeitpunkt des Einschaltens t_{EIN} von jenem der geforderten Wiederverfügbarkeit t_{Bereit} verschoben. Wie lange die Anlage zum Regeln auf den Sollwert braucht ist nun aber vom Ist-Zustand, d.h. von der Temperatur und der gespeicherten Restwärme des zu konditionierenden Mediums, abhängig. Durch Kenntnis der thermischen Zeitkonstante des Systems kann der Abkühlvorgang und somit die Abkühlzeit t_{AK} nachempfunden werden und stellt einen Parameter für die Bewertung der optimalen Steuerstrategie zur Energiebedarfsminimierung dar.

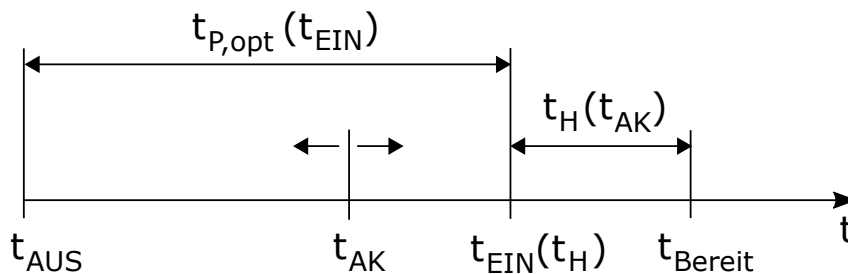


Abbildung 4.1.: Zeitzusammenhänge für die Methode

4. Optimierung des Energiebedarfs beim Prüflauf

Bezeichnung	Beschreibung
t_{AUS}	Zeitpunkt an dem das Gerät nicht mehr benötigt wird (vorgegeben)
t_{Bereit}	Zeitpunkt an dem das Gerät wieder einsatzbereit sein soll (vorgegeben)
t_{AK}	Zeitpunkt an dem das Gerät vollständig abgekühlt ist (systembedingt vorgegeben)
t_H	Dauer für den Aufheizvorgang (abhängig vom Fortschritt der Abkühlung bzw. des Energieeinsatzes)
t_{EIN}	Zeitpunkt zur erneuten Aktivierung des Gerätes (abhängig von der Aufheizzeit)
$t_{P,opt}$	Optimierte Pausenzeit (abhängig vom Einschaltzeitpunkt)

Tabelle 4.1.: Erläuterung für Abbildung 4.1

4.2. Steuerstrategie zur Optimierung des Energiebedarfs

Die Information über die Abkühlzeitdauer t_{AK} liefert den Grundstein für die Planung des optimalen Einschaltzeitpunkts t_{EIN} bzw. der optimalen Pausenzeit $t_{P,opt}$. Dabei sind folgende Fälle zu unterscheiden. Siehe dazu auch Abbildung 4.2:

$$1. \text{ Fall: } t_{AK} \leq t_{Bereit} - t_{H,max} : \begin{cases} E_{H,max} \\ t_{H,max} \\ t_{EIN} = t_{Bereit} - t_{H,max} \\ t_{P,opt} = t_{EIN} - t_{AUS} \end{cases}$$

keine Nutzung der Restwärme.

4.2. Steuerstrategie zur Optimierung des Energiebedarfs

$$2. \text{ Fall: } t_{AK} > t_{Bereit} - t_{H,max} : \begin{cases} E_H = [0, E_{H,max}) \\ t_H = [0, t_{H,max}) \\ t_{EIN} = t_{Bereit} - t_H \\ t_{P,opt} = t_{EIN} - t_{AUS} \end{cases}$$

Nutzung der Restwärme.

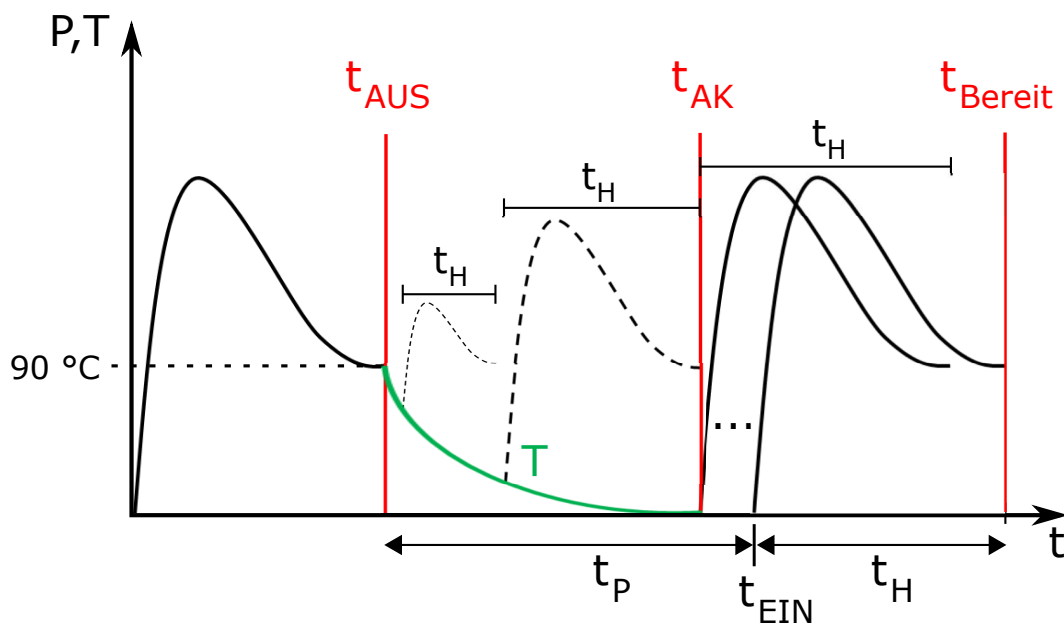


Abbildung 4.2.: Prinzip zur optimalen Wahl der Zeitsteuerung

Es müssen also für den 2. Fall alle Möglichkeiten zu Erlangung der optimalen Energieeffizienz für die Wahl von $t_{P,opt}$ simuliert und berechnet werden. Ziel ist es den Einschaltzeitpunkt t_{EIN} so lange wie möglich hinauszuzögern, sodass die Pausenzeit maximiert werden kann. Die Bedingung für $t_{P,opt}$ ist unter 4.1 angegeben:

$$t_{Bereit} > \max(t_{P,opt}) + t_H \quad (4.1)$$

Aus dem Resultat folgt die optimale Zeitsteuerung zur Erreichung des minimalen Energieaufwandes für den Betrieb einer Komponente des Prüfstandes.

4. Optimierung des Energiebedarfs beim Prüflauf

Diese Methode ist beliebig, für ähnliche Komponenten und Geräte anderer Prüfstandstypen skalierbar.

4.3. Entwicklung des Modells

Aufgrund der hohen Wärmekapazität von Öl und seiner zu erwarteten hohen Zeitkonstante, werden alle weiteren Ausführungen am Beispiel der Öl-Konditionierung durchgeführt. Daraus lässt sich der maximale Einfluss der Abkühlung ableiten und es kann eine Aussage darüber getroffen werden, ob sich diese Optimierungsmethode auch tatsächlich lohnt.

Betrachtet man eine Konditioniereinheit auf niedriger Detailebene und lässt dabei den Sekundärkreis (Kühlkreis) weg, setzt sich das Gerät aus dem Medium (hier: Öl) und einen elektrischen Heizer zusammen, welcher das Öl auf Temperatur bringt. Der Aufheizvorgang des Mediums entspricht im Wesentlichen einer Wärmeübertragung, welche von einem stark erwärmten elektrischen Widerstand durch hohe Ströme erzeugt wird. Der Temperaturanstieg kann durch ein PT₁-Verhalten beschrieben werden.

Durch die bestehende Analogie zwischen den Gesetzen der Wärme- und der Elektrizitätslehre sind folgende Formeln von Bedeutung:

Die Wärmeenergie ΔQ_{th} ist nach Formel 4.2 definiert:

$$\Delta Q_{th} = c \cdot m \cdot \Delta\theta \quad \text{in J} \quad (4.2)$$

Der Wärmestrom \dot{Q}_{th} ist nach Formel 4.3 definiert:

$$\dot{Q}_{th} = \frac{dQ_{th}}{dt} \quad \text{in W} \quad (4.3)$$

Die Wärmekapazität C_{th} berechnet sich über die spezifische Wärmekapazität c in $\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$ nach Formel 4.4 definiert:

$$C_{th} = c \cdot m \quad \text{in} \quad \left[\frac{J}{K}\right] \quad (4.4)$$

4.3. Entwicklung des Modells

Der elektrische Zusammenhang von Strom i , Spannung U und Ladung Q zur Kapazität C ist nach Formel 4.5 definiert:

$$i(t) = \frac{dQ}{dt} = C \cdot \frac{dU}{dt} \quad (4.5)$$

Elektrische Energie ist definiert nach 4.6:

$$\Delta E = \int_{t_1}^{t_2} i(t) \cdot u(t) \cdot dt \quad \text{in } \text{Ws} \quad (4.6)$$

Elektrische Verlustleistung ist definiert nach 4.7:

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} \quad \text{in } \text{W} \quad (4.7)$$

Somit ergibt sich der Zusammenhang in 4.8 und 4.9:

$$C_{th} = \frac{\Delta Q_{th}}{\Delta \theta} \quad (4.8)$$

$$C = \frac{Q}{U} \quad (4.9)$$

Die Temperatur T in K entspricht demnach der Spannung U in V (Bsp. Kondensator). Die Wärmekapazität C_{th} in $\left[\frac{\text{J}}{\text{K}}\right]$ entspricht der elektrischen Kapazität C in F. Integriert man die Leistung über die Zeit t , erhält man die Energie.

Eine Parallelschaltung von R und C , wie in Abbildung 4.3 dargestellt, wird von einer Stromquelle gespeist und stellt ein stark vereinfachtes Modell für die internen physikalischen Abläufe dar.

Die Beziehung 4.10 zwischen Strom und Spannung des vorliegenden Systems, ergibt sich durch Lösung der Differentialgleichung mit Anfangswert.

$$u(t) = I_0 \cdot R \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (4.10)$$

4. Optimierung des Energiebedarfs beim Prüflauf

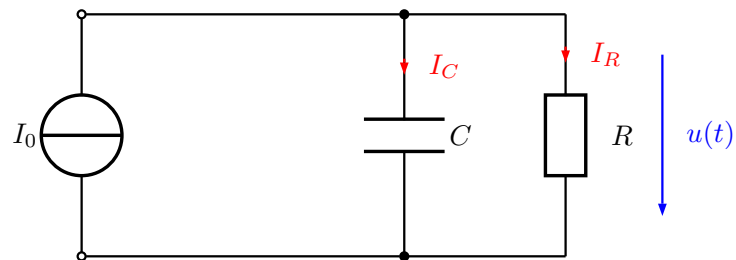


Abbildung 4.3.: Schaltbild thermisches Modell

4.3.1. Simulation mit Matlab/Simulink®

Die Schaltung aus Abbildung 4.3 wird in Simulink durch eine Differentialgleichung der Form 4.13 nachgebildet. Die Eingangsgröße I_0 entspricht also der aufgewendeten Leistung P , u entspricht der zu regelnden Temperatur T .

I_R ist durch Formel 4.11 definiert:

$$I_R = \frac{u(t)}{R} \quad (4.11)$$

Für I_C kann man außerdem wie unter 4.12 angegeben, schreiben:

$$I_C = I - I_R \quad (4.12)$$

Daraus ergibt sich folgende Differentialgleichung für die Ausgangsgröße u (Formel 4.13):

$$u = \frac{1}{C} \cdot \int I_C \cdot dt \quad (4.13)$$

In Simulink wird die RC-Parallelschaltung wie in Abbildung 4.4 gezeigt, implementiert.

4.3. Entwicklung des Modells

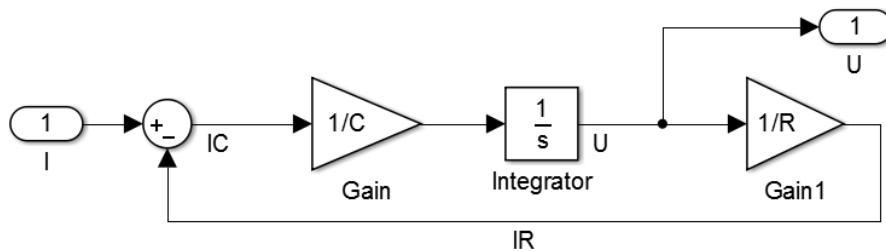


Abbildung 4.4.: RC-Parallelschaltung in Simulink modelliert

Das Modell wird um einen Regelkreis erweitert. Das RC -Glied entspricht darin der Regelstrecke. In Abbildung 4.5 ist das Gesamtmodell für die Simulation abgebildet.

Ziel ist es, durch geeignete Wahl der Parameter das Modell so anzupassen, dass es dem Verhalten der Realität entspricht. Das Messergebnis der Öl-Konditionierung dient dazu als Referenz. Die einzustellenden beiden Unbekannten, die Parameter für R und C , müssen noch ermittelt werden. Ersterer limitiert nach Formel 4.10 den Endwert der Temperatur und schließlich auch jenen des Leistungsbedarfs für die Heizung. Die Kapazität könnte durch Berechnung nach Formel 4.4 und durch Kenntnis der Medieigenschaften berechnet werden. Analysiert man das Gesamtsystem eingehender, würde auch ein Wärmeübergang zwischen Öl und dem Material der Ölwanne bzw. dem Kurbelgehäuse und eventuell auch des Zylinderkopfes stattfinden. Das erwärmte Öl würde verzögert auch die Metalle des Motorblocks erwärmen und Wärme als Verluste an die Umgebung abgeben. Dieses Verhalten ist auch in den Messdaten der Öl-Konditionierung beim Einregeln in den stationären Zustand erkennbar. Um auch dieses Systemverhalten abzubilden, würden noch weitere Informationen zu den Materialien und deren wechselseitige Beeinflussung benötigt werden, mit deren Hilfe man dann das Thermomodell entsprechend erweitern könnte. Ziel des vereinfachten Modells ist es aber eine grobe Abschätzung des Zeitverhaltens zu erhalten, um durch seine Berücksichtigung in der Optimierungsstrategie über eine sinngemäße Anwendung entscheiden zu können.

Für die Simulation wird zuerst R , wie oben bereits erwähnt und durch Formel 4.10 begründet, empirisch durch Wahl ermittelt. C wird ebenfalls an den

4. Optimierung des Energiebedarfs beim Prüflauf

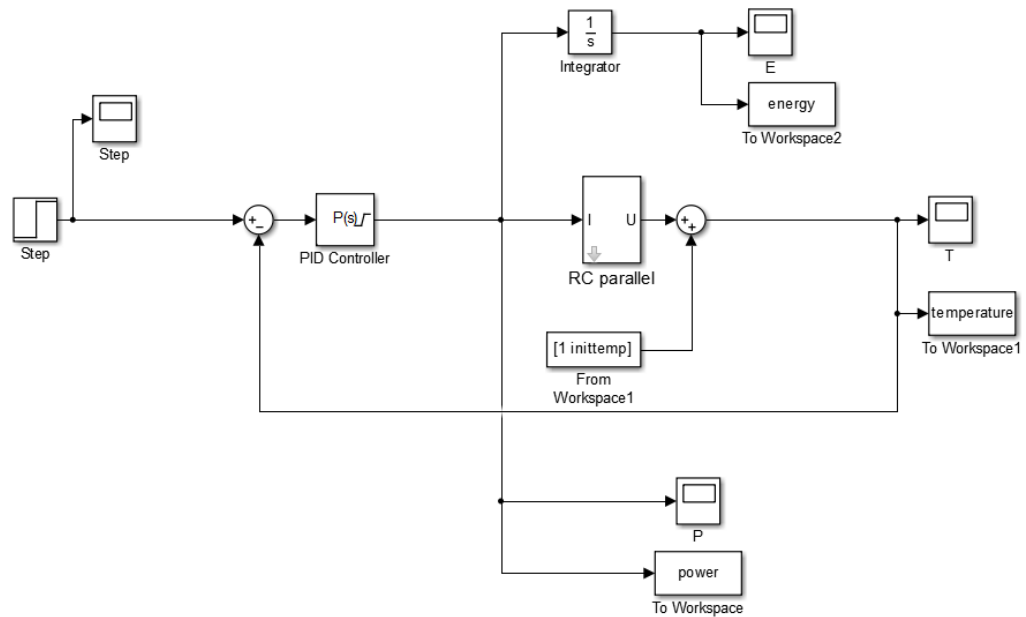


Abbildung 4.5.: Regelkreis Thermomodell

realen Leistungsverlauf angenähert, da die Wärmekapazität des Öls im vereinfachten Modell allein nicht ausreicht. Durch Verwendung eines P-Reglers mit sehr hohem Verstärkungsfaktor und Begrenzung kann im Sinne der Stabilität (Strecke hat integrierendes Verhalten) ein ähnliches Systemverhalten nachgestellt werden. Es fehlt jedoch aufgrund der Modellbeschränkung das Einregelverhalten auf den stationären Zustand. In Abbildung 4.6 ist die Gegenüberstellung des realen gemessenen Leistungsbedarfs und jener aus dem Modell generierten Leistungskurve für den Fall des Aufheizvorganges, von 22 °C bis zum gewünschten Sollwert von 90 °C, in einem Diagramm abgebildet. Das Modell ist aber trotz seiner Einschränkungen in der Lage das Systemverhalten relativ gut nachzubilden.

4.4. Resultate und gewonnene Informationen

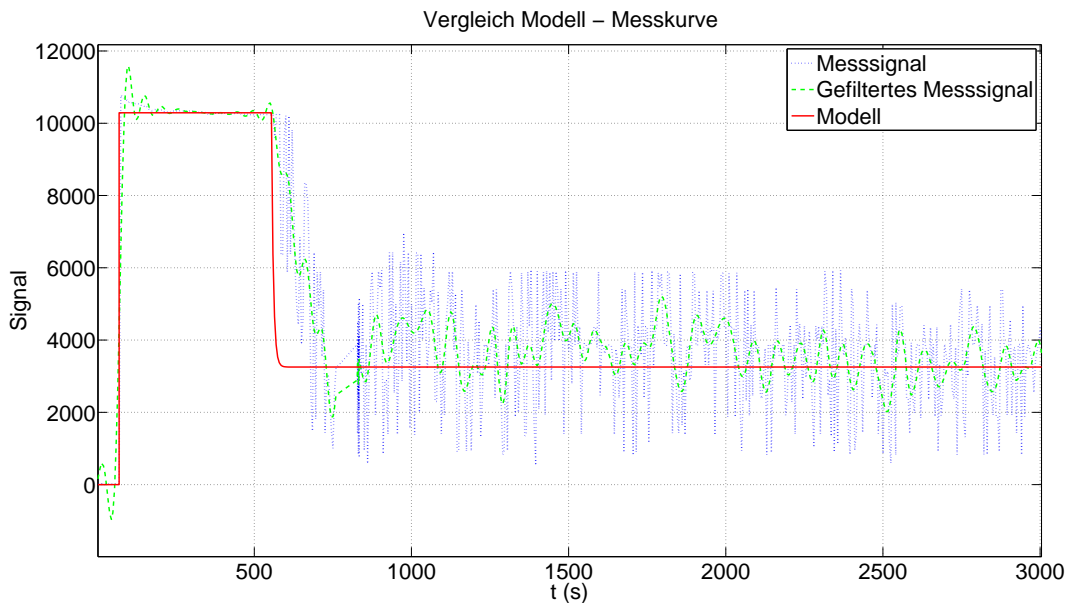


Abbildung 4.6.: Vergleich Messsignal - Modell

4.4. Resultate und gewonnene Informationen

Die gewählten Parameter für R und C sind unter 4.14 angeführt:

$$R = 0,0208 \quad C = 62064 \quad (4.14)$$

Die **thermische Zeitkonstante** beträgt daher nach 4.15 mit den Parametern aus 4.14:

$$\tau = R \cdot C \approx 1291 \text{ s} \quad (4.15)$$

Damit kann die Abkühlzeit unter der Annahme von 22°C Raumtemperatur und nach Abänderung von Formel 4.10 (für Abkühlen) nach 4.16 angegeben werden. Die Abkühlkurve, ausgehend vom Sollwert von 90°C ist in Abbildung 4.7 dargestellt.

$$22 = 90 \cdot e^{-\frac{t_{AK}}{\tau}} \Rightarrow t_{AK} \approx 1820 \text{ s} \quad (4.16)$$

4. Optimierung des Energiebedarfs beim Prüflauf

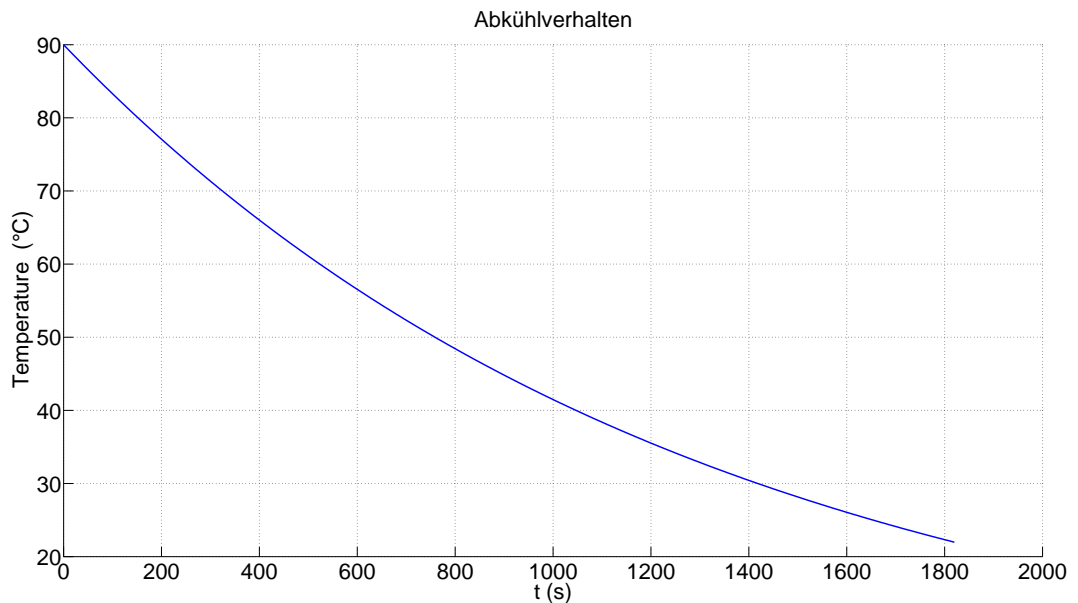


Abbildung 4.7.: Abkühlkurve Modell Öl-Konditionierung

Gemäß Abbildung 4.8 kann die Zeitdauer für den Aufheizvorgang zum Erreichen der Soll-Temperatur über die Länge der Pausenzeit entnommen werden. Die Aufheizzeit richtet sich nach den in Abschnitt 4.2 angestellten Überlegungen, wonach weniger Heizenergie benötigt wird, je mehr Restwärme sich noch im System befindet. Gleichzeitig braucht das System länger zum Erreichen der Wiederverfügbarkeit, je weiter der Abkühlvorgang fortgeschritten ist. In Abbildung 4.9 sind die simulierten Verläufe des benötigten Energieaufwandes über die Pausenzeit abgebildet. Es zeigt, dass der benötigte Energieeinsatz zum erneuten Aufheizen stark vom aktuellen thermischen Zustand der Anlage bzw. des Mediums abhängt und verhält sich daher ähnlich zur Aufheizzeit. Der Knick im Verlauf kennzeichnet das Zurücknehmen des Leistungsbedarf nach Erreichen des Sollwertes. Der Energieverbrauch steigt zum Aufheizen rapide an, regelt das System ein, wird nur noch jene Energie zum Halten der Temperatur aufgewendet. Vergleicht man die Abbildungen 4.9 und 4.8, so erkennt man den Zusammenhang beider Größen: Die Heizintervalle zwischen 100 s und knapp 600 s befinden sich vor der Anstiegsänderung in den Energieverläufen.

4.4. Resultate und gewonnene Informationen

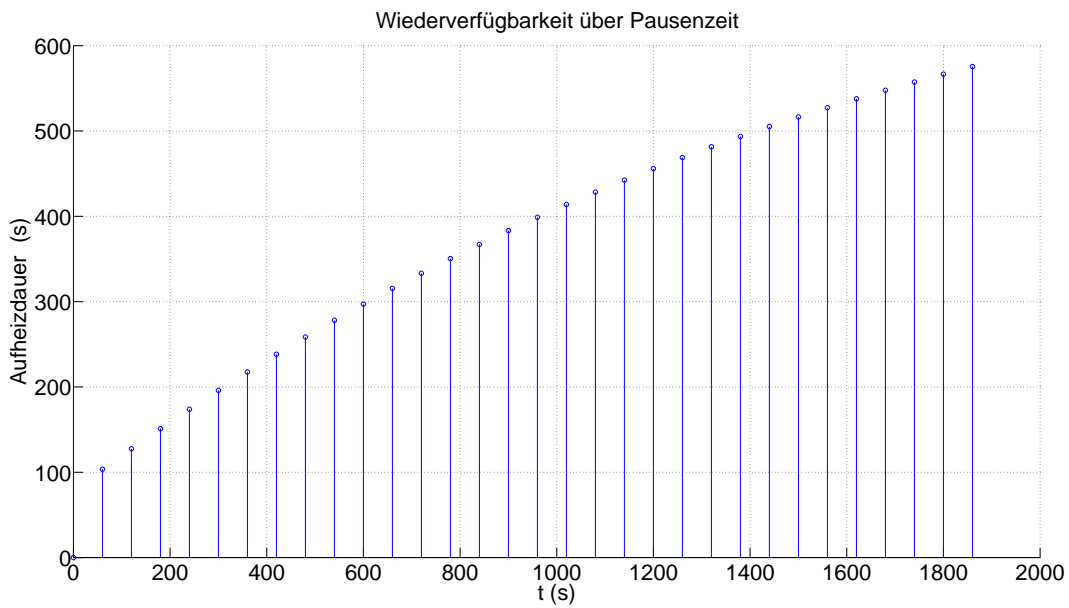


Abbildung 4.8.: Aufheizdauer über Pausenzeit in 60 s Schritten

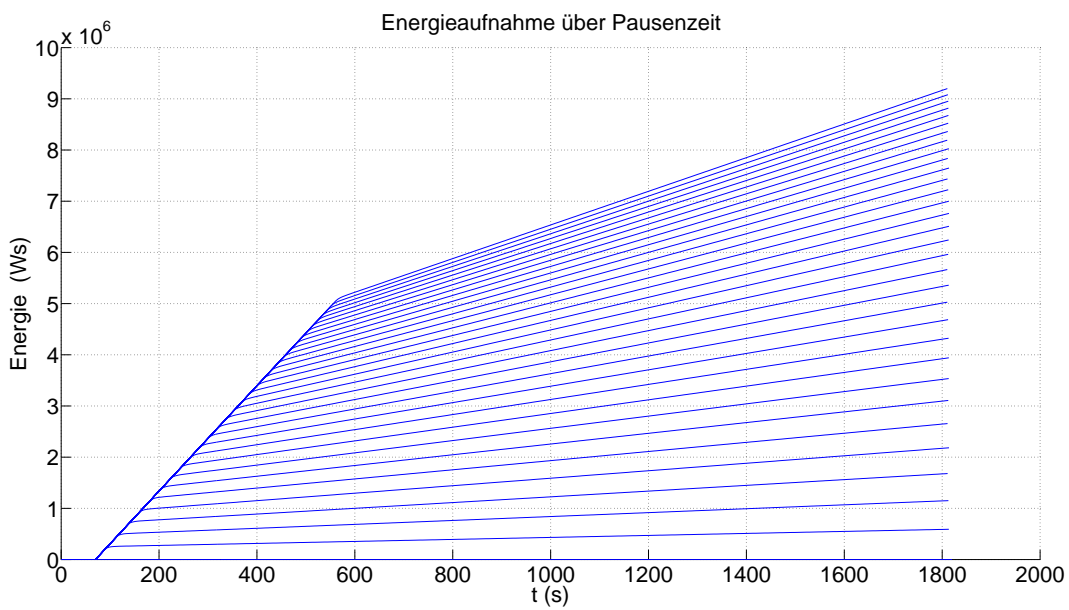


Abbildung 4.9.: Energieaufnahme über Pausenzeit in 60 s Schritten

4. Optimierung des Energiebedarfs beim Prüflauf

4.4.1. Einsparungspotential bei der Öl-Konditionierung

Es folgt die Analyse des zu erwartenden Einsparungseffekts im Falle der Öl-Konditionierung, durch die in den vorhergehenden Abschnitten 4.1 und 4.2 beschriebenen Maßnahmen und Bedingungen. Das Verwendungsszenario der Öl-Konditionierung wurde bereits im Zeitdiagramm 3.1 definiert.

Die Methode wird anhand eines Zustandswechsels gezeigt und gestaltet sich für alle weiteren Pausen des Verwendungsmusters, entsprechend analog. Aus 4.16 ist die Abkühlzeit $t_{AK} = 1820$ s bereits bekannt. t_{Bereit} ist durch den Zeitpunkt des Starts der nächsten Produktivperiode gegeben und beträgt 15 Minuten oder 900 s. Für die Bedingungen 4.2 fehlt also noch die maximale Aufheizzeit $t_{H,max}$. Aus Abbildung 4.8 kann dieser Wert bei $t = 1820$ s abgelesen werden und ergibt eine Zeitdauer von ca. 570 s.

$$15 \text{ Minuten Pause: } 1820 \text{ s} > 330 \text{ s} \rightarrow \text{Fall 2} \quad (4.17)$$

Für den betrachteten Anwendungsfall, treten gemäß Abbildung 3.1, noch Pausen zu 60 bzw. 30 Minuten auf. Die Kategorisierung bezüglich der Steuerstrategie wird analog in 4.18, sowie in 4.19 durchgeführt.

$$60 \text{ Minuten Pause: } 1820 \text{ s} < 3030 \text{ s} \rightarrow \text{Fall 1} \quad (4.18)$$

$$30 \text{ Minuten Pause: } 1820 \text{ s} > 1230 \text{ s} \rightarrow \text{Fall 2} \quad (4.19)$$

Bei den Zeitintervallen, bei denen Fall 2 eintritt, müssen alle möglichen Energiebedarfsfälle miteinander verglichen werden. Kommt Fall 1 zur Anwendung, ist die Pausenzeit länger als die Auskühlzeit und es muss daher das System mit maximaler Aufheizzeit für den nächsten Einsatz vorbereitet werden.

Die optimale Pausenzeit $t_{P,opt}$ befindet sich für die 15-minütige Pause im Intervall zwischen 0 s und $t_{Bereit} = 900$ s. Aus Abbildung 4.8 kann nach Bedingung 4.1 für $t_{P,opt}$ eine maximale Pausenzeit von 600 s bei einer zu erwartenden Aufheizdauer von $t_H = 297$ s abgelesen werden. Für die 30-Minuten-Pause beträgt die optimale Pausenzeit und die dafür notwendige Heizzeit 1310 s bzw. 479 s.

Daraus kann für das Verwendungsszenario der Gesamtenergiebedarf wie folgt berechnet werden:

4.4. Resultate und gewonnene Informationen

1. Zu Beginn des Tages, wird die Anlage von Raumtemperatur auf den Sollwert mit $E_{H,max} = 5094000 \text{ Ws}$ aufgeheizt.
2. Bis zum Ende der ersten Produktivphase bleibt das System im stationären Zustand mit konstanter Energieaufnahme.
3. Ab hier erfolgt die individuelle Betrachtung der auftretenden Pause-Perioden.
 - 15-Minuten-Pause:
Innerhalb der Pausenzeit $t_{P,opt} = 600 \text{ s}$ fällt durch Abschaltung kein Energieverbrauch an. Vor der nächsten Verwendungsperiode wird die Anlage mit dem Energieeinsatz $E_{H,opt} = 2255000 \text{ Ws}$ bei $t = 297 \text{ s}$ (Zu Entnehmen aus Abbildung 4.10) einsatzbereit gemacht.
 - 60-Minuten-Pause:
Es kommt zu keiner zusätzlichen Einsparung, da die Abkühldauer kürzer als die Verwendungspause ist. Die Öl-Konditionierung muss mit dem höchsten Energiebedarf das Öl von vorn aufheizen.
 - 30-Minuten-Pause:
Innerhalb der Pausenzeit $t_{P,opt} = 1310 \text{ s}$ fällt durch Abschaltung kein Energieverbrauch an. Vor der nächsten Verwendungsperiode wird die Anlage mit dem Energieeinsatz $E_{H,opt} = 4142000 \text{ Ws}$ bei $t = 479 \text{ s}$ (Zu Entnehmen aus Abbildung 4.11) einsatzbereit gemacht.
 - Innerhalb jeder Produktivphase fällt ein konstanter Verbrauch im stationären Zustand an.

4. Optimierung des Energiebedarfs beim Prüflauf

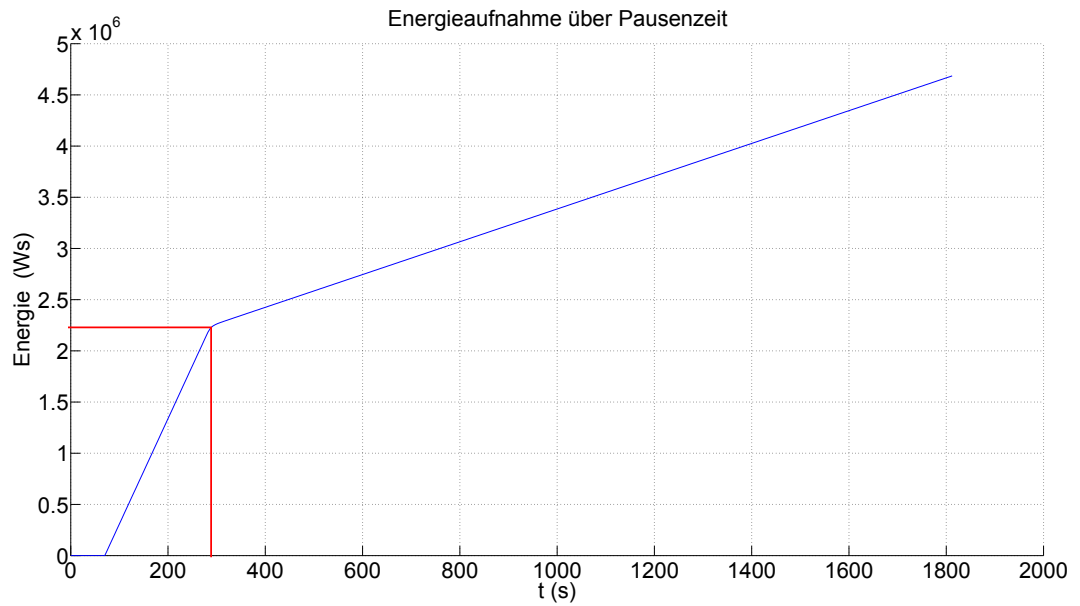


Abbildung 4.10.: Energieaufnahme nach 600 s Abkühldauer (15-Minuten-Pause)

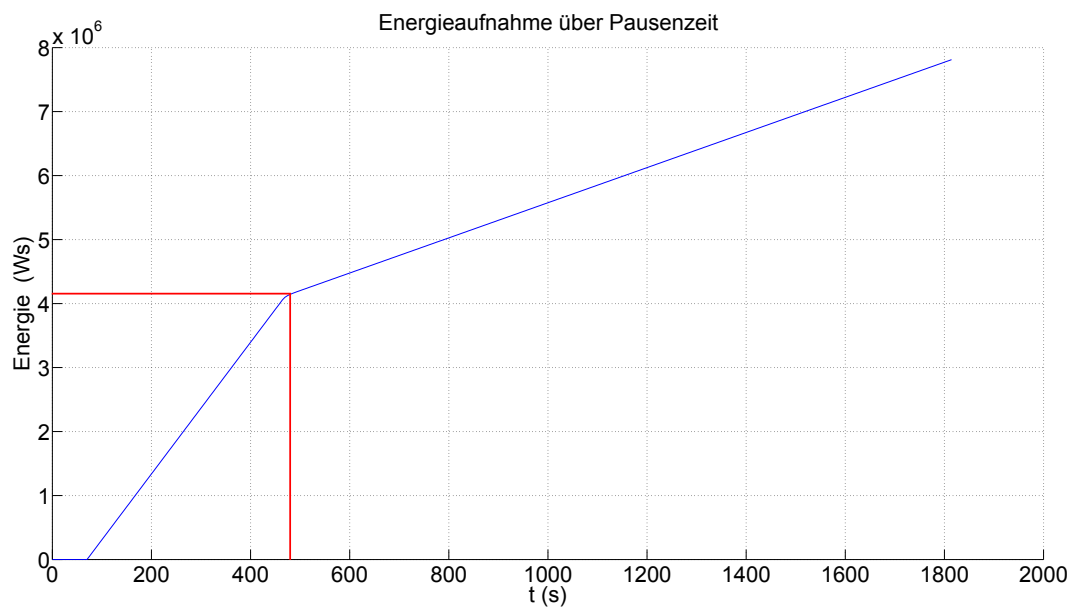


Abbildung 4.11.: Energieaufnahme nach 1310 s Abkühldauer (30-Minuten-Pause)

4.4. Resultate und gewonnene Informationen

Die Formel zur Berechnung des Energiebedarfs im optimierten Fall ist unter 4.21 angegeben:

$$E_{opt} = P_{stat} \cdot t_{prod} + E_{H,opt,15} + E_{H,opt,30} + 2 \cdot E_{H,max} \quad (4.20)$$

Daraus ergibt sich ein Energieverbrauch von:

$$E_{opt} = 52,3 \text{ kWh} \quad (4.21)$$

4.4.2. Vergleich des Einsparungspotentials und Diskussion

Für die Öl-Konditionierung wurde die Anwendung der Optimierungsstrategie beispielhaft angewandt. Wegen der hohen Wärmekapazität von Öl, ist der zu erwartende Effekt einer länger anhaltenden Speicherung von Wärmeenergie eingetreten und kann daher zum Zweck einer weiteren Energieeinsparung verwendet werden. So konnte beispielsweise bei der 15-minütigen Pause bei einem maximal verfügbaren Zeitrahmen von 900 s, sogar 66,7% zum Abschalten genutzt werden. Ohne Ausnutzung dieser Optimierungsmaßnahme würde bei dieser Pausenzeit gar nicht abgeschaltet werden, da für die Abschaltbedingung 3.2 der Worst-Case, also jener Fall angenommen wird, wo man für die Vorbereitung der nächsten Produktiv-Periode mit maximaler Heizleistung auf gewünschte Soll-Temperatur aufheizen muss. Da dieses Szenario auch die längste Heizdauer aufweist, würde ein Abschalten nicht wirtschaftlich sein. Durch die vorgestellte Optimierungsmethode wurde zum Erreichen der Wiederverfügbarkeit weniger als die maximale Heizenergie $E_{H,max}$ benötigt. Ähnliche Beobachtungen sind auch bei der 30-Minuten-Pause, allgemein jedoch überall dort, wo Fall 2 der Optimierungsbedingungen 4.2 gilt, zu erkennen.

Vergleicht man diese gewonnen Erkenntnisse mit jenen unter Abschnitt 3.4.2 errechneten Ergebnisse des selben Gerätes, ist eine positive Energiebilanz zu erwarten. Stellt man beide Gesamtenergieverbräuche aus Tabelle 3.8, sowie das Ergebnis von 4.21 gegenüber, ist eine weitere **Einsparung um zusätzliche 2,7%** ersichtlich (siehe Tabelle 4.2).

Die Optimierungsmaßnahme führt überall dort zu einer Verbesserung der Energiebilanz, wo die Pausenzeit jene Länge aufweist, welche zu einer Ausnutzung der Restwärme genutzt werden kann. Es kommt dabei einerseits

4. Optimierung des Energiebedarfs beim Prüflauf

Energieverbrauch Abschaltbedingung in kWh	Energieverbrauch optimiert in kWh	Einsparung in %
53,8	52,3	2,7

Tabelle 4.2.: Vergleich Energieverbrauch und Einsparungspotential

zu einer Verlängerung der Abschaltzeit und andererseits zu einem geringeren Energiebedarf für das Wiederaufheizen. Ist die Pausenzeit abzüglich der maximalen Heizdauer länger als die Auskühlzeit des Systems, hat die Optimierung keine Auswirkung.

5. Implementierung des Analysetools und Berechnung der Energiesparpotentiale

In Kapitel 3 und 4 wurden Methoden zur Generierung einer Energiebedarfsminimierung vorgestellt und diskutiert. Dafür benötigt man *charakteristische Kennwerte* (vgl. Abschnitt 3.3) der verschiedenen Prüfstandskomponenten, anhand dieser man die Abschaltbedingung 3.2 überprüfen und Berechnungen zum erwarteten Energiebedarf eines Verwendungsmusters durchführen kann. Zum Durchführen dieser Aufgaben wurde ein Analysetool in Form eines Frameworks unter Matlab/Simulink[®] entwickelt. Die Analyse folgt in 3 Teilschritten, welche nachfolgend diskutiert werden. Angaben zur Konfiguration des Tools sind im Anhang A zu finden.

5.1. Messwertanalyse

In diesem Abschnitt wird die Auswertung und Aufbereitung der vorliegenden Messdaten für die Erlangung der charakteristischen Kennwerte des Systems beschrieben. Zur Berechnung der minimalen Pausenzeit $t_{P,min}$ müssen Dividend und Divisor des Bruchs bestimmt werden. Vergleiche Formel 3.1 mit 5.1:

$$t_{P,min} = \frac{E_H}{P_{stat}} \quad (5.1)$$

Mit Kenntnis dieser Parameter ist es in weiterer Folge möglich, weitere Berechnungen zur Potentialanalyse von Einsparungen je nach Szenario

5. Implementierung des Analysetools und Berechnung der Energiesparpotentiale

durchzuführen. Als Szenario wird in diesem Zusammenhang jenes Betriebsverhalten charakterisiert, welches über einen Tag gesehen, die Perioden im Betriebszustand EIN und der unproduktiven Zeit dazwischen unterscheidet.

Da die mit der Leistungsmessung aufgenommenen Signalformen eine Ähnlichkeit zu Regelkurven aufweisen, ist das Ziel, jenen Zeitpunkt s_{sp} (Steady-State-Point) zu finden und zu berechnen, welcher den Übergang von der Heizphase in den stationären Zustand einleitet. Dafür wurde ein Algorithmus entwickelt und wird im nachfolgenden Abschnitt beschrieben. Durch Integration des Kurvenabschnitts, welcher die Heizphase charakterisiert, kann die aufgewendete Heizenergie E_H berechnet werden. Diese Fläche beinhaltet aber noch den stationären Energieaufwand $P_{stat} \cdot t_H$ welcher abgezogen werden muss, um jenen Energiegehalt E_H zu bekommen, welcher zusätzlich zum Halten der Soll-Temperatur benötigt wird. Die stationäre Leistungsaufnahme P_{stat} wird durch Bildung des Mittelwertes des Signals, ab dem Zeitpunkt s_{sp} berechnet. Mit den nun gewonnenen Kennwerten kann jene Zeit $t_{p,min}$ berechnet werden, in welcher das System theoretisch im eingeregelter Zustand verharren könnte, um die selbe Energie zu verbrauchen wie in der Aufheizphase. Damit können nun alle weiteren Berechnungen betreffend des Einsparungspotentials von Kilowattstunden, der Menge CO_2 und der Kostenersparnis angestellt werden. Die Berechnungsformeln werden im Anschluss an die Algorithmusbeschreibung angeführt und diskutiert.

5.2. Algorithmus zur Bestimmung des optimalen Abschaltzeitpunkts

Das Konzept der Energieoptimierung sieht vor, zwischen Heizphase und stationärem Zustand der untersuchten Komponente im Signal der Leistungsaufnahme zu trennen. Gleichzeitig erhält man durch Kenntnis des Übergangszeitpunkts die Dauer des Aufheizvorganges t_H . Für die Lösung dieses Problems muss aus der Messkurve dieser Zeitpunkt berechnet bzw. geschätzt werden. Da die Messdaten teilweise stark streuen, musste ein

5.2. Algorithmus zur Bestimmung des optimalen Abschaltzeitpunkts

Ansatz gefunden werden, welcher bei solchen Datensätzen zu brauchbaren Ergebnissen führt.

Algorithmus 1 zeigt den Pseudocode der Implementierung:

Algorithm 1 Schätzung des Steady-State-Points

```
1: function GETSSP(signal, start, end, s) ▷ signal - Messdaten, start - Index
   Anfangsmessdatenpunkt, end - Index Endmessdatenpunkt, s - Schärfe
2:
3:    $m\_totalsig = \overline{signal}[start \dots end]$ 
4:    $idx1 = start$ 
5:    $idx2 = start$ 
6:    $m\_old = \overline{signal}[idx1 \dots idx2]$  ▷ m_old - Alter Mittelwert
7:
8:   while  $idx2 < end$  do
9:      $m\_mom = \overline{signal}[idx1 \dots idx2]$  ▷ m_mom - Momentaner
   Mittelwert
10:    if  $m\_mom > m\_totalsig$  or  $m\_mom \leq m\_old \cdot s$  then
11:       $idx1 = idx2$ 
12:       $m\_old = m\_mom$ 
13:    end if
14:     $idx2 = idx2 + 1$ 
15:  end while
16: return  $ssp = idx1$ 
17: end function
```

Das Signal wird dazu schrittweise, d.h. jeder Datenpunkt iterativ untersucht. Als Referenz dient der Mittelwert des gesamten Signals, welcher durch den Heizphasenanteil immer höher als der Leistungswert P_{stat} liegt. Beginnend bei Index 1 (Startwert) wird iterativ bis Index 2 (Endwert) jeder Leistungswert im Signalvektor gemittelt. Der momentane Mittelwert *m_mom* beginnt nun in Summe zu wachsen und erreicht nach einer Zeit den Referenzwert *m_totalsig*. Solange entweder *m_mom* größer als *m_totalsig*, oder aber kleiner oder gleich dem alten Mittelwert *m_old* ist, wird der neue Startindex für die Mittelung auf den momentanen Index aktualisiert und der momentane Mittelwert auf *m_old* übertragen. Zu Beginn wird dieser mit Null initialisiert. Wurde der Endwert erreicht, entspricht der zuletzt aktualisierte Startindex

5. Implementierung des Analysetools und Berechnung der Energiesparpotentiale

dem Steady-State-Point ssp . Um die Funktion anpassbar zu gestalten wurde als Übergabeparameter noch eine Schärfe s , als Multiplikator für die zweite Bedingung, in Prozent hinzugefügt. Zu finden ist der Algorithmus in der Zusatzfunktion *getssp.m*.

5.2.1. Fallbeispiel

Zum Funktionsnachweis des Algorithmus wird dieser auf den Messdatensatz der Öl-Konditionierung angewandt. Das Ergebnis ist in Abbildung 5.1 abgebildet. Die strichliert gezeichnete, vertikale Linie kennzeichnet den berechneten Steady-State-Point ssp . Er befindet sich knapp hinter der Aufheizphase. Die punktierte Linie stellt den Mittelwert des stationären Zustandes P_{stat} dar, welcher ab dem Zeitpunkt ssp vom Rest des Signals durch Mittelwertbildung berechnet wurde. Etwas darüber liegt der Mittelwert des gesamten Messdatensatzes (strichpunktirt, vgl. *m_totalsig* im Algorithmus), welcher durch die Aufheizphase höher als der Mittelwert des stationären Zustandes liegt und als Referenzwert für den Algorithmus dient. Ebenfalls ist erkennbar, dass der Algorithmus trotz der Streuung des Messdatensatzes sehr gut funktioniert und in der Lage ist, den Übergang von der Heizphase in den stationären Betrieb zu schätzen.

5.3. Berechnung des Einsparungspotentials

Für die Berechnung der Einsparungspotentiale werden weitere Informationen benötigt, welche vor der Ausführung des Frameworks in einem Konfigurationsfile (siehe Anhand A) definiert werden. Nach Ausführung des Tools werden alle Parameter in den Workspace von Matlab übernommen und stehen für weitere Berechnungen zur Verfügung.

Um die Energieeinsparung berechnen zu können, wird ein Vergleichswert benötigt. Dieser kann, in Anlehnung an die durchgeführte Fallstudie im Abschnitt 3.4, für jenes Szenario stehen, an dem das Gerät 24 bzw. 16 Stunden durchgehend läuft (Dauerbetrieb vs. Doppelschichtbetrieb). Beide

5.3. Berechnung des Einsparungspotentials

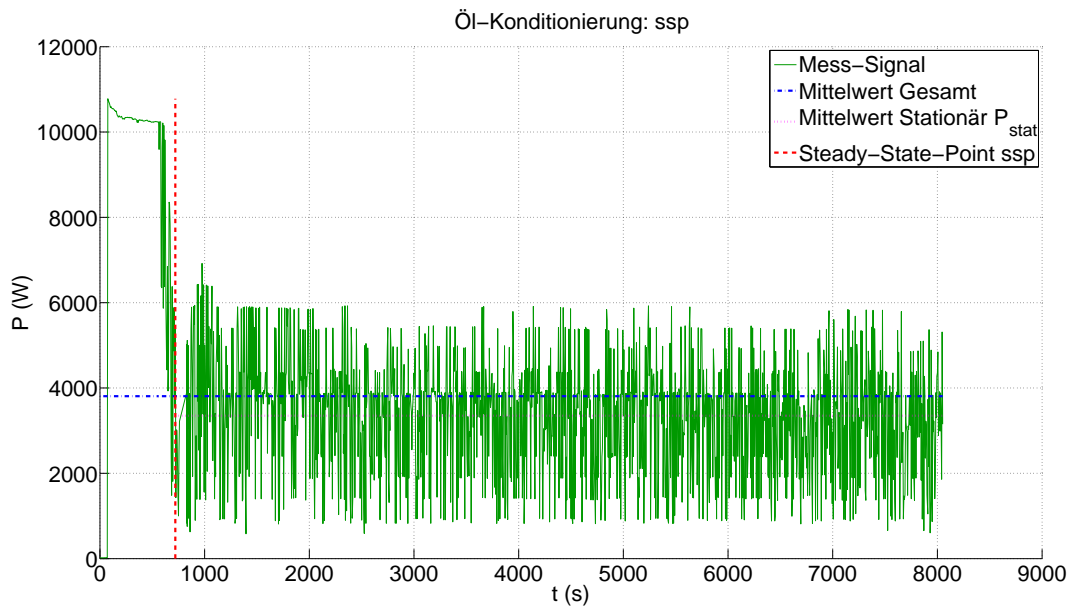


Abbildung 5.1.: Ermittlung ssp: Grafische Darstellung

Fälle stellen je nach durchgeführter Vergleichsbetrachtungsweise den Worst-Case dar. In Formel 5.2 ist die Berechnungsgrundlage dafür abgebildet.

$$E_{ao} = \frac{E_H + ref \cdot 3600 \cdot P_{stat}}{3600000} \quad \text{in kWh} \quad (5.2)$$

Die optimierte Energiebedarf wird nach Formel 5.3 berechnet. E_{active} ist dabei der Energiebedarf im eingeschalteten, stationären Zustand und E_{pause} der Energieverbrauch in den Pause-Perioden.

$$E_{opt} = \frac{E_{active} + E_{pause}}{3600000} \quad \text{in kWh} \quad (5.3)$$

Im Detail werden alle Betriebsstunden von Produktivphasen aufsummiert. Für den ersten Stundensatz wird der Initialisierungswert $E_{H,ges}$ einmalig aufaddiert, da die Annahme gemacht wird, dass das Gerät vor der ersten

5. Implementierung des Analysetools und Berechnung der Energiesparpotentiale

produktiven Phase, bereits vollständig aufgeheizt und bereit ist.

$$E_{active} = (E_{H,ges} +) \sum_{i=1}^{na} (na_i \cdot 3600 \cdot P_{stat}) \quad \text{in Ws} \quad (5.4)$$

In den unproduktiven Perioden kommt das Einsparungskonzept über die Abschaltbedingung 3.2 bzw. 5.6 und dem Vergleich mit der errechneten minimale Pausenzeit $t_{p,min}$ zum Tragen. Ist die tatsächliche Pause t_p (siehe Formel 5.5) zwischen einer neuerlichen Verwendungszeit des Gerätes größer der errechneten Zeit $t_{p,min}$, soll das Gerät abgeschaltet werden. Eine daraus resultierende Aufheizphase wird daher zur in der vorhin berechneten E_{active} hinzugezählt. Andernfalls bleibt das Gerät oder die Anlage eingeschaltet und verbraucht in der Wartezeit jene Energie, welche mit einer Leistungsaufnahme von P_{stat} anfällt. E_{pause} wird mit Null initialisiert. Die Pause-Intervalle sind einem definierten Anwendungsmuster (z.B. Abbildung 3.1 zu entnehmen).

Da das Gerät durch die Vorgabe von Verwendungsperioden (Aktivzeit-Vektor) zum Startzeitpunkt bereits den Sollwert erreicht haben muss, muss ein erneutes Aufheizen bereits in der unproduktiven Zeit erfolgt sein. Die tatsächliche Pausenzeit und damit jene Zeit, in welcher Energie gespart werden kann ergibt sich wie unter 5.5 angegeben:

$$t_p = t_{p,i} \cdot 3600 - t_H \quad (5.5)$$

$$E_{pause} = \begin{cases} E_{active} = E_{active} + E_H + t_h \cdot P_{stat} & \text{wenn } t_p > t_{p,min} \\ \sum_{i=1}^{np} (np_i \cdot 3600 \cdot P_{stat}) & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.6)$$

Die Einsparung in Kilowattstunden (kWh) ergibt sich durch die Subtraktion beider berechneter Fälle (siehe 5.2, 5.3) mit Formel 5.7.

$$E_{spar_day} = E_{ao} - E_{opt} \quad \text{in kWh} \quad (5.7)$$

Parallel zu dem Einsparungspotential in Kilowattstunden ist im Kontext von Energiesparen auch die Einsparung von CO_2 , das CO_2 -Äquivalent, von

5.3. Berechnung des Einsparungspotentials

Bedeutung. Energie kann nur von einer Form in eine andere umgewandelt werden (Energieerhaltungssatz, Mayer 1834). Wenn man fälschlicherweise von Energieerzeugung spricht, so gibt es mehrere Möglichkeiten eines Energietransports, um die gespeicherte Energie eines Energieträgers, in elektrisch für den Menschen nutzbare Energie umzuwandeln. Dabei entsteht vor allem bei Verbrennung das Gas Kohlenmonoxid, welches mit dem Sauerstoff der Luft zu CO_2 reagiert. Für die Energiegewinnung spielt aber nicht nur die Verbrennung selbst, sondern die gesamte Prozesskette für den Bau, Betrieb, Wartung und Reparatur sowie die Entsorgung am Ende der Nutzungsdauer eine Rolle. Vor allem in der Autoindustrie sind die Abgasnachbehandlung sowie die OBD¹ äußerst wichtige Teilgebiete, welche die Ingenieure vor große Herausforderungen stellt. Die Einsparung von Kohlendioxidemissionen liefert daher ein zusätzliches Maß für die Einsparung von Energie und ist auch im Bereich der Prüfstandtechnik von Bedeutung. Der *Emissionsfaktor* gibt das Verhältnis eines emittierten Stoffes zur eingesetzten Masse des Ausgangsstoffes an und ist stoff- und prozessspezifisch. Zur Umrechnung des berechneten Energieaufwands in eine CO_2 -Äquivalente benötigt man demnach einen Emissionsfaktor, der als Indikator der CO_2 -Emissionen je Kilowattstunde des Strommixes fungiert. Für die wichtigsten Länder der automobilen Industrie, USA[EPA14], England[EFRA13] und Deutschland[Ich14] lauten die CO_2 -Emissionsfaktoren wie in Tabelle 5.1 aufgelistet.

Land	Emissionsfaktor in kg CO_2 /kWh
USA	0,559
England	0,442
Deutschland	0,569

Tabelle 5.1.: Emissionsfaktoren der wichtigsten automobilen Industrieländer

Mithilfe des Emissionsfaktors ef aus Tabelle 5.1, kann die Einsparung in CO_2 nach folgender Formel 5.8 berechnet werden.

$$co2_spar_day = E_spar_day \cdot ef \quad \text{in kg CO}_2 \quad (5.8)$$

¹On-Board-Diagnose ist ein Fahrzeugdiagnosesystem, welches alle abgasbeeinflussenden Systeme überwacht.

5. Implementierung des Analysetools und Berechnung der Energiesparpotentiale

Die Aufrechnung auf ein Jahr berechnet sich in Kilowattstunden, sowie analog für CO₂ wie folgt (siehe Formel 5.9 bzw. 5.10):

$$E_{spar_year} = E_{spar_day} \cdot days \cdot weeks \quad \text{in kWh} \quad (5.9)$$

$$co2_{spar_day} = E_{spar_year} \cdot days \cdot weeks \quad \text{in kg CO}_2 \quad (5.10)$$

Will man die Einsparung mehrerer Geräte des gleichen Typs berechnen, etwa weil ein Prüfstandbetreiber mehrere identische Prüfstände besitzt, so kann die Einsparung noch um diesen Faktor ergänzt werden (Formeln 5.11, 5.12):

$$E_{spar_day_NumOfDevs} = E_{spar_day} \cdot nodev \quad \text{in kWh} \quad (5.11)$$

$$E_{spar_year_NumOfDevs} = E_{spar_year} \cdot nodev \quad \text{in kWh} \quad (5.12)$$

Neben der Angabe von Einsparungspotentialen in Kenngrößen wie Kilowattstunden und CO₂-Emissionen ist im wirtschaftlichen Umfeld nicht zuletzt auch eine Abschätzung über das Kostenpotential von hohem Interesse. Dafür sind weitere spezifische Informationen notwendig. Um die Kosteneinsparung im Realeinsatz noch zu verfeinern, wird über weitere Annahmen eine Abnutzung berücksichtigt.

In Formel 5.13 sind die Kosten für eine Betriebsstunde angegeben. Dividend und Divisor sind Konfigurationsparameter (siehe Tabelle A.1). Die Anzahl der Betriebsstunden ist ein empirischer Wert, welcher nach den Gesichtspunkten des Alters, Unmöglichkeit einer Reparatur aus Ersatzteilmangels, oder wegen Unrentabilität zu treffen ist. 20.000 Betriebsstunden ist ein Beispiel für einen realistischer Wert.

$$CBh = \frac{P}{N} \quad \text{in €} \quad (5.13)$$

In Formel 5.14 sind die Kosten für einen Switch-Cycle, Ein- bzw. Ausschalten, angegeben. Der Parameter von ca. 10⁶, ist ein empirischer Schätzwert, welcher in Anlehnung an ein Relais oder eines Schalters angenommen werden kann [Pan14].

$$CSc = \frac{P}{M} \quad \text{in €} \quad (5.14)$$

5.3. Berechnung des Einsparungspotentials

Für das Worst-Case-Szenario „Always-on“ muss außerdem ein Anteil f_{CSc} eingeführt werden, welcher die Schaltzyklen aliquot auf die Tage aufteilt. Es wird laut 5.15 zwischen den Fällen von 7 aktiven Tagen in der Woche oder weniger unterschieden.

$$f_{CSc} = \begin{cases} \frac{CSc}{days} & \text{wenn } days < 7 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.15)$$

Die Kosten für den durchgehenden Betrieb werden mit Formel 5.16 berechnet.

$$c_{ao} = CBh \cdot (t_{produktiv} + t_H) + c_{kWh} \cdot E_{ao} + f_{CSc} \quad \text{in €} \quad (5.16)$$

Im optimierten Fall ergeben sich die Kosten laut Formel 5.17:

$$c_{opt} = CBh \cdot \left(\sum_{i=1}^{na} (na_i) + t_H \cdot (nsc + 1) \right) + c_{kWh} \cdot E_{opt} + CSc \cdot (nsc + 1) \quad \text{in €} \quad (5.17)$$

Durch Subtraktion der Ergebnisse aus 5.16 und 5.17, werden die Einsparungen in Formel 5.18 angegeben.

$$c_{spar_day} = c_{ao} - c_{opt} \quad \text{in €} \quad (5.18)$$

Es folgen weitere Formeln für die Kosten mit Aufrechnung auf ein Jahr bzw. für mehrere Geräten desselben Typs (siehe Berechnungsgrundlagen 5.19, 5.20 und 5.21):

$$c_{spar_year} = c_{spar_day} \cdot days \cdot weeks \quad \text{in €} \quad (5.19)$$

$$c_{spar_day_NumOfDevs} = c_{spar_day} \cdot nodev \quad \text{in €} \quad (5.20)$$

$$c_{spar_year_NumOfDevs} = c_{spar_year} \cdot nodev \quad \text{in €} \quad (5.21)$$

Je nach Informationswunsch können hier noch beliebig weitere Berechnungen und Faktoren angestellt und eingeführt werden. Zur Weiterverarbeitung können die berechneten Werte in ein Tabellenkalkulationsprogramm exportiert werden (Anhang B).

6. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Thema Optimierung des Energieverbrauchs am automotiven Prüfstand behandelt. Dafür wurden alle Komponenten und Systeme der Messzelle hinsichtlich ihrer elektrischen Eigenschaften, insbesondere ihres Leistungsbedarfs bei verschiedenen Betriebsabläufen charakterisiert und analysiert. Anhand der gesammelten Informationen konnte der Istzustand der bestehenden Teilkomponenten erfasst werden und darauf basierend ein Konzept und einige Maßnahmen zur Einsparung von Energie erarbeitet werden. Durch gezielte Ein- und Ausschaltsteuerung eines Gerätes kann je nach Wahl eines Vergleichswertes, im Dauerbetrieb beispielsweise von 34% bis zu knapp 47% und im Doppelschichtbetrieb ca. 3% bis 22% des Energieaufwandes gespart werden. Es wurde außerdem noch eine Optimierungsmaßnahme durch die Berücksichtigung der Wärmespeicherkapazität des Mediums auf das Konzept angewandt und untersucht. Dabei konnte im Falle der Öl-Konditionierung ein zusätzliches Einsparungspotential um weitere 2,7% gewonnen werden.

Aufgrund der Vielfalt, der Größe und Komplexität eines Prüfstands gibt es dennoch viele Details, welche sich zwar außerhalb des Fokus dieser Arbeit befinden, aber einen direkten Einfluss auf das weitreichende Gebiet der Energieminimierung von automotiven Prüfständen haben. Einige, im Zuge dieser Arbeit angestellten Überlegungen, werden in den nächsten Abschnitten diskutiert.

6.1. Ausweitung des Konzepts am Gesamtprüfstand

Die Prüfzelle eines Prüfstandes, auf welchem Gebiet sich diese Arbeit beschränkt, umfasst nur einen relativ kleinen Teil eines Prüfstandskonzepts. Um die Zelle herum existieren weitere Themengebiete wie Energieversorgung und Bereitstellung, sowie leistungsstarke Vorkonditionierungen der benötigten Betriebsmittel. Ein Prüfstand wird immer individuell für einen Kunden geplant und ist daher abhängig von dessen bisherigen Ausrüstung, den örtlichen Gegebenheiten, den Anforderungen und der Gesetzeslage. Aus energietechnischer Sicht und im Kontext von Maßnahmen zur Einsparung von Energie am Prüfstand, müssten daher Konzepte erschaffen werden, welche die Optimierung, schon von Beginn der Planung an, in den Vordergrund stellen. Nur so kann eine noch effizientere Gesamtlösung geschaffen werden.

6.2. Gerätekonstruktion

Alle in dieser Arbeit betrachteten Geräte könnten weiter optimiert und um Funktionen ergänzt werden. In den meisten Fällen haben die Komponenten nur sehr wenige Betriebszustände. Hier könnte man sich überlegen, wann und wo es Sinn machen würde, einen speziellen Modus wie Standby oder ähnliches, einzuführen. Das würde jenen Fällen zugute kommen, wo ein Abschalten der Anlage nicht rentabel ist, die Temperatur aber für die kommende Einsatzperiode gehalten wird, obwohl das Gerät nicht benötigt wird. Ein gewisser Temperaturverfall könnte für diesen Betriebsmodus bewusst in Kauf genommen werden, um in Folge dessen mit geringer Aufheizenergie den Sollwert wiederherstellen zu können. Alternativ können auch die Konstruktion und die Robustheit hinsichtlich Dichtheit und des thermischen Verhaltens noch weiter optimiert werden, damit ein großes Messgerät mit hohem Einsparungspotential, wie etwa das AVL AMA i60, schaltbar machen zu können.

6.3. Verfeinerung des Modells zur Bestimmung der thermischen Zeitkonstante

Das eingeführte thermische Modell kann beliebig unter dem Kosten-Nutzen-Faktor (vergleiche auch 6.6) verfeinert werden. Das vorgestellte Modell unter Kapitel 4 zur Bestimmung der Zeitkonstante könnte noch um weitere Systemeigenschaften ergänzt werden. Das Gesamtsystem ist wesentlich komplexer aufgebaut und man könnte das Thermomodell um Einflüsse von Gehäuse, Motorblock, Leitungen etc. erweitern. Damit könnte man auch den Einschwingvorgang von der maximalen Leistungsaufnahme bis zum stationären Zustand abbilden, welcher wegen zeitverzögerter Erwärmung oder Wärmeübertragung auf umliegende Materialien stattfindet. Eine weitere Recherche über die Materialeigenschaften und deren Verhalten im Aufheizprozess muss dafür betrieben werden. Eine parallel durchgeführte Messung der Regelgröße, der Temperatur, ist für die Verifikation des komplexeren Modells unabdingbar.

6.4. Einflussfaktor Strompreis

Für genaue Kostenabschätzungen müsste der Strompreis genauer berücksichtigt werden. Seine Zusammensetzung ist in allen Ländern unterschiedlich. In Österreich gibt es mehrere Netzebenen für unterschiedliche Verbraucher. Die Industrie, hat daher einen anderen Energiepreis als ein gewöhnlicher Haushalt. Weiters ist der Preis variabel zur Tageszeit. Eine genauere Berechnung des Energiepreises und dessen Zusammensetzung könnte durch seine strategische Berücksichtigung auch für die Steuerung der Gesamtanlage zweckdienlich sein, etwa indem man gezielt geeignete Prüfprozesse auf kostengünstigere Tageszeiten verschiebt.

6.5. Implementierung der Ein-/Ausschaltsteuerung am Prüfstand

Der Prüfstand muss dazu in der Lage sein, aufgrund von Messdaten und weitere Informationen, vorausschauend auf Verwendungsmuster der Teilgeräte, reagieren zu können. Spricht man von Informationen am Prüfstand, ist es naheliegend, am Datensammelzentrum, dem Prüfstandrechner zu beginnen. Über diesen zentralen Punkt laufen sämtliche Messdaten zusammen und er übernimmt außerdem die komplexe Steuerung der gesamten Anlage. Eine enge Verzahnung zwischen Komponenten und PUMA-Steuerung in Form eines Monitorings ist dafür unabdingbar. Viele Sensoren sind im Gesamtsystem bereits integriert und deren Daten können ohne großen Aufwand abgegriffen und in Software ausgewertet und verarbeitet werden. Da die Ausstattung eines Prüfstands bereits alles dafür Notwendige mitbringt, ist die Integration einer solchen Steuerung in wirtschaftlichem Maße durchführbar.

6.6. Kompromiss: Einsparpotential/Machbarkeit

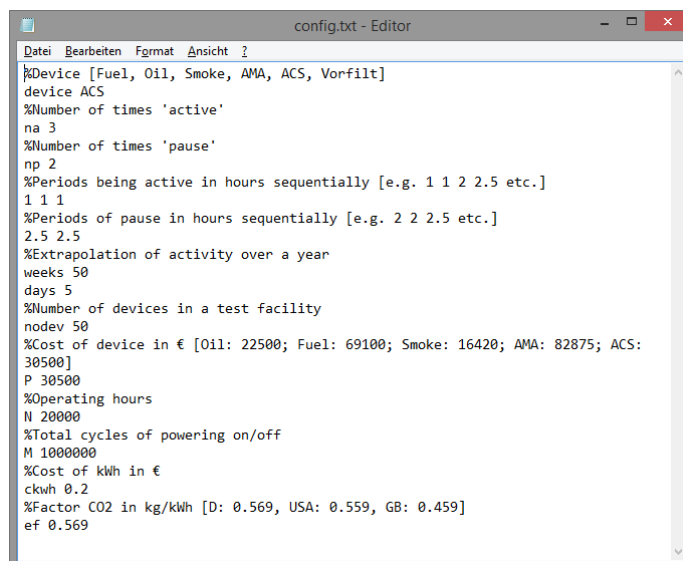
Optimierungsansätze müssen genau untersucht und bewertet werden, ob es sich für den wirtschaftlichen Einsatz auch lohnt. Bei der durchexerzierten Optimierung des Energiebedarfs der Öl-Konditionierung, konnte trotz den anteilig ziemlich geringen Pausenzeiten, eine ziemlich hohe, zusätzliche Einsparung mit relativ geringem Aufwand erzielt werden. Im selben Kontext ist natürlich auch immer die praktische Implementierung und deren Aufwand, ein Faktor, der berücksichtigt werden muss. Durch das Automatisierungssystem ist vieles schon real vorhanden. Alternativ könnte auch je nach Prüfstandsauslegung eine separate SPS, welche ausschließlich für Energieüberwachung und Zeitsteuerung verantwortlich ist, installiert werden.

Appendix

Anhang A.

Konfigurationsdatei Framework

Um das in Kapitel 5 vorgestellte Framework universell für alle verfügbaren Geräte zu halten, wurde eine zentrale Konfigurationsdatei erschaffen, in welcher gerätetypische Informationen und ein beliebiges Verwendungsszenario manuell konfiguriert werden können. Es handelt sich dabei um eine Vorlage für ein Textfile (siehe Abbildung A.1), welches Kommentare sowie deren zugehörigen Key-Value-Paare beinhaltet und mit jedem beliebigen Editor geändert werden kann.



```
config.txt - Editor
Datei Bearbeiten Format Ansicht ?
%Device [Fuel, Oil, Smoke, AMA, ACS, Vorfilt]
device ACS
%Number of times 'active'
na 3
%Number of times 'pause'
np 2
%Periods being active in hours sequentially [e.g. 1 1 2 2.5 etc.]
1 1 1
%Periods of pause in hours sequentially [e.g. 2 2 2.5 etc.]
2.5 2.5
%Extrapolation of activity over a year
weeks 50
days 5
%Number of devices in a test facility
nodev 50
%Cost of device in € [Oil: 22500; Fuel: 69100; Smoke: 16420; AMA: 82875; ACS:
30500]
P 30500
%Operating hours
N 20000
%Total cycles of powering on/off
M 1000000
%Cost of kWh in €
ckwh 0.2
%Factor CO2 in kg/kWh [D: 0.569, USA: 0.559, GB: 0.459]
ef 0.569
```

Abbildung A.1.: Beispiel: Konfigurationsfile „config.txt“

Bei Ausführung des Analysetools werden alle Parameter aus dem Konfigurationsfile in den Workspace von Matlab geladen.

In Tabelle A.1 werden alle Konfigurationsparameter aufgestellt und beschrieben.

Pos	Parameter	Beschreibung
1	<i>device</i>	Angabe des zu untersuchenden Gerätes
2	<i>na</i>	Anzahl der Betriebsperioden (Beiwert zur Datenauswertung)
3	<i>np</i>	Anzahl der Pause-Perioden (Beiwert zur Datenauswertung) $np = na - 1$
4	z.B: 1 2 3	Zeilenvektor Betriebsperioden in Stunden
5	z.B: 2 2	Zeilenvektor der unproduktiven Zeit in Stunden
6	<i>weeks</i>	Einsatz in Woche(n)/Jahr
7	<i>days</i>	Einsatz in Tag(en)/Woche
8	<i>nodev</i>	Multiplikator für Berechnung identischer Geräte
9	<i>P</i>	Gerätewert in Euro
10	<i>N</i>	Auslegung Betriebsstunden in Stunden
11	<i>M</i>	Auslegung Ein-/Ausschaltzyklen
12	<i>ckwh</i>	Durchschnittlicher Preis pro Kilowattstunde in Euro
13	<i>ef</i>	Emissionsfaktor in kg/kWh, für die Berechnung der Einsparung von CO ₂

Tabelle A.1.: Parameterliste Konfigurationsfile

Anhang B.

Ausgabe der Ergebnisse in Excel

Zur Weiterverarbeitung/Visualisierung werden die berechneten Ergebnisse tabellarisch und automatisiert in Microsoft Excel[®] exportiert. Sind alle Kennwerte des Systems mit Matlab ausgewertet und bekannt, können jegliche Berechnungen auch mit einem alternativen Programm durchgeführt werden. Ziel ist es die technische Geräteanalyse von der kaufmännischen Kalkulation zu trennen, wie es meistens auch in der Wirtschaft zwischen den verschiedenen Abteilungen und Angestellten praktiziert wird. Im industriellen Bereich können das beispielsweise Firmenbereiche für die Planung und Auslegung künftiger Prüfstände, welche die das Konzept tatsächlich in den Geräten oder durch zusätzliche Steuerungen realisieren, sein. Eine Rohfassung der berechneten Ergebnisse könnte in Excel wie in Abbildung B.1 gezeigt, aussehen. Die Bezeichnung des erstellten Analyseprotokolls ist eindeutig nach dem Schema *[Device].[Date].[Time].xlsx* zusammengesetzt.

Oil_2015-10-08-16h23m22s.xlsx - Excel

DATEI START EINFÜGEN SEITENLAYOUT FORMELN DATEN ÜBERPRÜFEN ANSICHT

Ausschneiden Kopieren Einfügen Format übertragen Zwischenablage

Calibri 11 A⁺ A⁻ F K U

Zeilenumbbruch Verbinden und zentrieren

Standard % 000 ‰,00 ‰,00 Bedingte Formatierung

Schriftart Ausrichtung Zahl

A20

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Stationäre Wirkleistung [kW]	3,3487471						
2	Heizenergie [kWh]	1,10236979						
3	Empfohlene Ausschaltzeit [s]	1185,07941						
4	Energieaufwand always on [kWh]	81,4723003						
5	Energieaufwand optimiert [kWh]	13,3533507						
6	Gesparte Energie/Tag [kWh]	68,1189496						
7	Gesparte kg CO2/Tag [kg]	38,7596823						
8	Gesparte Energie/Jahr [kWh]	17029,7374						
9	Gesparte kg CO2/Jahr [kg]	9689,92058						
10	Gesparte Energie/Tag bei 50 Geräten [kWh]	3405,94748						
11	Gesparte Energie/Jahr bei 50 Geräten [kWh]	851486,87						
12	Kosten pro Betriebsstunde [€]	1,125						
13	Kosten pro Schaltzyklus [€]	0,0225						
14	Kosten/Tag 24h ein inkl. Abnutzung [€]	31,8045						
15	Kosten/Tag Optimiert inkl. Abnutzung [€]	4,0425						
16	Gesparte Kosten/Tag [€]	27,762						
17	Gesparte Kosten/Jahr [€]	6940,5						
18	Gesparte Kosten/Tag bei 50 Geräten [€]	1388,1						
19	Gesparte Kosten/Jahr bei 50 Geräten [€]	347025						
20								

Abbildung B.1.: Beispiel: Excel-File „Oil.xx-yy.xlsx“

Literaturverzeichnis

- [AVL10] AVL List GmbH, Graz - Austria, Hans-List-Platz 1, A-8020, Graz. *AVL AMA i60 LDD Remote Unit/Stand Alone Unit*, 10 edition, 8 2010. Gerätebeschreibung der Abgasmessanlage mit LDD-Analysator.
- [AVL11] AVL List GmbH, Graz - Austria, Hans-List-Platz 1, A-8020, Graz. *AVL 415SE Smoke Meter*, 3 edition, 9 2011. Product Description.
- [AVL14] AVL List GmbH, Graz - Austria, Hans-List-Platz 1, A-8020, Graz. *AVL FuelExactTMPLU*, 12 edition, 7 2014. Product Guide.
- [AVL15a] AVL List GmbH, Graz - Austria, Hans-List-Platz 1, A-8020, Graz. *AVL ConsysAir 1600 Ansaugluftkondtionierung*, 3 edition, 6 2015. Product Guide.
- [AVL15b] AVL List GmbH, Graz - Austria, Hans-List-Platz 1, A-8020, Graz. *AVL ConsysLube 25/50 Öl-Konditioniersystem*, 10 edition, 4 2015. Product Guide.
- [BCL⁺14] M.P. Brundage, Qing Chang, Yang Li, J. Arinez, and Guoxian Xiao. Utilizing energy opportunity windows and energy profit bottlenecks to reduce energy consumption per part for a serial production line. In *Automation Science and Engineering (CASE), 2014 IEEE International Conference on*, pages 461–466, Aug 2014.
- [Eic14] Univ.-Prof. DI Dr. Helmut Eichlseder. Kolbenmaschinen. Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, Inffeldgasse 19, A-8010, Graz, 10 2014. Lehrveranstaltungsskriptum.
- [EPA14] EPA. EPA Year 2010 eGRID 9th edition Version 1.0 February 2014. page 13, 2 2014.

- [fEFRA13] Department for Environment Food & Rural Affairs. 2013 Government GHG Conversion Factors for Company Reporting: Methodology Paper for Emission Factors. page 111, 7 2013.
- [Gmb12] Konradin Verlag R. Kohlhammer GmbH. Energieeffizienz im Maschinen- und Anlagenbau (SPS IPC Drives: 1-458) Strukturiert zum Energiesparen. *Elektro Automation*, 11 2012.
- [Haa12] Holger Haag. DFG Forschergruppe ECOMATION – Ein Ansatz zur energieeffizienten Planung und Steuerung einer Produktion. (1), 6 2012. GREES Kolloquium Effiziente Energienutzung, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA und Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb IFF - Universität Stuttgart.
- [Ich14] Petra Icha. Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 bis 2013. *Climate Change*, 1(23):30, 7 2014. Umweltbundesamt.
- [LHW⁺14] Yufeng Li, Yan He, Yan Wang, Ping Yan, and Xuehui Liu. A framework for characterising energy consumption of machining manufacturing systems. *International Journal of Production Research*, 52(2):314–325, 2014.
- [MYT07] Gilles Mouzon, Mehmet B. Yildirim, and Janet Twomey. Operational methods for minimization of energy consumption of manufacturing equipment. *International Journal of Production Research*, 45(18-19):4247–4271, 2007.
- [New15] Newtons4th Ltd., 1 Bede Island Road, Leicester, LE2 7EA, UK. *PPA5500 KinetiQ*, 2.118 edition, 3 2015. User Manual.
- [Pan14] Panasonic Corporation Automation Controls Business Division, 1006, Oaza Kadoma, Kadoma-shi, Osaka 571-8501, Japan. *Panasonic HE1AN-P-DC24V-Y5*, 2014. Datenblatt.
- [PL14] M. Paulweber and K. Lebert. *Mess- und Prüfstandstechnik: Antriebsstrangentwicklung · Hybridisierung · Elektrifizierung*. Der Fahrzeugantrieb. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014.

Literaturverzeichnis

- [swi] swissmem. Energieeffiziente Produktionsmaschinen - Vermeiden von Betrieb ohne Nutzen. *Planungshilfen für die MEM-Industrie*, (2):12. swissmem, energie schweiz.