



**Abschlussbericht  
an die**

**Gesellschaft für Energie und  
Klimaschutz Schleswig-  
Holstein GmbH (EKSH)**



## **ERToS – Emission Related Testing of Ship Engines**

**Abschlussbericht, 20.10.2016, Kiel**

Prof. Dr.Ing. Klaus Lebert  
Martin Held, M. Eng  
Christian Loof, M. Eng  
Matthias Lorenz, M. Eng  
Felix Schröder, M. Eng  
Jonas Höhne, B. Eng  
Hauke Jung, B. Eng  
Nils Löffler, B. Eng  
Philipp Timm, B. Eng



Das Forschungsprojekt befasste sich mit der Fragestellung und der Umsetzung, wie die Motorenhersteller, durch die von der Firma AVL Zöllner hergestellten hydraulischen Leistungsbremsen, bei der Entwicklung von schadstoffärmeren Motoren unterstützt werden können. Hierbei bezog sich die Aufgabenstellung konkret auf das Anfertigen einer Analyse mit Potentialabschätzung und das Weiterentwickeln der Bremse, um den immer weiter steigenden Prüfstandanforderungen gerecht zu werden. Für das Projekt wurde als **erster Schritt** eine systematische Datenaufnahme und Bewertung im Stationärbetrieb sichergestellt. Die Umsetzung erfolgte durch das Anfertigen eines automatischen Prüflaufes und einer automatischen Auswertung. Hiermit konnte eine Datenbank aufgebaut werden, die als Grundlage für die weiteren Entwicklungsschritte diente. Im **zweiten Schritt** wurden die gemessenen Daten analysiert und Vorschläge erarbeitet, wie die Inbetriebnahme bzw. Regelung der transienten Übergänge in Prüfläufen verbessert werden kann. Hierfür wurde in Matlab Simulink ein vereinfachtes Tankmodell der Bremse entwickelt und mit der Wirklichkeit verglichen. Dabei konnten Verbesserungsvorschläge hinsichtlich der Filterung des aufgenommenen Drehmomentsignals erarbeitet und ein vorhandener Aliasing-Effekt entdeckt und verringert werden. Des Weiteren wurden in der vorhandenen SPS-Steuerung von B&R nicht zu vernachlässigende Totzeiten ermittelt, welche durch ein Hardware Upgrade stark verringert werden konnten. Im **dritten Abschnitt** wurde die bestehende Regelung analysiert und am Simulink Modell getestet. Aufgrund dessen, dass neue Regelungsstrukturen nicht mit der bestehenden Hardware der Bremsensteuerung kompatibel waren, musste eine Möglichkeit entwickelt werden, um neue Regelungen besser in der Wirklichkeit testen zu können. Hierfür wurde ein MiL und HiL Konzept mit Realtime PCs umgesetzt, welche eine einfache und schnelle Umsetzung vom Modell zur Wirklichkeit erlauben. Der **vierte Abschnitt** befasste sich mit der Entwicklung neuer Regelungsstrukturen für transiente Drehmomentübergänge. Hierbei konnten mit dem Model-Prädiktiv-Controller (MPC) und einer Vorsteuerung mit Wärmemodell die besten Ergebnisse erzielt werden. Um eine Bewertung von transienten Übergängen durchführen zu können, wurden zusätzlich Kriterien erstellt, anhand derer eine objektive Bewertung der Übergänge festgestellt werden kann. Als Abschluss wurde im **fünften Abschnitt**, die in den vorhergehenden Abschnitten erarbeiteten Handlungsanweisungen und Entwicklungen, anhand von ausführlichen Prüfläufen an einer Bremse des Typs Omega1000 bei der Firma SDT in Rendsburg getestet. Die durchgeführten Prüfläufe bestätigten die erarbeiteten Verbesserungen und Vorschläge. Mit Ende des Projekts ist die Firma AVL Zöllner in der Lage die bereits jetzt gestiegenen Anforderungen der Prüfstände durch die hydraulischen Hochleistungsbremsen abzudecken.

## 1 Zusammenfassung



## Inhalt

1	Zusammenfassung .....	4
2	Einleitung .....	5
3	Projektvorgehensweise .....	6
3.1	Projektplan .....	7
3.2	Methodik .....	8
4	Realisierung der Arbeitspakete .....	9
4.1	AP 1: Systematische Datenaufnahme und -bewertung im Stationärbetrieb.....	9
4.2	AP 2: Methodische Absicherung der Inbetriebnahme im Stationärbetrieb .....	11
4.2.1	Datengestützte Analyseverfahren.....	12
4.2.2	Modellbildung .....	15
4.3	AP 3: Potentialanalyse für die Abbildung transienter Zustandsübergänge.....	20
4.3.1	Anforderungen an Regelkonzept.....	20
4.3.2	Modelbasierte Verfahren .....	24
4.4	AP 4: Konzeptentwicklung für die Abbildung transienter Zustandsübergänge .....	27
4.4.1	Prüfstandumgebung .....	27
4.4.2	Erweiterte Entwicklungsumgebung.....	28
4.4.3	Regler für transiente Übergänge .....	31
4.4.4	Wärmerregelung einer HLB .....	33
4.4.5	Verfeinerung der Modellstruktur .....	34
4.4.6	Bewertungskriterien transienter Übergänge .....	36
4.4.7	Entwicklung eines Datenloggers.....	37
4.5	AP 5: Automatisierte Bewertung der transienten Übergänge.....	39
4.5.1	Prüflauf mit eigener Entwicklungsumgebung.....	40
4.5.2	Drehmoment-Regelung über eigene Entwicklungsumgebung.....	41
4.5.3	Test mit eigenem automatischen Drehmoment-Fahrprofil.....	41
4.5.4	Abtastrate mit 200 Hz .....	43
4.5.5	Linearisierung der Ventile .....	44
4.5.6	Überprüfung des Temperaturmodells .....	44
4.5.7	Dokumentation der simulierten Modelle .....	46
5	Ausblick.....	47
6	An der FH-Kiel entstandene Projekt-Literatur .....	48





## 2 Einleitung

Die AVL Zöllner Marine GmbH ist der weltweit führende Hersteller von hydraulischen Hochleistungsbremsen im Prüfbereich von 100 bis 140.000 kW und blickt auf eine über 65 Jahre zurückliegende Firmengeschichte am Standort Kiel. In über 50 Ländern der Erde genießt die AVL Zöllner Marine GmbH beste Reputation bei ihren Kunden, die überwiegend aus der maritimen Großmotoren-Industrie kommen. Dabei überzeugen die Produkte durch ihre Messgenauigkeit, Stabilität und Lebensdauer in einem von einem harten Wettbewerb geprägten Markt. Insbesondere im asiatischen Raum etablieren sich Lösungen, die auf Kosten der Lebensdauer und Genauigkeit preiswerte Alternativen anbieten, die die heutigen Anforderungen an so genannte stationäre Prüfungen in Arbeitspunkten für einen begrenzten Zeitraum erfüllen können. Dieses Forschungsprojekt sollte dabei helfen, die Wettbewerbssituation der AVL Zöllner Marine GmbH insbesondere im Hinblick auf die schärfer werdenden Klimaschutzrichtlinien weiter zu verbessern.

Deshalb ging es in diesem Forschungsprojekt mit der Fachhochschule Kiel zunächst um eine Effizienzsteigerung der kosten- und ressourcenintensiven Inbetriebnahme. Dazu sollten die auszuliefernden Bremsen zunächst an Testaufbauten bei dem Rendsburger Unternehmen Schiffsdieseltechnik Kiel GmbH mit einer erweiterten Sensorik automatisiert vermessen werden. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Laufruhe. Auch die Anforderungen an die Entwicklung von Großmotoren steigen durch schärfere Klimaschutzrichtlinien, strengere Normen und knapper werdende Ressourcen (1). Insbesondere in stark frequentierten Hafenstädten werden eine Verringerung der Schadstoffbelastung und die Verwendung schadstoffoptimaler Kraftstoffe gefordert. Dabei entstehen Schadstoffe insbesondere bei so genannten transienten Übergängen zwischen unterschiedlichen Arbeitspunkten. Dies ist insbesondere bei Hafenmanövern der Fall. Diese Manöver müssen am Prüfstand nachgestellt werden können. Deshalb müssen auch insbesondere die Hochleistungsbremsen der AVL Zöllner Marine GmbH diesen steigenden Mess- und Prüfanforderungen für transiente Übergänge gerecht werden. Dementsprechend sollte als weiteres Ziel in diesem Forschungsprojekt zunächst das Potenzial der derzeitigen Produktpalette für transiente Tests untersucht werden. Dabei geht es um Fragen der notwendigen Sensorik und Aktuatorik sowie um innovative Steuerungs- und Regelungskonzepte. Prof. Dr.-Ing. Klaus Lebert hat an der Fachhochschule Kiel die Professur für Regelungstechnik, Modellbildung und Simulation am Institut für Mechatronik inne. Über seine Zeit bei der AVL List GmbH, Graz in den Jahren 2005 bis 2008 hat er Erfahrungen mit dem modellgestützten Betrieb von hochdynamischen Prüfständen im Motorsportbereich gesammelt. Damit ergibt sich eine ideale Kooperation zwischen der AVL Zöllner Marine GmbH und der Fachhochschule Kiel, um die bestehenden Prüfumgebungen für Schiffsdieselmotoren auf die Herausforderungen im Umfeld steigender Abgasgesetzgebung vorzubereiten und die angestrebten Projektziele zu erreichen (Quelle (1)).

### 3 Projektvorgehensweise

Um die Projektziele zu erreichen, wurden Arbeitspakete erstellt, und diese systematisch abgearbeitet. Der Projektplan hierzu wird in Kapitel 3.1 erläutert und vorgestellt. Die Arbeitspakete lauten:

- AP 1 - Systematische Datenaufnahme und -bewertung im Stationärbetrieb
- AP 2 - Methodische Absicherung der Inbetriebnahme im Stationärbetrieb
- AP 3 - Potentialanalyse für die Abbildung transienter Zustandsübergänge
- AP 4 - Konzeptentwicklung für die Abbildung transienter Zustandsübergänge
- AP 5 - Automatisierte Bewertung der transienten Übergänge

Mit den ersten beiden Arbeitspaketen soll eine ressourcenschonende Inbetriebnahme sichergestellt werden.

#### **AP 1 - Systematische Datenaufnahme und -bewertung im Stationärbetrieb**

Mit diesem Arbeitspaket wird sichergestellt, dass permanent Daten der Leistungsbremse aufgenommen werden, mit denen die weiteren Arbeitspakete abgearbeitet werden können. All diese Messungen fanden bei der Schiffsdieseltechnik Kiel GmbH in Rendsburg statt.

#### **AP 2 - Methodische Absicherung der Inbetriebnahme im Stationärbetrieb**

In diesem Paket wird ein methodisches Werkzeug erarbeitet, um die aufgenommenen Daten verarbeiten und vergleichen zu können. Mit den Arbeitspaketen 3 - 5 sollen emissionsrelevante Prüfläufe entwickelt

#### **AP 3 - Potentialanalyse für die Abbildung transienter Zustandsübergänge**

Hierbei werden die Anforderungen der transienten Übergänge erarbeitet. Grundlage hierzu bilden reale Szenarien, die in Zusammenarbeit mit dem Maritimen Cluster Norddeutschland entwickelt werden.

#### **AP 4 - Konzeptentwicklung für die Abbildung transienter Zustandsübergänge**

In diesem Arbeitspaket wird ein Modell der Leistungsbremse erstellt und in eine reale Prüfumgebung implementiert, die ebenfalls in Betrieb genommen wird. Die Prüfumgebung verbleibt an der FH-Kiel für weitere Forschungszwecke.

## AP 5 - Automatisierte Bewertung der transienten Übergänge

Hierbei sollen die entwickelten Prüfläufe an der realen Anlage getestet, dokumentiert und bewertet werden.

### 3.1 Projektplan

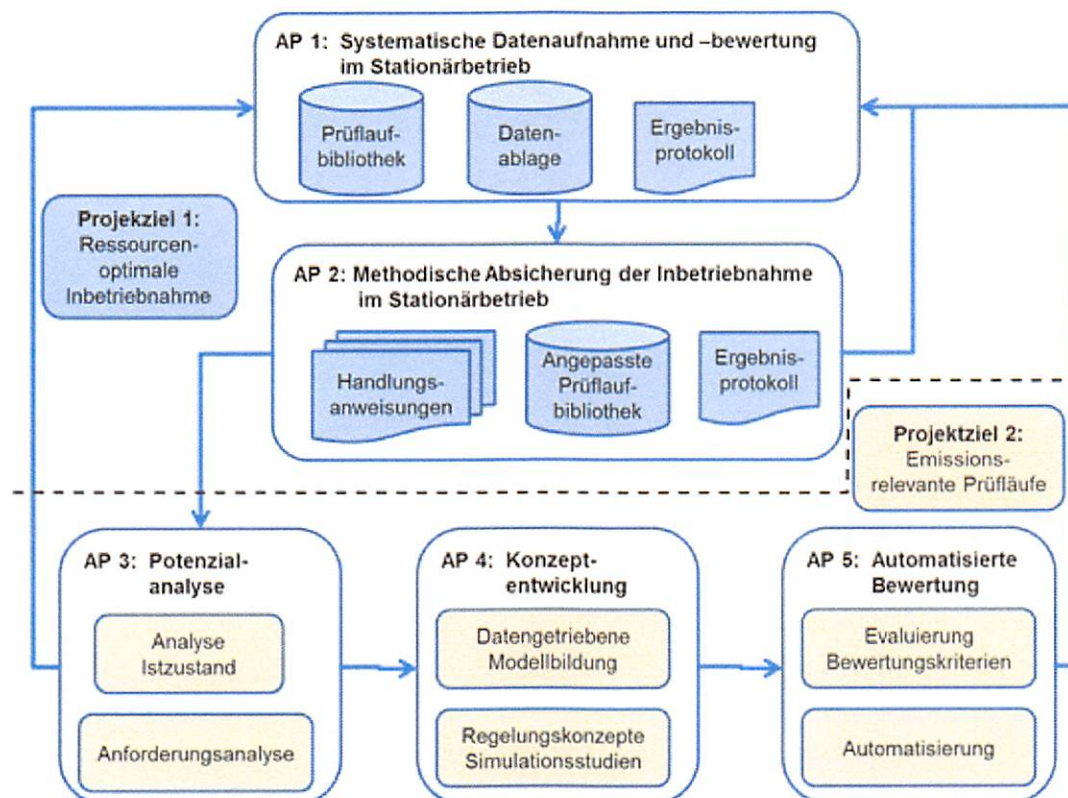


Abbildung 3-1: Projektplan ERToS

In Abbildung 3-1 ist der Projektplan zu sehen. Hierbei wurden die Arbeitspakete nochmals graphisch aufbereitet.

Der Zeitplan des Projektes ERToS ist in der Abbildung 3-2 dargestellt. Er zeigt, dass alle Arbeitspakete abgeschlossen wurden. Jedoch konnten die abschließenden Tests des Arbeitspakets 5 wegen betriebsinterner Verzögerungen bei der Firma AVL Zöllner Marine GmbH nicht wie geplant im zweiten Quartal 2016 durchgeführt werden.

Auf Grund dessen wurde bei der EKSH eine kostenneutrale Verlängerung bis zum 31.10.2016 beantragt und bewilligt. Die entsprechende Verzögerung des Arbeitspakets und des zugehörigen Meilensteins MS4, sind in der Abbildung 3-2 gelb markiert worden.

AP	Aktivität	2014			2015				2016			
		Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
1	Systematische Datenaufnahme und -bewertung im Stationärbetrieb		■	■		■	■					
MS 1	Datenbasis aufgebaut			■								
2	Methodische Absicherung der Inbetriebnahme im Stationärbetrieb			■	■	■						
MS 2	Handlungshinweise für IBN vorhanden					■						
3	Potenzialabschätzung für die Abbildung transienter Zustandsübergänge					■	■					
4	Konzeptentwicklung für die Abbildung transienter Zustandsübergänge						■	■	■			
MS 3	Prototypische Implementierung des Konzepts vorhanden								■			
5	Automatische Bewertung der transienten Zustandsübergänge								■	■	■	■
MS 4	Prüflaufbibliothek zur Bewertung transienter Zustandsübergänge vorhanden									■	■	■

Abbildung 3-2: Zeitplan Projekt ERToS

### 3.2 Methodik

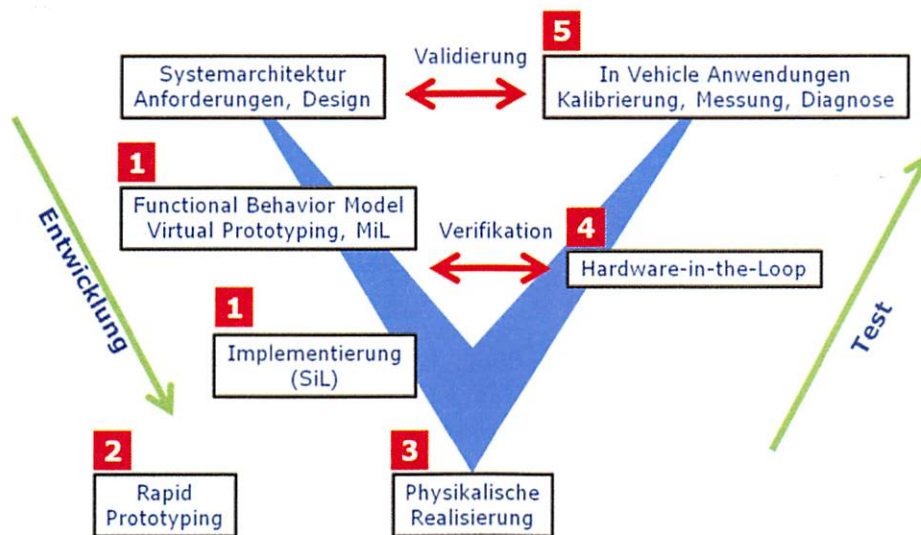


Abbildung 3-3; Arbeiten nach V-Modell

In dem Projekt wurde die Methodik des V-Modells angewendet. Eine Übersicht hierzu ist in Abbildung 3-3 zu erkennen. Hierbei wurden zunächst neue Regelungen und Modelle der Leistungsbremsen in der Simulationsumgebung erstellt, getestet und validiert (Schritt 1). Bei positiver Bewertung werden die Regelungen und Modelle an der angeschafften Prüfsimulationsumgebung mit realen Schnittstellen angepasst (Schritt 2 und 3), getestet und validiert, bevor die Regelungen an der realen Anlage implementiert und getestet werden (Schritt 4 und 5).



## 4 Realisierung der Arbeitspakete

Die Ergebnisse der Arbeitspakete werden in den folgenden Kapiteln vorgestellt.

### 4.1 AP 1: Systematische Datenaufnahme und -bewertung im Stationärbetrieb

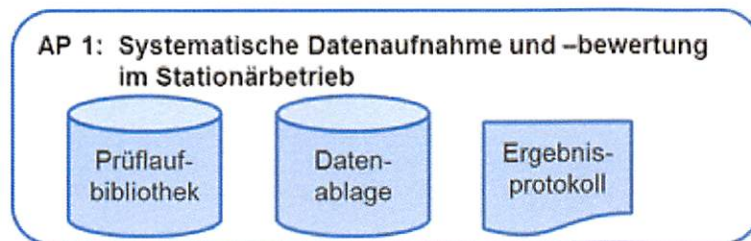


Abbildung 4-1: Arbeitspaket 1

Zu Beginn der Untersuchungen wurde mit den Stabilitätstests der Laufruhe begonnen. Die Prüfläufe wurden bei der Firma Schiffsdieseltechnik Kiel GmbH (SDT) in Rendsburg durchgeführt. Sie stellt in ihrem Prüffeld den für die Testläufe benötigten Dieselmotor bereit. Der verwendete Dieselmotor ist ein gebrauchtes Modell der Baureihe 16V 2000 von der Firma MTU. Zum Testen der Laufruhe wurde von der Firma AVL Zöllner Marine GmbH die Bremse vom Typ Omega 2200 S1 vorgesehen. Die Wahl dieser Bremse beruht auf kundenspezifischen Anfragen.

Um mehr Daten über den Bremsentyp zu sammeln, wurde im Vorfeld entschieden, eine Testreihe zu fahren. In dieser Testreihe wurden neben der Originalbremse des Typs Omega 2200 S1 noch drei leicht unterschiedlich modifizierte Bremsen getestet. Die verwendeten Modifikationen zielten dabei alle auf die Verbesserung der Laufruhe ab. Insgesamt wurden damit an vier leicht unterschiedlichen Modellen Prüfläufe zur Stabilitätsmessung durchgeführt, wie Abbildung 4-2 zeigt.

Bremse	Abkürzung	Modifikation
1	Ori	Originalmodell
2	Stufensprung	Statortaschen sind kleiner als die Rotortaschen
3	Winkel kleiner	Lauftrad und Einsatzaschen sind 5° kleiner
4	Winkel größer	Lauftrad und Einsatzaschen sind 5° größer

Abbildung 4-2; Bremsenmodelle mit Modifikationen

Um exakt wiederholbar messen zu können und damit für alle Messungen eine gemeinsame und vergleichbare Grundlage zu schaffen, wurde für die Messungen im Stationärbetrieb ein automatischer Prüflauf entworfen. Der Prüflauf ist in der Puma Open Software umgesetzt. Dieses von der Firma AVL LIST GmbH entwickelte Programm ist die standardmäßig von Zöllner verwendete Benutzersoftware um Prüfläufe zu entwickeln. Das besondere Augenmerk lag dabei auf dem Messen der Drehmomentlaufruhe. Nach kundenspezifischen Angaben muss die Laufruhe des Drehmoments innerhalb von 60Nm liegen um störungsfreie Schadstoffmessungen

durchführen zu können. Die verwendeten Prüfläufe wurden an der FH-Kiel im Rahmen einer Projektarbeit von dem Herrn Christian Loof erstellt und sind detailliert in dem von ihm erstellten Projektbericht Quelle (2) dargestellt.

Zum Darstellen und Aufbauen einer Datenbasis wurde das firmeneigene Programm Concerto verwendet. Das Design und die Auswertung der Daten wurden in enger Abstimmung mit der Firma Zöllner umgesetzt. Dabei dient die automatisierte Auswertung nicht nur zur schnelleren Darstellung der Ergebnisse, sondern auch zur Vorlage beim Kunden. Die Abbildung 4-3 zeigt beispielhaft einen automatisch ausgewerteten Prüflauf.

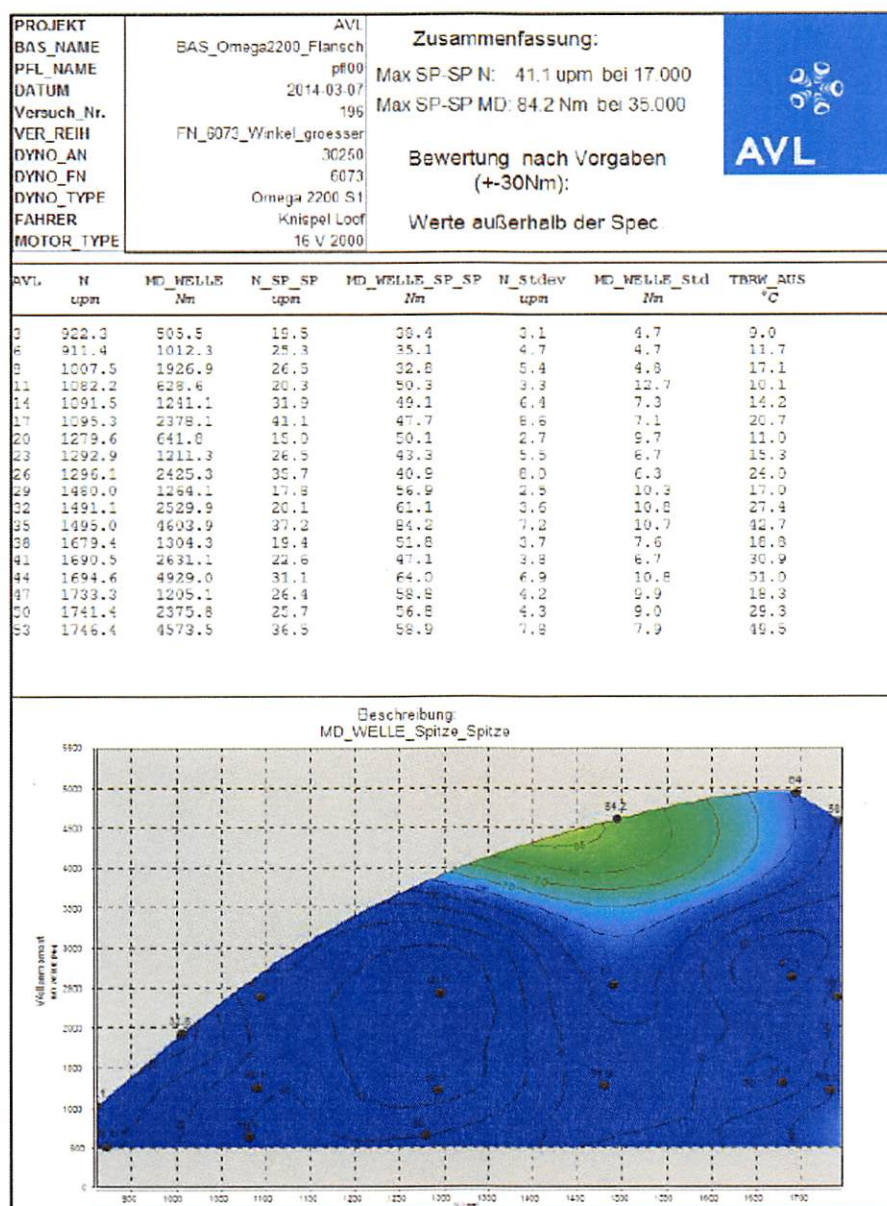


Abbildung 4-3: automatische Auswertung eines Prüflaufs

Der automatisierte Prüflauf und die automatisierte Auswertung wurden in mehreren Schritten stetig verbessert und angepasst. Nach mehreren Validierungen und Verifizierungen gilt die Entwicklung des Prüflaufs mit Auswertung bei der Firma Zöllner als abgeschlossen und wurde übernommen. Der Arbeitspunkt 1 kann damit als abgeschlossen angesehen werden.

### **Abgeschlossene Aufgaben AP1:**

- ✓ Auswahl geeigneter Sensorik und Aktuatorik
- ✓ Aufbau und Inbetriebnahme eines Prüfstandautomatisierungssystems
- ✓ Entwicklung standardisierter Prüfläufe und Aufbau einer Prüflaufbibliothek
- ✓ Automatische Messdatenerfassung und –speicherung
- ✓ Identifizierung von Qualitätsmerkmalen
- ✓ Ergebnisaufbereitung in enger Abstimmung mit dem Projektpartner
- ✓ Aufbau einer Datenbasis für die Referenzdaten
- ✓ Dokumentation
- ✓ weitere Messungen über gesamte Projektdauer

Dauer ca. 10 Monate

Aufgrund der in AP1 erhobenen und umgesetzten Daten, konnte der Meilenstein 1 (MS1) nach Absprache mit der Firma Zöllner positiv beurteilt und abgeschlossen werden.

### **4.2 AP 2: Methodische Absicherung der Inbetriebnahme im Stationärbetrieb**

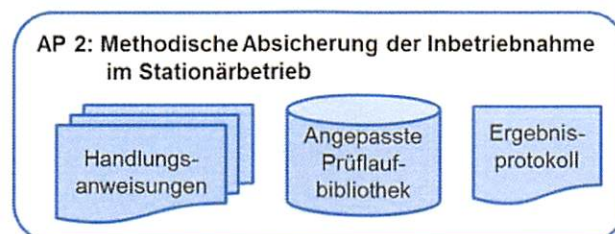


Abbildung 4-4: Arbeitspaket 2

Die im AP2 durchgeführten Datenanalysen zur methodischen Absicherung der Inbetriebnahme basieren alle auf den im AP1 ermittelten Daten. Die Grundlage bilden dabei die Daten der Bremsen aus Abbildung 4-2. Im AP2 wurden zeitgleich mehrere

Ansätze verfolgt, die in zwei grobe Richtungen unterteilt werden können (siehe Abbildung 4-5). Zum einen wurden datengestützte Analyseverfahren verwendet um das Drehmomentsignal aufzubereiten und zu analysieren und zum anderen die Modellbildung der hydraulischen Leistungsbremse (HLB) vorangetrieben.

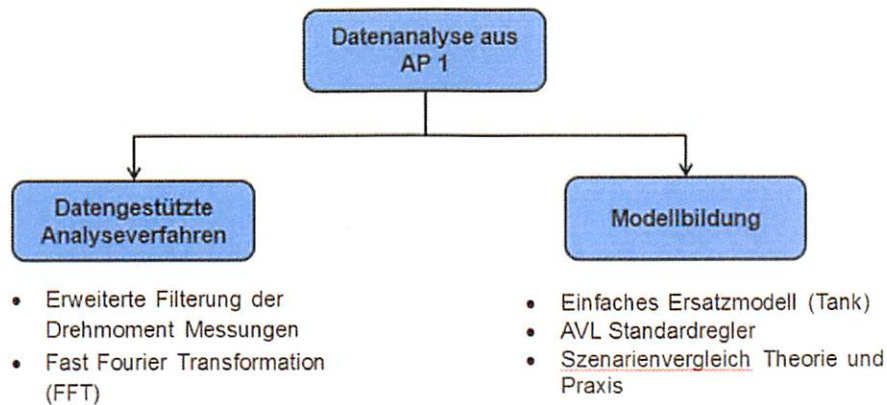


Abbildung 4-5: Aufteilung des Arbeitspaketes 1

#### 4.2.1 Datengestützte Analyseverfahren

##### Erweiterte Filterung der Drehmoment Messungen

Aufgrund der Erkenntnisse, dass das aufgenommene Drehmomentsignal aus den Messungen sehr verrauscht ist (siehe Abbildung 4-6), sollten zum glätten des Signals zusätzliche Filtermethoden analysiert werden. Dabei bezieht sich das Filtern zum einen auf die Glättung des Signals, damit ein stationärer Endwert eingeregelt werden kann, und zum anderen auf das Filtern, um die geforderte Laufruhe der Kunden zu erreichen.

Für die Regelung der Bremse ist es wichtig, dass das Messsignal nur das erzeugte Drehmoment der Bremse auf den Regler zurückführt. Eine Filterung sollte somit im Idealfall in der Lage sein, Drehmomentänderungen des Motors von den Drehmomentänderungen der Bremse unterscheiden zu können. Die Stärke der untersuchten Filterungen beeinflusst dabei die mögliche Regeldynamik. Je stärker die Filterung ist, desto langsamer werden Drehmomentänderungen auf den Regler rückgeführt. Dies bewirkt, dass auch die Regelung dementsprechend langsam wird und nur auf langsame Änderungen des Drehmoments ausreichend schnell reagiert werden kann. Eine möglichst schnelle Regelung und eine starke Filterung der Signale stehen somit kritisch zueinander. Es muss daher eine Filterung gefunden werden, mit der sich beide Anforderungen erfüllen lassen (Quelle (3)).

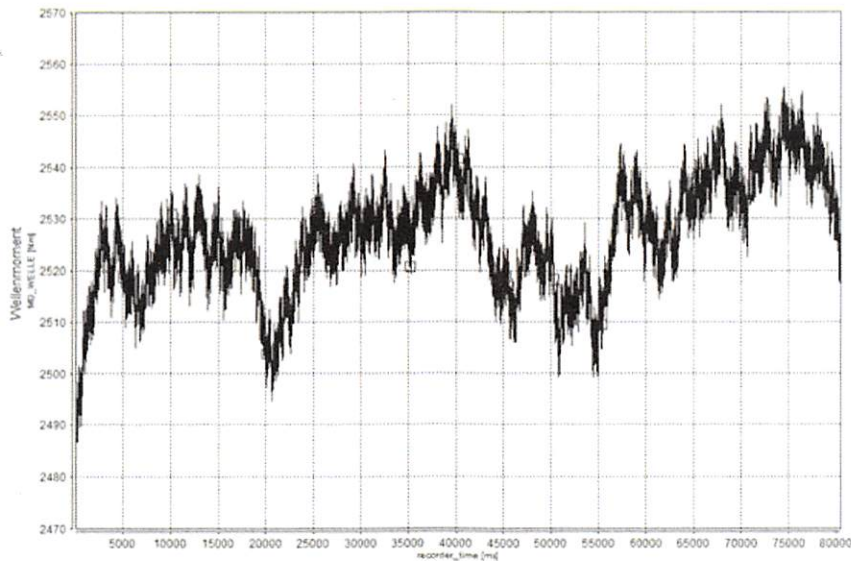


Abbildung 4-6: Verrauschtes Drehmomentsignal

Die in dem Projekt analysierten Filtermethoden sind in der folgenden Auflistung dargestellt:

- Arithmetischer Mittelwertfilter
- Bessel-/Butterworth-Filter
- Dynamische Drehmomentberechnung
- Moving-Average-Filter

Die Analyse der Filtermethoden ergab, dass keine Filtermethode in der einzelnen Betrachtung eine wesentliche Verbesserung der Filterung ergab. Erst aus der Kombination von Moving-Average-Filter und bestehendem Bessel-Filter ergab sich eine deutliche Verbesserung der Filterwirkung, ohne eine höhere Verzögerung des Messsignals zu erzeugen (siehe Abbildung 4-7).

Mit den hier getesteten Filtermethoden kann je nach Anforderungen oder Kundenwunsch der Serviceingenieur das Drehmomentsignal der Bremse während der Inbetriebnahme stärker filtern. Dabei liefern die Ergebnisse der verschiedenen Filtermethoden dem Inbetriebnahme-Ingenieur die nötige Wissensbasis.

Filtervergleich der Sp.-Sp. Drehmomentschwingungen				
Messung	N [upm]	Mean [Nm]	MDWELLE [Nm]	Moving Average- und Bessel-Filter [Nm]
3	881	516	53	13
6	892	1019	37	15
9	894	1939	44	18
12	1079	638	27	14
15	1089	1259	43	21
18	1093	2401	58	23
21	1279	619	37	18
24	1290	1267	40	26
27	1294	2429	73	42
30	1479	1272	40	28
33	1491	2755	62	45
36	1494	4785	75	36
39	1679	1341	45	29
42	1690	2394	66	44
45	1695	4881	59	35
48	1734	1280	37	27
51	1741	2434	63	49
54	1746	4612	53	37

Abbildung 4-7: Filtervergleich

### Fast-Fourier-Transformation (FFT)

Die Analyse des Drehmomentsignals mit Hilfe der FFT-Analyse dient vorrangig dazu, das Signal in seine einzelnen Frequenzanteile aufgelöst darzustellen. Hierbei wurde untersucht, welche Frequenzen in dem Signal enthalten sind und maßgeblich zu den Drehmomentschwankungen beitragen. Aus den einzelnen Frequenzanteilen konnten dadurch Rückschlüsse über die Ursache der Schwingungen ermittelt werden. Als Beispiel dient das mit einer 5kHz Abtastfrequenz aufgenommene Drehmomentsignal, welches den gesamten Footprint einer Bremse widerspiegelt (Abbildung 4-8).

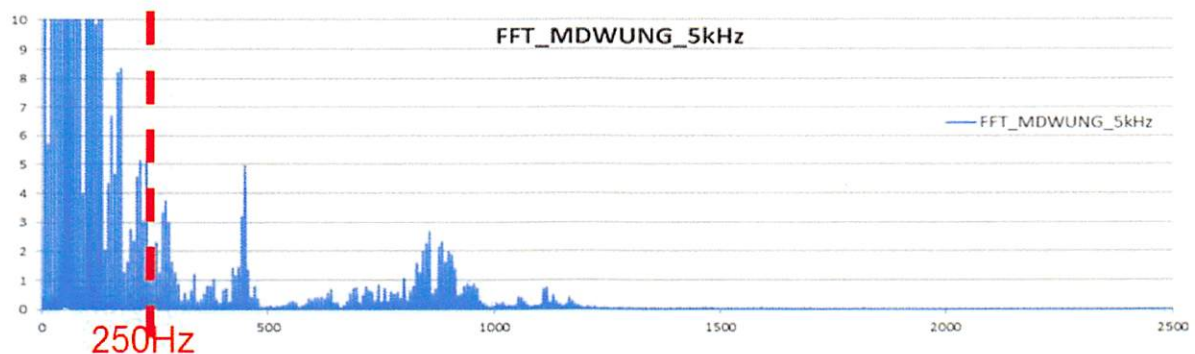


Abbildung 4-8: FFT-Analyse mit 5 kHz

Aus den Frequenzen den FFT-Analysen konnten eindeutig die Schwingungsanteile der Motorzylinderstöße ermittelt werden. Dies konnte über die Eckdaten des Motors berechnet und über das zeitabhängige Verhältnis zwischen Drehmoment und Drehzahl bewiesen werden. Die vom Dieselmotor erzeugten Schwingungen liegen im Bereich 0 bis 100Hz.

Wie in Abbildung 4-8 zu sehen ist, erstreckt sich der Footprint der Drehmomentmessung bis über 1kHz. Es wird daher empfohlen, die standardmäßig eingestellte Abtastfrequenz von 500Hz zu erhöhen. Bedingt durch das Shannon-Abtast-Theorem, können mit einer Abtastfrequenz von 500Hz, nur Schwingungen bis  $f=250\text{Hz}$  in der FFT-Analyse richtig dargestellt werden (Quelle (3)).

Mit der Erhöhung der Abtastfrequenz auf 5kHz wird zusätzlich das Risiko von Schwebungseffekten (Alias-Effekt) minimiert. Schwebungseffekte können bei zu geringer Abtastfrequenz im gefilterten Drehmomentsignal zu Schwingungen führen.

Die Messungen im 2. Quartal 2016 haben ergeben, dass eine Erhöhung der Abtastfrequenz im Automatisierungssystem zu einer Verbesserung der Laufruhe führte. Hier war technisch bedingt nur eine Erhöhung auf 200 Hz möglich. Diese reichte jedoch aus um die Schwebefeffekte ausreichend zu minimieren. Der Test wurde an einer Omega 1000 durchgeführt.

Um die Qualität der Bremse bei der Auslieferung und Inbetriebnahme vor Ort beim Kunden abzusichern, wurde zusätzlich eine neue Handlungsanweisung geschrieben. Es wird in Zukunft bei jeder Inbetriebnahme eine FFT-Analyse als Footprint der Bremse erstellt und im Abnahmeprotokoll für den Kunden vermerkt. Sichergestellt wird die Messung durch eine hochfrequente Schwingungsmessung, welche mittels des QuantumX der Firma HBM durchgeführt wird.

## 4.2.2 Modellbildung

### Ersatzmodell und Standardregler

Neben der Spezifikation der Bremse ist die Regelung der hydraulischen Leistungsbremse ein weiterer wichtiger Schritt. Für Messungen mit verschiedenen Fahrprofilen, in denen transiente Übergänge vorhanden sind, ist es sinnvoll, die Bremsen geregelt zu fahren. Nur im geregelten Betrieb können Messungen und Fahrprofile möglichst exakt wiederholt werden.

Das Problem der hydraulischen Leistungsbremsen ist die Tatsache, dass das gesamte System auf der Basis von Flüssigkeiten beruht, die im Inneren Verwirbelungen erzeugen. Solche Flüssigkeiten mit internen Wirbeln sind mathematisch, im Sinne der Regelungstechnik, nicht zu beschreiben.

Weil das System mathematisch nicht beschrieben werden kann, wird nach einem anderen Ansatz gesucht, mit dem eine Regelung aufgebaut werden kann. Der hier verwendete Ansatz basiert auf dem Gedanken, sich der Bremse auf einem möglichst einfachen Weg anzunähern. Als Vereinfachung wurde hierfür ein einfaches Wassertankmodell verwendet, siehe Abbildung 4-10. Dieses wurde gewählt, weil das Drehmoment der Bremse in hohem Maße davon abhängt, wie viel Wasser in der Bremse vorhanden ist.

Das bestehende Regelkonzept der Firma AVL, siehe Abbildung 4-9, wird zusammen mit dem Wassertankmodell in der Simulationsumgebung von Matlab Simulink aufgebaut und getestet. Anhand dieser Simulation wurden erste Erkenntnisse und Rückschlüsse zum Verhalten der Regelung und der Bremse erarbeitet.

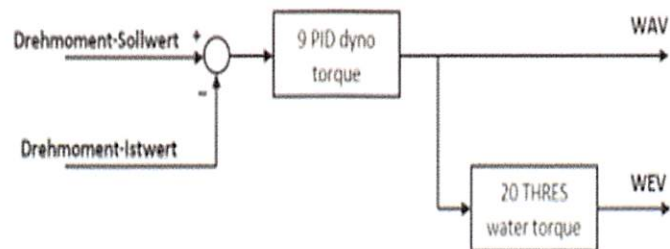


Abbildung 4-9: Aufbau des Standardreglers der Fa. AVL Zöllner Marine GmbH

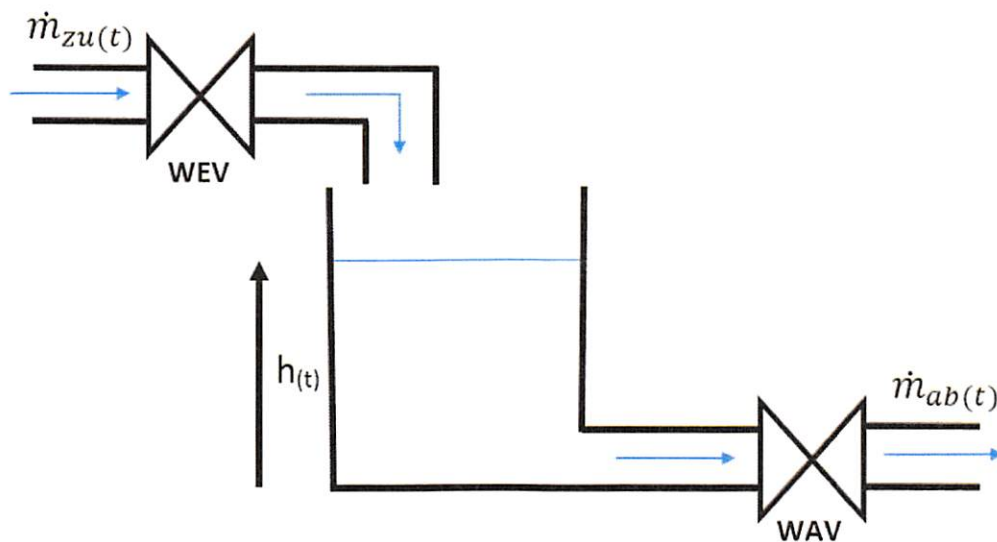


Abbildung 4-10: Wassertankmodell



## Nichtlinearität der Ventile

Die erste Szenario-Analyse zwischen Theorie und Praxis betrifft die Nichtlinearität der verwendeten Ventile. Im Modellaufbau der Ventile wurde bei der Berechnung von dem Ventilfluss festgestellt, dass die Ventile eine nicht vernachlässigbare Nichtlinearität aufweisen. Diese Nichtlinearitäten führen in einem System dazu, dass sich das System nicht in jedem Punkt gleich verhält und somit die Regelbarkeit des Systems stark beeinträchtigt wird. Zur Behebung des Problems kann der P-Anteil im Regler an die jeweiligen Arbeitspunkte angepasst werden, oder es wird eine Linearisierung durchgeführt. Um die Nichtlinearität zu bestätigen, wurde von der Firma Zöllner ein Ventil bei der Firma SDT in Rendsburg vermessen.

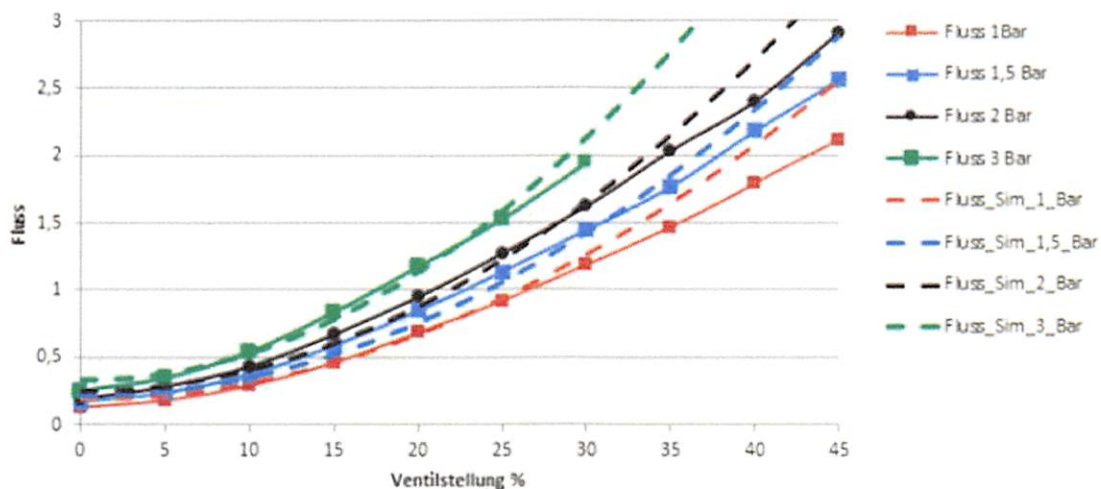


Abbildung 4-11: Flusskennlinie der Ventile

Wie in der Abbildung 4-11 zu sehen ist, stimmen die berechneten Werte aus dem Modell gut mit den real gemessenen Werten überein. Besonders die Nichtlinearität verhält sich bis zu einer Ventilstellung von ca. 35% fast gleich. Es zeigt, dass die Nichtlinearitäten vorhanden sind und eine Linearisierung der Ventile großes Potential beinhaltet, mit der die Regelbarkeit des Systems verbessert werden kann. Eine Linearisierung der Ventile ist erforderlich (Quelle (3)).

## Totzeit der Ventile

Der zweite Punkt, der bei dem Aufbau des Modells ersichtlich wurde, sind die Totzeiten der Ventile. Zur Dynamikanpassung des Modells, wurden die Sprungantworten der Ventile aus den realen Messungen betrachtet. Hierbei viel auf, dass eine lange Totzeit in der Reaktion der Ventile vorhanden ist, siehe Abbildung 4-12. Die Totzeit beträgt ca.  $T=170\text{ms}$  und ist im Verhältnis zur

gewünschten Regelgeschwindigkeit und Systemdynamik nicht vernachlässigbar klein. Die HLB der Fa. AVL Zöllner Marine GmbH soll möglichst schnell, innerhalb von ca. einer Sekunde geregelt werden und Schwingungen von bis zu 3 Hz ausregeln. In diesem dynamischen Bereich führt die Totzeit jedoch zu erheblichen Problemen.

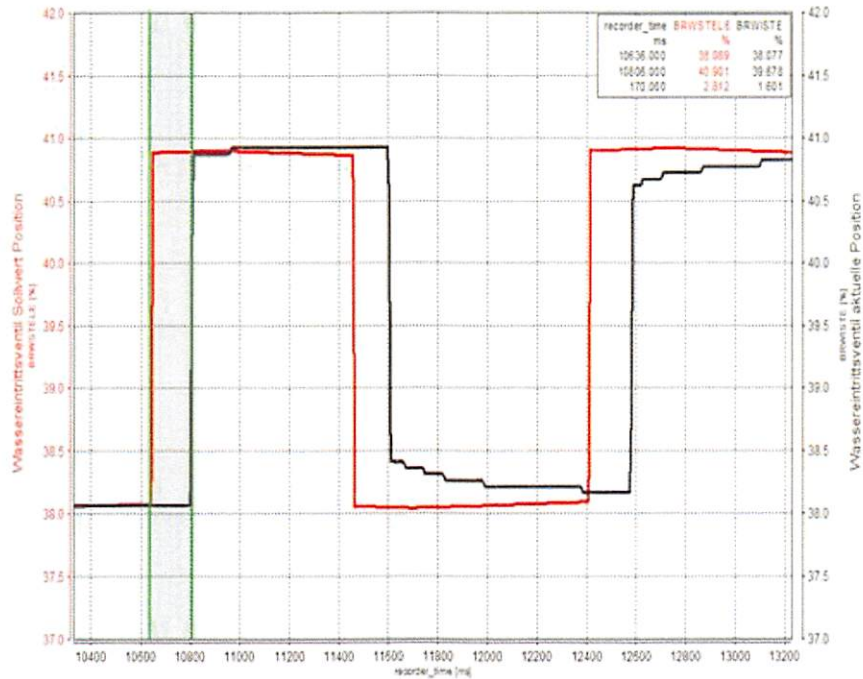


Abbildung 4-12: Soll-/ist-Position der Ventile mit Totzeit

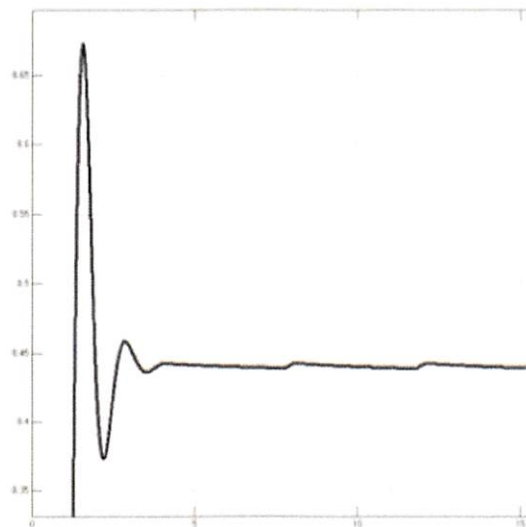


Abbildung 4-13: Modellschwingungen durch Totzeit

Die Problematik der Totzeit konnte in dem Simulink Modell nachgebildet und getestet werden. An einem Modell, welches nicht zum Überschwingen neigte, wurde die Totzeit mit eingebunden. Abbildung 4-13 zeigt das Ergebnis des Modells nach Einbindung der Totzeit. Auf einem Sprung am Eingang reagiert das System mit weitem überschwingen. Weiter bilden sich auch im stationären Betrieb Dauerschwingungen aus. Die Theorie und das Modell zeigen sehr klar, dass die Totzeit einen großen Einfluss auf die Regelbarkeit des Systems hat und somit minimiert werden muss (Quelle (3), (4)).

### **Zusammengefasste Ergebnisse aus AP2:**

- Filter Best Practice: Moving-Average-Filter mit bestehendem Bessel-Filter
- FFT-Analyse kann ein Footprint einer Bremse darstellen, aber
  - Motorschwingungen in der FFT-Analyse enthalten (0 bis 100 Hz)
  - Eindeutige Zuordnung der höheren Frequenzen erfordert weitere Analysen
  - Ein kompletter Footprint erfordert eine ca. 5kHz Abtastfrequenz
- Das einfache Ersatzmodell zeigt real auftretende Phänomene
  - Totzeit der Ventile führt zu hohen Schwingungen
  - Nichtlinearität der Ventile führt zu Problemen in der Regelung

### **Die folgenden Aufgaben im AP 2 können als abgeschlossen gelten:**

- ✓ Entwicklung standardisierter Prüfläufe für die Inbetriebnahme und Abnahme
- ✓ Abgleich der Ergebnisse bezüglich der in Arbeitspaket 1 entwickelten Qualitätsmerkmale
- ✓ Ableitung von Handlungshinweisen für die Inbetriebnahme Ingenieure
- ✓ Aufbau eines Informationssystems
- ✓ Dokumentation der Ergebnisse

Die aus dem AP 2 hervorgehenden Erkenntnisse wurden der Firma Zöllner mitgeteilt und besprochen. Es wurden eindeutige Handlungshinweise bezüglich der Umsetzung der Regelung gefunden, die zu einer wesentlichen Verbesserung der Regelbarkeit führen. Nach Absprache aller Projektpartner, wird der MS 2 als positiv beurteilt und abgeschlossen.

### 4.3 AP 3: Potentialanalyse für die Abbildung transienter Zustandsübergänge

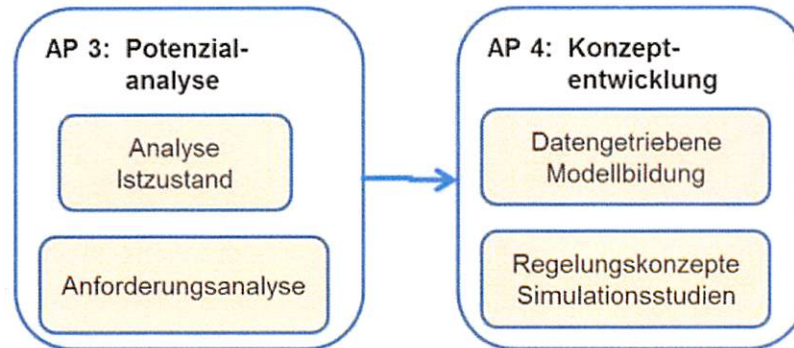


Abbildung 4-14: Arbeitspakete3 und 4

In dem AP3 wurden im Wesentlichen die Erkenntnisse aus dem AP2 weiter aufgegriffen und untersucht. Es wurden Anforderungen an das Regelkonzept definiert und gleichzeitig Lösungsvorschläge zur Umsetzung erarbeitet. Parallel dazu wurde ersichtlich, dass die Glättung des rückgeführten Signals (Drehmoment) für die Regelung immer wichtiger wird. Aus diesem Grund wurde das Drehmomentsignal mittels modellbasierter Verfahren gefiltert.

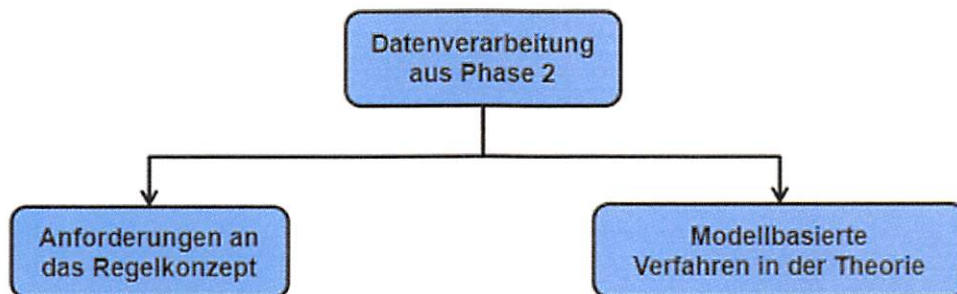


Abbildung 4-15: Aufteilung des Arbeitspaketes 3

#### 4.3.1 Anforderungen an Regelkonzept

##### Linearisierung der Ventile

Die Nichtlinearität der Ventile konnte in der Praxis und der Theorie bewiesen werden und stimmt gut miteinander überein. Im nächsten Schritt wurde aus den real gemessenen Ventildaten eine Linearisierungskennlinie erstellt und in das Matlab-Simulink Modell implementiert. Die Simulation zeigt, dass durch die Linearisierung die Ventile in jedem Bereich linear arbeiten. Hierdurch gelingt es, dass das Modell in allen Bereichen besser regelbar wird.



---

Um die erforderliche Linearisierung der Ventile in der Praxis testen zu können, wurde im ersten Schritt eine Flowsimulation von den Mitarbeitern der Fa. AVL Zöllner Marine

GmbH mit dem Simulationsprogramm SolidWorks erstellt. Hierbei wurden die gängigsten Druck und Ventilstellungen in die Simulation eingearbeitet. Die Ergebnisse der Simulation wurden in die Regelungsumgebung in Matlab/Simulink implementiert und getestet (Abbildung 4-16).

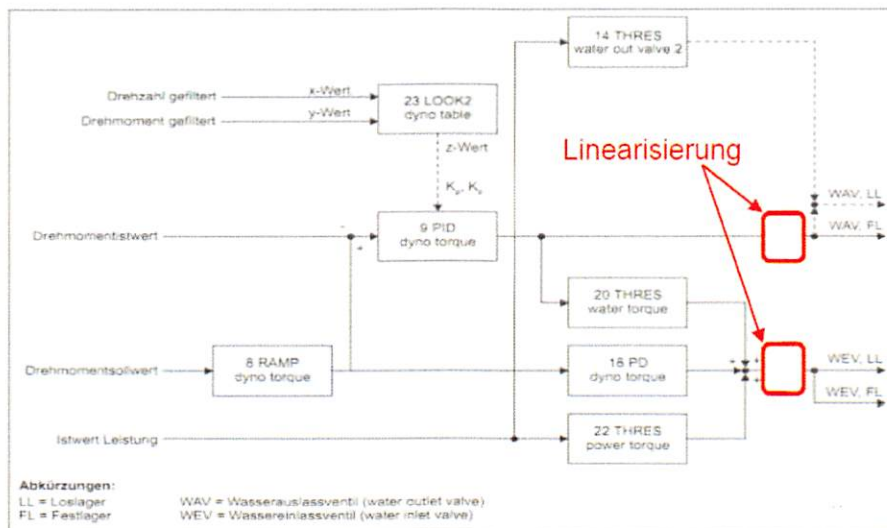


Abbildung 4-16: Einbindung der Linearisierung in das bestehende Regelungskonzept

### Minimierung der Totzeiten

Zur Identifizierung der Ursache wurde eine Ansteuerung der Ventile an der FH-Kiel genauer untersucht. Für die Ansteuerung der Ventile wird ein Steuer- und Antriebssystem der Fa. B&R Automation GmbH verwendet. Zu Beginn wurde die Totzeit durch ein Oszilloskop im Gesamtsystem nachgewiesen (Abbildung 4-17). Gleichzeitig wurde der Ventilmotor ausgemessen.

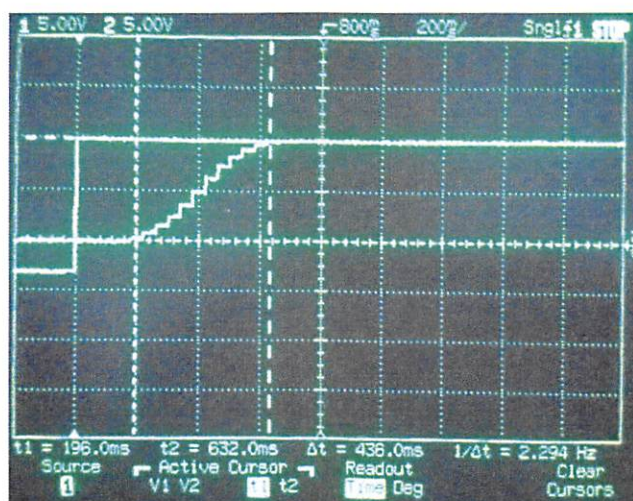


Abbildung 4-17: Totzeitnachweis mit Oszilloskop



Anschließend wurden mehrere Steuerungselemente abgeklemmt, u. a. der Resolver und der Umrichter. Beide konnten als Fehlerursache ausgeschlossen werden. Um die Funktionsweise der SPS zu verstehen, wurde ein kleines Programm geschrieben. Hierbei fiel auf, dass Zykluszeiten eingestellt werden können, in dem die Aufgaben abgearbeitet werden sollen. Die Analyse hat gezeigt, dass in dem verwendeten System Zykluszeiten von 100 ms eingestellt sind. Eine Neuprogrammierung der Steuerungssoftware mit geringeren Zykluszeiten ist leider nicht möglich, da die verwendete Hardware zu veraltet ist. Somit liegt das Auftreten der Totzeit in der veralteten SPS - Hardware. Diese Erkenntnisse wurden der AVL Zöllner Marine GmbH mitgeteilt.

Aus diesem Grund hat sich die Firma Zöllner entschieden die Ansteuerungseinheit (LSE) der Ventile zu erneuern und auf den aktuellen Stand der Technik zu bringen. In der neu konstruierten LSE Einheit werden neue Motoren, neue SPS und neue ACOPOS Frequenzumrichter verwendet. Das Erstellen des SPS Programms wird extern von der Firma B&R übernommen. In dem neuen Programm ist die Zykluszeit der SPS auf 10ms gesetzt. Die Zykluszeit im neuen Programm ist damit 10 Mal schneller als in der alten Software. Erste Versuche bei der Firma AVL haben eine wesentliche Verbesserung der Regeleigenschaften gezeigt. Die erneuerte LSE stellt damit eine sinnvolle Verbesserung der hydraulischen Leistungsbremse da und wird nach der noch ausstehenden CE-Zertifizierung in die Standardproduktion einfließen.

Damit an der Fachhochschule Kiel weiter an neuen Lösungsansätzen und Optimierungen gearbeitet werden kann, sind auch die Systeme an der FH-Kiel auf die neue Hard und Software umgestellt worden. Die im Projekt beteiligten Studenten wurden hierfür auf den entsprechenden Lehrgängen bei der Firma B&R geschult.

### 4.3.2 Modelbasierte Verfahren

Zur Filterung des Drehmomentsignals wurde in diesem Abschnitt ein modellbasierter Kalman-Filter verwendet. Für die Aufgabe der Zustandsschätzung und Beobachtung der Zustände eignet sich der Kalman-Filter besonders, welcher nach seinem Entdecker Rudolf E. Kálmán benannt wurde. Der Kalman-Filter ist ein adaptiv arbeitender Beobachter für ein dynamisches System, vorzugsweise für Größen, die schlecht oder überhaupt nicht gemessen werden können. Die Aufgabe des Kalman-Filters besteht bei dieser Anwendung in der Schätzung der Systemzustände (sowohl des Drehmoments, als auch der Störgröße), welche durch den Vergleich zwischen Messungen und der Simulation des zu messenden Systems die korrekten Zustände schätzt. Der Kalman-Filter ist dabei besonders robust gegen Störungen durch überlagerte Rauschprozesse. Für die Verwendung des Kalman-Filters wird eine mathematische Beschreibung des Systems in Form der Zustandsraumdarstellung benötigt. Hierfür ist ein mathematisches Modell Voraussetzung. Die Erarbeitung des Modells mit Kalman-Filter war Bestandteil der für das Projekt durchgeführten Master-Projekte und ist in den Quellen (4) und (5) genau beschrieben.

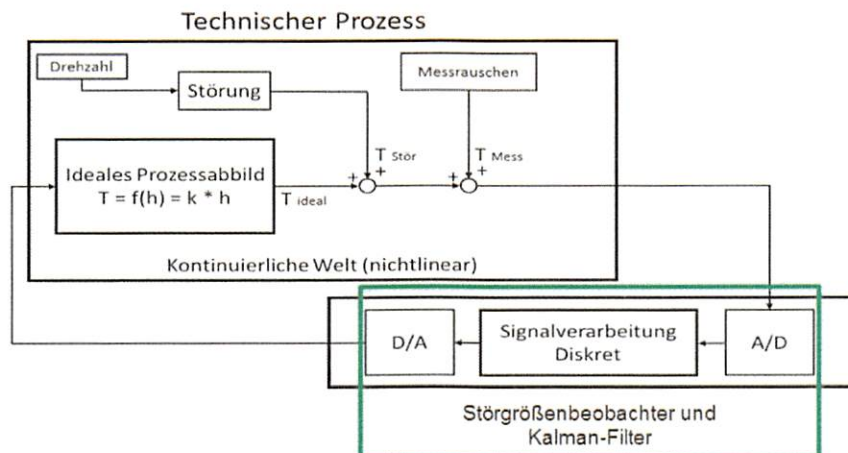


Abbildung 4-18: Prozessabbild einer HLB mit Kalman-Filter

Die Abbildung 4-18 zeigt den schematischen Aufbau des Simulink Modells mit Kalman-Filter. Im technischen Prozess wird der Ausgang des idealen Prozessabbildes des Tankmodells mit einer drehzahlabhängigen Störfrequenz und einem Messrauschen beaufschlagt. Der Kalman-Filter nimmt das gestörte Signal auf und filtert es für die Regler Rückführung.



In einem ersten Schritt wurde der aufgebaute Kalman-Filter anhand eines künstlich hergestellten Störsignals mit Messrauschen getestet. Das Ergebnis dieses Versuchs ist in der Abbildung 4-19 zu sehen.

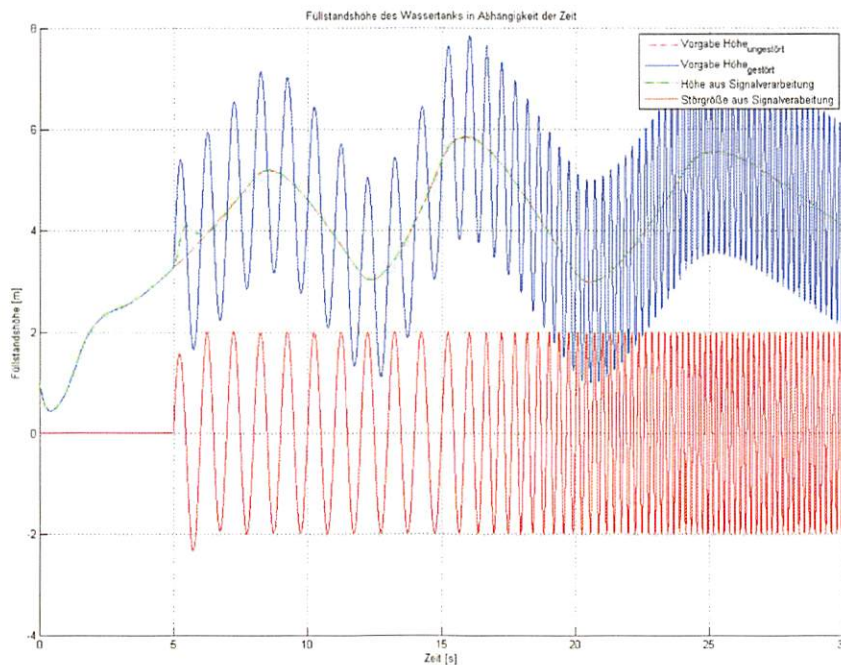


Abbildung 4-19: Ergebnis der Filterung mit systematischer Störung

Das Ergebnis der Messung zeigt, dass der Kalman-Filter die künstlich erzeugte Störgröße mit Rauschen sehr gut identifiziert und herausfiltern kann. Auf der grünen Kennlinie sind keine Störschwingungen mehr zu erkennen.

Um einen Schritt weiter zu gehen, wurde getestet wie sich der Kalman-Filter verhält, wenn man ihn mit echten Prozessdaten füttert. Hierfür wurde das real gemessene und ungefilterte Drehmomentsignal einer Messung aufgenommen und an die momentanen Bedingungen des Kalman-Filters angepasst. Es sollte hierbei vorrangig getestet werden, ob der Kalman-Filter mit den sich ständig ändernden Frequenzen zurecht kommt oder nicht. Das Ergebnis aus diesem Versuch ist in der Abbildung 4-20 zu sehen.

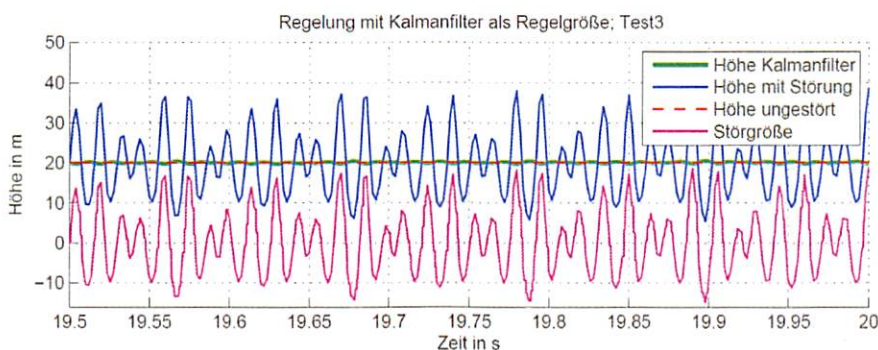


Abbildung 4-20: Ergebnis der Filterung mit realem Störsignal

Nach erfolgter Anpassung an das erweiterte Simulationsmodell und der Implementierung in die Regelungsumgebung sowohl auf Simulationsebene als auch in der Hardware-in-the-Loop-Umgebung, wird auch hier das große Potential des Kalman-Filters aufgezeigt, obwohl ein eindeutiges Simulationsmodell nicht vorhanden ist. Für eine erfolgreiche Anwendung des Kalman-Filters muss sichergestellt sein, dass das Störsignal ausreichend genau übertragen wird. In Absprache mit dem Industriepartner wurde Arbeitspaket 3 erfolgreich abgeschlossen.

### **Zusammengefasste Ergebnisse aus AP 3:**

- Die Erweiterung des bestehenden Regelungskonzeptes um eine Normierung und Linearisierungskennlinie zeigt großes Potenzial  
→ Implementierung durch AVL notwendig
- Ventilansteuerung ist totzeitbehaftet und kann mit dem bestehenden System nicht aufgelöst werden  
→ Es wird eine neue SPS mit schneller (10ms) Reaktionszeit verwendet
- Die theoretischen Untersuchungen haben ein einfaches Modell ergeben, das für einen Prüfstands-Simulator geeignet scheint
- Modellbasierte Verfahren wie der Kalman-Filter zeigen ihr großes Potenzial, sind jedoch durch die Abhängigkeit einer genauen Modellvorstellung schwierig umzusetzen

### **Abgeschlossene Aufgaben im AP 3:**

- ✓ Ist-Analyse anhand der bestehenden Prüfstands Infrastruktur
- ✓ Anforderungsanalyse für transiente Übergänge anhand realer Szenarien
- ✓ Potenzialabschätzung für die Umsetzung am Prüfstand

Dauer: 3 Monate

## 4.4 AP 4: Konzeptentwicklung für die Abbildung transienter Zustandsübergänge

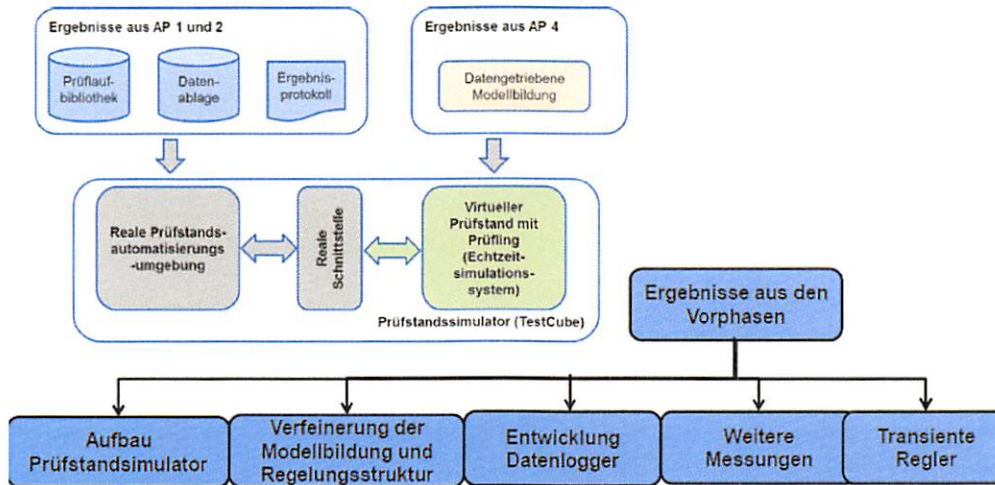


Abbildung 4-21: einzelne Arbeitspunkte im Arbeitspaket 4

Wie in Abbildung 4-21 zu erkennen ist, ist das Arbeitspaket in 4 Teilbereiche gegliedert. Mit den Ergebnissen aus den Vorphasen wurde nun eine Prüfstandumgebung aufgebaut, ein Datenlogger entwickelt, die Modell- und Regelungsstrukturen verfeinert und weitere Messungen betrieben.

### 4.4.1 Prüfstandumgebung

Ein wesentlicher Bestandteil des Arbeitspaketes 4 war die Inbetriebnahme einer Prüfstandumgebung. Diese wurde von der Fa. AVL List GmbH zur Verfügung gestellt und aus den Projektmitteln finanziert. Diese ist nun Eigentum der FH Kiel und kann für weitere Entwicklungen genutzt werden. Die Inbetriebnahme erfolgte in Zusammenarbeit mit Fachpersonal der Fa. AVL List GmbH aus Graz, welches eine Woche lang den Studierenden eine Einweisung in die Prüfstandumgebung gab.

Bei der Prüfstandumgebung handelt es sich um eine Hardwareumgebung, die in der Lage ist Simulationsmodelle in Echtzeit, d. h. in definierten gleichen Zeitschritten, mit realen Schnittstellen zu berechnen. In Abbildung 4-22 ist diese zu erkennen. Auf dem Prüfstandsimulator werden die Bremsen und Motoren Modelle in Echtzeit simuliert und können über eine Schnittstelle extern angesteuert bzw. geregelt werden. Der Vorteil hierbei ist, dass der Regler und die Modelle auf getrennter Hardware laufen und somit auch die Wege der Kommunikation mit betrachtet und getestet werden können. Im allgemein werden solche Aufbauten auch als Model-in-the-Loop (MiL) bezeichnet.

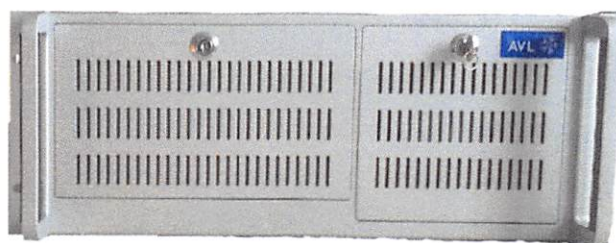


Abbildung 4-22: Prüfstandsimulator von der Fa. AVL List GmbH

Somit ist die FH Kiel nun in der Lage, Regler und weitere innovative Methoden mit Hilfe dieser Prüfstandumgebung unabhängig von der realen Anlage zu entwickeln. Dies verkürzt die Entwicklungszeit und erhöht die Qualität der entwickelten Methoden.

#### **4.4.2 Erweiterte Entwicklungsumgebung**

Neben der Inbetriebnahme der Prüfstandumgebung wurde auch eine erweiterte Entwicklungsumgebung geschaffen. Dies hat mehrere Gründe. Die PUMA-Automatisierungseinheit der AVL List GmbH wird für die Inbetriebnahme von Leistungsbremsen verwendet. Der Umgang mit dieser ist sehr speziell und wird nur von Inbetriebnehmern der AVL Zöllner GmbH beherrscht. Die Implementierung von neuen Reglern und Methoden kann nur von Fachpersonal der AVL List GmbH in Graz übernommen und nicht von der FH Kiel sichergestellt werden. Um effizient an der FH entwickeln zu können, wurde nun gemeinsam eine Bypass Lösung erarbeitet. Die erdachte Lösung, eigene entwickelte Regler mit der PUMA-Automatisierungseinheit über eine Ethernet-Schnittstelle an der realen Anlage zu testen, musste jedoch verworfen werden. Im Betrieb zeigte sich, dass es bei der Datenübertragung zu Aussetzern kommen kann, wie in den rot markierten Kreisen der Abbildung 4-23 zu sehen ist. Eine echtzeitfähige Datenübertragung muss für den sicheren Betrieb gewährleistet sein.

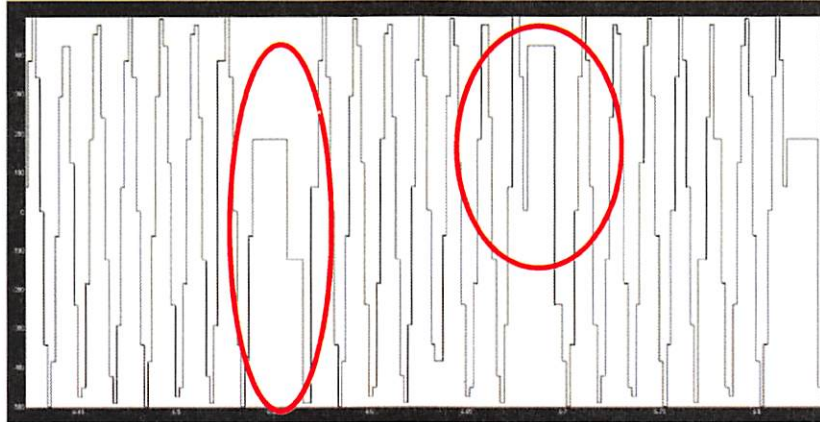


Abbildung 4-23: Signalverfälschung durch fehlende Echtzeitfähigkeit des Entwicklungsrechners

Somit wurde eine Bypass Lösung über eine echtzeitfähige CAN-Kommunikationsschnittstelle realisiert. Hierfür wurde ein FH-Kiel eigener Realtime-PC verwendet. Tests mit dieser neuen Entwicklungsumgebung haben zufriedenstellende Ergebnisse erzeugt. Es sind keine Aussetzer in der Kommunikation mehr vorhanden. Ein schematischer Aufbau der Entwicklungsumgebung ist in Abbildung 4-24 zu sehen.

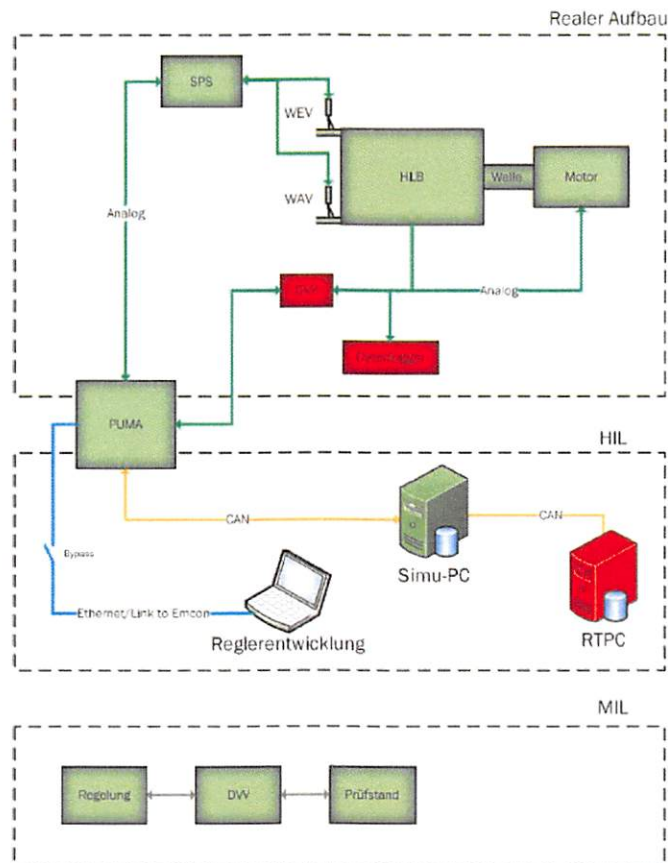


Abbildung 4-24: Schematischer Aufbau von Entwicklungsumgebung, Prüfstands-Simulator und realer Anlage



Neben der Echtzeitfähigkeit ist ein weiterer Vorteil der Bypass Lösung eine PUMA-unabhängige Entwicklung von Reglern und Methoden. Somit ist eine effiziente Entwicklung an der FH-Kiel sichergestellt. Weiterhin vorteilhaft ist auch, dass die Bypass Lösung sowohl für Hardware-in-the-Loop (HiL) Tests als auch für die reale Anlage verwendet werden kann.

Der Bypass wurde in Zusammenarbeit mit der Firma Zöllner realisiert und bei Messungen an der realen Anlage ausreichend getestet. Somit ist es nun möglich in einer MiL-Umgebung Regler und Methoden zu entwickeln, diese an einer HiL-Prüfstandumgebung zu verfeinern und danach an der realen Anlage zu testen, ohne Anpassungen an der Entwicklungsumgebung vornehmen zu müssen. Eine nähergehende Beschreibung der Prüfstandumgebung ist unter der Quelle (4) zu finden.

#### **Vorgehensweise:**

- MiL-Umgebung → erste Grundlagenentwicklung
- HiL-Umgebung → Verfeinerung der Regler/Modelle und Test der Kommunikation
- Reale Anlage → Abschließende Test an realer Anlage

### 4.4.3 Regler für transiente Übergänge

Der Begriff transiente Übergang beschreibt in der Regelungstechnik das Verfahren von Arbeitspunkten gemäß bestimmter Funktionen von Sollwerten. Dabei kann es sich beispielsweise um rampenförmige Sollwertvorgaben handeln. Der Begriff Sollwert wird hierbei durch die Bezeichnung Solltrajektorie ersetzt. Die Regelgröße soll der Solltrajektorie möglichst exakt folgen. In Bezug auf das Projekt ERToS ist dies wichtig, da die Motorenhersteller in ihren Prüfläufen verschiedenste dynamische Kennlinien verfahren müssen. Diese Genauigkeit und Dynamik ist durch die HLB zu gewährleisten, damit die Prüfergebnisse nicht verfälscht werden. Klassische PID-Strukturen stoßen bei der Regelung transientser Sollwertvorgaben schnell an ihre Grenzen. Ein häufig auftretendes Phänomen ist der sogenannte Schleppfehler. Der Schleppfehler bezeichnet den Abstand der Regelgröße  $y(t)$  zur Solltrajektorie  $w(t)$ . In Abbildung 4-25 ist das Auftreten eines Schleppfehlers zu erkennen.

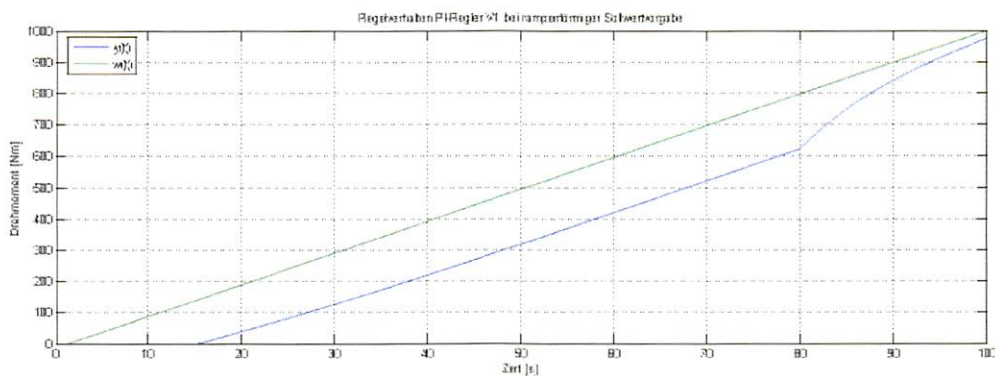


Abbildung 4-25: Schleppfehler zwischen Soll-Größe  $w(t)$  und Ist-Größe  $y(t)$

Das Regelverhalten aus Abbildung 4-25 wurde mit dem Standard PI-Regler an dem Anlagenmodell der Prüfstandumgebung aufgenommen. Es ist eindeutig zu erkennen, dass die Regelgröße, der Solltrajektorie stark verzögert folgt. Der Verlauf von  $w(t)$  ist in der Regelgröße nicht erkennbar. Dieses Verhalten kann bei schnelleren Solltrajektorien noch deutlich verstärkt werden.

Zur Verbesserung des Regelverhaltens der transienten Übergängen wird das Verfahren der modellprädiktiven Regelung (MPC-Modell prädiktive Control) untersucht und an dem vorhandenen Anlagenmodell getestet. Es wird vorrangig das Verhalten des Systems bei rampenförmigen Sollwertvorgaben getestet. Die Untersuchungen hierfür wurden im Rahmen einer Master-Projektarbeit vergeben und sind unter der Quelle (6) zu finden.

Der MPC Regler verwendet ein Verfahren, dass auf Grund von modellgestützten Vorhersagen der Regelgröße und Zustandsgrößen, sowie durch Messen aktueller Signale, eine optimale Stellgrößenfolge ermittelt. Dabei dienen die prädiktierten und gemessenen Informationen als Grundlage für das Lösen eines Gütefunctionals. Dieses hat die Aufgabe diverse Aspekte zu optimieren, wie beispielsweise die Minimierung der prädiktierten Regeldifferenz oder die Minimierung des Stellaufwandes. Ein spezielles Verfahren des MPC ist der Ansatz des Receding Horizon Control. Dabei handelt es sich um ein iteratives Verfahren. Für die Prädiktion wird ein zeitdiskretes Prozessmodell benötigt. In dem aktuellen Zeitpunkt  $k$  werden zunächst die aktuelle Regelgröße gemessen und alle aktuellen Zustandsgrößen bestimmt. Mit Hilfe dieser Informationen und Kenntnis über die zukünftigen Sollgrößen wird die im Sinne einer Optimierungsfunktion optimale Stellgrößenfolge ermittelt. Dabei liegt der Schwerpunkt oft auf der Minimierung der zukünftigen Regeldifferenz. Der Ablaufplan des MPC Reglers ist in Abbildung 4-26 zu sehen.

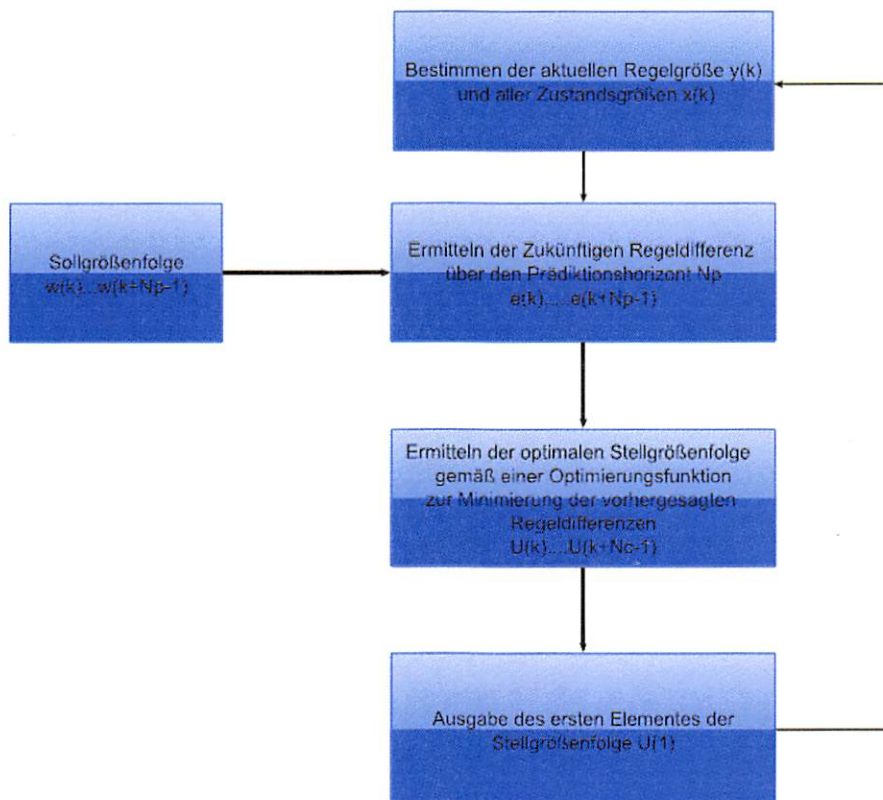


Abbildung 4-26: Ablaufplan des MPC-Algorithmus



Der umgesetzte MPC-Algorithmus ist in verschiedenen Szenarien an dem Anlagenmodell getestet worden. Dabei wurden die Tests zunächst in der MiL-Umgebung durchgeführt und anschließend in der HiL-Umgebung. Alle Tests wurden an dem Anlagenmodell in der Version 1 durchgeführt. Abbildung 4-27 zeigt den Vergleich des Regelverhaltens des MPC und des PI-Reglers bei einer langsamen, rampenförmigen Sollwertvorgabe. Das Verhalten des PI-Reglers weist einen deutlichen Schleppfehler auf. Die Solltrajektorie ist in dem Regelverhalten nicht erkennbar. Der MPC Regelkreis folgt der Sollwertvorgabe nahezu verzugsfrei.

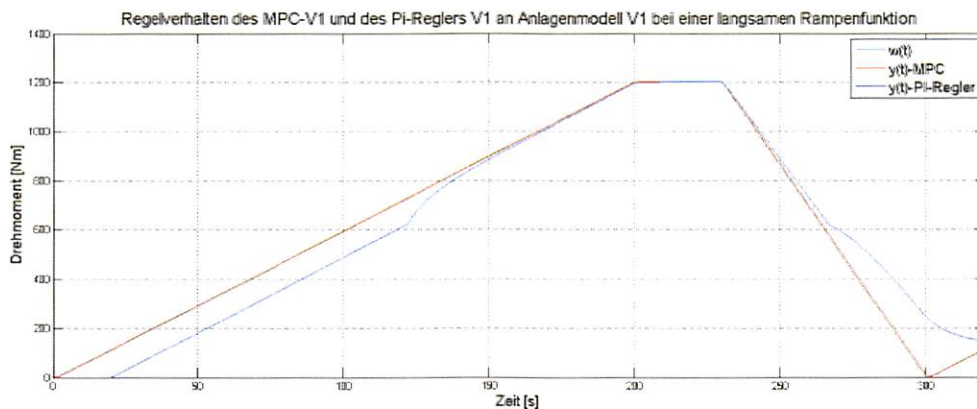


Abbildung 4-27: Vergleich zwischen MPC-Regler und PI-Regler

#### 4.4.4 Wärmeregulierung einer HLB

Das HLB-System hat während des Betriebs einen ständigen Wasserdurchfluss welcher Kosten verursacht. Diese Kosten stehen in einem direkten Zusammenhang zur Menge des Wasserdurchflusses und deren Bereitstellung mit angeschlossener Peripherie. So benötigt ein großer Wasserdurchfluss eine dementsprechend große Pumpe, welche nicht nur den Fluss, sondern auch den geforderten Wasserdruck gewährleisten kann. Aus diesem Grund ist es sinnvoll den Wasserdurchfluss, im Rahmen der einzuhaltenden Toleranzen, möglichst gering ausulegen. Die Grenze markiert hier die einzuhaltende maximale Wasseraustrittstemperatur von 60°C. Zur Sicherheit sollte die Wasseraustrittstemperatur zwischen 50°C und 55°C liegen. In den Messungen bei SDT zeigte sich, dass mit den jetzigen Einstellungen an der HLB kein definierter Temperaturzustand erreicht wird und die Temperatur zum Teil weit unterhalb den geforderten 50°C liegt. Um den geforderten Betriebszustand zu erreichen, soll eine Temperatur-Regelung in die HLB integriert werden. Um die Temperaturregelung problemlos in die bestehenden Regelungen zu integrieren, sollte die Temperaturregelung um das 10-fache langsamer arbeiten als die Drehmomentregelung. Bei der Entwicklung wurden mehrere Varianten simuliert. Das beste Ergebnis zeigt die Abbildung 4-28.

Hierbei wird eine Vorsteuerung verwendet, bei der der Drehmomentregler und der Temperaturregler entkoppelt sind. Erreicht wird dass, in dem das Drehmoment nur durch das Einlassventil und die Wassertemperatur nur durch das Auslassventil geregelt wird.

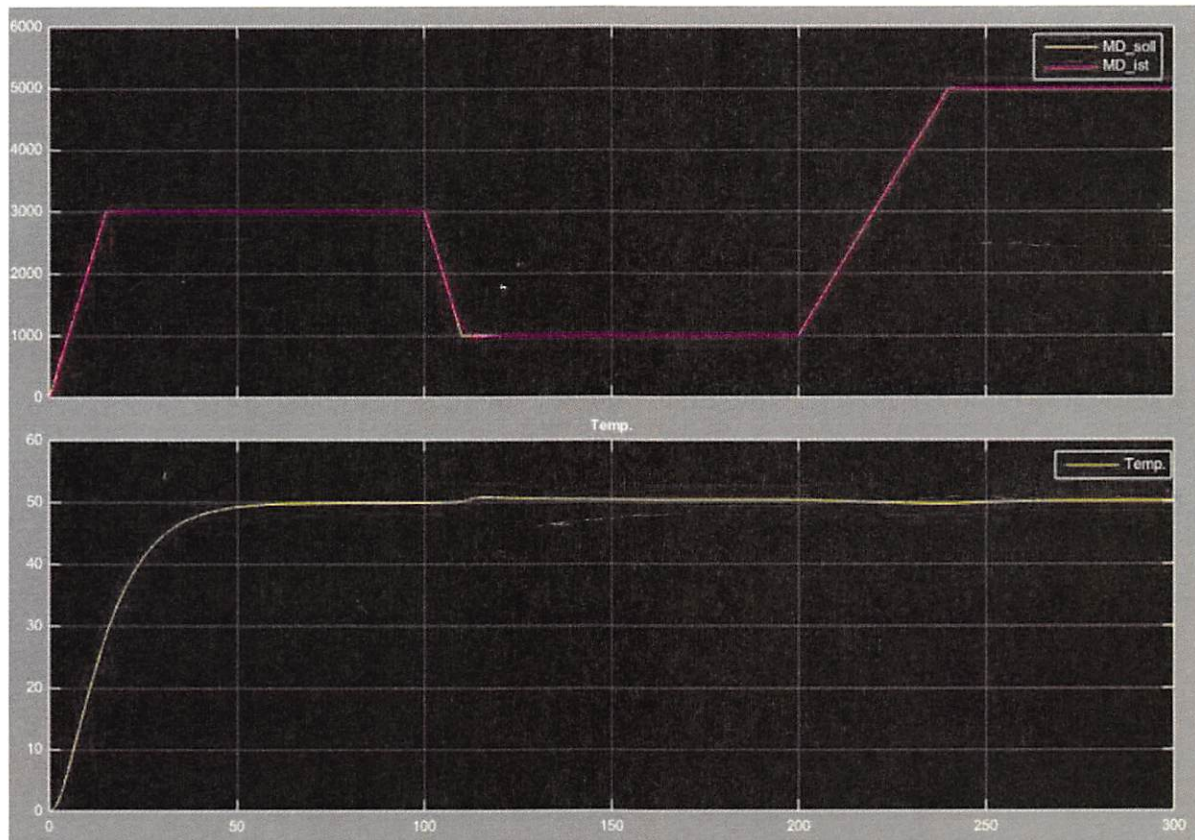


Abbildung 4-28: Simulationsergebnisse einer entwickelten Temperaturregelung für die HLB

In Abbildung 4-28 ist gut zu erkennen, dass der Temperaturregler die geforderten 50°C erreicht und auch bei Drehmomentänderungen nur minimale Abweichungen auftreten. Somit ist das Potential einer Temperaturregelung zur Kostenreduzierung von Inbetriebnahmen aufgezeigt worden. Eine ausführliche Dokumentation der getesteten Temperatur-Regler befindet sich unter der Quelle (7).

#### 4.4.5 Verfeinerung der Modellstruktur

Durch weitere Tests bei der SDT Kiel GmbH in Rendsburg konnten weitere reale Daten einer Leistungsbremse gesammelt werden. Diese wurden mit dem Modell verglichen und das Modell daraufhin angepasst und erweitert. Hierbei wurde ein linearer Zusammenhang zwischen dem hydrostatischen Druck des Modells und der Bremse festgestellt. Somit konnte die Höhe als Modellausgang durch ein drehzahlabhängiges Drehmoment ersetzt werden (Abbildung 3-1).

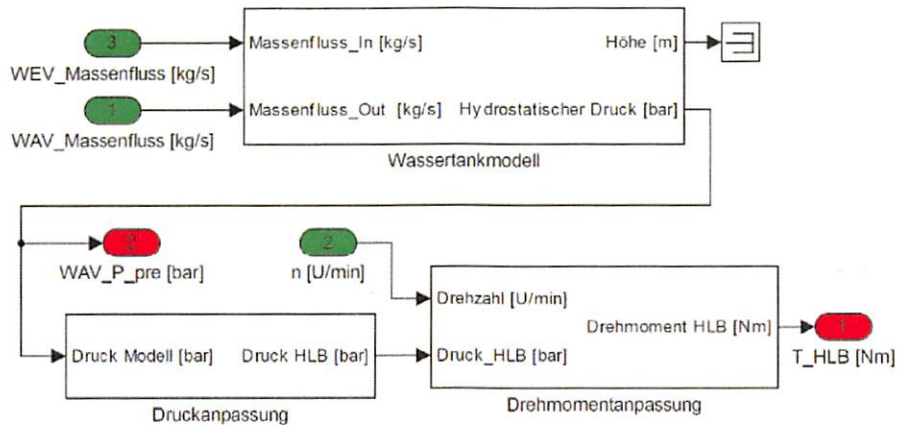


Abbildung 4-29: Erweiterung des Wassertankmodells um ein Drehmomentsignal

Des Weiteren wurden die Arbeitsergebnisse aus Kapitel 4.3.1 genutzt, um aus den vorhandenen Daten die Motorsteuerung der Ventile zu modellieren. Hierbei wurden die gemessenen Verzugszeiten der Steuerung berücksichtigt und zwei in Reihe geschaltete PT1-Glieder als Motorelemente genutzt. Somit konnte das theoretische Leistungsbremsenmodell weiter der physikalischen Funktionalität angepasst werden (siehe Abbildung 4-30).

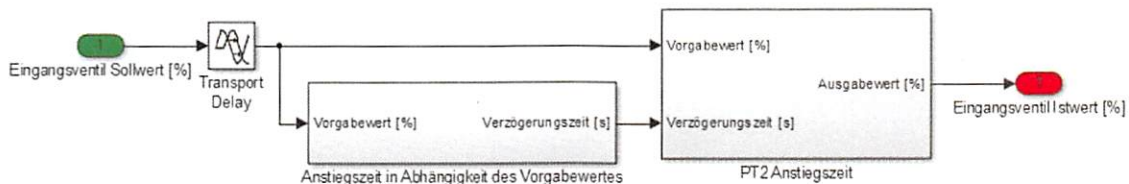


Abbildung 4-30: Erweiterung des HLB-Modells um die Ventileinstellzeit

Außerdem wurden die Eingangsgrößen des Systemmodells auf die realen physikalischen Größen angepasst. Hierbei wird der Massenfluss, der durch das Eingangsventil und das Ausgangsventil, in Abhängigkeit vom Differenzdruck am Ventil und dem Öffnungswinkel des Ventils, fließt, betrachtet. Somit wird die Ausgangsventilfläche nicht mehr als relevante Eingangsgröße genutzt. Hierbei wurden die Ergebnisse aus Kapitel 4.3.1 in die Simulationsumgebung eingepflegt. Ein Abgleich mit real gemessenen Werten in einem begrenzten Wertebereich ergab eine Übereinstimmung der simulierten Werte, wie Abbildung 4-31 zeigt.

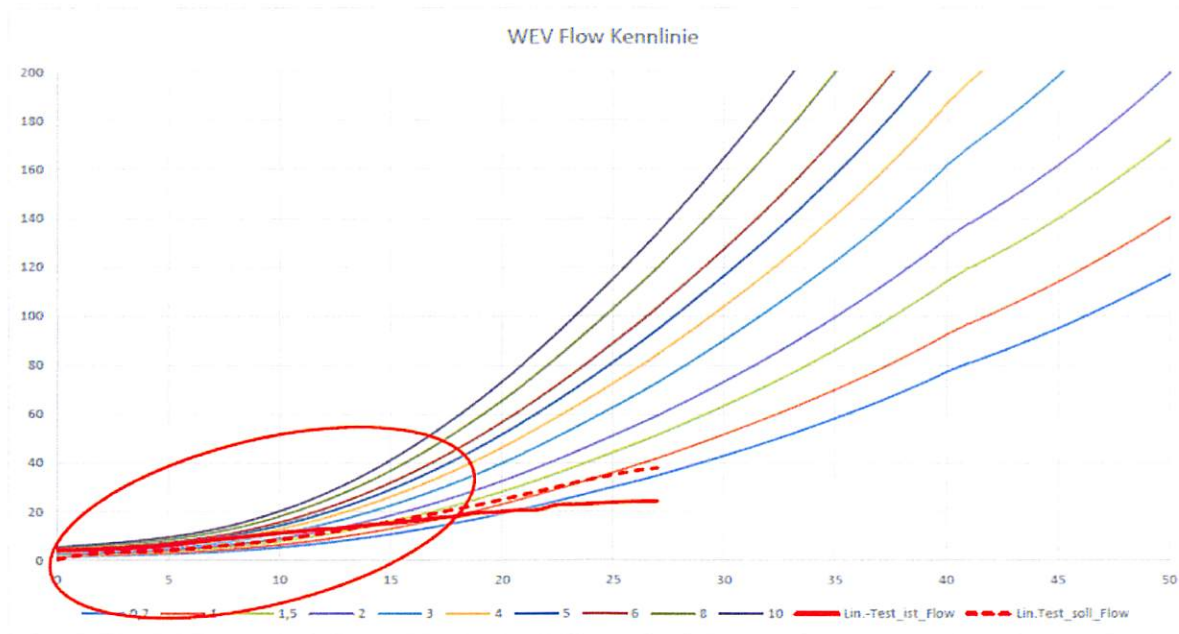


Abbildung 4-31: Vergleich von realen und simulierten Massenflüssen im Eingangsventil Y-Achse: Massenfluss, X-Achse: Öffnungswinkel

#### 4.4.6 Bewertungskriterien transienter Übergänge

Um transiente Übergänge miteinander vergleichen zu können, müssen Kriterien gefunden werden, die eine Bewertung von transienten Übergängen ermöglichen. Hierbei wurden folgende Kriterien herausgearbeitet.

##### Verzugsfreier Start

Hierbei soll die Zeitdifferenz zwischen Solltrajektorie und Ist-Wert beim Start des Prüflaufs auf ein Minimum reduziert werden. Es soll somit kein Schleppfehler entstehen, wie in Abbildung 4-25 zu erkennen ist.

##### Gleiche Steigung wie Solltrajektorie

Ein weiteres Kriterium ist die gleiche Steigung des Istwertes wie die Solltrajektorie. Hiermit soll sichergestellt werden, dass die transienten Übergänge sauber den Vorgaben entsprechen.

##### Über- und Dauerschwingen

Als letztes Kriterium kann die Schwingfähigkeit der transienten Übergänge genannt werden. Hierbei gilt es, ein Überschwingen oder ein Dauerschwingen der Istwerte zu vermeiden.

#### 4.4.7 Entwicklung eines Datenloggers

Für die Kunden soll von der hydraulischen Leistungsbremse während der Inbetriebnahme ein Abnahmeprotokoll erstellt werden. Dieses Protokoll dient dazu dem Kunden vor Ort ein Nachweis zu erbringen, dass die Inbetriebnahme korrekt durchgeführt worden ist und die Anlage ohne Fehler läuft. Hiermit kann für beide Seiten die korrekte Ausführung der Lieferung abgesichert werden. Aus diesem Grund müssen Messdaten von der Inbetriebnahme gesammelt und in einem Datenlogger abgespeichert werden. Ein weiterer Grund für den Datenlogger besteht darin, dass ein Footprint der Anlage erstellt werden soll, so dass man im späteren Lebenszyklus eventuelle Veränderungen messen kann. Hierbei ist das vorrangige Ziel mehr Daten von dem gesamten Lebenszyklus einer Bremse zu sammeln. Für diesen Zweck wird in diesem Projekt ein Prototyp eines günstigen Datenloggers erstellt.

Um eine ausreichende Datenbasis zu erhalten, wurde ein Datenlogger entwickelt, mit dem zusätzliche Messdaten einer Leistungsbremse aufgenommen werden können. Hierbei sollen Langzeitwerte von Betriebsgrößen wie beispielsweise

- Drehmoment
- Drehzahl
- Ventilpositionen
- Temperaturen

aufgenommen werden, die durch die bestehenden Systeme nicht separat gespeichert werden können. Das Grundelement des Datenloggers besteht aus einem Mikrocontroller, der in Abbildung 4-32 zu sehen ist.



Abbildung 4-32: Verwendeter Mikrocontroller als Basis für den Datenlogger

- Einlesen von Controller Area Network (CAN)-Daten
- Aufnehmen von 4 + x Signalen (Analog / Digital)
- Aufnahmeintervall von 10ms
- Echtzeitfähig
- Speichern der Daten auf einer Festplatte (Dateisystem / Server)
- Mit MATLAB / Simulink beschreibbar

Um die Stabilität des Systems zu ermitteln wurden zunächst einige Langzeitmessung bei einer Sample Time von 10ms durchgeführt. Die Auswertung weist selbst bei einer Laufzeit von vier Tagen keine Unregelmäßigkeiten auf. Dies zeigt, dass der Prototyp auch über einen Zeitraum von mehreren Tagen funktioniert. Der nachfolgende Test in Abbildung 4-33 ist mit einer Sample Time von 100ms ausgeführt worden. In der Abbildung ist ein Vergleich der aufgenommenen Daten mit dem Datenlogger und der Prüfsimulationsumgebung erkennbar. Bis auf ein leichtes Überschwingen bei 100s sind beide Werte identisch. Eine ausführliche Beschreibung des Datenloggers befindet sich in der Quelle (6).

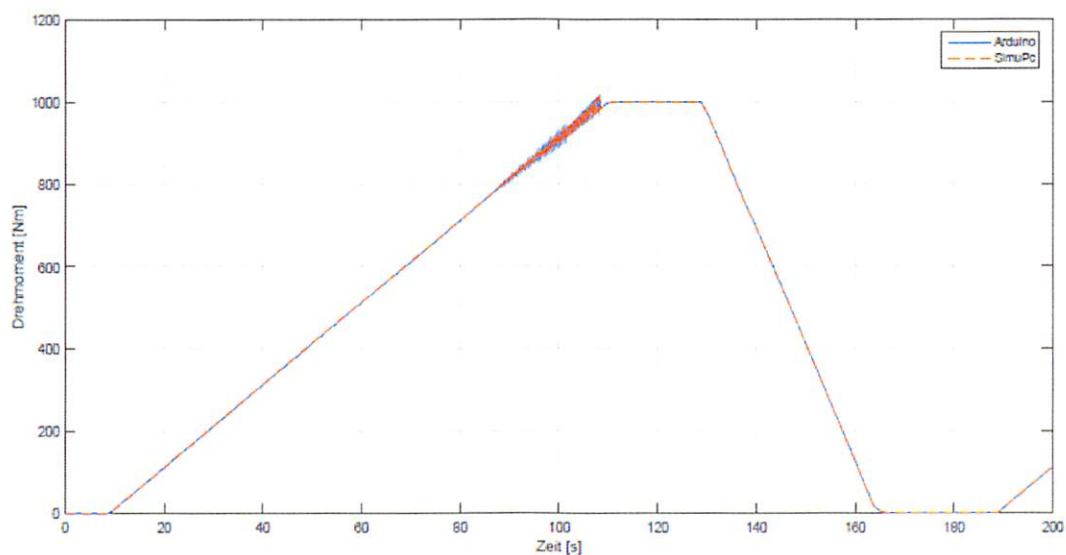


Abbildung 4-33: Datenaufnahme mit einem Datenlogger

#### Abgeschlossene Aufgaben des AP 4:

- ✓ Datengestützte Modellbildung für die hydraulischen Hochleistungsbremsen
- ✓ Validierung der Modellbildung anhand der realen Daten
- ✓ Untersuchung geeigneter Regelstrategien (z.B. Gain-Scheduling Verfahren)
- ✓ Untersuchung möglicher Bewertungskriterien für die transienten Zustandsübergänge (z.B. Toleranzbänder, Integrale Abweichungen, Gradientenvergleich)
- ✓ Bewertung der konzeptionellen Ideen
- ✓ Dokumentation

Dauer: 6 Monate

In Zusammenarbeit mit dem Industriepartner wurde das Arbeitspaket 4 als erfolgreich abgeschlossen bewertet.

#### **4.5 AP 5: Automatisierte Bewertung der transienten Übergänge**

Im Arbeitspaket 5 ist das vorrangige Ziel, die in den vorangegangenen Arbeitspaketen ermittelten Ergebnisse abschließend zu testen. Die anstehenden Tests sollten an einer realen Anlage durchgeführt werden. Aufgrund von Verzögerungen im Auftrags- und Fertigungsprozess der Hochleistungsbremsen bei unserem industriellen Kooperationspartner „AVL Zöllner Marine GmbH“ kam es jedoch zu Verzögerungen bei den abschließenden Messungen. Die Verzögerungen wurden in der Projektplanung im Kapitel 3.1 mit berücksichtigt.

Die abschließenden Prüfläufe konnten ausführlich am 15-27.08.2016, am 20-27.09.2016 und am 13-20.10.2016 bei der Firma SDT in Rendsburg durchgeführt werden. Um ein breiteres Abbild der Wirklichkeit zu bekommen, wurden die Tests an verschiedenen Bremsenversionen der Omega 1000 Serie durchgeführt. Die Zeit zwischen den Prüfläufen wurde genutzt, um letzte geringfügige Anpassungen vorzunehmen.

In den Tests wurden die Ergebnisse aus den Arbeitspaketen 1,2,3 und 4 aufgegriffen, wobei die folgenden Schwerpunkte definiert wurden.

- Prüflauf mit eigener Entwicklungsumgebung
- Drehmoment-Regelung über eigene Entwicklungsumgebung
- Test mit eigenem automatischen Drehmoment-Fahrprofil
- Abtastrate mit 200 Hz
- Linearisierung der Ventile
- Überprüfung des Temperaturmodells
- Dokumentation der simulierten Modelle

#### 4.5.1 Prüflauf mit eigener Entwicklungsumgebung

Um die entwickelten Regelungen testen zu können sind Prüfläufe an einer realen Anlage erforderlich. Wie im Kapitel 4.4.2 bereits beschrieben worden ist, können eigene Regelungskonzepte jedoch nicht auf dem standardmäßig genutzten Automatisierungssystem PUMA implementiert werden. Hierfür ist es besonders wichtig, dass die unter Kapitel 4.4.2 beschriebene Bypass-Lösung funktioniert. Aufgrund dessen wurde die Bypass-Lösung, wie in Abbildung 4-34 zu sehen ist, ausführlich getestet.

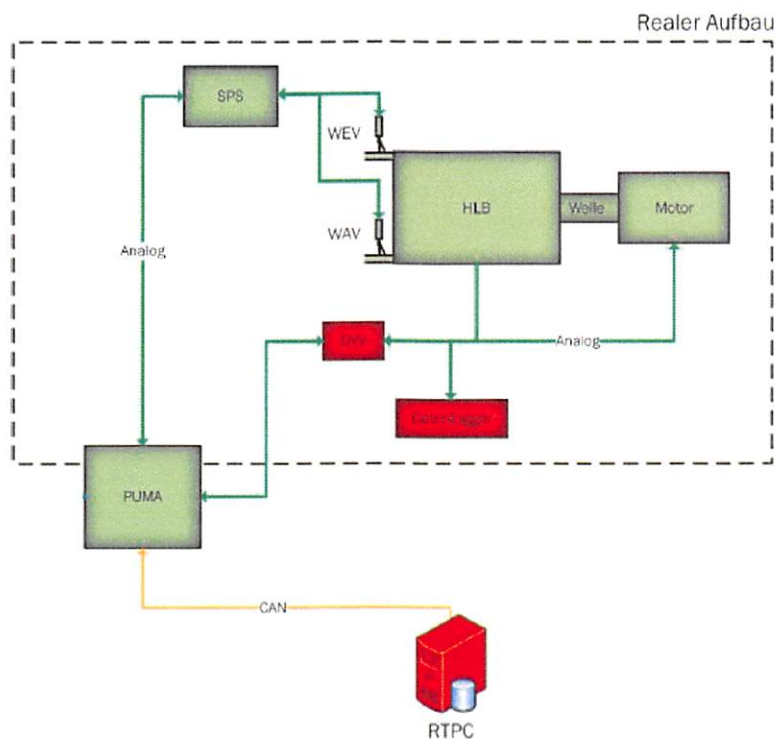


Abbildung 4-34: Bypass-Lösung an realer Anlage

Die Ergebnisse aus den Prüfläufen sind zufriedenstellend. Der RTPC kann über die Bypass-Lösung das Automatisierungssystem PUMA ersetzen, ohne das es zu Fehlern oder Fehlverhalten kommt. Die CAN-Kommunikation zwischen dem RTPC und dem PUMA-System funktioniert und kann bei Bedarf einfach erweitert werden.



#### **4.5.2 Drehmoment-Regelung über eigene Entwicklungsumgebung**

Um zu beweisen, dass mit dem Bypass die Regelung der Bremse übernommen werden kann, wurde als erster Test der standardmäßig von Zöllner genutzte Regelalgorithmus im RTPC exakt nachgebildet.

Die Tests haben gezeigt, dass der PID-Regler in der eigenen Entwicklungsumgebung sehr gut funktioniert. Besonders das Umschalten zwischen der eigenen Entwicklungsumgebung und dem PUMA Automatisierungssystem funktioniert stoßfrei, womit ein wichtiges Kriterium erfüllt wird. Somit kann über die Bypass-Lösung im RTPC eine schnelle Validierung von neuen Regelungskonzepten an realen Anlagen durchgeführt werden.

#### **4.5.3 Test mit eigenem automatischen Drehmoment-Fahrprofil**

Der in Arbeitspunkt 1 entwickelte Prüflauf kann nur auf dem AVL eigenen Automatisierungssystem PUMA ausgeführt werden. Im Regelfall ist beim Kunden vor Ort jedoch kein PUMA System vorhanden. Dies liegt daran, dass die meisten Kunden das weitaus günstigere AVL eigene Automatisierungssystem BME400 nutzen. Das günstige BME400 System ist jedoch nicht eigenständig in der Lage automatische Fahrprofile zu fahren. Mit dem RTPC können über die Bypass-Lösung jedoch automatische Fahrprofile vorgegeben werden. Dies versetzt die Fa. Zöllner unter anderem in die Lage bei Inbetriebnahmen Prüfläufe mit automatisierten Fahrprofilen durchzuführen. Dies garantiert eine standardisierte Prüfung der Inbetriebnahmen vor Ort und kann in das Abnahmeprotokoll mit einfließen. Hierfür muss lediglich der RTPC das PUMA oder BME400 System zeitweise während der Inbetriebnahme ersetzen.

Die automatisierten Fahrprofile können durch eine Signal-Builder-Funktion in die eigene Entwicklungsumgebung integriert werden und wurden vollständig abgefahren. Die Abbildung 4-36 zeigt die in Simulink verwendete Signal-Builder-Funktion, in der die gewünschten Drehmoment- und Drehzahl-Fahrprofile über der Zeit eingestellt werden können. Die transienten Übergänge sind in ihrer Steilheit, Dauer und Höhe frei wählbar. Die Umsetzung der Fahrprofile kann in Excel vorbereitet und mit der richtigen Formatierung in die Simulink Signal-Builder-Funktion importiert werden (siehe Abbildung 4-35).

Time	MD	N
0	500	900
100	500	900
138	1100	900
200	1100	900
238	2000	900
300	2000	900
400	600	900
500	600	900
600	600	1100
700	600	1100
738	1250	1100
800	1250	1100
838	2400	1100

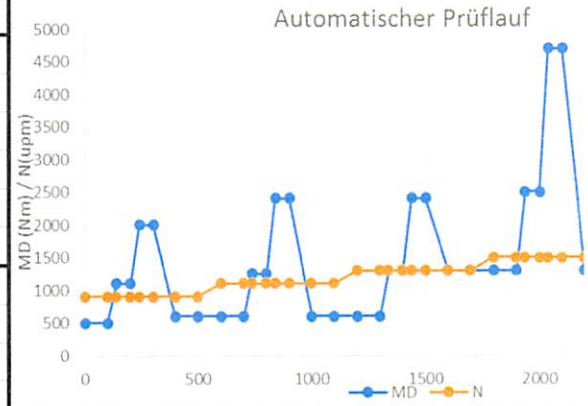


Abbildung 4-35: Vorbereitetes Fahrprofil in Excel

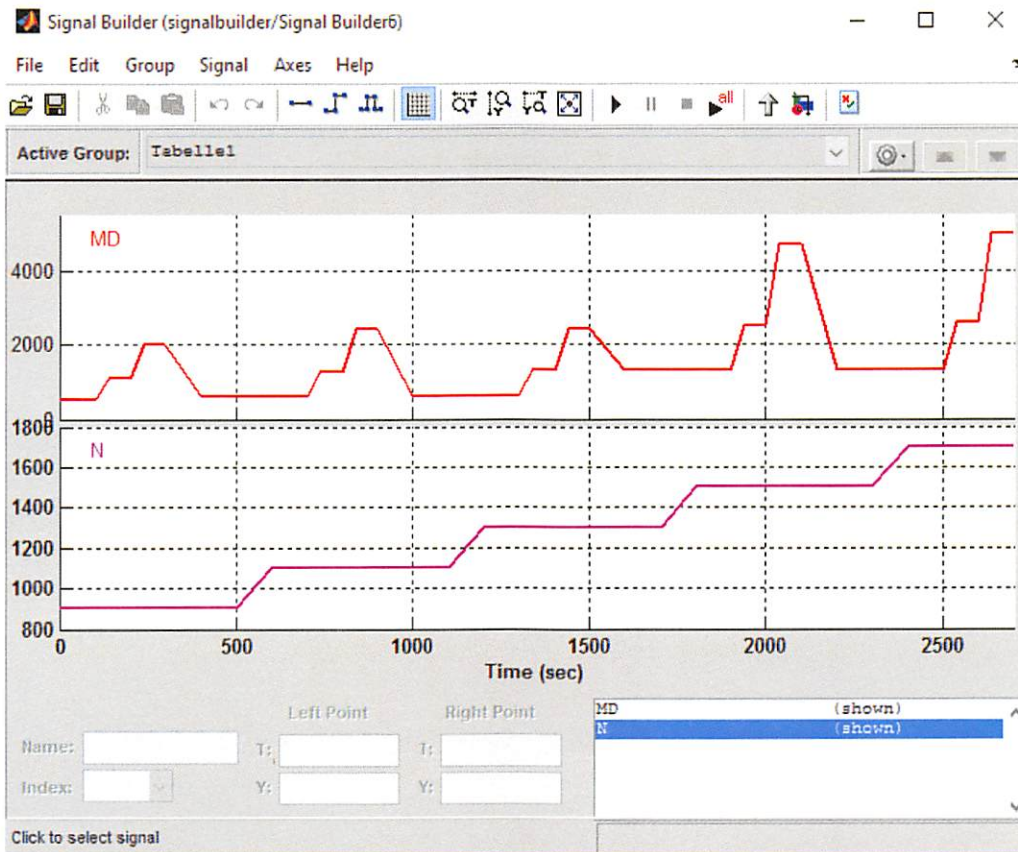


Abbildung 4-36: Fahrprofil in der Signal-Builder-Funktion

#### 4.5.4 Abtastrate mit 200 Hz

Eine zentrale Messung, war die Messung des Drehmoments mit einer höheren Abtastrate. Die Abtastrate wurde von 62,5 Hz auf 200 Hz erhöht. Hiermit wurde das Risiko einer verfälschten Messung durch Schwebungseffekte minimiert. Eine direkte Auswirkung konnte während des Betriebes mit dem PUMA System nicht nachgewiesen werden, jedoch ist die theoretische Betrachtung des Abtasttheorems von Shannon ausreichend um die Erhöhung der Abtastrate zu begründen. Weil die praktischen Messungen keine eindeutigen Unterschiede im Drehmomentsignal gezeigt haben und der Schwebungseffekt nur in einem sehr kleinen Frequenzbereich auftritt, wurde das Drehmomentsignal bei dem BME400 System noch einmal künstlich nachgestellt.

#### Test des Drehmomentsignals an der BME400

Der Eingang der DMS-Vollmessbrücke am F-FEMCON wurde künstlich durch eine Sinusschwingung mit verschiedenen Frequenzen und immer gleicher Amplitude angeregt. Dabei wurde mit der Zeit, angefangen bei 0,2Hz, die Frequenz langsam und stetig weiter gesteigert. Weil bei einer langsamen Frequenz davon ausgegangen werden kann, dass das Signal noch nicht gefiltert wird, stellt das Signal mit 0,2Hz die Amplitude des Rohsignals da.

$$F = 0,2\text{Hz} \quad \rightarrow \quad MD_{pp\_max} = 5000\text{Nm}$$

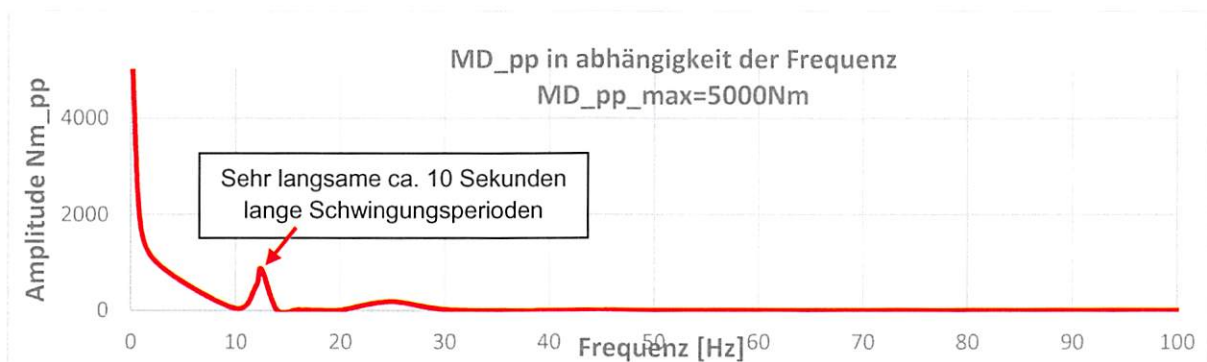


Abbildung 4-37: Amplitudengang an der BME400

Wie in der Abbildung 4-37 zu sehen ist, wird die 5000Nm Schwingung schon vor 3Hz sehr stark gedämpft. Der digitale Filter ist damit wahrscheinlich nicht auf 3Hz ( $n^2$ ) eingestellt. Es gibt ein Aliasing-Effekt bei 12,5Hz und bei 25Hz. Bei 12,5Hz ist die gemessene Dämpfung des Signals nur noch 1/5 stark, obwohl die Dämpfung vor den 12,5Hz schon wesentlich stärker war. Die Abbildung 4-37 ist wie folgt zu deuten. Am Drehmoment Eingang der BME400 wurde mit einem Frequenzgenerator eine Frequenz mit fester Amplitude eingespeist. Die eingestellte Frequenz am Eingang ist auf der x-Achse aufgetragen.

Die Amplitude des Signals wurde von dem digitalen Anzeigefenster der BME400 abgelesen. Der Schwebungseffekt macht sich an der digitalen Anzeige der BME400 bemerkbar, indem die Anzeige des Drehmomentsignals bei 12,5Hz anfängt mit einer sehr langsamen Frequenz zu schwingen. Diese langsame Frequenz war jedoch am Eingang der BME nicht eingestellt. Dieses Verhalten spiegelt genau das Verhalten eines Schwebungseffekts wieder. Das an der BME400 nachgewiesene Verhalten stellt nach Rücksprache mit der Firma AVL in der Regelung kein Problem dar, weil das Signal intern mit einer viel höheren Abtastfrequenz arbeitet. Das Problem bezieht sich damit allein auf das angezeigte Signal und ist nicht zu vernachlässigen, weil der Kunde vor Ort nur die Anzeige der BME400 zur Verfügung hat und dem Signal vertrauen muss. Durch den Schwebungseffekt kann das angezeigte Signal jedoch beträchtlich falsche Werte liefern.

**Bsp.**

$$MD_{\text{Schwingung}} = 500 \text{ Nm} \rightarrow MD_{\text{BME400\_Angezeigt}} = \frac{500 \text{ Nm}}{5} = 100 \text{ Nm}$$

Wie das Beispiel zeigt, können Schwingungen im Rohsignal bei 12,5Hz eine hohe Schwingung im angezeigten Signal der BME400 verursachen. Die BME400 muss daher für den angezeigten Wert eine höhere Abtastfrequenz benutzen. Die Signalverarbeitung der BME400 Anzeige wird in Zukunft geändert.

#### 4.5.5 Linearisierung der Ventile

Um den Ventilfluss zu linearisieren wurden die Ventilflüsse durch Tests ermittelt und zusätzlich mittels einer Flow Simulation in SolidWorks berechnet. In den Praxistests zeigte sich jedoch, dass weder die Flow-Simulation noch die ermittelten Werte hinreichend genau passen. Der Grund für die hohen Abweichungen in der Linearisierung ist wahrscheinlich in der zu ungenauen Messung bzw. Flow-Simulation zu finden. Die Linearisierung über eine datengetriebene Invertierungskennlinie hat nicht zum Erfolg geführt. Eine weitere Möglichkeit, die in Zukunft getestet werden kann, ist die Regelung der Ventilflüsse.

#### 4.5.6 Überprüfung des Temperaturmodells

Das im Kapitel 4.4.4 vorgestellte Temperaturmodell der hydraulischen Leistungsbremse wurde anhand von 4 verschiedenen Messungen an einer Omega 1000 verglichen. Die Messungen wurden zu verschiedenen Zeitpunkten mit verschiedenen Temperaturen durchgeführt. Auch der von den Inbetriebnehmern eingestellte Wasserfluss war jedes Mal unterschiedlich. Die Omega1000 HLB wurde

damit unter unterschiedlichsten Bedingungen betrieben. Zusätzlich ist außer bei dem Prüflauf „Ori\_P“ in allen Prüfläufen eine Omega1000 gefahren, welche einen kleinen Wellendefekt aufwies. Der Wellendefekt machte sich in dem Maße bemerkbar, dass die HLB über die Wellendichtung ca.0,45 Liter/min. Wasser verloren hatte. Dieser Wassermenge ist im Vergleich zu dem gesamten Wasserdurchfluss jedoch verschwindend gering und wird hier vernachlässigt. Die Prüfläufe zeigten, dass das Temperaturmodell weit von den real gemessenen Werten entfernt liegt. Das Temperaturmodell kann so wie in Kapitel 4.4.4 aufgezeigt wurde nicht verwendet werden. Bei dem Vergleich der Daten fällt jedoch auf, dass die deltaP Leistung, welche den Unterschied zwischen realer Anlage und Modell widerspiegelt, aufgetragen über die angelegte Leistung immer in einem linearen Zusammenhang steht. Dieser Zusammenhang ist in allen 4 Prüfläufen gemessen worden und ist in der Abbildung 4-38 gut zu erkennen. Um die Geradengleichungen zu bestimmen wurde in Excel für jede Kennlinie die Ausgleichsgerade bestimmt und die Formel im Diagramm dargestellt. Berücksichtigt man z.B. die im Diagramm dargestellte blaue Kennlinie im Modell als Ausgleichsfaktor, so werden die im Modell ermittelten Temperaturen sehr exakt und weichen nur noch wenige Zehntel °C von der eingestellten Temperatur an der realen Bremse ab. Selbst wenn das Modell mit der blauen Kennlinie arbeitet und die Wirklichkeit jedoch der schwarzen Kennlinie folgt, beträgt die Temperaturdifferenz nur ca. 1,5°C.

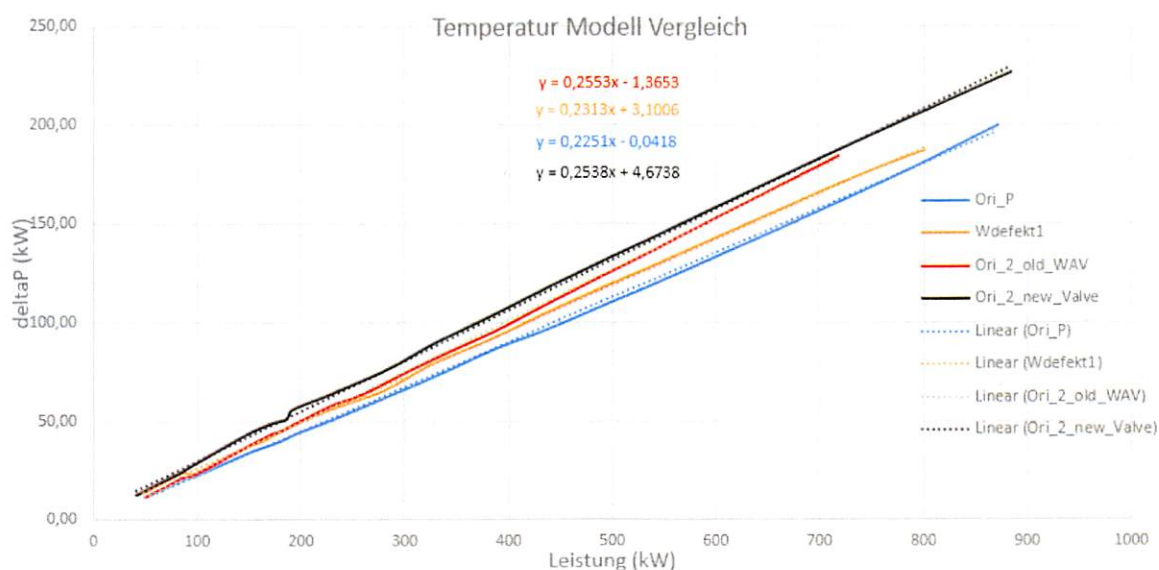


Abbildung 4-38: Vergleich des Temperaturmodells

Nach diesen Messungen zu beurteilen, ist die Genauigkeit des Temperaturmodells mit Ausgleichsgeraden exakt genug, um als Modell in einer Temperatur Regelung Verwendung zu finden. Der Aufbau einer Temperatur Regelung ist jedoch nicht mehr Bestandteil des ERToS Projektes. Die Entwicklung einer Temperatur Regelung auf Basis des Modells wird von der Fa. Zöllner übernommen.

#### 4.5.7 Dokumentation der simulierten Modelle

Damit das Wissen um die einzelnen Prüfstandmodelle für nachfolgende Projekte erhalten bleibt, ist eine detaillierte Dokumentation der Prüfstandkomponenten erforderlich. Die eigentliche Dokumentation wird mit dem Report Generator von MATLAB erzeugt. Dies ist eine integrierte Toolbox, die die einzelnen Ebenen der Modelle darstellt und dokumentiert. Hierbei kann jedes verwendete Subsystem mit eigenen Worten beschrieben werden, sodass auch Entwicklungsschritte mit dokumentiert werden können. Zusätzlich können Variablen benannt und beschrieben werden. Bei der Erstellung der Dokumentation wird der schriftliche Code von Matlab-Funktionen ebenfalls mit dokumentiert. Mit Hilfe der Dokumentation und deren Struktur ist es nun möglich Modelle zu erweitern und zu versionisieren. Dadurch können neue Regelungskonzepte an einheitlichen Modellen getestet und verglichen werden. Mit Hilfe der Dokumentation können zu jedem Modell Einzelheiten nachgeschlagen werden und ermöglicht somit neuen Projektgruppen eine kürzere Einarbeitungszeit in die Thematik (Quelle (6)).

#### Zusammengefasste Ergebnisse aus AP 5:

- ✓ Prüflauf mit eigener Entwicklungsumgebung
- ✓ Drehmoment-Regelung über eigene Entwicklungsumgebung
- ✓ Test mit eigenem automatischen Drehmoment-Fahrprofil
- ✓ Abtastrate mit 200 Hz
- ✗ Linearisierung der Ventile
- ✓ Überprüfung des Temperaturmodells
- ✓ Dokumentation der simulierten Modelle

#### Die folgenden Aufgaben des AP 5 können als abgeschlossen gelten:

- ✓ Erweiterung der bestehenden Prüfläufe um die Bewertungskriterien aus AP 4
- ✓ Test der Prüfläufe an realer Prüfstandumgebung mit Omega 1000
- ✓ Abschlussdokumentation ist angefertigt

Dauer: 4 Monate

Durch die freundliche Zusammenarbeit mit dem Industriepartner konnte auch dieses Arbeitspaket und der MS4 erfolgreich abgeschlossen werden.



## 5 Ausblick

Die in diesem Projekt aufgebaute Entwicklungsumgebung kann von der Fa. AVL Zöllner GmbH genutzt werden, um weitere Daten über Leistungsbremsen zu sammeln. Hierzu kann auch der prototypische entwickelte Datenlogger verwendet werden. Des Weiteren ist es unumgänglich weitere Tests an einer realen Anlage zu absolvieren, um die Automatisierungsentwicklung weiterhin zu verifizieren und zu validieren.

Neben der Kostenreduzierung bei Inbetriebnahmen von Anlagen, wäre es wünschenswert, fehlerhafte Bauteile oder Fehlfunktionen der Anlage frühzeitig zu erkennen, um so Stillstandzeiten zu reduzieren und Kosten zu sparen. Diese Art der Wartung wird auch zustandsorientierte Wartung genannt. Die mit dem ERToS-Projekt entwickelte lauffähige Entwicklungs- und Prüfumgebung ist eine Voraussetzung, die für die Entwicklung einer zustandsorientierten Wartung genutzt werden könnte. Um einen Überblick über die zustandsorientierte Wartung zu erhalten und das Potential besser abzuschätzen zu können, wurde als Vorstudie eine Master-Thesis über dieses Thema vergeben (siehe Quelle (8))

## 6 An der FH-Kiel entstandene Projekt-Literatur

Die in diesem Abschlussbericht gezeigten Aussagen und Ergebnisse beziehen sich weitestgehend auf die in diesem Projekt entstandenen Projektarbeiten bzw. Master-Thesen. Die aufgelistete Projekt-Literatur liegt der elektronischen Ausgabe bei.

1. **Lebert, Klaus.** *EKSH-Antrag.* s.l. : FH-Kiel, 2014.
2. **Loof, Christian.** *Projektarbeit: Vergleich von Wasserwirbelbremsen.* Kiel : AVL Zöllner Marine GmbH, 2014.
3. **Schröder, Felix.** *Master-Thesis: Automatisierte Bewertung hydraulischer Leistungsbremsen.* FH-Kiel : AVL Zöllner Marine GmbH, 2014.
4. **Held, Martin und Löffler, Nils Willi.** *Master-Projektarbeit: Erweiterung des Simulationsmodells einer hydraulischen Wasserwirbelbremse und Inbetriebnahme eines Echtzeitfähigen Simulations-PC.* s.l. : FH-Kiel, 2015.
5. **Lorenz, Matthias.** *Master-Projekt: Modellbasierte Istwertaufbereitung für eine hydraulische Leistungsbremse.* FH-Kiel : AVL Zöllner Marine GmbH, 2015.
6. **Höhne, Jonas & Jung, Hauke & Timm, Philipp.** *Master-Projektarbeit: Moderne Regelungs- und Datenaufzeichnungskonzepte.* s.l. : FH-Kiel, 2015/2016.
7. **Schröder, Felix.** *Bericht: Temperatur-Regler im HLB System.* s.l. : FH-Kiel, 2016.
8. **Held, Martin.** *Master-Thesis: Vergleich und Bewertung von Fehlererkennungs-Fehlerdiagnoseverfahren am Beispiel einer hydraulischen Hochleistungsbremse.* s.l. : FH-Kiel, 2016.