UNI STUTTGART

Berichte aus dem
Institut für Maschinenelemente
Antriebs-, Dichtungs-, Schienenfahrzeug- u. Zuverlässigkeitstechnik

Maximilian Schenk

Adaptives Prüfstandsverhalten in der PKW-Antriebstrangerprobung

Bericht Nr. 169

D 93
ISBN 978-3-936100-70-9

Institut für Maschinenelemente
Antriebs-, Dichtungs-, Schienenfahrzeug- u. Zuverlässigkeitstechnik

Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 9
70569 Stuttgart
Tel. (0711) 685 – 66170

Prof. Dr.-Ing. B. Bertsche, Ordinarius und Direktor

Adaptives Prüfstandsverhalten in der PKW-Antriebstrangerprobung

Von der Fakultät
Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
M. Eng. Maximilian Schenk
geboren in Memmingen

Hauptberichter:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Bertsche
Mitberichter:	Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Michael Weigand
Tag der mündlichen Prüfung:	03.03.2017

Institut für Maschinenelemente der Universität Stuttgart
2017

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Industriepromotion bei der Daimler AG in Zusammenarbeit mit dem Institut für Maschinenelemente (IMA) der Universität Stuttgart.

Mein besonderer Dank gilt an dieser Stelle meinem Doktorvater der Dissertation, Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Bertsche, Ordinarius und Direktor des Instituts für Maschinenelemente der Universität Stuttgart, für die wissenschaftliche Betreuung der Arbeit. Insbesondere danke ich Herrn Prof. Bernd Bertsche für die fachlichen Anregungen und Diskussionen, die stetige Unterstützung sowie das entgegengebrachte Vertrauen, das wesentlich zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen hat.

Ebenso gilt mein besonderer Dank Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Michael Weigand von der Technischen Universität Wien für die Übernahme des Mitberichts sowie für die kritische Durchsicht der Arbeit und die konstruktiven Hinweise.

Herrn Dipl.-Ing. Harald Behrendt, Abteilungsleiter Powertrain Testing bei der Daimler AG, danke ich herzlich für die Ermöglichung dieser Arbeit im Rahmen einer Industriepromotion sowie für das stets entgegen gebrachte Vertrauen. Ebenso gilt mein besonderer Dank Herrn Dr.-Ing. Wolfgang Klos sowie Herrn Dipl.-Ing. Jan-Peter Ziegele für die fachliche und menschliche Unterstützung bei Erstellung dieser Arbeit. Ich danke außerdem Herrn Dipl.-Ing. (BA) Carsten Karthaus M. Sc. (TUM) für die kritische Durchsicht der Arbeit, für die vielen fachlichen Diskussionen sowie für die stetige Unterstützung und Motivation.

Mein Dank gilt allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts für Maschinenelemente für die kollegiale Zusammenarbeit und das gute, abteilungsübergreifende Institutsklima. Ebenso danke ich den Mitarbeiterinnen des Sekretariats für die Unterstützung in organisatorischen und verwaltungstechnischen Anliegen.

Mein herzlichster Dank gebührt meiner Familie und meiner Frau, die mich in der Zeit der Entstehung dieser Arbeit stets unterstützt haben.

Aitrach im März 2017 Maximilian Schenk

Inhaltsverzeichnis

Vorwort V

Inhaltsverzeichnis VI

Abkürzungen und Indizes IX

Formelzeichen XI

Abstract XIV

Kurzfassung XVI

1 Einleitung 18
1.1 Problemstellung 18
1.2 Ziele der Arbeit 20
1.3 Strukturierung der Arbeit 22

2 Stand der Technik 24
2.1 Antriebstrangerprobung 24
2.1.1 Reifegradabhängige Erprobung 24
2.1.2 Prüfprogramme 26
2.2 Versuchstechnik 27
2.2.1 Entwicklung Prüfstandstechnik 28
2.2.2 Prüfstandskonfigurationen 29
2.2.3 Prüfstandsarchitektur 30
2.3 Antriebstrangsimulation 32
2.3.1 Untergliederung Fahrsimulationen 33
2.3.2 Streckensimulation 34
2.3.3 Rechenprinzip 35
2.3.4 Modulares Antriebstrangmodell 38
2.4 Fehlerreaktionen im Testbetrieb 39
2.4.1 Schematische Fehlerreaktionen 40
2.4.2 Komplexe Fehlerreaktionen 40
2.4.3 Spezifische Fehlerreaktionen 41
2.5 Lastkollektive 41
2.6 Automatgetriebe 43

3 Versuchsmethodik 47
3.1 Vorgehensmodell in der Produktentstehung 47
3.2 Vorgehensweise im Versuch 49
3.2.1 Versuchsplanung 50

3.2.2 Versuchsvorbereitung ... 51
3.2.3 Versuchsdurchführung ... 54
3.2.4 Versuchsauswertung ... 56
3.3 Definition Versuchsmethodik ... 57
3.4 Beispiele Methoden ... 60
3.4.1 Beispiel Planungsmethode ... 60
3.4.2 Beispiel Erprobungsmethode ... 60
3.4.3 Beispiel Applikationsmethode ... 63
3.4.4 Beispiel Auswertemethode ... 63

4 Vorgabewerte für die Prüfstandserprobung ... 66
4.1 Vorgabegrößen ... 66
4.2 Vorgabearten ... 67
4.2.1 Bandvorgabe ... 67
4.2.2 Online-Simulation ... 69
4.3 Validierung Antriebstrangmodell ... 69
4.3.1 Vergleich Messung-Simulation ... 71
4.3.2 Grenzen der Simulation ... 72
4.4 Realitätsnahe Sollwertvorgaben ... 74

5 Fehler in der Antriebstrangerprobung auf Prüfständen ... 75
5.1 Einteilung und Fehlererkennung ... 75
5.2 Fehleranalyse ... 78
5.2.1 Fehlerstatistik ... 79
5.2.2 Korrelationsanalyse ... 81
5.3 Bewertung von Fehlern ... 86

6 Automatisierte Fehlerreaktion ... 87
6.1 Systembeschreibung ... 87
6.1.1 Funktionsumfang ... 87
6.1.2 Systemintegration ... 88
6.2 Reaktionstypen ... 91
6.2.1 Online-Reaktion ... 91
6.2.2 Offline-Reaktion ... 92
6.3 Einflussfaktoren auf das Reaktionsverhalten ... 93
6.3.1 Prüflingsreifegrad ... 93
6.3.2 Streckencharakterisierung ... 96
6.4 Fehlerreaktion ... 99
6.4.1 Reaktionskatalog ... 100
6.4.2 Reaktionsstrategien ... 102
6.4.3 Ablaufplan Fehlerreaktion ... 104

6.4.4 Sicherheit und Lastkollektive 107
6.5 Risikoanalyse 107
6.6 Systemumsetzung 110

7 Evaluation und Testfälle 112
7.1 Vergleich Prüflauf konventionell und Onlinesimulation 112
7.2 Vergleich Prüflauf mit und ohne automatisierter Fehlerreaktion 114
7.3 Fehlerdatenbank 116
7.4 Beispiel automatisierte Fehlerreaktion 119
7.5 Detailauswertung Laufzeit 122
7.6 Lastbewertung 124
7.7 Bewertung der Testfälle 127

8 Schlussbetrachtung 129
8.1 Zusammenfassung 129
8.2 Ergebnisdiskussion 129
8.3 Ausblick 131

9 Literaturverzeichnis 133

Anhang A 138

Abkürzungen und Indizes

A

A1 ..... *Prüfstand mit einer Bremsmaschine an der Gelenkwelle*
A2-Front ..... *Prüfstand für Frontquer-Anwendungen mit zwei Bremsmaschinen*
A2-Heck ..... *Prüfstand für heckgetriebene Fahrzeuge mit zwei Bremsmaschinen*
A3 ..... *Prüfstand mit drei Bremsmaschinen für Allradaufbauten*
A4 ..... *Prüfstand mit vier Bremsmaschinen für Allradaufbauten*
ASR ..... *Antischlupfregelung*
AuSy ..... *Automatisierungssystem*

C

CAN ..... *Controller Area Network*
CCP ..... *CAN Calibration Protocol*
CSV ..... *Comma Separated Value*

D

DGL ..... *Differentialgleichung*
DKG ..... *Doppelkupplungsgetriebe*
DoE ..... *Design of Experiments*

E

EM ..... *Elektromotor*
EMS ..... *Erprobungs-Monitoring-System*

F

FM ..... *Fehlermanager*
FMEA ..... *Failure Mode and Effects Analysis*
FPC ..... *Fahrprogrammcode*

H

Hz ..... *Hertz*

K

K_ÜB ..... *Wandlerüberbrückungskupplung*
KW ..... *Kalenderwoche*

L

LE ..... *Leistungselektronik*

M

Mess ..... *Messung*
MKS ..... *Mehrkörpersimulation*

N

n/PW ..... *Drehzahl/Pedalwert*

P

PKW ..... *Personenkraftwagen*
Profibus ..... *Process Field Bus*
Pst ..... *Prüfstand*
PW ..... *Pedalwert*

R

R2R ..... *Road-To-Rig*
RPZ ..... *Risikoprioritätszahl*

S

Sim ..... *Simulation*
SoSy ..... *Sollwertvorgabesystem*

V

v_ist ..... *Ist-Geschwindigkeit*
V221 ..... *Baureihe S-Klasse bei Mercedes Benz*
VB-Motor ..... *Verbrennungsmotor*
VD ..... *Verweildauer*
VDI ..... *Verein Deutscher Ingenieure*

W

W166 ..... *Baureihe M-Klasse bei Mercedes Benz*
winEVA ..... *Windows EDV-Programm zur Verbrauchs- und FahrleistungsAnalyse*

X

X253 ..... *Baureihe GLK-Klasse bei Mercedes Benz*
XCP ..... *eXtended Calibration Protocol*

Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
A	m^2	Querspannfläche des Fahrzeugs
a	m/s^2	Fahrzeugbeschleunigung
c_W	-	Luftwiderstandsbeiwert
E	J	Energieeintrag
F	N	Antriebskraft
F_B	N	Beschleunigungswiderstand
F_K	-	Fehlerkategorie
F_L	N	Luftwiderstand
F_N	N	Normalkraft
F_R	N	Rollwiderstand
$f_R(v)$	-	geschwindigkeitsabhängiger Rollwiderstandsbeiwert
F_{rh}	N	Rollwiderstand Hinterachse
F_{rv}	N	Rollwiderstand Vorderachse
F_{St}	N	Steigungswiderstand
G	N	Gewichtskraft
G	-	Gewichtung
h	m	Schwerpunkthöhe
h	-	absolute Häufigkeit
h_L	-	Lösungshäufigkeit
$h_{L,ges}$	-	Gesamtlösungshäufigkeit
i	-	Zählervariable
J_R	$kg\ m^2$	Massenträgheit rotatorischer Massen
k_L	-	Gewichtung für Zeitfaktor
m	kg	Fahrzeugmasse
M_{Ab}	Nm	Getriebeabtriebsmoment
M_D	Nm	Momentenniveau für Dauerfestigkeit

m_{ges}	kg	Gesamtmasse aller translatorischen Massen
M_{GW}	Nm	Drehmoment Gelenkwelle / Getriebeabtrieb
M_i	Nm	Lastniveau der i-ten Stufe
M_M	Nm	mittleres Lastniveau
M_{Mot}	Nm	Drehmoment Verbrennungsmotor
$M_{R,j}$	Nm	Summenmoment aller angetriebenen Räder
n	-	Anzahl Verweildauerklassen
n_{Ab}	1/min	Getriebeabtriebsdrehzahl
N_D	-	Ecklastspielzahl
n_{GW}	1/min	Drehzahl Gelenkwelle / Getriebeabtrieb
n_i	-	Lastwechsel auf der i-ten Stufe
n_{Mot}	1/min	Drehzahl Verbrennungsmotor
n_{SW_HL}	1/min	Drehzahl Seitenwelle hinten links
n_{SW_HR}	1/min	Drehzahl Seitenwelle hinten rechts
n_{Turb}	1/min	Drehzahl Turbine
p_A	-	Auftrittshäufigkeit eines Fehlers
p_{ab}	bar	Druck abschaltendes Schaltelement
PW	%	Pedalwert Fahrpedal
p_{zu}	bar	Druck zuschaltendes Schaltelement
r	-	Korrelationskoeffizient
$R_{1...n}$	-	Fehlerreaktion 1…n
r^2	-	Bestimmtheitsmaß
$r_{dyn,j}$	m	dynamischer Radhalbmesser
R_e	-	Anzahl erfolgreiche Fehlerreaktionen
R_{ges}	-	Gesamtzahl Fehlerreaktionen
r_j	m	Radien von rotatorischen Massen
RPZ	-	Risikoprioritätszahl
s	m	zurückgelegte Wegstrecke
S	-	Schwerpunkt
s_1, s_2	m	Streckenintervall 1 und 2

s_h	m	Schwerpunktabstand Hinterachse
SU_i	-	Überrollungsschädigung auf der i-ten Stufe
s_v	m	Schwerpunktabstand Vorderachse
s_{Vw}	m	Vorausschauweg
SW_i	-	Wechsellastschädigung auf der i-ten Stufe
t	s	Zeit
t_0	s	Startzeit
U_D	-	Anzahl Überrollungen für Dauerfestigkeit
u_i	-	Überrollungen auf der i-ten Stufe
v	km/h	Fahrzeuggeschwindigkeit
VD	-	Verweildauer
VD_{Pst}	s	Verweildauer des Prüfstandskollektivs
VD_{Sim}	s	Verweildauer in der Simulation
VZ	-	Vergleichsziffer
x_A	-	Grenzwert für Auftrittshäufigkeit
α_1, α_2	%	Fahrbahnneigung für die Streckenintervalle 1 und 2
ρ	kg/m^3	Luftdichte
φ	°	Knickwinkel Gelenkwelle
ω	1/s	Winkelgeschwindigkeit

Abstract

Adaptive test bench behavior in automotive powertrain testing

As the product variety becomes increasingly complex, e.g. hybrid powertrains, and development cycles become shorter and shorter, the demands on powertrain development are rising. These external conditions have implications on both, testing and the development process in general.

The efficient use of testing and development resources in particular moves into focus.

For this purpose a general testing methodology will be described. The methodology includes the following process steps: planning, preparation, execution and analysis. It is integrated in the product development process. The objective of a general testing methodology is to test and develop products in a structured and target-orientated way.

The thesis describes a method for a more efficient way of powertrain testing. This method concerns itself with automated error response on test benches. The reduction of downtime as well as the increasing quality of testing leads to a higher degree of test bench utilization. Hence the value of testing results increases.

The test benches behavior in case of an error derives from real test drivers behavior in order to run tests as close to reality as possible. The test bench analyses errors during the test run and thus is able to react automatically to errors.

After a clear identification of an error the test bench itself is able to react automatically to these errors. Therefore the information concerning the occurred error is transferred from the test bench to an additional system, which handles the errors and assigns suitable reactions. This system is called error manager. Decision matrices are the basis for automated error reactions. After an automated reaction the test run can be continued automatically. The security of test bench and testing aggregate against violation due to improper error reactions always has prime attention.

Possible errors in powertrain testing can be classified into Online-Errors and Offline-Errors. Online-Errors can be detected by monitoring boundary conditions and warning limits. The exceeding of warning limits does not lead to a shutdown of the test run. In contrast Offline-Errors are characterized by the fact of a limit value violation, which leads to an accurately defined test run shut down. The speed is set to zero and the testing aggregate is set power free.

According to these error categories there are Online-Reactions and Offline-Reactions. Online-Reactions can be arranged during the test run without any shut-down. Offline-Reactions take place after the shutdown. Explicit information about the error is transferred to the error manager. Based on several decision matrices a suitable error reaction is selected.

The error manager was developed and tested on several powertrain test benches. Using the automated error reaction it is possible to improve testing efficiency significantly, particularly at night or at the weekend, when testing staff is not available. To avoid load shifting due to automated interventions into the test run, a load analysis was implemented.

The analysis of test bench runtimes shows a reduction of downtime up to 50%. Thus the testing method contributes to a more efficient way of testing on powertrain test benches.

Kurzfassung

Die Dauerhaltbarkeitserprobung auf Antriebstrangprüfständen beschäftigt sich mit der Absicherung von Funktion und Betriebsfestigkeit aller Komponenten, Aggregate und Systeme des PKW-Antriebstrangs. Die Vorgabe für die Erprobung erfolgt mittels dynamischer Straßenlast-Profile, bei denen reale Erprobungsfahrten simuliert werden.

Der größtmögliche Bezug zur Realität, der bei dieser Art der Erprobung gewährleistet wird, soll auch auf das Verhalten des Prüfstands im Fehlerfall ausgeweitet werden. Analog der Fehlerreaktion eines Testfahrers soll auch der Prüfstand durch automatisierte Abläufe aufgetretene Fehler während der Erprobung beurteilen und geeignete Reaktionen einleiten.

Zu diesem Zweck wurde im ersten Schritt eine allgemeine Versuchsmethodik definiert, in die sich die automatisierte Fehlerreaktion einordnet. Die Versuchsmethodik gliedert sich mit den Prozessschritten Planung, Vorbereitung, Durchführung und Auswertung in den Produktentstehungsprozess ein. In ihr werden Planungsmethoden, Erprobungsmethoden, Applikations- und Auswertemethoden zusammengefasst, um eine strukturierte, zielgerichtete Vorgehensweise in der Erprobung gewährleisten zu können.

Bei der automatisierten Fehlerreaktion am Antriebstrangprüfstand handelt es sich um eine Erprobungsmethode. Bei Abschaltungen durch Grenzwertverletzungen wird im ersten Schritt der aufgetretene Fehler einer Kategorie zugeteilt und die Fehlerart bestimmt. Die Informationen über den Fehler werden anschließend an ein System zur automatisierten Fehlerreaktion, den sog. Fehlermanager, weitergeleitet. Dort sind verschiedene Reaktionsstrategien hinterlegt, die je nach anstehendem Fehler zur Anwendung kommen. Zunächst wird jedoch die Kritikalität des Fehlers überprüft und nur bei bekannten, unkritischen Fehlern eine nachfolgende Reaktion eingeleitet. Die Zuordnung einer geeigneten Fehlerreaktion erfolgt mit Hilfe von Matrizen, in denen abhängig von verschiedenen Zusatzparametern einer bestimmten Fehlerart eine Fehlerreaktion zugeteilt werden kann.

Bei den Fehlerreaktionen wird unterschieden zwischen Online- und Offline-Reaktionen. Bei Offline-Reaktionen wird nach Auftreten einer Grenzwertverletzung der Prüfling zunächst in einen betriebssicheren Zustand versetzt und erst im Anschluss eine Reaktion durchgeführt und – im Falle einer erfolgreichen Reaktion – der Prüflauf fortgesetzt. Im Gegensatz dazu wird bei der Online-Reaktion bereits ein Trend hin zu einer Grenzwertverletzung detektiert und noch vor der zu erwartenden Abschaltung eine Reaktion während des Prüflaufs eingeleitet. Somit wird die Grenzwertverletzung bereits im Vorfeld verhindert.

Das entwickelte System wurde an mehreren Antriebstrangprüfständen im realen Dauerlauf angewendet und getestet. Insbesondere in personalfreier Zeit können durch die automatisierten Fehlerreaktionen erhebliche Effizienzverbesserungen bei der Auslastung

der Prüfstände verzeichnet werden. Da durch den automatisierten Eingriff in den Prüflauf die Erprobungsergebnisse verfälscht werden können, wurde zusätzlich eine Lastbewertung angestellt, um sicherzustellen, dass die geforderten Lasten erzielt werden.

Die Auswertung der Laufzeiten von Prüfläufen mit und ohne Fehlermanager zeigt, dass die Stillstandszeiten um bis zu 50% reduziert werden können. Die vorgestellte Erprobungsmethode trägt somit zu einer effizienten Erprobung auf Antriebstrangprüfständen bei.

1 Einleitung

Bei der Entwicklung von technischen Produkten im Allgemeinen sowie bei der Entwicklung von Antriebsträngen für PKW-Anwendungen im Besonderen tritt der Bedarf an effiziente Methoden und Prozesse mehr und mehr in den Vordergrund. Eine wachsende Variantenvielfalt sowie stetig steigende Kundenanforderungen bedingen verkürzte Entwicklungszyklen bei gleichzeitiger Berücksichtigung von Qualitäts- und Zuverlässigkeitszielen. Insbesondere der Wunsch nach zuverlässigen Produkten steht bei den Wünschen der Kunden an oberster Stelle [BER04]. Eine valide Erprobung mit repräsentativen Belastungen für den Antriebstrang ist dabei ein wesentlicher Bestandteil des Zuverlässigkeitskonzeptes.

Die Antriebstrangentwicklung in der Automobilindustrie zeichnet sich dadurch aus, dass aufgrund des Know-How-Schutzes große Umfänge der Entwicklung und Erprobung inhouse erfolgen. Durch die große Entwicklungstiefe besteht die Möglichkeit aber auch die Notwendigkeit einer spezifischen, entwicklungs- und fertigungsbegleitenden Absicherung der Triebstrangkomponenten sowie des gesamten Antriebstrangs. Unter diesem Gesichtspunkt sind sowohl Dauerhaltbarkeitsaspekte als auch funktionale Anforderungen inklusive der Softwareentwicklung und Applikation abzuprüfen.

1.1 Problemstellung

Die Dauererprobung von Antriebsträngen auf Prüfständen muss sich wie alle Prozessschritte bei der Produktentwicklung den stetig steigenden Anforderungen hinsichtlich Zeit- und Kostenaspekten stellen. Aufgabe der Antriebstrangerprobung ist es, die Ziele bezüglich Lebensdauer, Zuverlässigkeit und Funktionalität simulativ und experimentell nachzuweisen [KLOS11].

Um die Erprobung von Antriebsträngen effizient durchführen zu können, muss diese von einer durchgängigen Methodik unterstützt werden. Idealerweise wird präskriptiv eine Vorgehensweise beschrieben, die einen effizienten Erprobungsprozess ermöglicht. Für den Prozessschritt der Konstruktion in der Produktentwicklung ist eine entsprechende Methodik bereits entwickelt (vgl. [VDI93]) und seit längeren im praktischen Betrieb in der Anwendung, [PAH07]. Für die Erprobung sind hierfür nur methodische Ansätze genannt bzw. Teilprozesse methodisch beschrieben.

Bei der dynamischen Dauererprobung von Antriebsträngen auf Prüfständen werden alle Betriebspunkte analog einer realen Kundenfahrt erprobt. Der Antriebstrang erfährt dabei unter Berücksichtigung möglichst realer Randbedingungen die geringfügig gerafften Straßenlasten des normalen Fahrbetriebs. Die Komplexität der Erprobung hinsichtlich Prüftechnik, Sollwertvorgaben und Überwachung ist hierbei aufgrund des Zusammenspiels vieler zustandsgesteuerter Aggregate maximal. Für die dynamische Dauererprobung werden dynamische Prüfprogramme benötigt. Das bedeutet, dass die Sollwertvor-

gaben einerseits hochfrequent mit 100 Hz und in Echtzeit dem Prüfling vorgegeben werden müssen. Anderseits müssen die Vorgabewerte einer realen Fahrt dem Zielaufbau des jeweiligen Antriebstrangs entsprechen. Diese realitätsnahen Vorgabewerte können entweder durch Aufzeichnung von Drehzahlen und Drehmomenten sowie von Zustandssignalen wie z. B. dem Gangsignal bei einer realen Messfahrt oder durch eine realitätsnahe Antriebstrangsimulation generiert werden (vgl. Kapitel 2.1).

Bei der dynamischen Erprobung wird der gesamte Antriebstrang inklusive Verbrennungsmotor, Anfahrelement, dem Getriebe und verschiedenen Wellen und Lagern erprobt. Abhängig vom Prüfstandsaufbau sowie vom zu erprobenden Aggregat wird der Aufbau durch Achsgetriebe, Gleichlaufgelenke, Seitenwellen oder hybride Komponenten wie z. B. Elektromotor oder Leistungselektronik ergänzt. Da die Erprobung bereits in einer sehr frühen Phase des Entwicklungszyklus beginnt, weisen viele der genannten Aggregate noch einen geringen Produktreifegrad auf.

Von der Komponente über das System bis zum Aggregat wachsen mit zunehmender Teilezahl auch die Funktionalität sowie die Komplexität. In Abbildung 1 ist dieser Zusammenhang an einem Beispiel erläutert. Funktionalität und Komplexität nehmen am Beispiel eines Doppelkupplungsgetriebes von der einzelnen Komponente (z. B. Kupplungslamelle) über das System (z. B. Doppelkupplung) bis zum Aggregat (z. B. Automatgetriebe) stetig zu.

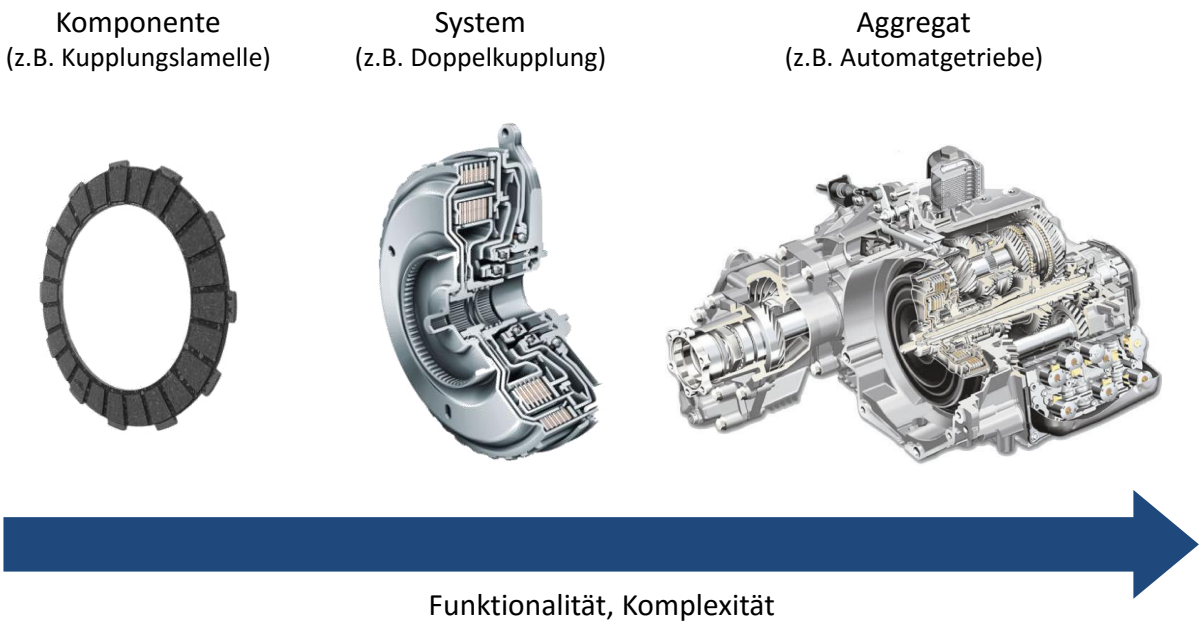


Abbildung 1: Zunahme Funktionalität und Komplexität von der Komponente zum Aggregat

Durch das Zusammenspiel der zustandsgesteuerten Aggregate erweitert um die Komplexität der dynamischen Prüfprogramme wird ein größtmöglicher Bezug zur Realität erreicht. Somit können neben den Aspekten der Dauerhaltbarkeit auch funktionale Fragestellungen geklärt werden. Der Erkenntnisgewinn für die Entwicklung der Aggregate ist bei dynamischen Prüfprogrammen aufgrund des großen Bezugs zum realen Kunden-

fahrverhalten wesentlich größer als bei stationären oder synthetischen Prüfprogrammen (s. Kapitel 2.1.2). Entsprechend dem Fahrversuch auf der Straße können einerseits Aussagen über die Dauerhaltbarkeit und Funktion einzelner Aggregate getroffen werden andererseits Erkenntnisse über die Wechselwirkungen der Systeme im Verbund als Antriebstrang gezogen werden.

Durch die Wechselwirkungen der einzelnen Systeme, das Erreichen aller möglichen Betriebspunkte und die gleichzeitige Absicherung von Dauerhaltbarkeit und Funktion wird ein sehr vielschichtiges Erprobungskonzept erreicht. Im Gegenzug wirkt sich diese Vielschichtigkeit negativ auf die Laufzeiten bei der Dauererprobung auf Prüfständen aus. So werden bei der Erprobung von Antriebsträngen mit Hilfe dynamischer Prüfprogramme Prüfstandsauslastungen im Bereich von 30% - 60% erzielt. Die Auslastung variiert in Abhängigkeit des Produktreifegrads.

Im Gegensatz dazu werden bei der Dauererprobung von Einzelkomponenten mit Hilfe stationärer Prüfprogramme, bei denen nur wenige spezifische Betriebspunkte erprobt werden, Prüfstandsauslastungen von 95% und mehr erzielt. Aufgrund der vereinfachten Erprobung mit wenigen Betriebspunkten auf der einen Seite und der mangelnden Wechselwirkung mit anderen Komponenten auf der anderen Seite fällt der Erkenntnisgewinn für die Produktentwicklung in diesem Fall jedoch deutlich geringer aus.

Für die geringen Prüfstandslaufzeiten bei dynamischen Erprobungen können im Wesentlichen drei Ursachen identifiziert werden.

1. Durch die komplexe Prüfstandstechnik und die Implementierung der Fahrzeug-Bus-Kommunikation in die Prüfstandsarchitektur können Fehler bei den Systemen am Prüfstand nicht ausgeschlossen werden.
2. Aufgrund von unreifen Softwareständen der zustandsgesteuerten Aggregate treten häufig Softwarefehlern auf.
3. Im Zuge der Dauererprobung treten infolge von Fehlfunktionen der Aggregate Grenzwertüberschreitungen auf, die zu Prüfstandsabschaltungen führen [SCHE12].

Softwarefehler und Fehlfunktionen der zustandsgesteuerten Aggregate werden in den jeweiligen Steuergeräten verursacht. Dabei können Fehler entweder durch Fehlerfunktionen einzelner Steuergeräte oder durch eine fehlerhafte Kommunikation mehrerer Steuergeräte entstehen. Durch die Vernetzung mehrerer zustandsgesteuerter Aggregate potenziert sich somit die Anzahl der Fehlerquellen.

1.2 Ziele der Arbeit

In der industriellen Anwendung im Automobilbereich gibt es Hersteller, die aufgrund ihrer großen Entwicklungstiefe überwiegend eigen-entwickelte Aggregate für den Antriebstrang verwenden. Neben den Verbrennungsmotoren werden auch die Automatgetriebe, die Software für die Steuergeräte sowie ein Großteil der hybriden Komponenten selbst entwickelt. Somit besteht bereits in frühen Entwicklungschargen die Möglichkeit

zur Erprobung aller Antriebstrangelemente im Verbund. Es ergibt sich dadurch einerseits die Chance, Fehler der Aggregate und Steuergeräte insbesondere im Zusammenspiel frühzeitig zu erkennen und zu beheben, andererseits führt die große Komplexität erfahrungsgemäß zu einer höheren Fehlerhäufigkeit und demzufolge zu häufigen Abschaltungen und Stillstandzeiten.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Dauererprobung von PKW-Antriebsträngen auf Großprüfständen. Sie verfolgt drei Hauptziele:

Um den Erprobungsprozess durchgängig methodisch zu unterstützen soll eine allgemeine Versuchsmethodik entwickelt und vorgestellt werden. Sie befasst sich mit der Erprobung von Antriebsträngen und dient dazu, präskriptive Vorgehensweisen zu beschreiben, die durch reproduzierbare Anwendung und gleichbleibende Abläufe eine effiziente Erprobung ermöglichen. Die Methodik unterstützt dabei in Analogie zur Konstruktionsmethodik den gesamten Erprobungsprozess von der Planung bis zur Auswertung.

Um die Stillstandzeiten insbesondere in personalfreier Zeit zu reduzieren, soll eine Erprobungsmethode zur automatisierten Fehlerreaktion entwickelt werden. Damit verbunden ist die Möglichkeit, autonom auf Basis verschiedener Kennzahlen und Kriterien auf einen Fehler im Prüfbetrieb reagieren zu können. Abhängig von der Art und Häufigkeit des Fehlers soll analog zum Fehlerfall im realen Fahrbetrieb entschieden werden, ob der Prüflauf fortgesetzt werden kann, ob Einschränkungen vorgenommen werden müssen, oder ob eine Abschaltung erforderlich ist. Als Beispiel aus dem Fahrzeugdauerlauf sei an dieser Stelle das Beispiel eines kochenden Fahrzeugkühlers genannt. Die Reaktion des Erprobungsingenieurs wäre eine Kombination aus einer Abkühlphase am Straßenrand und dem anschließenden Aufsuchen einer Werkstatt. Diese Reaktion soll auf Prüfständen automatisiert erfolgen, wobei die Abkühlphase am Straßenrand einer kurzen Stillstandszeit entspricht. Das Aufsuchen einer Werkstatt wäre in diesem Beispiel mit der Fortsetzung des Prüflaufs unter verringerter Last gleichzusetzen, bis das zuständige Prüfstandspersonal vor Ort ist. Die Abschaltkriterien der Fehler sind dabei ebenso Bestandteil der zu entwickelnden Erprobungsmethode wie die Sicherheitskriterien, die bei unbemannter Fahrt und besonders bei autonom reagierenden Systemen berücksichtigt werden müssen. Mit Hilfe dieser Erprobungsmethode soll einerseits die Dauererprobung aufgrund realitätsnaher Verhaltensstrukturen im Fehlerfall näher an den realen Fahrversuch rücken, andererseits durch automatisierte Fehlerreaktionen Stillstandzeiten minimiert und die Prüfstandsauslastung gesteigert werden.

Das dritte Hauptziel befasst sich mit einer durchgängigen automatisierten Fehleranalyse. Das bedeutet, dass alle Fehler, die während des Prüflaufs auftreten, automatisiert von intelligenten Systemen erfasst, kategorisiert und dokumentiert werden. Die Ablage der detektierten Fehler soll in einer Datenbank erfolgen, um einen universellen Zugriff und entsprechende Auswertungen zu ermöglichen. Durch eine durchgängige Fehleranalyse und eine entsprechende Dokumentation wird die Basis für eine statistische Auswertung gelegt. Auf dieser Basis können Detailauswertungen und Schwachstellenanalysen erfol-

gen. Weiterhin ist diese Dokumentationsbasis Ausgangspunkt für die automatisierte Fehlerreaktion.

1.3 Strukturierung der Arbeit

Die Arbeit beginnt mit einer Beschreibung des aktuellen Stands der Technik im Bereich der Antriebstrangerprobung, vgl. Kapitel 2. Im ersten Schritt werden die für die Dauererprobung benötigten Prüfprogramme von den stationären zu den dynamischen Programmen näher erläutert. Nachfolgend erfolgen eine Darstellung zum aktuellen Stand der Versuchstechnik in der Prüfstandserprobung sowie eine Beschreibung der für die Generierung der Sollwerte benötigten Antriebstrangsimulation. Anschließend werden die konventionellen Möglichkeiten zur Fehlerreaktion beschrieben um darauf aufbauend in den folgenden Kapiteln eine Methode zur autonomen Fehlerreaktion zu entwickeln. Da bei der autonomen Fehlerreaktion das Hauptziel der Dauererprobung hinsichtlich der Absicherung von repräsentativen Lasten im Fokus steht folgt ein Unterkapitel zur Beschreibung der Lastkollektive. Abschließend wird der aktuelle Stand der Technik bei der Entwicklung von Automatgetrieben skizziert, da diese als zentrale Komponente des Antriebstrangs im Fokus der vorliegenden Ausarbeitung stehen.

Aufbauend auf dem Stand der Technik erfolgt eine Definition der in der Praxis der Antriebstrangentwicklung angewandten Versuchsmethodik in Anlehnung an die bereits bekannte Konstruktionsmethodik. Aufbauend auf dem Versuchsprozess wird eine durchgehende, unterstützende Methodik bestehend aus Planungs-, Erprobungs-, Applikations- und Auswertemethoden beschrieben und an Beispielen erläutert. Der Versuchsprozess sowie die Versuchsmethodik sind in Kapitel 3 beschrieben.

Als Teil des Prozessschrittes ‚Vorbereitung' werden in Kapitel 4 die Vorgabewerte, die für die Antriebstrangerprobung benötigt werden sowie deren Generierung näher erläutert. Dabei werden die Vorgabearten Bandvorgabe und Onlinesimulation vorgestellt.

Weiterhin erfolgen gemäß den weiteren Prozessschritten des Versuchsprozesses (Durchführung und Auswertung) zunächst eine empirische sowie eine analytische Fehleranalyse von Fehlern bei der Prüfstandsdauererprobung (Kapitel 5). Auf Basis der Fehleranalyse wird eine Erprobungsmethode zur automatisierten Fehlerreaktion auf Prüfständen entwickelt, vgl. Kapitel 6. Dabei werden verschiedene Reaktionstypen, die dominanten Einflussfaktoren, der Ablaufplan im Fehlerfall sowie eine Risikoanalyse vorgestellt.

Abschließend erfolgt die Evaluation des neu entwickelten Systems anhand verschiedener Testfälle und Auswertungen, s. Kapitel 7.

Abbildung 2 zeigt den Aufbau der vorliegenden Arbeit, integriert in den Versuchsprozess, welcher durch eine entsprechende Versuchsmethodik unterstützt wird.

In Kapitel 3 werden der Prozess sowie die unterstützenden Methoden beschrieben. Unter den Prozessschritten ‚Vorbereitung', ‚Durchführung' und ‚Auswertung' befinden sich die Kapitel zu den Vorgabedaten in der Antriebstrangerprobung (Kapitel 4), zur Fehleranalyse (Kapitel 5), zur automatisierten Fehlerreaktion (Kapitel 6) sowie zu den Testfällen (Kapitel 7).

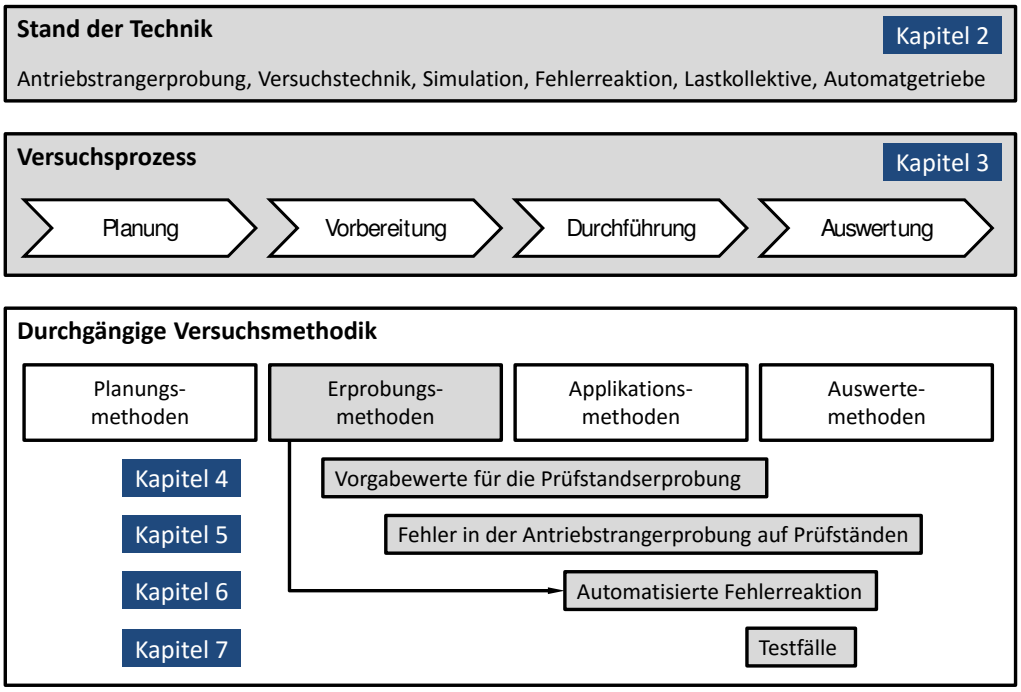


Abbildung 2: Strukturierung der Arbeit

Im Kern der Arbeit steht die Effizienzsteigerung bei der Dauererprobung von PKW-Antriebsträngen auf Prüfständen. Im Wesentlichen betrifft dies eine Erhöhung der Prüfstandsauslastung bei gleichzeitiger Beibehaltung der hohen Erprobungsqualität hinsichtlich des Erkenntnisgewinns für die Antriebstrangentwicklung. Hierfür wird eine neue Erprobungsmethode entwickelt und zur Anwendung gebracht. Die Effizienzsteigerung wird durch diese Erprobungsmethode erreicht, die ein speziell an den jeweiligen Prüfling angepasstes Prüfstandsverhalten in der Antriebstrangerprobung ermöglicht. Im Detail bedeutet dies, dass im Fehlerfall adaptiv und selektiv auf die verschiedensten Fehler in der Antriebstrangerprobung reagiert wird. Die Reaktion erfolgt autonom auf Basis empirischer und analytischer Entscheidungen. Somit wird die Prüfstandsauslastung, insbesondere in personalfreier Zeit erheblich verbessert.

2 Stand der Technik

Im Folgenden wird der aktuelle Stand der Technik im Bereich der Antriebstrangerprobung näher beschrieben. Zunächst werden die Anforderungen an die Erprobung sowie die aktuelle Versuchstechnik näher erläutert. Anschließend erfolgt eine Beschreibung der für die Generierung von Sollwerten benötigten Antriebstrangsimulation. In einem weiteren Schritt werden die konventionellen Möglichkeiten zur Reaktion auf Fehler im Prüfbetrieb dargestellt. Den Abschluss des Kapitels bilden eine Beschreibung der Lastkollektive, die für die Dauererprobung von Antriebsträngen gefordert werden sowie eine Einführung in den Stand der Technik der aktuellen Generation von Automatgetrieben.

2.1 Antriebstrangerprobung

Die Antriebstrangerprobung umfasst einerseits die Absicherung der Dauerhaltbarkeit und andererseits die Funktionserprobung der zustandsgesteuerten Aggregate [KLOS11].

Bei der Funktionserprobung werden die im Lastenheft definierten Funktionen bzw. gesetzliche Vorschriften mit bestimmten Prüfumfängen untersucht. Die Funktionserprobung findet entwicklungsbegleitend über den gesamten Produktentwicklungsprozess statt, da auch in späten Entwicklungsphasen das Funktionsspektrum noch erweitert werden kann. Hier werden sowohl einzelne Komponenten als auch gesamte Aggregate und Systeme geprüft.

Die Dauererprobung zielt auf die Aspekte der Betriebsfestigkeit und sichert die Dauerhaltbarkeit im späteren Kundenbetrieb ab. Es werden analog zur Funktionserprobung in Abhängigkeit der Entwicklungsphasen Komponenten, Systeme und Aggregate erprobt. Für die Absicherung der Dauerhaltbarkeit müssen sowohl gesetzliche als auch firmenspezifische Vorschriften beachtet und markenspezifisches Kundenverhalten berücksichtigt werden. Die Prüfung der Dauerhaltbarkeit findet sowohl im Fahrzeug als auch auf Prüfständen statt. Bei der Prüfstandserprobung kommen sogenannte Antriebstrangprüfstände zum Einsatz, auf denen der gesamte Antriebstrang mit allen leistungsführenden Teilen aufgebaut und erprobt wird.

2.1.1 Reifegradabhängige Erprobung

Im Wesentlichen werden bei der Antriebstrangerprobung drei Stadien der Bauteil- bzw. Aggregateabsicherung unterschieden [BRA91]:

- Die Simulation (virtuelles Fahrzeug in virtueller Umgebung)
  → virtuelle Absicherung

- Die Prüfstandserprobung (vollständiger Antriebstrang in experimenteller Umgebung)
  → Prüfstandsabsicherung
- Der Fahrversuch (reales Fahrzeug in realer Umgebung)
  → Fahrzeugabsicherung

Dieses vielschichtige Absicherungskonzept gewährleistet betriebs- und funktionssichere Aggregate und Produkte [KLOS11] [SCHE12].

Unter Berücksichtigung der Entwicklungsphasen beginnt die Erprobung, abgesehen von wenigen Vorversuchen in Vorgängerfahrzeugen, üblicherweise mit der Funktionsabsicherung der Komponenten auf Prüfständen. Anschließend folgen erste Dauerhaltbarkeitstests und die Integration der Komponenten in die Baugruppe sowie anschließend in das Gesamtaggregat. Ab diesem Zeitpunkt ist für die weitere Erprobung bei komplexen Aggregaten wie beispielsweise einem Automatgetriebe die Funktion der Ansteuerung zwingend erforderlich. Unter Berücksichtigung der Funktionen sowie aller anderen Antriebstrangkomponenten wird die Dauererprobung ergänzend zu den Komponentenversuchen auf Antriebstrangprüfständen fortgesetzt. Mit dem Erreichen eines gewissen Produktreifegrades beginnt die Erprobung im Fahrzeug mit ersten Aggregateträgern. Hier stehen zunächst funktionale Erprobungen wie beispielsweise Startvorgänge und Schaltvorgänge im Stand im Vordergrund. Im weiteren Verlauf der Entwicklung finden parallel zur Prüfstandsabsicherung Funktionsuntersuchungen und Dauerläufe im Fahrzeug statt [SCHE11], [KLOS11].

Der Fahrversuch bildet im Gegensatz zur Prüfstandserprobung alle Betriebspunkte unter realen Bedingungen ab. Wechselwirkungen zwischen den Aggregaten inklusive der Anbindung an die Karosserie können nur im Fahrversuch zweifelsfrei identifiziert und erprobt werden [MAI07], [MÜL02].

Der Fahrversuch stellt im Entwicklungsprozess die letzte Stufe der Absicherung unter den späteren Einsatzbedingungen dar.

Applikations- und Zertifizierungsaufgaben sowie verschiedene Aspekte der Dauerabsicherung werden unter anderem auf Rollenprüfständen abgeprüft. Die Vorteile von Rollenprüfständen sind die reproduzierbaren Randbedingungen bei gleichzeitiger Berücksichtigung aller Fahrzeugsysteme. Die Grenzen zeigen sich jedoch bei Untersuchungen von Grenzlasten wegen der begrenzten Momenten-Übertragungsfähigkeit der Reifen bzw. bei der Darstellung von dynamischen Fahrsituationen, wie z. B. Reifenschlupf [KLOS11].

Allgemein muss für die Fahrzeugerprobung ein hoher Zeit- und Kostenaufwand eingeräumt werden. Daher wird versucht, so viele Fragestellungen wie möglich mit Hilfe von Erprobungen auf dem Prüfstand zu beantworten [EBE68]. Dieser Trend der Verlagerung von Tests auf den Prüfstand wird unter dem Stichwort Road-To-Rig (R2R) zusammengefasst (vgl. [SCI01]).

2.1.2 Prüfprogramme

Unter Prüfprogrammen versteht man in der Antriebstrangerprobung Abläufe von Sollwertvorgaben, die für die Erprobung von Komponenten, Systemen oder Aggregaten benötigt werden. Es gibt Prüfprogramme für Dauer- und für Funktionserprobungen. Die Sollwerte sind in der Regel last- oder drehzahlproportionale Vorgabegrößen, die dem Prüfling vom Prüfstand aufgeprägt werden. Abhängig von der Komplexität des Prüfprogramms handelt es sich hierbei um einfache Rampen oder um realitätsnahe Fahrprofile.

Je nach Erprobungszweck kommen für die Erprobung von Aggregaten bzw. Antriebsträngen auf Prüfständen verschiedene Prüfprogramme zum Einsatz. Diese lassen sich gliedern in stationäre, synthetische und dynamische Prüfprogramme, s. Abbildung 3.

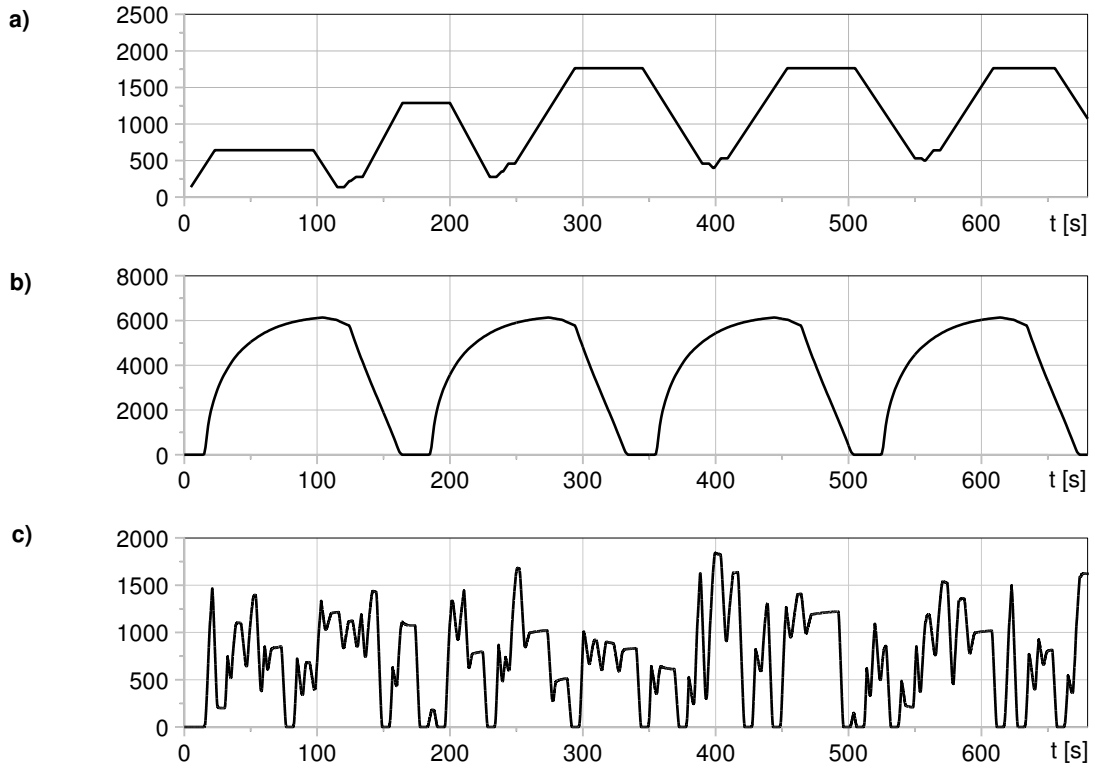


Abbildung 3: Vergleich Prüfprogramme am Beispiel Gelenkwellendrehzahl
a) Stationäre Prüfprogramme
b) Synthetische Prüfprogramme
c) Dynamische Prüfprogramme

Bei den stationären Prüfprogrammen handelt es sich um einfache Drehzahl- / Drehmomentprogramme deren Betriebspunkte häufig mit den Lastenhefteckwerten korrelieren. Ein wesentlicher Vorteil der stationären Prüfprogramme ist die Möglichkeit, Prüflinge bereits in frühen Entwicklungschargen mit hohen Raffungsfaktoren mechanisch zu erproben. Hintergrund sind die geringen Anforderungen an den Prüfling. So müssen bestimmte Funktionen, wie beispielsweise Kupplungswechsel noch nicht voll entwickelt sein. Eine Grundabsicherung der Tragfähigkeit der Zahnräder ist dennoch möglich sofern die Bauteillastkollektive vorliegen.

Bei den synthetischen Prüfprogrammen werden einzelne Fahrmanöver anhand einfacher Simulationen abgebildet. Für die Darstellung von Schaltmanövern bei wechselnden Lastzuständen ist ein gewisser Reifegrad der Aggregate bzw. der Software erforderlich. Synthetische Prüfprogramme dienen u.a. der Darstellung von extremen Fahrsituationen. Zu diesen zählen:

- Volllastanfahrten,
- Volllasthoch-, Volllastrück- u. Schubschaltungen und
- Sondermanöver wie beispielsweise Stop-Start.

Die dynamischen Prüfprogramme stellen den höchsten Komplexitätsgrad der Prüfstandserprobung dar. Hierbei wird die reale Fahrzeugfahrt auf dem Prüfstand nachgebildet. Der Antriebstrang besitzt den größtmöglichen Freiheitsgrad, sich der Fahrsituation anzupassen. Viele Funktionen werden analog dem Fahrzeugdauerlauf erprobt. Dynamische Prüfprogramme bilden den realen Fahrbetrieb in allen Betriebspunkten ab. Daher muss für einen stabilen Prüfbetrieb ein höherer Aggregatreifegrad als bei synthetischen Prüfprogrammen vorausgesetzt werden [KLOS11].

Die Erstellung synthetischer und dynamischer Prüfprogramme erfolgt mit der Simulationssoftware winEVA®. Für eine valide Erprobung müssen die Vorgabedaten exakt mit dem aufgebauten Prüfling und dessen Funktionen übereinstimmen. Die Ergebnisse der Antriebstrangsimulationen mit winEVA erfüllen diese Bedingung [GRE04].

2.2 Versuchstechnik

Eine allgemeine Übersicht über die Entwicklung in der Mess- und Versuchstechnik ist bei Braess [BRA92] nachzulesen. Hier sind die Entwicklungsschritte von der technologieorientierten über die funktionsorientierte bis zur prozessorientierten Versuchsmethodik mit Beispielen dargestellt, s. Abbildung 4.

Die Versuchstechnik im Automobilbau zeichnet sich neben der quantitativen Steigerung von Erprobungsinhalten auch durch den kontinuierlichen Ausbau qualitativer Methoden aus. Als Beispiel kann hier die systematische Methodenentwicklung in den Bereichen Qualität, Zuverlässigkeit und Lebensdauerberechnung genannt werden [BRA92].

Die Zunahme der Erprobungsinhalte sowie der Ausbau der Methoden führen zu immer komplexeren Erprobungen, die ebenso umfangreicher und detaillierter Prozesse bedürfen. Es ist zu beobachten (vgl. Abbildung 4), dass sich der Fokus bei der Versuchstechnik von der Technologie-Orientierung über die Funktions-Orientierung hin zur Prozess-Orientierung verschoben hat. Dieser Umstand ist der oben genannten Zunahme an Komplexität geschuldet.

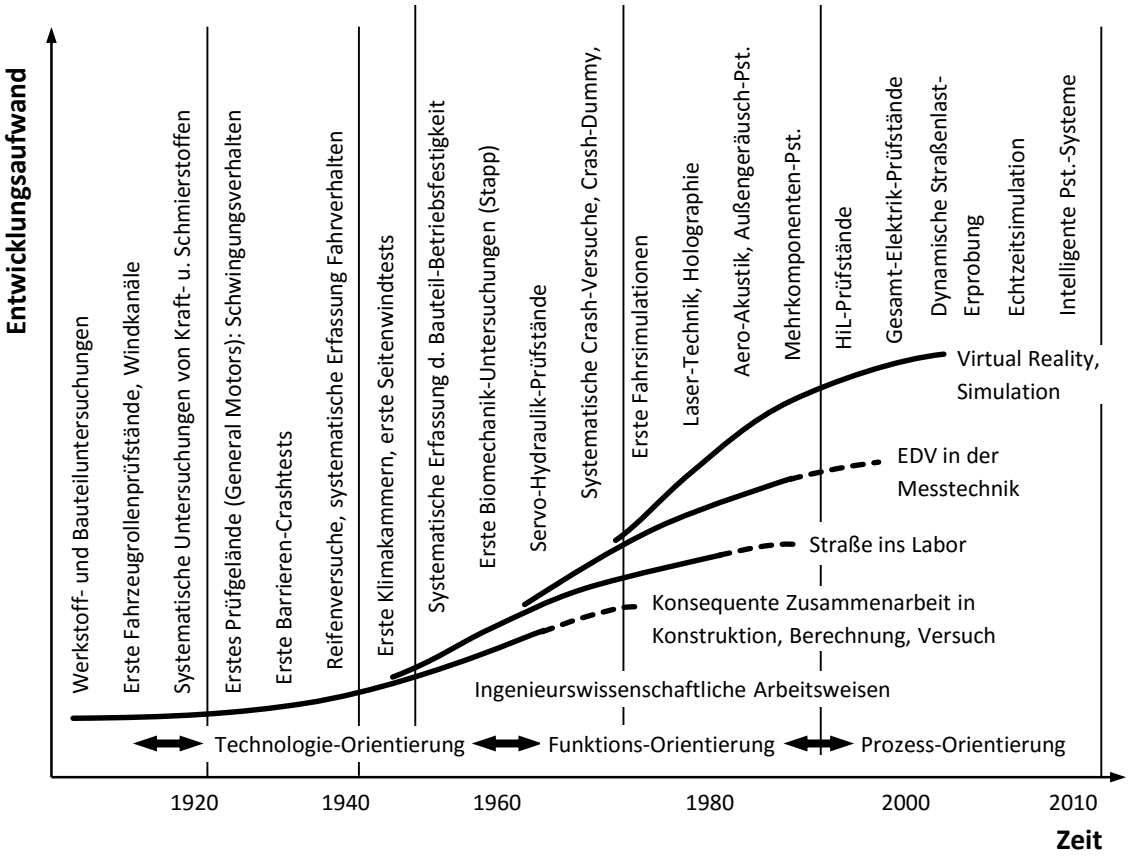


Abbildung 4: Beispiele für Meilensteine der Mess- und Versuchstechnik [BRA92]

2.2.1 Entwicklung Prüfstandstechnik

Seit Fahrzeuge kommerziell in großen Stückzahlen hergestellt werden, zählt die Erprobung zur Absicherung der Funktion und Dauerhaltbarkeit zu den Hauptaufgaben. Dabei hat sich erst in den vergangenen 20 - 25 Jahren eine prozessorientierte Methodik entwickelt, die den steigenden Anforderungen gerecht wird. Insbesondere die enormen Fortschritte in der Elektro- und Elektronikindustrie führten zu immer ausgereifteren Möglichkeiten zur Betreibung des Prüfstandes.

Zu Beginn wurden zur Erprobung von Antriebsträngen Schwungmassenprüfstände verwendet. Dabei wurden die zu beschleunigenden translatorischen und rotatorischen Massen durch eine äquivalente Drehmasse am Getriebeausgang simuliert. Später wurde die zu beschleunigende Masse durch Wasser- bzw. Wirbelstrombremsen ersetzt [HOM68]. Trotz der sehr guten Regelbarkeit dieser Bremsen überwiegt in der Prüfstandstechnik ein entscheidender Nachteil. In beiden Fällen ist kein Schleppbetrieb des Motors möglich und somit sind im Antriebstrang keine Schubmomente realisierbar [SPR09]. Die Sollwertvorgaben stammten bis dahin überwiegend aus aufgezeichneten und aufbereiteten Fahrzeugmessungen, die über Magnetbänder dem Regelsystem des Prüfstands vorgegeben wurden [BEN67].

Erst mit der Entwicklung leistungsstarker Mikroprozessoren und Leistungstransistoren wurden die stromrichtergespeisten Gleichstrommaschinen aus der Prüfstandstechnik verdrängt. Die heutigen Anforderungen nach realitätsnahem Prüfstandsverhalten erfordern flexible, hochdynamische Bremsmaschinen. Abhängig von der Anforderung des Prüfstands kommen sowohl Synchron- als auch Asynchronmaschinen zum Einsatz. Die Steuerung der Asynchronmotoren erfolgt in der Regel über Frequenzumrichter, die den Einsatz der Elektromaschinen im Vier-Quadranten-Betrieb ermöglichen. Da Asynchronmaschinen bei Netzspannung abhängig von ihrer Polzahl nur bei einer bestimmten Nenndrehzahl betrieben werden können, verwendet man zur Drehzahlvariation von Nulldrehzahl bis zur Nenndrehzahl bei gleichbleibend hohem Drehmoment einen Frequenzumrichter [LER12]. Auch der hochdynamische Anfahrbetrieb eines Antriebstrangs kann auf diese Weise gestützt werden. Die Regelung der Umrichter erfolgt in eigens dafür vorgesehenen Regelbaugruppen, um ein stabiles Systemverhalten gewährleisten zu können. Durch die verschiedenen Drehmassen im Triebstrang sowie durch das geforderte hochdynamische Verhalten der Bremsmaschinen kommt der Regelung eine entscheidende Rolle zu. Die Sollwertvorgabe wird heute mit Hilfe moderner Bus-Kommunikation von einem Sollwertvorgabesystem an den Drehzahlregler der Bremsmaschinen vorgegeben. Parallel wird eine lastproportionale Größe zur Verspannung des Prüflings zugesteuert (s. Kapitel 3).

2.2.2 Prüfstandskonfigurationen

Die Erprobung von Antriebsträngen findet abgesehen von den realen Fahrversuchen im Wesentlichen auf Prüfständen statt. Hierzu wird der Antriebstrang inklusive aller zu erprobenden Komponenten am Prüfstand verbaut und je nach Zielaufbau eine oder mehrere Abtriebswellen von E-Maschinen gebremst. Der Prüfstandsaufbau wird, abhängig von der Anzahl der Bremsmaschinen mit A1…A4 bezeichnet (s. Abbildung 5). Die verschiedenen Prüfstandsaufbauten sind an die jeweiligen Antriebstrangkonfigurationen angepasst.

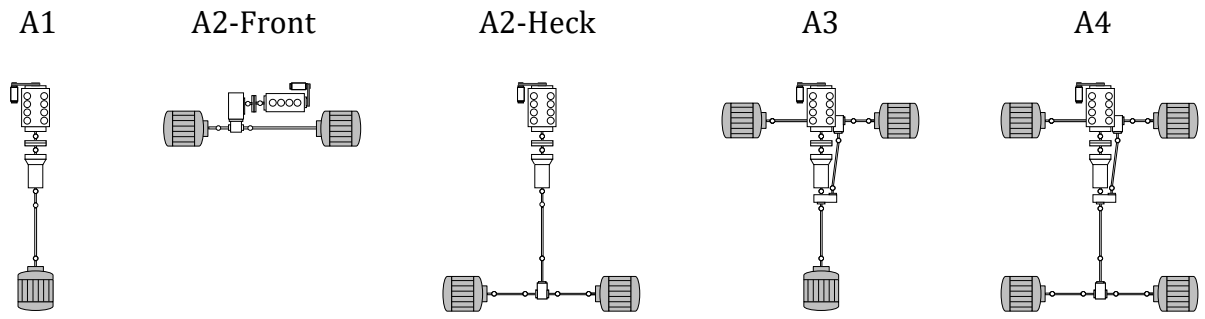


Abbildung 5: Prüfstandsaufbauten für verschiedene Antriebstrangkonfigurationen

Mit Hilfe der verschiedenen Prüfstandsaufbauten können beliebige Antriebstrangkonfigurationen erprobt werden. Standardantrieb-Konfigurationen werden auf A1 Prüfständen, sog. Powerpack-Prüfständen bzw. auf A2-Heck-Prüfständen erprobt, abhängig davon, ob Achsgetriebe und radnahe Komponenten mit erprobt werden sollen [NAU07].

Front-Quer-Anwendungen können durch entsprechende Positionierung der Bremsmaschinen ebenfalls auf A2-Prüfständen erprobt werden. Allrad-Konfigurationen werden üblicherweise auf A4-Prüfständen erprobt, da hier der Antriebstrang nahezu komplett abgebildet werden kann. Es besteht weiterhin die Möglichkeit, Allrad-Antriebstränge auf A3-Prüfständen zu erproben, wobei der hintere Teil des Antriebstrangs ohne Achsgetriebe und Seitenwellen verbaut wird. Hierzu werden in der Regel unterschiedlich dimensionierte Bremsmaschinen benötigt, was wiederum die Regelung erschwert.

2.2.3 Prüfstandsarchitektur

Für die Durchführung eines Dauerlaufs auf einem Antriebstrangprüfstand werden verschiedene Systeme benötigt, die unterschiedliche Aufgaben erfüllen. Nachfolgend werden die Hauptsysteme näher beschrieben [SCHE13].

System	Beschreibung
Erprobungsaggregat	Der Antriebstrang wird mit allen notwendigen Komponenten am Prüfstand verbaut. Zu diesen zählen die zustandsgesteuerten Aggregate wie der Verbrennungsmotor oder das Getriebe, verschiedene Kennungswandler wie z. B. das Anfahrelement und weitere Triebstrangkomponenten wie z. B. Wellen oder Lager.
Automatisierungssystem	Das Automatisierungssystem leitet die Sollwerte direkt an die Umrichter der Bremsmaschinen bzw. an die Steuergeräte des Antriebstrangs weiter [WIL12]. Außerdem übernimmt das Automatisierungssystem die Prüfstands- und Prüflingsüberwachung inklusive aller Sicherheitsfunktionen und koordiniert die Steuerung von Hilfsbetrieben und Kommunikationssystemen.
Sollwertvorgabesystem	Im Sollwertvorgabesystem werden die Sollwerte für den Prüflauf in Echtzeit durch eine parallel zur Erprobung mitlaufende Antriebstrangsimulation generiert [HÄC07]. Um eine Sollwertvorgabe in Echtzeit zu ermöglichen, müssen die generierten Sollwerte über ein Echtzeitsystem für die Vorgabe am Prüfstand aufbereitet werden.
Sicherheitssysteme	Unter dem Begriff Sicherheitssysteme werden alle Systeme zusammengefasst, die zum Schutz des Menschen, des Prüflings und der Prüftechnik am Prüfstand implementiert sind.
Hilfssysteme	Die Hilfssysteme umfassen die Systeme zur Konditionierung der Prüfumgebung, beispielsweise hinsichtlich des Drucks oder der Temperatur in der Prüfzelle.
Kommunikations- und Bussysteme	Alle relevanten Fahrzeugbussysteme werden am Prüfstand entsprechend verbaut bzw. mit Hilfe einer Restbussimulation simuliert. Zusätzlich werden weitere Bussysteme (CAN, Profibus…) und Protokolle (CCP, XCP…) zur Steuerung und Regelung des Prüfstands benötigt.

Messsystem	Die generierten Messdaten des Prüflings werden mit einer Frequenz von 100 Hz erfasst und gespeichert. In bestimmten Fällen übernimmt das Messsystem auch einen Teil der Prüflingsüberwachung, da hier alle gemessenen Größen erfasst werden. Der Umfang der gemessen Größen ist dabei erheblich. Abhängig von der Topologie des zu prüfenden Antriebstrangs werden in einem Prüflauf 2000 Messgrößen und mehr aufgezeichnet [SCHE13].
Applikationssystem	Optional sind für die Bedatung von Steuergeräten auch verschiedene Applikationssysteme in die Prüfstandsarchitektur integriert.
Peripheriesysteme	Zu den Peripheriesystemen zählen z. B. die Batteriesimulation oder Abgasmesssysteme, die jedoch nicht zwingend zur Durchführung eines Prüflaufs benötigt werden.

Tabelle 1: Systemarchitektur am Antriebstrangprüfstand

Die Systemarchitektur für einen Powerpack-Prüfstand ist in Abbildung 6 schematisch zusammengefasst. Die Vorgabegrößen Pedalwert und Abtriebsdrehzahl werden im Sollwertvorgabesystem in Echtzeit erzeugt und über das Automatisierungssystem weitergegeben.

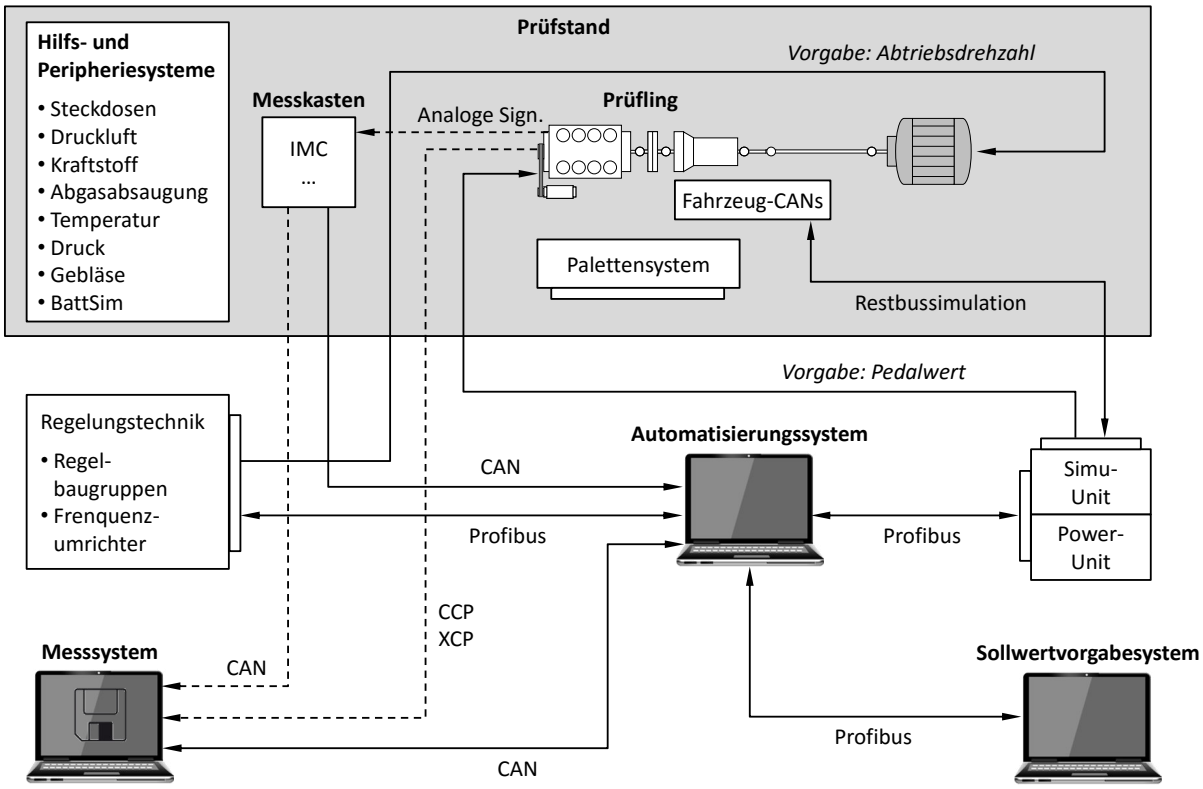


Abbildung 6: Systemarchitektur am Beispiel Powerpack-Prüfstand

Die Abtriebsdrehzahl wird als Sollwert den Umrichtergruppen für die Drehzahlregelung der Bremsen vorgegeben. Die Vorgabe des Pedalwerts erfolgt analog zum Fahrzeug über

ein Spannungssignal, das in einer separaten Einheit, der sog. Simu-Unit generiert wird. Die Simu-Unit bedient zusätzlich die Fahrzeug-CANs mit Signalen, die aufgrund des vereinfachten Aufbaus bei der Prüfstandserprobung nicht vorhanden sind, die aber von den entsprechenden Steuergeräten erwartet werden. Beispielsweise muss hier der Endschalter der Motorhaube simuliert werden.

2.3 Antriebstrangsimulation

Die Antriebstrangsimulation, auch Fahrsimulation genannt, wird in der Fahrzeugentwicklung unter den unterschiedlichsten Randbedingungen mit jeweils verschiedenen Anforderungen eingesetzt. Die Anwendungsgebiete reichen von der Berechnung des Kraftstoffverbrauchs über Fahrleistungsanalysen bis hin zu Fahrbarkeitsuntersuchungen. Ein weiteres Anwendungsgebiet für die Fahrsimulation ist die Generierung von Vorgabedaten für die Prüfstandsdauererprobung [SCHE11].

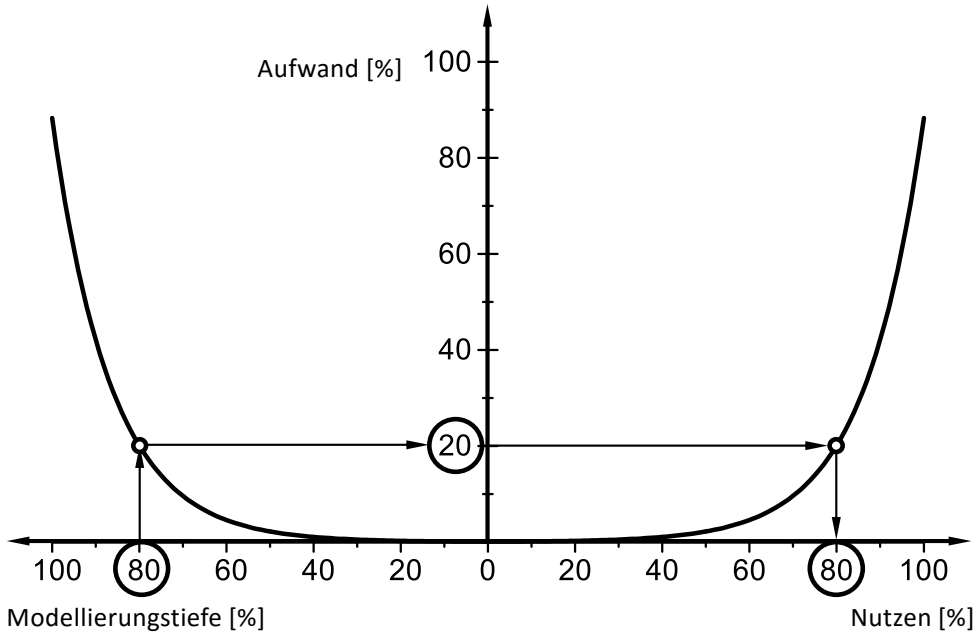


Abbildung 7: Verhältnis Aufwand zu Nutzen in Abhängigkeit der Modellierungstiefe [SPÖ96]

Die für die Simulation benötigten mathematischen Modelle werden aus physikalischen Zusammenhängen und Gesetzen abgeleitet [SCHR13]. Durch die Modellierung werden prinzipiell Vereinfachungen des realen Systems vorgenommen. Der Detaillierungsgrad des Modells (Modelltiefe) bestimmt dabei maßgeblich den Modellierungsaufwand, die Simulationszeit und die Qualität der Simulationsergebnisse. Prinzipiell gilt, dass Modellierungsaufwand, Simulationszeit und Ergebnisqualität mit zunehmendem Detaillierungsgrad stetig steigen. Laschet und Dresig sprechen in diesem Zusammenhang von Minimal- und Maximalmodellen [LAS88] [DRE06]. Spörl zeigt die Korrelation von Modellierungsaufwand, Modelltiefe und Nutzen qualitativ in einem Diagramm auf, bei dem die Modellierungstiefe nach dem Pareto-Prinzip gewählt wird, s. Abbildung 7 [SPÖ96].

Die Simulationszeit rückt insbesondere dann in den Fokus, wenn die Modelle in einem Hardware-in-the-Loop (HiL) System eingesetzt werden (vgl. Onlinesimulation Kapitel 4.2.2), da für diese Anwendung eine entsprechend kurze Rechenzeit realisiert werden muss [HÄC07], [SCHR13].

Aufgrund des großen Anwendungsbereichs von Fahrsimulationen erfolgt im Folgenden die Fokussierung auf den für die Antriebstrangerprobung relevanten Bereich der Längsdynamik. Diese Einschränkung ist für eine Betrachtung mit dem Ziel der Dauererprobung von Antriebssystemen zulässig [KLOS04], [COM05], [SCHE11].

Das Ziel einer Fahrsimulation ist laut Schramm [SCHR13], das zu betrachtende System durch ein geeignetes Modell so gut zu beschreiben, dass Rückschlüsse vom Verhalten des Modells auf das Verhalten des realen Systems ermöglicht werden. Dadurch ergeben sich große Potentiale zur Zeit- und Kostenersparnis, da nicht auf das reale System zurückgegriffen werden muss, das eventuell zum gewünschten Zeitpunkt der Betrachtung noch nicht vorhanden ist, [DRE11], [DIR92].

Nachfolgend wird zunächst eine mögliche Gliederung von Fahrsimulationen vorgestellt. Anschließend wird die Streckensimulation mit Fokus auf der Längsdynamik vorgestellt und deren Vorteile ausgearbeitet. Abschließend wird das Rechenprinzip der verwendeten Simulationssoftware näher beschrieben.

2.3.1 Untergliederung Fahrsimulationen

Die Untergliederung von Fahrsimulationssystemen erfolgt aufgrund der vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten immer bezogen auf Teilbereiche mit entsprechenden Lösungsansätzen. Jauch [JAU89] gliedert die Simulationsverfahren in Regressionsverfahren (Parametrierung durch Regressionsanalyse von Messdaten) und analytische Rechenverfahren. Die analytischen Verfahren können weiter in statistische und deterministische Berechnungsverfahren gegliedert werden.

Diese Gliederung wird von Spörl [SPÖ96] weiterentwickelt indem drei wesentliche Kriterien für die Fahrsimulation definiert werden:

1. Topologieabhängigkeit
   - topologiegebunden
   - topologieungebunden
2. Nachbildung der Kausalkette
   - Berechnung von der Ursache zur Wirkung
   - Berechnung von der Wirkung zur Ursache
3. Mathematischer Modellansatz
   - Mehrkörpersimulationssysteme (MKS)
   - starre Elementkopplung
   - elastische Elementkopplung

Die Abhängigkeit der Topologie beschreibt dabei die Anordnung und Konfiguration von Antriebstrangelementen, die entweder vom Simulationssystem vorgegeben wird (topologiegebunden) oder vom Anwender frei gewählt werden kann (topologieungebunden). Prinzipiell sind topologiegebundene Systeme einfacher parametrierbar, aber auch durch die Einschränkung auf die üblichen Triebstrangkonfigurationen weniger flexibel. [SPÖ96]

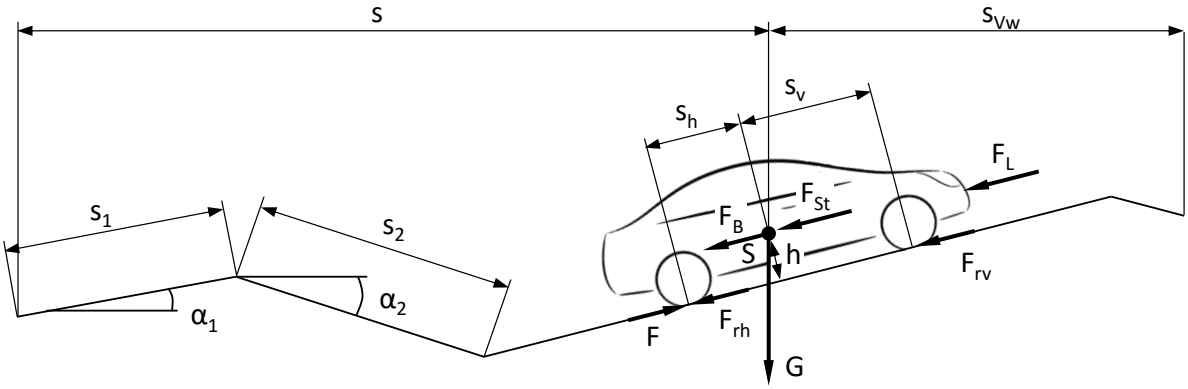
Die kausale Abfolge von der Ursache zur Wirkung beschreibt ein Rechenprinzip in dem bestimmte Stellgrößen im Triebstrang, wie z. B. eine Gaspedalstellung über verschiedene Kennungswandler zu einem Moment am Rad führen. Daraus resultiert eine Beschleunigung des Fahrzeugs als Wirkung des geänderten Radmoments. Im Gegensatz dazu wird beim Rechenprinzip von der Wirkung zur Ursache eine Beschleunigung des Fahrzeugs vorgegeben und auf die entsprechende Ursache (Antriebsmoment) zurückgerechnet. [HÄC07] [SPÖ96]

Der mathematische Modellansatz beschreibt die im Simulationsmodell verwendete mechanische Kopplung der Antriebstrangelemente. Mehrkörpersimulationssysteme (MKS) bieten in der Regel die größte Anzahl an Freiheitsgraden und dem entsprechend auch eine große Flexibilität bei der Modellierung. Allerdings sind diese Systeme für Fahrsimulationen aufgrund des hohen Parametrieraufwands und der benötigten Rechenzeit in den meisten Fällen ungeeignet. Weitaus üblicher für Fahrsimulationssysteme sind starre oder elastische Kopplungen der Triebstrangelemente. Bei der starren Elementkopplung liegen die Differentialgleichungen zur Beschreibung der Systemdynamik in expliziter Form vor. Diese werden in der Regel durch iterative Rechenverfahren gelöst. Für die Simulation der Längsdynamik mit dem Ziel der Generierung von Lastkollektiven ist diese Elementkopplung ausreichend. Für Schwingungsuntersuchungen muss auf eine elastische Elementkopplung mit Feder- und Dämpferelementen zurückgegriffen werden. [SPÖ96]

2.3.2 Streckensimulation

Eine weitere Teilmenge der Fahrsimulationen ist die sog. Streckensimulation, die im Folgenden näher betrachtet und für die Untersuchungen dieser Arbeit verwendet wird. Die Streckensimulation kennzeichnet sich durch das Abfahren einer modellierten Fahrzeug-Fahrer-Streckenkombination [WIL03], [KLOS04]. Dabei bietet sich die Möglichkeit, durch möglichst realitätsnahes Fahrverhalten, reale Straßenlasten des Antriebstrangs zu simulieren. Die Bezugsgröße zur Beschreibung von Umwelt- und Fahrergrößen ist bei der Streckensimulation die Wegkoordinate, nicht die Zeit [SCHI98]. Die zu simulierende Strecke wird daher unabhängig vom Fahrzeug parametriert und bleibt weitgehend unverändert. Somit ergibt sich der Vorteil einer relativ einfachen Anpassung von Parametern beispielsweise für Variantenuntersuchungen [SCI01].

Abbildung 8 zeigt exemplarisch das Vorgehen bei der Streckensimulation inklusive der für die Berechnung der Fahrwiderstände benötigten Kenngrößen.



s	m	zurückgelegte Wegstrecke
s_{Vw}	m	Vorausschauweg
s_1, s_2	m	Wegabschnitte 1 und 2
α_1, α_2	%	Fahrbahnneigung für die Streckenintervalle 1 und 2
F	N	Antriebskraft
G	N	Gewichtskraft
F_L	N	Luftwiderstand
F_{St}	N	Steigungswiderstand
F_B	N	Beschleunigungswiderstand
F_{rv}	N	Rollwiderstand Vorderachse
F_{rh}	N	Rollwiderstand Hinterachse
S	-	Schwerpunkt
s_v	m	Schwerpunktabstand Vorderachse
s_h	m	Schwerpunktabstand Hinterachse
h	m	Schwerpunkthöhe

Abbildung 8: Streckensimulation und Fahrwiderstände [WIL03]

Die Umgebung des Fahrzeugs wird bei der Streckensimulation in einzelne Streckenintervalle s_i unterteilt, innerhalb derer die Umweltgrößen (Fahrbahnsteigung, Kurvenradius, Reibwert, Vorausschauweg) als konstant angenommen werden. Die Fahrergrößen wie z. B. die Wunschgeschwindigkeit werden ebenfalls als Funktion des Weges angegeben, sind aber von den streckenbeschreibenden Intervallen s_i unabhängig. Der Gesamtstreckenkoordinate s werden zusätzlich Sonderbedingungen und -ereignisse, die nicht als Funktion des Weges beschrieben werden können, zugeordnet um ein realitätsnahes Fahrverhalten zu generieren. Derartige Bedingungen sind beispielsweise Haltezeiten, die nicht wegabhängig dargestellt werden können, sondern als Sonderereignis definiert werden. [WIL03], [APO00]

2.3.3 Rechenprinzip

Die Simulation umfasst in Anlehnung an Rill [RIL94] drei Schritte: die Modellbildung, das Aufstellen der Bewegungsgleichungen sowie deren numerische Lösung. Jede Fahrsimulation basiert auf den allgemeinen Fahrwiderstandsgleichungen. Der Gesamtfahr-

widerstand setzt sich dabei zusammen aus dem Radwiderstand F_R, dem Luftwiderstand F_L, dem Steigungswiderstand F_{St} und dem Beschleunigungswiderstand F_B [MIT04], [POP10].

Der Radwiderstand kann bei Geradeausfahrt auf trockener Fahrbahn praktisch gleich dem Rollwiderstand gesetzt werden [MIT04]. Dieser hängt ab vom geschwindigkeitsabhängigen Rollwiderstandsbeiwert $f_R(v)$ sowie von der Normalkraft F_N bzw. der Fahrzeugmasse m, der Erdbeschleunigung g und dem Steigungswinkel α:

$$F_R = f_R(v) \cdot F_N = f_R(v) \cdot m \cdot g \cdot \cos\alpha$$

Der Luftwiderstand wird bestimmt durch die Querspannfläche A des Fahrzeugs sowie den Luftwiderstandsbeiwert c_W:

$$F_L = c_W \cdot A \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2$$

Der Steigungswiderstand entspricht der Hangabtriebskraft bei einer Steigung mit dem Steigungswinkel α:

$$F_{St} = F_N \cdot \sin\alpha = m \cdot g \cdot \sin\alpha$$

Um den Beschleunigungswiderstand zu überwinden, sind alle translatorischen Massen m_{ges} sowie alle rotatorischen Massen mit den Trägheiten J_R und den zugehörigen Radien r zu beschleunigen:

$$F_B = \left(m_{ges} + \sum_{j=1}^{n} \frac{J_{R,j}}{{r_j}^2} \right) \cdot \ddot{x}$$

Den vier Fahrwiderständen steht die antreibende Zugkraft F_A des Fahrzeugs entgegen, die sich zusammensetzt aus dem Summenmoment an den angetriebenen Rädern $M_{R,j}$ bezogen auf den jeweiligen dynamischen Radhalbmesser $r_{dyn,j}$:

$$F_A = \sum_j \frac{M_{R,j}}{r_{dyn,j}}$$

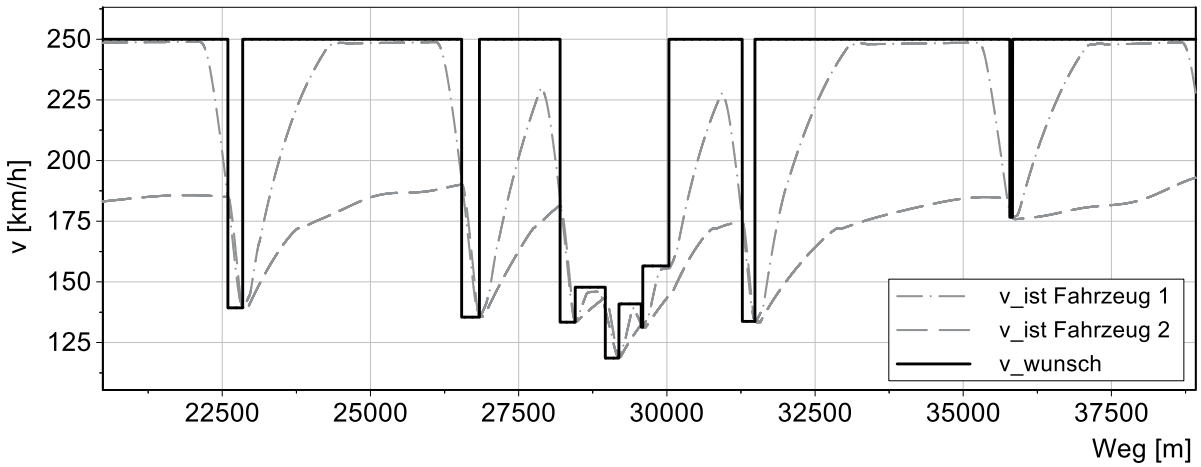
Aus dem Kräftegleichgewicht aus antreibender Zugkraft auf der einen Seite und den Fahrwiderständen auf der anderen Seite ergibt sich folgende zu lösende Differentialgleichung (DGL) zweiten Grades:

$$\sum_j \frac{M_{R,j}}{r_{dyn,j}} = \left(f_R \left(\frac{\partial x}{\partial t} \right) \cdot \cos\alpha + \sin\alpha \right) \cdot m \cdot g + c_W \cdot A \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \left(\frac{\partial x}{\partial t} \right)^2 + \left(m_{ges} + \sum_{j=1}^{n} \frac{J_{R,j}}{{r_j}^2} \right) \cdot \frac{\partial^2 x}{\partial t^2}$$

Das Simulationstool winEVA® verwendet zur Lösung der DGL einen expliziten Lösungsalgorithmus. Es handelt sich nach der Gliederung von Spörl [SPÖ96] (s. Kapitel 2.3.2) um ein topologieungebundenes Simulationstool, das vom mathematischen Modellansatz her

sowohl eine starre, als auch eine elastische Elementanbindung erlaubt. Bei der Nachbildung der Kausalkette wird ein kombiniertes Ursache-Wirkungs-Prinzip verwendet [WIL03] [HÄC07]. Das bedeutet, dass die vom Fahrermodell vorgegebene Gaspedalstellung, unter Berücksichtigung der aus dem letzten Rechenschritt eingeprägten Drehzahlen, in ein Drehmoment am Rad umgerechnet wird. Entsprechend der sich daraus ergebenden Zugkraft wird anhand der Fahrwiderstandsgleichungen eine Fahrzeugbeschleunigung errechnet. Mit dieser neu bestimmten Beschleunigung werden wiederum die Drehzahländerung und die Beschleunigungen aller Massen im Antriebstrang neu bestimmt.

Bei der Simulationsart selbst handelt es sich um eine streckenbasierte Wunschgeschwindigkeitssimulation. Die Beschreibung der Fahrstrecke, der Fahrerparameter sowie der Sonderereignisse erfolgt anhand diskreter Wegintervalle. Die Wunschgeschwindigkeitssimulation beschreibt ein Verfahren, bei dem ein virtueller Geschwindigkeitswunsch des Fahrers über ein Rechteckprofil beschrieben wird. Dieses Vorgehen wurde bei Kunz [KUN02] und Schiberna [SCHI98] beschrieben. Die Wunschgeschwindigkeit, oder auch Grenzgeschwindigkeit [JAU89] stellt in Abhängigkeit der Streckenkoordinate den Fahrerwunsch dar. Sie kann aus einer Messfahrt mit Hilfe eines geeigneten Algorithmus zur Umkehrpunktfolge erzeugt werden [HÄC06], [LAS05]. Sie richtet sich nach der Straßenverkehrsordnung, den Krümmungsradien der Streckenintervalle und der zugehörigen maximalen Querbeschleunigung, der Fahrermotivation und der Fahrleistung des Fahrzeugs.



v_wunsch	km/h	Wunschgeschwindigkeit des Fahrers
v_ist	km/h	Ist-Geschwindigkeit des Fahrzeugs

Abbildung 9: Wegabhängige Wunschgeschwindigkeit [SCHE12]

Das Wunschgeschwindigkeitsprofil beschreibt den Fahrerwunsch, eine bestimmte Geschwindigkeit zu erreichen. Diese Geschwindigkeit ist die Sollgröße des Reglers im Fahrermodell. Die Vorteile der Wunschgeschwindigkeitssimulation liegen in der universellen Anwendbarkeit, da die Streckendaten für alle Fahrzeug- und Fahrertypen geeignet sind. Abhängig von der tatsächlichen Motorisierung erreicht ein entsprechendes

Fahrzeug die gewünschte Geschwindigkeit früher, später oder gar nicht. Die Randbedingungen (Witterung, Sonderereignisse, Motorisierung, Fahrermotivation) können beliebig variiert und mit geringem Aufwand untersucht werden.

Abbildung 9 zeigt den Verlauf eines streckenabhängigen Wunschgeschwindigkeitsprofils sowie die zugehörigen Ist-Geschwindigkeitsprofile eines stark motorisierten Fahrzeugs (Fahrzeug 1) sowie eines schwach motorisierten Fahrzeugs (Fahrzeug 2) im Vergleich. Beide Fahrzeugmodelle wurden auf Basis derselben Strecken- und Geschwindikgeitsvorgaben simuliert. Entsprechend der Motorisierung des Fahrzeugs und der Motivation des Fahrers ergibt sich ein unterschiedlicher Verlauf der Ist-Geschwindigkeit.

Die streckenbasierte Wunschgeschwindigkeitssimulation bietet bei Bremsvorgängen die Möglichkeit, eine Sofortbremsung oder eine Zielbremsung durchzuführen. Eine Sofortbremsung führt sofort nach Herabsetzen der Wunschgeschwindigkeit zu einer Verzögerung. Dies ist beispielsweise bei einer Gefahrenbremsung der Fall. Bei einer Zielbremsung versucht der Fahrerregler, exakt zum Ende des Streckenintervalls die gewünschte Geschwindigkeit einzuregeln. Ein Beispiel für eine Zielbremsung ist das gezielte Verzögern des Fahrzeugs zu Beginn eines geschwindigkeitsbegrenzten Fahrabschnitts.

2.3.4 Modulares Antriebstrangmodell

Das Antriebstrangmodell ist modular aufgebaut und besteht aus den wesentlichen Komponenten des Antriebstrangs. Beginnend beim Verbrennungsmotor (VB-Motor) wird der Antriebstrang über verschiedene Kennungswandler bis hin zu den Rädern komplettiert. Auch verschiedene Komponenten von hybriden Antriebsystemen (z. B. Elektromotor (EM) oder Leistungselektronik (LE)) sind im Modulbaukasten vorgesehen. Die jeweiligen Antriebstrangkomponenten werden über bauteilspezifische Parameter, Kennlinien und Kennfelder definiert. Der Grad der Modellierungstiefe bleibt dem Anwender überlassen und richtet sich nach dem Ziel der Simulation. Durch den modularen Aufbau können Anpassungen am Modell schnell und einfach vorgenommen werden. Abbildung 10 zeigt am Beispiel eines Allrad-Antriebstrangs den modularen Aufbau des Modells in winEVA. Das mechanische Modell des Antriebstrangs wird für die Streckensimulation um ein erweitertes Einspurmodell nach Mitschke [MIT04] ergänzt. Das bedeutet, dass bei einer Kurvenfahrt abhängig von der parametrierten Spurbreite und vom Kurvenradius für jedes Rad separat eine entsprechende Drehzahl berechnet wird.

Die jeweiligen Module des Antriebstrangs sind beliebig erweiterbar (s. topologieungebundene Fahrsimulation, Kapitel 2.3.3). Somit wird eine hohe Flexibilität bei der Weiterentwicklung von Antriebstrangtopologien gewährleistet. Der modulare Aufbau unterstützt weiterhin schnelle Variantenuntersuchungen durch den Tausch einer oder mehreren Komponenten.

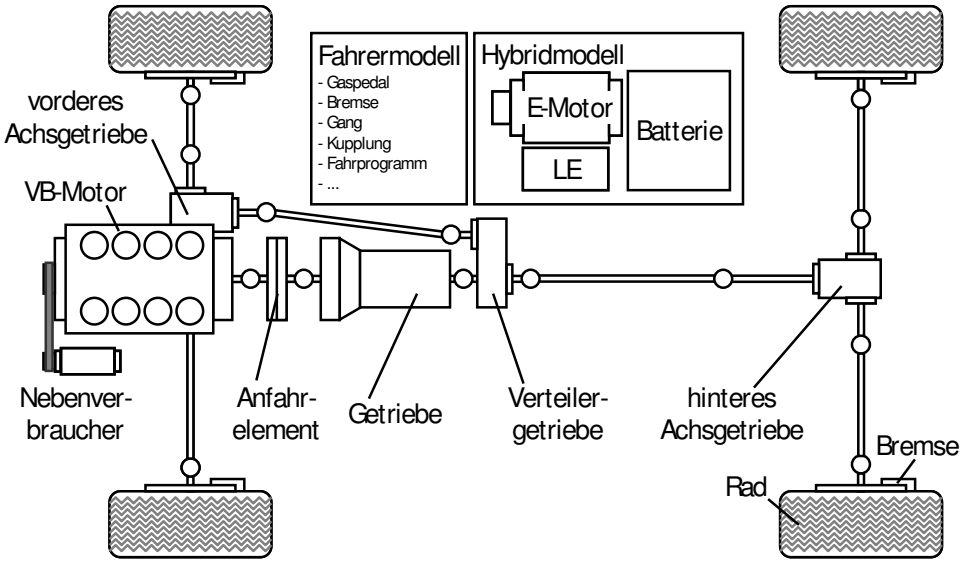


Abbildung 10: Modular aufgebautes Antriebstrangmodell

Für die Simulation der Längsdynamik werden drehsteife Modelle verwendet, was auf zwei wesentliche Gründe zurückzuführen ist. Einerseits genügt die Simulationsgüte mit dem drehsteifen Modell den Anforderungen bei der Generierung von Lastkollektiven (vgl. [GRE04]), andererseits kann somit der Simulationsaufwand in Grenzen gehalten werden. Ziel der Antriebstrangsimulation ist es, das dynamische Verhalten des realen Antriebstrangs abzubilden.

Die Grenzen des Modells sind bei transienten Schwingungsvorgängen im Antriebstrang erreicht. Hochfrequenten Schwingungen, wie sie beispielsweise bei schlupfenden Rädern oder Eingriffen durch Assistenzsysteme auftreten, können durch das oben beschriebene Modell nur mit sehr großem Modellierungsaufwand abgebildet werden. Diese Grenzen sind in Kapitel 4.3.2 näher beschrieben.

2.4 Fehlerreaktionen im Testbetrieb

Durch das Zusammenspiel mehrerer komplexer Komponenten sowie durch die noch nicht ausgereiften Softwarestände der zustandsgesteuerten Aggregate kann es bei der Antriebstrangerprobung auf Prüfständen häufig zu Fehlern und Abschaltungen kommen. Unter einem Fehler wird eine fehlerhafte Funktion des Prüflings verstanden. Schwerwiegende Fehler wie beispielsweise zu hohe Momente am Getriebeabtrieb können zu Bauteilschäden führen und werden daher von der Prüfstandsautomatisierung überwacht. Diese Fehler werden als kritische Fehler bezeichnet. Kleinere Fehler wie beispielsweise unkomfortable Schaltungen werden nicht überwacht bzw. führen bei einer Detektion nicht zu einer Abschaltung.

Die Fehlerbehebung kann auf verschiedenen Stufen erfolgen. Bei geringfügigen Fehlern mit bekanntem Reaktionsmuster reagiert direkt das Prüfstandspersonal vor Ort. Ist der Fehler schwerwiegender wird zunächst der zuständige Prüfstandsingenieur hinzugezo-

gen. Dieser hat umfangreiche Kenntnisse zur Prüftechnik und allgemeine Kenntnisse der zu erprobenden Aggregate und kann somit einen großen Bereich der Fehlerfälle behandeln. Bei bauteil- oder softwarespezifischen Fehlern muss zusätzlich der Fachbereich zur Fehlerbehebung hinzugezogen werden [KAR13].

Abhängig von der Art des Fehlers werden nachfolgend drei unterschiedliche Ebenen der Fehlerreaktion definiert und beschrieben.

2.4.1 Schematische Fehlerreaktionen

Bei bekannten Fehlerbildern, die als unkritisch eingestuft werden können, werden nach Abschaltungen im Prüfbetrieb häufig schematische Fehlerreaktionen angewandt. Dabei handelt es sich um definierte Reaktionsabläufe.

Die einfachste Möglichkeit zur Fehlerreaktion ist das Wiederaufsetzen des Prüflings in den Prüflauf. Diese Reaktion wird angewandt, wenn beide oben genannten Kriterien erfüllt sind, also der Fehler bereits in der Vergangenheit aufgetreten ist und er als unkritisch erachtet werden kann. Häufig erfolgt zusätzlich noch ein Reset der Steuergeräte zum Löschen des Fehlerspeichers durch Aus- und Einschalten der Zündung. Das Wiederaufsetzen des Prüflings bedeutet eine Fortsetzung des Prüflaufs an der Stelle, an der zuvor wegen einer Abschaltung unterbrochen wurde.

Ein Beispiel für eine schematische Fehlerreaktion ist das Wiederaufsetzten des Prüflaufs infolge eines Softwarefehlers im Sollwertvorgabesystem. Wenn beispielsweise durch eine fehlerhafte CAN-Bus Kommunikation die Schnittstelle zweier Systeme durch einen Timeout unterbrochen wird, kann dies zu einer Abschaltung des Prüflaufs führen. Da jedoch keine Schäden am Prüfling oder an der Prüftechnik entstehen können, handelt es sich um einen unkritischen Fehler.

2.4.2 Komplexe Fehlerreaktionen

Komplexe Fehlerreaktionen zeichnen sich aus durch größere Eingriffe in das Prüflingsverhalten zur Behebung bekannter oder unbekannter Fehler. Die Abläufe zur Fehlerreaktion sind bei komplexen Reaktionen nur teilweise vorab definiert und müssen gegebenenfalls kombiniert werden. Die Analyse des Fehlers nimmt hier einen größeren Stellenwert ein, als bei den schematischen Fehlerreaktionen, da eine gezielte Reaktion erforderlich ist.

Eine komplexe Reaktion ist beispielsweise erforderlich, wenn die Überwachungskriterien bei der Abschaltung des Prüflaufs darauf schließen lassen, dass ein Problem beim Kupplungswechsel bei Schaltungen vorliegt. Zunächst muss ausgeschlossen werden, dass die betroffenen Bauteile beschädigt sind, der Prüfling also mechanisch in der Lage ist, den Prüflauf fortzusetzen. Im weiteren Schritt kann zur Verbesserung der Schaltqualität eine manuelle Adaption der Schaltglieder erfolgen. Das bedeutet, dass bei definierten Drehzahl-Last-Fenstern manuelle Schaltungen unter definierten Randbedingungen

durchgeführt werden, um u.a. den Anlegedruck und die Füllzeiten der Betätigungskolben zu adaptieren. Nach erfolgreich durchgeführter Adaption der Schaltglieder besteht die Möglichkeit, den Prüflauf fortzusetzen.

2.4.3 Spezifische Fehlerreaktionen

Spezifische Fehlerreaktionen erfordern detaillierte Kenntnisse über die Mechanik und den Funktionsumfang in der Software bei den betroffenen Komponenten oder Aggregaten. Da es sich bei den vorausgehenden Abschaltungen in der Regel um unbekannte Fehlerbilder handelt, muss zunächst eine umfangreiche Fehleranalyse zur Eingrenzung des Fehlers stattfinden. Zu dieser zählen neben der Analyse des Signalverlaufs auch das Auslesen von Fehlerberichten im Steuergerät der Aggregate sowie die Überprüfung der mechanischen Funktionalität der Prüflinge durch manuelle Tests am Prüfstand.

Die Reaktion muss anschließend spezifisch an das Fehlerbild angepasst werden. Jede spezifische Fehlerreaktion ist aufgrund der unbekannten Fehler, die zugrunde liegen, individuell durchzuführen. Als Beispiel kann hier die Neuparametrierung einer bestimmten Funktion in der Steuergerätesoftware zur Behebung eines Fehlerbilds genannt werden. Spezifische Fehlerreaktionen können aufgrund des hohen Aufwandes häufig nicht vor Ort erfolgen sondern müssen mit einem gewissen Zeitaufwand entwickelt werden. Während dieser Problemlösungszeit muss der Prüfbetrieb mit Teillösungen überbrückt werden. Beispielsweise kann bei dem vermehrten Auftreten eines Fehlers auf einer bestimmten Dauerlaufstrecke diese einfach ersetzt oder ausgelassen werden. Nach der Behebung des Fehlers sind die ausgesetzten Dauerlaufstrecken zu wiederholen und die nachhaltige Fehlerbeseitigung zu kontrollieren.

2.5 Lastkollektive

Die Darstellung der Bauteilbelastungen erfolgt mit Hilfe von Lastkollektiven. Sie transformieren die am Bauteil auftretenden Belastungen aus dem Zeitbereich in den Häufigkeitsbereich [HAI06], [MÜL02]. Die Belastungen werden durch Lastzyklen in Form von Teilschwingungen oder Amplitudenwechsel definiert. Durch die Transformation in den Häufigkeitsbereich können die meist sehr umfangreichen und speicherintensiven Last-Zeit-Daten komprimiert dargestellt werden. Informationen über die zeitliche Abfolge gehen bei dieser Komprimierung jedoch verloren.

Lastkollektive werden in der Produktentwicklung u.a. für die Bauteildimensionierung und die Generierung von Vorgabedaten im Versuch benötigt. Insbesondere bei der Erprobung spielt die Korrelation der Vorgabedaten mit dem realen Kundenverhalten eine entscheidende Rolle. Bei guter Übereinstimmung zwischen der berechneten Schädigungen aus der Simulation und der realen Schädigung aus Fahrversuchen spricht man von repräsentativen Lastkollektiven. Die repräsentative Erprobung von Antriebsträngen sichert den zulässigen Einsatz des Produkts ab. Bei der Vorgabe von nicht repräsentativen Lastkollektiven können sowohl zu niedrige, als auch zu hohe Lasten zu Fehlent-

scheidungen im Entwicklungsprozess führen. Zu niedrige Lasten können dazu führen, dass eventuelle Schwachstellen nicht erkannt und während der Entwicklung nicht behoben werden. Zu hohe Lasten und entsprechende Schäden im Versuch können fälschlicherweise zu einer Überdimensionierung der Bauteile führen.

Die Generierung repräsentativer Lastkollektive kann über Fahrzeugmessungen oder über Simulationen erfolgen [WEI05]. Bei der Generierung von Lastkollektiven aus Fahrzeugmessungen ist der repräsentative Charakter der Daten aufgrund der realen Fahrmanöver bereits gegeben. Nachteilig wirkt sich jedoch aus, dass die zu erprobenden Antriebstränge hinsichtlich ihrer Antriebstrangkonfiguration von der Messung abweichen können. Da zum Zeitpunkt der Erprobung noch keine Fahrzeuge mit entsprechenden Aggregaten zur Verfügung stehen, muss die Generierung der Lastkollektive auf Basis von Vorgänger-Fahrzeugen erfolgen. Die Abweichungen der so gewonnen Vorgabedaten können teilweise durch nachträgliche Bearbeitung und Umrechnung der Signale kompensiert werden. Als Beispiel soll an dieser Stelle die meist unterschiedlichen Achsübersetzungen zwischen den Vorgängerfahrzeugen und den zu erprobenden Antriebsträngen genannt werden. Diese führt zu einer Verschiebung des Drehzahl- und Drehmomentenkollektivs. Über entsprechende Korrekturfaktoren können diese auf die Zielkonfiguration angepasst werden. Unterschiede, die sich durch die Achsübersetzung in der Fahrweise ergeben können jedoch nicht berücksichtigt werden. Daher wird die Möglichkeit der Generierung von Lastkollektiven für die Prüfstandserprobung aus Fahrzeugmessungen nur noch selten verwendet.

Die zweite Möglichkeit zur Generierung repräsentativer Lastkollektive führt über die Antriebstrangsimulation. Der Vorteil dieser Methode ergibt sich daraus, dass beliebige Antriebstrangkonfigurationen und Komponenten inklusive deren Funktionen modelliert werden können. Diese entsprechen den zu erprobenden Aggregaten am Prüfstand. Bei validen Modellen liegen die Ergebnisse der Antriebstrangsimulation daher sehr nahe an der Realität. Durch geeignete Fahrermodelle und Simulationskonzepte kann zusätzlich ein realitätsnahes Fahrverhalten simuliert werden. Durch die Kombination realitätsnaher Fahrermodelle mit Modellen der Zielanwendung können somit mit relativ geringem Aufwand repräsentative Sollwert-Vorgabedaten für die Erprobung generiert werden.

Die Validierung der Simulationen anhand von Fahrzeugmessungen hinsichtlich der Lastkollektive erfolgt mit Hilfe von Messdaten aus dem Fahrzeug-Dauerlauf und wurde bereits bei Greiner nachgewiesen [GRE04]. Die Qualität der simulierten Fahrmanöver im Vergleich zur Fahrzeugmessung sowie die Grenzen der Simulation bzw. der Prüfstandserprobung werden in Kapitel 4.3 aufgezeigt.

Die Last-Zeit-Daten aus Fahrzeugmessungen bzw. aus Simulationen werden durch eine Transformation aus dem Zeit in den Häufigkeitsbereich in ein Lastkollektiv gewandelt. Diese Transformation erfolgt mit Hilfe von Zählverfahren wie beispielsweise der Verweildauerzählung (s. Kapitel 3.4.4). Um ein repräsentatives Lastkollektiv zu erhalten werden die Last-Zeit-Daten iterativ auf eine Zielschädigung angepasst. Nach diesem Vorgang wird durch die Zusammenstellung verschiedener Last-Zeit-Daten aus unter-

schiedlichen Strecken ein Prüfprogramm erstellt. Aus den Last-Zeit-Daten des Prüfprogramms werden für die Erprobung auf Prüfständen bestimmte Signale als Sollwerte zur Vorgabe an den Prüfling verwendet. Dieses Vorgehen ist nachfolgend in Abbildung 11 näher erläutert.

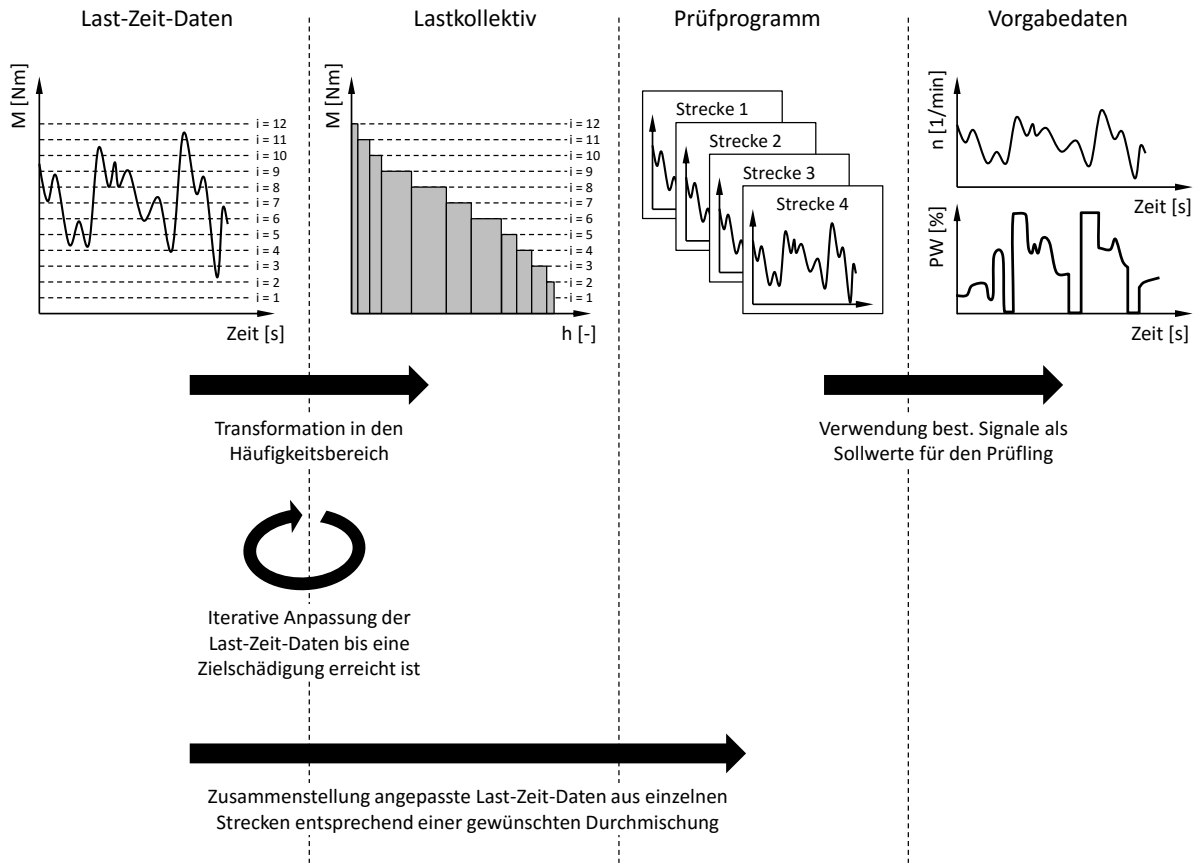


Abbildung 11: Zusammenhang Last-Zeit-Daten - Lastkollektiv - Prüfprogramm - Vorgabedaten

2.6 Automatgetriebe

Die Antriebstrangerprobung befasst sich, wie in Kapitel 2.1 beschrieben, mit der Erprobung aller Komponenten, Aggregate und Systeme des Antriebstranges. Aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen an das Testing werden die Getriebe und radnahen Komponenten mit Hilfe von dynamischen Prüfprogrammen und die Verbrennungsmotoren mit Hilfe von stationären und synthetischen Prüfprogrammen erprobt. Bezüglich der Anforderungen an Prüftechnik und Erprobungsmethodik stellt die dynamische Erprobung des Getriebes sowie der radnahen Komponenten einen höheren Komplexitätsgrad dar und steht daher in der folgenden Ausarbeitung im Fokus.

Die PKW-Getriebe lassen nach Naunheimer [NAU07] systematisch wie folgt einteilen:

- Handschaltgetriebe,
- Automatisierte Schaltgetriebe,
- Stufen-Automatgetriebe,
    - Doppelkupplungsgetriebe,

  - konventionelle Automatgetriebe (bestehend aus hydrodynamischem Wandler und nachgeschaltetem Planetengetriebe),
  - Automatgetriebe in Vorgelegebauweise,
- Hybridantriebe und
- Mechanische Stufenlosgetriebe.

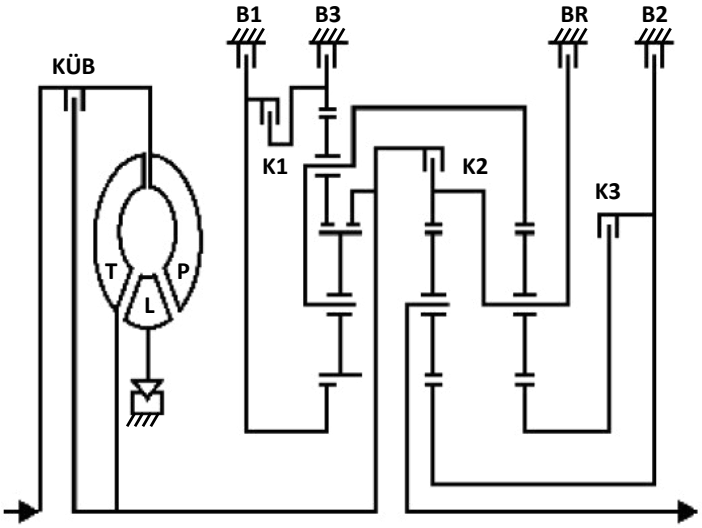
Der Hauptanteil der in modernen Oberklasse-Fahrzeugen verbauten Getriebe entfällt auf die Stufenautomaten und auf die Hybridantriebe. Zu diesen zählen Doppelkupplungsgetriebe (DKG) und konventionelle Automatgetriebe in Planetenbauweise sowie deren Hybrid-Derivate. Neben einem höheren Schalt- und Bedienkomfort sind die Stufenautomatgetriebe in Planetenbauweise aufgrund ihrer hohen Leistungsdichte und der koaxialen Bauweise insbesondere für den Einbau in stark motorisierte Fahrzeuge mit Standardantrieb geeignet.

Die Stufenautomatgetriebe zählen zur Gruppe der Lastschaltgetriebe. Bei Lastschaltgetrieben erfolgt der Gangwechsel ohne Zugkraftunterbrechung, d. h. mit permanent anliegendem Getriebeeingangsmoment. Die Gangwahl wird vom Getriebesteuergerät getroffen, kann jedoch vom Fahrer durch manuelle Eingriffe bzw. durch die Gaspedalstellung und das somit angeforderte Moment beeinflusst werden. Auch die aktuelle Fahrsituation, die im Steuergerät hinterlegte Betriebsstrategie sowie die Umweltbedingungen haben Einfluss auf die Wahl der Übersetzung [KLOS04], [KIR07].

Für die Einstellung unterschiedlicher Übersetzungen werden bei Doppelkupplungsgetrieben ein- oder mehrstufige Stirnradgetriebe verwendet. Konventionelle Stufenautomaten greifen hierfür auf eine Kombination verschiedener Planetenradsätze zurück. Die einzelnen Komponenten der Planetenradsätze werden dabei über Lamellenkupplungen oder starre Verbindungen miteinander gekoppelt oder über Lamellenbremsen gegen das Getriebegehäuse gebremst. Bei Lamellenkupplungen und Lamellenbremsen handelt es sich um das gleiche Maschinenelement mit dem Unterschied, dass bei Kupplungen zwei Wellenenden miteinander gekoppelt werden und bei Bremsen die Sekundärseite der Kupplung gehäusefest ist und daher das entsprechende Koppelelement auf der Primärseite bei Schließen der Bremse auf Drehzahl 0 gebremst wird. Das Ziel bei der Auswahl einer geeigneten Koppelstruktur ist es, mit möglichst wenigen Wirkungsgradverlusten möglichst viele progressiv gespreizte Gänge zu generieren [GUM07], [FÖR91]. Die Verluste im Getriebe entstehen durch die Verzahnungsverluste der Planetengetriebe sowie durch geöffnete Lamellenkupplungen und –bremsen entsprechend deren Schleppmoment.

Der Gangwechsel erfolgt bei Stufenautomatgetrieben ohne Unterbrechung der Zugkraft am Rad. Dabei wird die zu verlassende Gangstufe aus dem Kraftfluss ausgekuppelt während die zuschaltende Stufe parallel in den Kraftfluss eingekuppelt wird. Bei Stufenautomatgetrieben erfolgt dieser Gangwechsel durch das zeitsynchrone Zu- und Abschalten von Lamellenkupplungen bzw. Lamellenbremsen. Diese Vorgehensweise beim Übersetzungswechsel wird Überschneidungsschaltung genannt [NAU07], [FÖR91].

In Abbildung 12 ist die Koppelstruktur eines 7-Gang Stufenautomatgetriebes inklusive des Anfahrelements dargestellt. Im Schaltschema ist zu erkennen, welche Kupplungen bzw. welche Bremsen für einen bestimmten Gang geschlossen sind. In jedem Gang sind drei Schaltelemente geschlossen und drei Schaltelemente geöffnet. Das Grundgetriebe besteht aus zwei einfachen Planetenradsätzen sowie aus einem Ravigneaux-Planetensatz.



Gg	K1	K2	K3	B1	B2	B3	BR	i
1			•		•	•		4,38
2			•	•	•			2,86
3	•		•		•			1,92
4	•	•			•			1,37
5	•	•	•					1,00
6		•	•	•				0,82
7		•	•			•		0,73
R1			•			•	•	-3,4
R2			•	•			•	-2,2
N			•			•		0

Abbildung 12: Koppelstruktur und Schaltschema 7-Gang Stufenautomatgetriebe von Mercedes-Benz

Als Anfahrelement wird bei Stufenautomatgetrieben üblicherweise ein hydrodynamischer Drehmomentwandler verwendet. Dabei handelt es sich um ein Strömungsgetriebe bei dem Drehzahlen und Drehmomente gewandelt werden. Ein Drehmomentwandler besteht aus den Einzelkomponenten Pumpenrad P, Turbinenrad T und Leitrad L. Die mechanische Leistung des Verbrennungsmotors wird am Pumpenrad in die hydraulische Leistung eines Massenstroms gewandelt. Diese wird im Turbinenrad – nach der hydrodynamischen Drehzahl- und Drehmoment-Wandlung – wieder in eine mechanische Leistung gewandelt, die am Getriebeeingang anliegt. Das gewandelte Drehmoment wird im geschlossenen hydraulischen Kreislauf des Wandlers zur Abstützung des Massenstroms und somit zur Abstützung des gewandelten Drehmoments verwendet. Der Drehmomentwandler weist aufgrund der fehlenden mechanischen Verbindung in allen Betriebspunkten eine Differenzdrehzahl zwischen Primär- und Sekundärseite, also zwischen Pumpen- und Turbinenrad auf. Dadurch arbeitet der Drehmomentwandler beim Anfahrvorgang als hydrodynamisches Getriebe und kann das Drehmoment der Primärseite überhöhen. Durch die Drehmomentüberhöhung bei Drehzahldifferenz zwischen Primär- und Sekundärseite erhöht sich die dem Fahrzeug zur Verfügung stehende Zugkraft am Rad. Infolge der berührungsfreien Leistungsübertragung erfolgt der Anfahrvorgang komfortabel und ruckfrei. In anderen Fahrsituationen ist dieses Verhalten aufgrund des schlechten Wirkungsgrades bei Differenzdrehzahl jedoch unerwünscht. Daher

wird nach aktuellem Stand der Technik ein Drehmomentwandler nach dem Anfahrvorgang durch eine Lamellenkupplung überbrückt. Abbildung 12 zeigt diese sog. Überbrückungskupplung $K_{ÜB}$ als direkte Verbindung zwischen dem Pumpen- und dem Turbinenrad.

Der Einsatzbereich von Stufenautomatgetrieben beschränkt sich auf dem europäischen Markt für PKW weitgehend auf das Premiumsegment. In jüngster Vergangenheit werden jedoch auch bei Mittelklassefahrzeugen vermehrt Automatgetriebe, insbesondere Doppelkupplungsgetriebe, angeboten. In den USA hingegen dominieren die Automatgetriebe über alle Segmente hinweg [NAU07].

3 Versuchsmethodik

Auf Basis der beschriebenen Grundlagen bei der Prüfstandserprobung und der aufgezeigten Anforderungen an den Erprobungsprozess soll im Folgenden eine grundlegende Versuchsmethodik, bestehend aus mehreren Einzelmethoden, skizziert werden. Zunächst kennzeichnet sich eine Methodik nach Lindemann [LIN09] durch das Zusammenwirken verschiedener Einzelmethoden.

Der Begriff einer Methode wiederum ist bei Lindemann [LIN09] wie folgt definiert:
„Eine Methode kennzeichnet die Beschreibung eines regelbasierten und planmäßigen Vorgehens, nach dessen Vorgabe bestimmte Tätigkeiten auszuführen sind, um ein gewisses Ziel zu erreichen. Methoden sind präskriptiv, also als eine Vorschrift zu verstehen. Sie sind zielorientiert und damit auf die Lösung eines Problems oder einer Aufgabenstellung fokussiert. Methoden bieten Vorschläge für die Abfolge bestimmter Tätigkeiten an und die Art und Weise, in der diese Tätigkeiten durchzuführen sind. Sie besitzen einen stark operativen Charakter. Oftmals stellen Methoden einen Formalismus dar, der festlegt, wie Schritte durchzuführen beziehungsweise Arbeitsergebnisse zu dokumentieren sind.“ [LIN09].

Auf Basis dieser Definition wird in den folgenden Kapiteln zunächst der allgemeine Problemlösungsprozess in der Produktentstehung näher beschrieben, um im Folgenden eine problemorientierte Vorgehensweise für den Versuchsprozess zu definieren. Im Anschluss erfolgt eine Beschreibung der Versuchsmethodik.

3.1 Vorgehensmodell in der Produktentstehung

Da in der Entwicklung im Allgemeinen und in der Konstruktion und Erprobung im Besonderen eine Vielzahl von Problemen gelöst werden müssen, liegt es nahe, die Vorgehensweise des allgemeinen Vorgehensmodells auf den Versuchsprozess anzuwenden [VDI93]. Allgemein erfolgt das Vorgehen in Phasen zunehmender Konkretisierung, sodass der Prozess zunächst im Abstrakten, später im Konkreten und zuletzt im Besonderen angewendet wird. Das Vorgehensmodell wird in der VDI-Richtlinie 2221 zur Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte [VDI93] in folgende Teilprozesse untergliedert:

- Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung,
- Ermitteln von Funktionen und Strukturen,
- Suchen nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen,
- Gliedern in realisierbare Module,
- Gestalten der maßgebenden Module,
- Gestalten des gesamten Produkts,
- Ausarbeiten der Ausführungs- und Nutzungsangaben.

Den sieben Schritten des Vorgehensmodells liegen die vier grundsätzlichen Phasen: Planen, Konzipieren, Entwerfen und Ausarbeiten zu Grunde.

In der Regel sind zusätzliche Iterationsschleifen insbesondere bei komplexen Problemstellungen erforderlich, um durch immer detailliertere Analysen eine Lösung herbei zu führen.

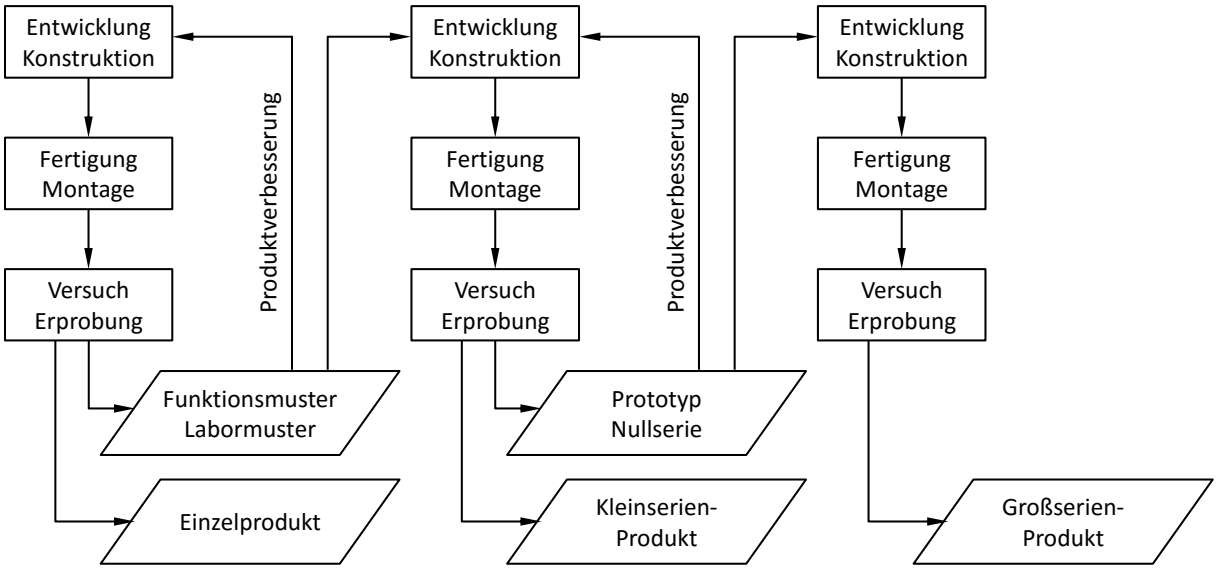


Abbildung 13: Produktentstehungsprozess [VDI93]

Die Prozessschritte zur Konstruktion sowie zur Fertigung des in Abbildung 13 gezeigten Produktentstehungsprozess werden bereits heute sehr stark methodisch unterstützt. Exemplarisch seien an dieser Stelle die VDI-Richtlinie 2221 zur Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte [VDI93], die Werke zur Konstruktionslehre von Pahl und Beitz [PAH07] oder das Toyota Produktionssystems (TPS) für die Vermeidung jedweder Art von Verschwendung im Produktions- und Fertigungsprozess, das bereits im frühen 20. Jahrhundert entwickelt wurde, genannt [OHN05].

Die VDI-Richtlinie 2221 teilt den methodischen Konstruktionsprozess ein in die Prozessschritte Planung, Konzipierung, Entwurf, Ausarbeitung. Das oben genannte Prinzip der Zerlegung eines Gesamtproblems liegt dieser Gliederung zugrunde. Im Versuch gibt es derzeit noch kein generisches, allgemein gültiges Vorgehensmodell wie in der VDI-Richtlinie 2221 für den Konstruktionsprozess beschrieben [KAR15]. In den meisten Fällen wird die Vorgehensweise im Versuch durch unternehmensinterne Standardabläufe und bilaterale Kommunikation zwischen Entwicklung und Versuch definiert. Die Vorgehensweise kann dabei durchaus auch unternehmensintern variieren, abhängig von den zu erprobenden Komponenten bzw. Systemen. Wenn methodische Ansätze verfolgt werden, handelt es sich meist um das in der VDI-Richtlinie 2206 [VDI04] beschriebene V-Modell, das aus der Softwareentwicklung bekannt ist.

Ein allgemein gültiges Vorgehensmodell auch im Versuch bietet den Vorteil einer einheitlichen Abwicklung der Einzelprozessschritte unabhängig vom Erprobungsziel. Wei-

terhin können nach Lindemann [LIN09] durch die Beschreibung einer Versuchsmethodik zielorientierte Einzelschritte und Tätigkeiten definiert werden, die entsprechend einer Vorgabe zur Lösung des Gesamtproblems beitragen sollen.

In Anlehnung an den methodischen Konstruktionsprozess wird daher in den folgenden Kapiteln ein methodisches Vorgehensmodell im Versuch beschrieben und auf dessen Basis eine allgemeine Definition für die Versuchsmethodik erstellt.

3.2 Vorgehensweise im Versuch

Gemäß Abbildung 13 fließen die Erkenntnisse aus der Erprobung in die Weiterentwicklung der Produkte mit ein und führen somit zu einem höheren Produktreifegrad durch Erhöhung des Erfüllungsgrads der Kundenanforderungen unter Berücksichtigung zusätzlich gewonnener Informationen (beispielsweise aus dem Erprobungsprozess), s. [PAE06], [KRE08]. An den Versuch selbst werden aus der Produktentwicklung bzw. aus einzelnen Entwicklungsprojekten abgeschlossene Problemstellungen herangetragen. Deren Lösung erfolgt durch eine methodische Vorgehensweise in der Erprobung. Die einzelnen Prozessschritte hierbei sind in Anlehnung an Zeller [ZEL90] folgende:

1. Versuchsplanung,
2. Versuchsvorbereitung,
3. Versuchsdurchführung und
4. Versuchsauswertung.

Auf Managementebene werden in der Versuchsplanung in Abhängigkeit der Problemstellung verschiedene Versuchsaufträge definiert. Versuchsaufträge beinhalten spezifische Erprobungsziele, die zur Problemlösung beitragen.

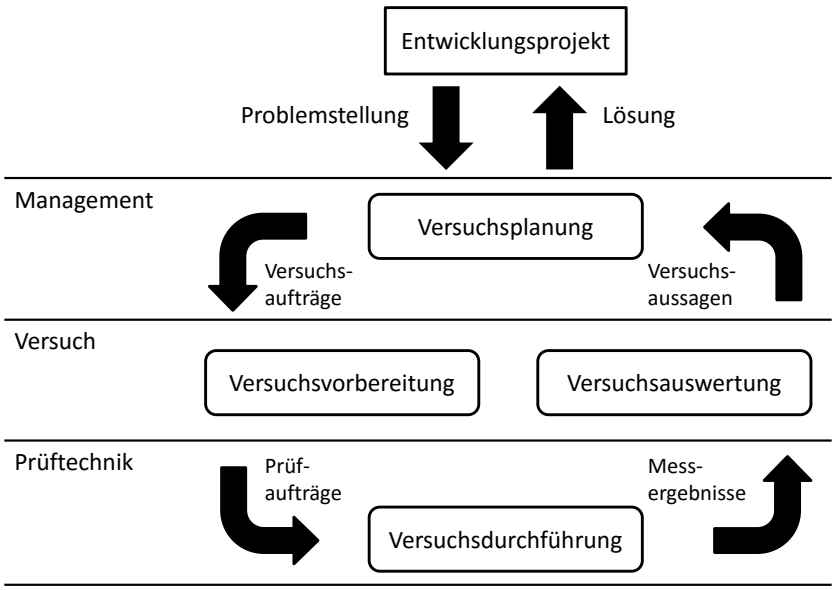


Abbildung 14: Methodisches Vorgehen zur Problemlösung im Versuch [ZEL90]

Aus den Versuchsaufträgen werden einzelne Prüfaufträge zur Dauer- und Funktionserprobung abgeleitet. Unter Berücksichtigung der vorhandenen Prüfressourcen und Prüftechnik erfolgt die Umsetzung der Versuchsaufträge in konkreten Prüfaufträgen. Die Auswertung der ermittelten Messergebnisse erfolgt einerseits während der Erprobung zur Kontrolle der Lasten, andererseits nach Abschluss der Erprobung zur Verifizierung der Prüfergebnisse. Mit Hilfe der ausgewerteten Ergebnisse können Aussagen über die Erprobung und die definierten Erprobungsziele getroffen werden. Der beschriebene Prozess ist in Abbildung 14 dargestellt.

Die vier Phasen der methodischen Vorgehensweise werden im Folgenden näher erläutert.

3.2.1 Versuchsplanung

Die Versuchsplanung steht am Anfang des Versuchsprozesses und wird von den Problemstellungen aus den Entwicklungsprojekten beeinflusst. Es wird unterschieden zwischen einer strategischen und einer operativen Versuchsplanung.

Die strategische Planung beinhaltet langfristige Ziele während der Produktentwicklung und ist daher eine langfristige Planung. In der Regel wird für ein Entwicklungsprojekt auf Basis eines vorhandenen Erprobungsportfolios eine Versuchsstrategie erstellt, welche die ganzheitliche Absicherung von Funktion und Dauerhaltbarkeit der betroffenen Bauteile, Aggregate und Systeme beschreibt. Das zugrunde liegende Erprobungsportfolio beinhaltet eine Ansammlung verschiedener Prüfläufe mit unterschiedlichen Erprobungszielen abhängig vom Prüflingsreifegrad. Die Versuchsstrategie berücksichtigt einzelne Chargen des Entwicklungsprojekts, und setzt jeweils eine gewisse stetig wachsende hard- und softwareseitige Funktionalität der Prüflinge voraus. Die strategische Planung kann aufgrund des langen Planungszeitraums nur grob, d.h. im Monatstakt durchgeführt werden. Bezüglich der Ressourcen werden vor allem Prüfstandsbelegungen, Fahrzeugbelegungszeiträume und die Prüflingslogistik geplant. Auch Entscheidungen über die externe Vergabe von einzelnen Versuchen, also die Auslagerung von Erprobungen zu externen Dienstleistern, werden von der strategischen Planung beeinflusst. Zur strategischen Planung zählt ebenfalls die Budgetplanung für die Erprobung. In Abstimmung mit den Planungs- und Controlling-Abteilungen werden die Umfänge, die für die internen und externen Erprobungen anfallen, eingeplant.

Die operative Versuchsplanung betrifft hauptsächlich die kurzfristige Prüfstands- und Teileplanung. Hier wird auf Wochen- bzw. auf Tagesbasis die Bereitstellung der Prüflinge sowie die Verfügbarkeit von Prüfstandsressourcen geplant. Optional können die Prüflinge für die Prüfstandserprobung auf Paletten vorgerüstet werden, um die Totzeit zwischen zwei Erprobungen zu minimieren. Die Verfügbarkeit der Paletten sowie die entsprechenden Zusatzaufwände beim Rüsten sind ebenso Teil der operativen Planung wie die rechtzeitige Bereitstellung der zu erprobenden Aggregate, der entsprechenden Software sowie geeigneter Prüfprogramme. Bei weniger umfangreichen Erprobungen wie z. B. bei der Komponentenerprobung entfällt der Rüstprozess weitgehend. Hier werden

die zu erprobenden Prüflinge direkt am Prüfstand verbaut. Ein weiterer Umfang der operativen Planung ist die Festlegung der Messsignale, die bei der Erprobung aufgezeichnet und dokumentiert werden sollen. Zu jedem Messsignal werden der Messbereich sowie die notwendige Abtastfrequenz definiert und ein entsprechender Speicherplatz bereitgestellt.

Die Einzelschritte für den Prozessschritt 1. Versuchsplanung sind in nachfolgender Tabelle dargestellt.

Nr.	Prozessschritt
1.	**Versuchsplanung**
1.1.	Strategische Versuchsplanung
1.1.1.	Definition strategische Erprobungsziele
1.1.2.	Ableitung Versuchsstrategie
1.1.3.	Grobplanung Prüfstandsressourcen
1.1.4.	Grobplanung Prüflingslogistik und Hardwarebeschaffung
1.1.5.	Grobplanung externe Vergabe
1.1.6.	Budgetplanung
1.2.	Operative Versuchsplanung
1.2.1.	Feinplanung Prüfstandsressourcen
1.2.2.	Feinplanung Erprobungsaggregate
1.2.3.	Feinplanung externe Vergabe
1.2.4.	Beplanung Palettensysteme
1.2.5.	Festlegung Messsignalliste und Abtastfrequenzen

Tabelle 2: Prozessschritte Versuchsplanung

3.2.2 Versuchsvorbereitung

Der zweite Prozessschritt der Versuchsmethodik beinhaltet die Versuchsvorbereitung. Die Vorbereitungsphase betrifft die Teilebeschaffung sowie die Bereitstellung repräsentativer Sollwertvorgaben für die Erprobung.

Um den Versuch vorzubereiten, muss rechtzeitig vor Erprobungsstart die notwendige Hard- und Software beschafft werden. Unter Hardware werden in diesem Zusammenhang alle zur Durchführung der Erprobung benötigten Komponenten verstanden. Zu diesen zählen neben den Erprobungsaggregaten selbst auch Anbauteile zur Anbindung des Prüflings an die Bremsmaschinen des Prüfstandes, die Palettensysteme, auf denen ein Prüfling aufgebaut wird, die Abgasanlage und vieles mehr. Die Software beschreibt im Gegensatz dazu sowohl die Grundsoftware für die Steuergeräte der zustandsgesteuerten Aggregate, als auch eine entsprechende Bedatung, den sog. Datenstand. Abhängig

von der Art der Erprobung kann der Umfang von Hard- und Software, beispielsweise bei der Dauererprobung von komplexen Antriebssystemen, größere Ausmaße annehmen. Das bedeutet, dass eine interdisziplinäre Zusammenarbeit und entsprechende Absprachen sowie mehrere Planungsschritte notwendig sind, um zu Beginn des Prüflingsaufbaus alle notwendigen Komponenten zur Verfügung zu stellen. Daher müssen bei komplexen Erprobungen die einzelnen Aggregate und Komponenten vor dem Aufbau auf dem Prüfstand vorgerüstet werden. Bei weniger komplexen Erprobungen kann der Rüstprozess entfallen und der Aufbau der Prüflinge direkt am Prüfstand erfolgen.

Neben den Prüflingen muss auch der Prüfstand für die Erprobung vorbereitet werden. Zu den Vorbereitungen am Prüfstand zählen beispielsweise die Bereitstellung versuchsspezifischer Messtechnik oder die Anpassung des Automatisierungssystems, des Sollwertvorgabesystems sowie des Messsystems an die geplante Erprobung. Ein weiterer wichtiger Punkt bei der Anpassung der Systeme ist die Definition von Grenzwerten. In Abstimmung mit der Produktentwicklung werden eine Grenzwertüberwachung sowie sinnvolle Warn- und Abschaltbedingungen definiert. Die Grenzwerte gliedern sich in die Systemgrenzwerte, die Prüflingsgrenzwerte sowie in die versuchsspezifischen Grenzwerte, s. Abbildung 15.

Bei Systemgrenzwerten wird in erster Linie die Prüftechnik überwacht und geschützt. Zu diesen zählt beispielsweise die Überwachung der Leistungsgrößen der E-Maschinen, die Überwachung der Prüfzelle selbst oder die Überwachung zusätzlich bereitgestellter Messtechnik. Diese sind allgemein für alle Erprobungen gültig.

Die Prüflingsgrenzwerte werden separat für jedes Erprobungsaggregat vom zuständigen Fachbereich definiert. Hier werden Leistungsgrößen wie z. B. Drehzahlen oder Drehmomente, Temperaturen oder Drücke überwacht.

Die versuchsspezifischen Grenzwerte betreffen weiter spezifizierte Überwachungen in Abhängigkeit der Besonderheiten der aktuellen Erprobung. Die Grenzwerte werden von den Systemgrenzwerten über die Prüflingsgrenzwerte hin zu den versuchsspezifischen Grenzwerten immer weiter spezifiziert und eingegrenzt.

Die Aufgliederung der Grenzwerte ist in Abbildung 15 dargestellt. Dort sind die durch die Spezifikation der E-Maschinen gegebenen Systemgrenzwerte in der obersten Zeile dargestellt. Die Prüflingsgrenzwerte schränken die Systemgrenzwerte durch die im Lastenheft definierten Grenzwerte weiter ein. In den versuchsspezifischen Grenzwerten ist zusätzlich die Einschränkung getroffen, dass keine Rückwärtsfahranteile erlaubt sind (untere Grenzdrehzahl = 0 1/min) und die Maximal-Geschwindigkeit begrenzt ist (maximal zulässige obere Grenzdrehzahl).

Weiterhin werden zur Vorbereitung des Versuchs auch die dem Erprobungsziel entsprechenden Prüfprogramme bereitgestellt. Bei den Prüfprogrammen wird zwischen Funktions- und Dauererprobungen unterschieden. Funktionserprobungen bedingen Programme, die die zu untersuchende Funktion unter möglichst realitätsnahen Randbedingen in Form von stationären oder synthetischen Vorgabegrößen abbilden (vgl. Kapi-

tel 2.1.1). Für die Dauererprobung von Aggregaten und Systemen werden neben den beschreibenden Prüfprogrammen auch die hinterlegten Prüfkollektive benötigt. Die Aufgabe bei der Erstellung von Prüfkollektiven besteht darin, die maximal zulässige Belastung, die in der Zielanwendung auftritt, zu simulieren und diese bei Bedarf zu raffen. Da die Belastung in der Zielanwendung zum Zeitpunkt der Erstellung der Lastkollektive noch nicht bekannt ist, wird mit Hilfe geeigneter Methoden und auf Basis von bekannten ähnlichen Antriebskonfigurationen das Schädigungspotential der Zielanwendung prädiziert. Eine mögliche Methode hierfür ist bei Ullmann [ULL86] beschrieben. Die generierten Lastkollektive müssen bei der Prüfstandserprobung unter möglichst realitätsnahen Rand- und Umgebungsbedingungen und unter Berücksichtigung der Abweichungen zwischen dem modellierten und dem realen Antriebstrang als Sollwerte dem Prüfling vorgegeben werden. Diese Vorgehensweise sowie mögliche Vorgabearten sind in Kapitel 4 näher erläutert.

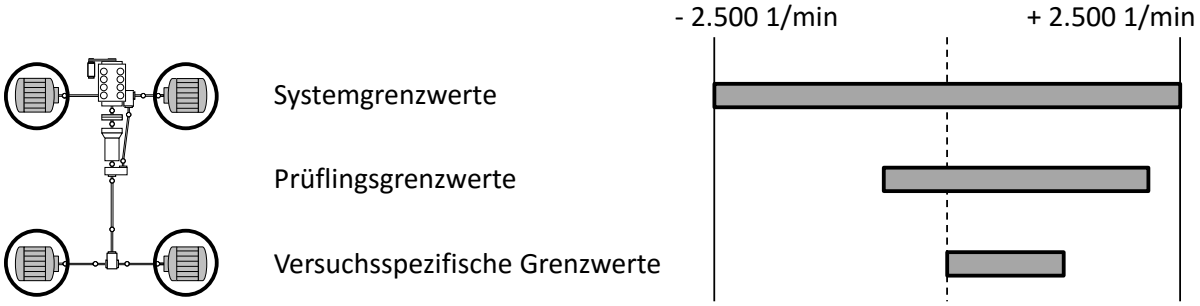


Abbildung 15: System-, Prüflings- und versuchsspezifische Grenzwerte

Die Vorbereitung bei Funktions- und Fahrbarkeitsuntersuchungen beinhaltet ebenfalls die Bereitstellung entsprechender Prüfprogramme. Fahrbarkeitsuntersuchungen beschreiben Erprobungen bei denen Komfort- und Agilitätskriterien untersucht werden. Im Unterschied zur Dauererprobung liegt jedoch der Fokus nicht auf den Lastkollektiven sondern auf der Erstellung möglichst realitätsnaher Fahrmanöver, die je nach Erprobungsziel variiert werden.

Für Fahrbarkeits- und Applikationsuntersuchungen, insbesondere im Bereich Motorapplikation, wird häufig die Methode des „Design of Experiments“ (DoE) eingesetzt [PIL12]. Dabei werden für einen Versuch, bei dem viele Parameter in bestimmten Fahrmanövern variiert werden sollen, die Permutationen mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung auf ein Minimum reduziert.

Die DoE-Methode wird für die Analyse von Fahrbarkeitsuntersuchungen sowie für die Applikation von Steuergeräten eingesetzt. Aufgrund der am Prüfstand gleichbleibenden Randbedingungen, kann die jeweilige Untersuchung zeit- und kostengünstiger durchgeführt werden, als entsprechende Versuchsfahrten auf der Straße.

Die Prozessschritte für die Versuchsvorbereitung sind in nachfolgender Tabelle zusammengefasst.

Nr.	Prozessschritt
2.	**Versuchsvorbereitung**
2.1.	Teilebereitstellung
2.1.1.	Hardwarebereitstellung
2.1.2.	Softwarebereitstellung
2.1.3.	Bereitstellung von Zusatzkomponenten
2.1.4	Konditionierung von Aggregaten
2.2.	Prüfstandsanpassung
2.2.1.	Bereitstellung und Implementierung von Zusatzmesstechnik
2.2.2.	Anpassung Automatisierungssystem
2.2.3.	Anpassung Sollwertvorgabesystem
2.2.4.	Anpassung Messsystem
2.2.5.	Definition System-, Prüflings- und Versuchsgrenzwerte
2.2.6	Anpassung Restbussimulation
2.3.	Bereitstellung von Prüfprogrammen und Prüfkollektiven
2.3.1.	Erstellung stationärer, synthetischer oder dynamischer Programme
2.3.2.	Generierung von repräsentativen Prüfkollektiven
2.3.2.	Generierung von (DoE-)Versuchsplänen
2.4.	Dokumentation

Tabelle 3: Prozessschritte Versuchsvorbereitung

3.2.3 Versuchsdurchführung

Die Erprobung selbst startet mit der mechanischen und elektrischen Inbetriebnahme der Systeme. Bei weniger komplexen Erprobungen wie beispielsweise bei Komponentenerprobungen entfällt in der Regel die elektrische Inbetriebnahme, sofern keine zustandsgesteuerten Aggregate untersucht werden. Bei der mechanischen Inbetriebnahme werden die zu erprobenden Komponenten, Aggregate und Systeme am Prüfstand verbaut und bei Bedarf an die vom Prüfstand bereitgestellten Medien wie zum Beispiel Kühlwasser, Kraftstoff oder Strom angeschlossen. Die elektrische Inbetriebnahme umfasst das Aufspielen des gewünschten Softwarestandes inklusive Variantencodierung auf die Steuergeräte sowie die Vernetzung der zustandsgesteuerten Aggregate mit der Prüfstandstechnik. Ein weiterer Teil ist die Inbetriebnahme der Messtechnik. Dabei werden die Messgrößen aus den zustandsgesteuerten Aggregaten, die Fahrzeug-CANs sowie die Messsignale der Prüfstandstechnik im Messsystem zusammengefasst und eine geeignete Messkonfiguration erstellt.

Nach der Inbetriebnahme folgt eine kurze Testphase, in der alle Funktionen des Prüflings sowie die bestimmungsgemäße Vorgabe der Sollwerte getestet werden. Im Anschluss an die Testphase kann die eigentliche Erprobung gestartet werden. Insbesondere zu Beginn der Erprobung ist darauf zu achten, dass die Belastung der Prüflinge gemäß den repräsentativen Lastkollektiven erfolgt. Hierfür werden automatisierte Lastanalysen durchgeführt (s. Kapitel 3.2.4).

Um im Schadensfall eine detaillierte Analyse durchführen zu können, wird jede Erprobung gemessen und mitgeloggt. Es müssen daher die korrekte Messdatenerfassung und deren Sicherung gewährleistet werden. Hierzu zählen die Sicherstellung der Messdatenqualität (Aufzeichnungsfrequenz, Signalumfang…) sowie eine nachvollziehbare Dokumentation, Sicherung und Archivierung der erzeugten Messdaten für anschließende Auswertungen.

Während der Erprobung werden die Prüflinge nach vorab definierten Intervallen gewartet. Bei Komponentenerprobungen beinhaltet die Wartung meist nur die Kontrolle von Kühl- und oder Schmierstoffen, bei komplexen Antriebstrangerprobungen beinhaltet die Wartung, analog der Wartung eines Fahrzeugs, die Kontrolle und den Wechsel von Schmier- und Kühlmedien sowie von Filtern und Verschleißteilen.

Der größte Teilprozess bei der Versuchsdurchführung betrifft vor allem bei Antriebstrangerprobungen das Fehlerhandling. Bedingt durch das Zusammenspiel vieler zustandsgesteuerter Aggregate sowie durch den meist sehr niedrigen Produktreifegrad der Prüflinge sind Fehler in der Antriebstrangerprobung unvermeidbar und vor dem Hintergrund des Aufdeckens von Schwachstellen sogar erwünscht. Das Fehlerhandling wird wie im Stand der Technik in Kapitel 2.4 beschrieben manuell durchgeführt. Das bedeutet, dass im Fehlerfall der Fehler manuell analysiert und die zugrunde liegende Ursache identifiziert werden muss. Auf Basis der Fehleranalyse wird eine geeignete Reaktion durchgeführt und der Prüflauf anschließend fortgesetzt. Alle Schritte des Fehlerhandlings von der Analyse bis zur Fortsetzung des Prüflaufs sind in mehreren Systemen zu beschreiben und nachvollziehbar zu dokumentieren.

Die Prozessschritte für die Versuchsdurchführung sind in nachfolgender Tabelle zusammengefasst. Es handelt sich um einen idealisierten Prozess, der aus der Praxis resultiert.

Nr.	**Prozessschritt**
3.	**Versuchsdurchführung**
3.1.	Inbetriebnahme
3.1.1.	mechanische Inbetriebnahme
3.1.2.	elektrische Inbetriebnahme
3.2.	Testphase
3.3.	Erprobungsstart

3.4. Durchführung der Erprobung
- 3.4.1. Kontrolle der Lasten
- 3.4.2. Prüflingswartung
- 3.4.3. Fehlerhandling
- 3.4.4. Dokumentation

Tabelle 4: Prozessschritte Versuchsdurchführung

3.2.4 Versuchsauswertung

Die Auswertung des Versuchs dient der Sicherstellung der Versuchsergebnisse. Die Notwendigkeit zur Messdatenauswertung ergibt sich bei den Erprobungen aus der großen Fülle an aufgezeichneten Messdaten. Bei komplexen Erprobungen, wie beispielsweise bei Dauerläufen von hybriden Antriebssystemen, werden 2.000 bis 3.000 Messsignale mit einer Frequenz von 1 bis 100 Hz über einen Zeitraum von mehreren Monaten aufgezeichnet. Eine manuelle Sichtung der gesamten Messdaten ist allein aufgrund der Datenmenge unmöglich. Daher wird bei umfangreichen Erprobungen die Versuchsauswertung mit Hilfe von standardisierten Tools durchgeführt. Ein Beispiel zur komprimierten Darstellung von Last-Zeit-Signalen ist die Klassierung. Bei Köhler [KÖH10] sind unterschiedliche Arten der Klassierung näher beschrieben. Auf Basis dieser Klassierverfahren können automatisierte Tools für die spezifische Lastanalyse zur Auswertung von Dauererprobungen angewandt werden (vgl. [ZIE02]). Für die Dauererprobung wird üblicherweise auf Basis der klassierten Last-Zeit-Daten eine Schädigungsrechnung angestellt, um mit Hilfe geeigneter Lebensdauerhypothesen eine Aussage über die Bauteilschädigung der Prüflinge zu treffen.

Neben der Lastanalyse zählen auch Signalanalysen der Last-Zeit-Daten, insbesondere im Fehlerfall, zum Standardumfang der Versuchsauswertung. Für die Signalanalyse werden zunächst allgemeine Signale zur Beschreibung der aktuellen Fahrsituation benötigt. Zusätzlich werden abhängig vom Fehlerbild die fehlerspezifischen Signale aufgetragen, um eine detaillierte Fehleranalyse durchzuführen.

Die Auswertung von Fahrbarkeits- oder Applikationsuntersuchungen erfolgt in der Regel nicht mit Hilfe von Lastanalysen sondern anhand von Schwingungs- und Funktionsuntersuchungen. Für die Bewertung der Fahrmanöver werden objektive Bewertungskriterien hinsichtlich Komfort und Agilität berechnet. Je nach Erprobungsziel stehen Schaltungsbewertungen, Komfortuntersuchungen oder Agilitätsanalysen im Vordergrund der Auswertung. Auch in diesem Fall werden aufgrund der großen Menge an Messdaten automatisierte Auswertetools verwendet.

Abschließend im Prozess steht die Dokumentation. Die gesamte Prozesskette vom Ziel der Erprobung bis zu den erreichten Ergebnissen und Auswertungen werden an zentraler Stelle zusammengefasst und nachvollziehbar dokumentiert. Die Dokumentation ist Teil des kontinuierlichen Verbesserungsprozess. Bei späteren Erprobungen kann auf

das dokumentierte Wissen aus den bereits gemachten Fehlern sowie aus den erarbeiteten Lösungsvorschlägen zurückgegriffen werden.

Die Prozessschritte für die Versuchsauswertung sind in nachfolgender Tabelle dargestellt.

Nr.	Prozessschritt
4.	**Versuchsauswertung**
4.1.	Plausibilisierung der Messdaten
4.2.	Lastanalyse
4.2.1.	Klassierung von Last-Zeit-Signalen
4.2.2.	Automatisierte Auswertung und Schädigungsrechnung
4.3.	Signalanalyse
4.3.1.	Beschreibende Signale
4.3.1.	Fehlerspezifische Signale
4.4.	Schwingungs- und Funktionsanalysen
4.4.1.	Schaltungsbewertung
4.4.2.	Komfortuntersuchung
4.4.3.	Agilitätsanalyse
4.4.4.	Sensitivitätsanalyse
4.5.	Dokumentation

Tabelle 5: Prozessschritte Versuchsauswertung

3.3 Definition Versuchsmethodik

Die beschriebene Vorgehensweise in der Erprobung mit den Unterpunkten Planung, Vorbereitung, Durchführung und Auswertung wird gemäß Abbildung 13 als Erprobungsprozess in den Produktentstehungsprozess eingegliedert. Die strukturierte Vorgehensweise wird durch eine durchgängige Versuchsmethodik unterstützt. Der Begriff der Versuchsmethodik ist seither in der Wissenschaft nicht unter diesem Namen in Erscheinung getreten. Lediglich im praktischen Gebrauch taucht er häufiger auf, wird jedoch unterschiedlich interpretiert. Nachfolgend erfolgen eine allgemeine Definition der Versuchsmethodik sowie die Beschreibung der zu Grunde liegenden Methoden.

Die Versuchsmethodik ist die Summe aller Planungs-, Erprobungs-, Applikations- und Auswertemethoden im Versuchsprozess. Sie beschreibt eine Ansammlung an methodischen Vorgehensweisen für einzelne Versuchsaufgaben über den gesamten Versuchsprozess. Die praktische Anwendung der Versuche findet abhängig vom Produktreifegrad auf verschiedenen Ebenen statt: auf Basis von Simulationen, auf Prüfständen oder im

Fahrversuch. Für eine zielgerichtete Anwendung der Versuchsmethodik werden Inputdaten benötigt. Diese sind beispielsweise die Lastenheftvorgaben des zu erprobenden Bauteils, Aggregats oder Systems, Erprobungsziele hinsichtlich Funktion und Dauerhaltbarkeit oder Informationen über die vorhandene Prüftechnik und Prüfressourcen. Das Ergebnis des Versuchsprozesses mit durchgängig angewandter Versuchsmethodik sind repräsentativ erprobte und applizierte Aggregate und Systeme des gesamten Antriebstrangs. Diese Versuchsmethodik ist in Abbildung 16 zusammengefasst.

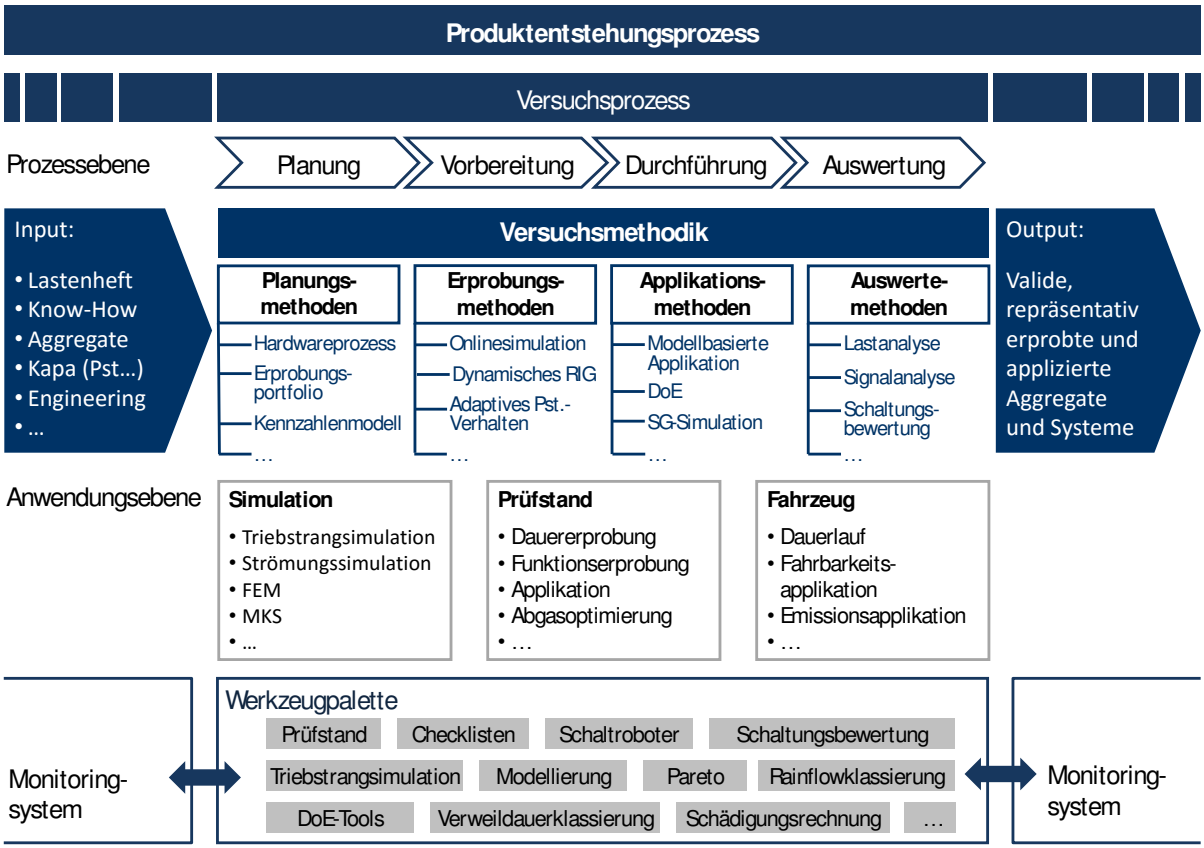


Abbildung 16: Versuchsprozess und Versuchsmethodik

Auf der obersten Ebene steht der Produktentstehungsprozess nach VDI-Richtlinie 2221 [VDI93]. In diesen gliedert sich der Versuchsprozess gemäß Abbildung 13 ein. Der Versuchsprozess ist wie in Kapitel 3.2 beschrieben in die Teilprozesse Planung, Vorbereitung, Durchführung und Auswertung gegliedert. Der gesamte Versuchsprozess wird unterstützt durch eine durchgängige Versuchsmethodik, die sich gliedert in Planungsmethoden, Erprobungsmethoden, Applikationsmethoden und Auswertemethoden. Eine eindeutige Zuordnung der Methoden zu den übergeordneten Prozessschritten ist nicht möglich, da die Methoden nicht zwingend sequentiell angewendet werden müssen. Die einzelnen Methoden sind in sich geschlossen und somit solitär anwendbar. So ist beispielsweise eine Auswertemethode zum Abgleich von Soll- und Ist-Ständen auch auf den Prozessschritt der Planung anwendbar.

Auf der Anwendungsebene werden drei Ebenen unterschieden: Die Simulation, die Erprobung auf Prüfständen und die Erprobung im Fahrzeug. Folgende Aspekte und Krite-

rien nehmen dabei entlang der Kette Simulation – Prüfstandserprobung – Fahrzeugerprobung stetig zu:

- Kosten:
  Prüflingskosten, Kosten für Versuchsdurchführung, Kosten für Toolintegration…
- Zeit:
  Vorbereitungszeiten, Rüstzeiten, Erprobungszeitraum…
- Grad der Erfüllung realitätsnaher Rand- und Umgebungsbedingungen:
  Witterung, Fahrbahneinflüsse, Verkehrssituation…
- Integrative Erprobungsaspekte:
  Zusammenspiel von Komponenten, Wechselwirkungen, gesamtheitliche Erprobung…

Die oben genannten Kriterien zeigen den Zielkonflikt bei der Wahl einer geeigneten Erprobungsebene auf. Den Zeit- und Kostenvorteilen steht immer der niedrigere Bezug zur Realität entgegen. Um diesen Zielkonflikt zu beheben wird stetig die Qualität von Prüfstandserprobungen und Simulationen hinsichtlich eines größeren Bezugs zur Realität verbessert. Ein Beispiel hierfür ist die in der vorliegenden Arbeit beschriebene realitätsnahe Fehlerreaktion in der Prüfstandserprobung.

Das allgemein definierte Ziel in der Produktentwicklung ist unter dem Begriff „Road to Rig to Simulation“ zusammengefasst. Dieser wurde aus dem Begriff „Road to Rig“ (vgl. [SCI01]) weiterentwickelt und um den zusätzlichen Schritt der Simulation ergänzt. Die Vorgehensweise beschreibt die oben genannte Verlagerung von Versuchsumfängen von der Straße auf Prüfstände bzw. in die Simulation. Hintergrund ist die sog. Rule of Ten, die beispielsweise bei Bertsche [BER04] beschrieben ist. Diese besagt, dass sich die Kosten zur Fehlerbehebung mit jedem Prozessschritt in der Produktentwicklung, in dem ein Fehler entdeckt wird, verzehnfachen. Der Nutzen von entsprechenden Zuverlässigkeitsanalysen ist daher umso höher, je früher im Produktentwicklungsprozess deren Einsatz erfolgt.

Ziel einer Versuchsmethodik ist es daher, durch geeignete Planungs-, Erprobungs-, Applikations- und Auswertemethoden eine effiziente, realitätsnahe Erprobung zu gewährleisten und diese auf Prüfstände bzw. bis in die Simulation zu verlagern. Die Notwendigkeit zur Anwendung von Methoden ergibt sich allein aus der großen Anzahl an Kombinationen verschiedener Antriebstrangkomponenten. Bei heutigen Automobilherstellern werden bis zu 20 verschiedene Getriebevarianten, 20 verschiedene Motorvarianten, 5-10 verschiedene Vorderachsvarianten und 15 – 20 verschiedene Hinterachsvarianten produziert. Diese können mit ca. 20 verschiedenen Dauerlaufprogrammen, 50 verschiedenen Funktionserprobungen und ca. 15 verschiedenen Applikationsuntersuchungen erprobt werden. Allein die Permutation der genannten Antriebstrangkomponenten ergibt für die Dauererprobung eine Anzahl von ca. 1 Mio. verschiedener Kombinationen. Eine sinnvolle Fokussierung auf die relevanten Erprobungen ist daher unerlässlich. Die Frage nach den sinnvollen Kombinationen wird mit Hilfe geeigneter Methoden beantwortet.

Nachfolgend werden die oben beschriebenen Methoden an jeweils einem Beispiel erläutert.

3.4 Beispiele Methoden

3.4.1 Beispiel Planungsmethode

Die Erstellung und Anwendung eines Erprobungsportfolios kann als Beispiel für eine Planungsmethode genannt werden. Die strategische Planung der gesamtheitlichen Absicherung eines Aggregats oder Systems in einem PKW-Antriebstrang berücksichtigt einerseits die Funktionsabsicherung andererseits die Absicherung der Dauerhaltbarkeit. Hierfür werden verschiedene Funktions- und Dauererprobungen über den gesamten Entwicklungsprozess durchgeführt. Die Basis für eine effiziente Planung der Erprobungen bildet das sog. Erprobungsportfolio. In einem Erprobungsportfolio sind zunächst alle möglichen Erprobungen aufgelistet. Jede Erprobung wird mit zusätzlichen Informationen verknüpft, sodass eine Matrix entsteht. Zusätzliche Informationen zu den Erprobungen sind beispielsweise folgende:

- Erprobungszweck
- Erprobungsdauer / Laufleistung / Lastzyklen / Raffungsfaktoren
- Erprobungskosten
- Anforderungen an die zu erprobenden Bauteile / Aggregate / Systeme
- Prüfbedingungen
- Abgeprüfte Schädigungsmechanismen
- Abgesicherte Bauteile
- Notwendige Ressourcen (Prüfstand, Personal, Kraftstoff…)
- Freigabekriterien
- Anwendungsebene Simulation / Prüfstand / Fahrzeug

Auf Basis des Erprobungsportfolios erfolgt die strategische Versuchsplanung nach dem Baukastenprinzip. Die Zusammenstellung einzelner Erprobungen in Abhängigkeit des Produktreifegrades beschreibt eine Erprobungsstrategie, an deren Ende ein valide abgesichertes Produkt steht.

3.4.2 Beispiel Erprobungsmethode

Als Beispiel für eine Erprobungsmethode kann einerseits die automatisierte Fehlerreaktion genannt werden, die in den Kapiteln 5 bis 7 beschrieben ist, andererseits die unter dem Stichwort „Dynamisches RIG“ zusammengefasste Methode zur Untersuchung der Triebstrangbelastungen unter Berücksichtigung von Fahrwerkseinflüssen auf Prüfständen (vgl. [KAR12]). Karthaus beschreibt hier eine Methode zur Erprobung von radnahen Komponenten, welche die Nickdynamik des Fahrzeugs berücksichtigt. Zu den radnahen Komponenten werden alle Komponenten im Leistungsfluss vom Getriebeausgang bis zu den Rädern gezählt, s. Abbildung 17.

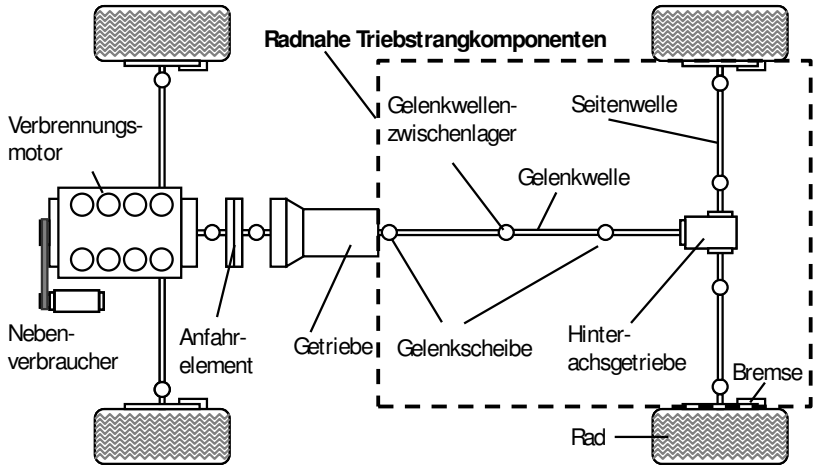


Abbildung 17: Definition radnahe Komponenten nach [KAR12]

Üblicherweise erfolgt die Achsgetriebe- und Gelenkscheibenerprobung auf einem A2-Prüfstand (s. Abbildung 5) mit einer zusätzlichen E-Maschine, welche den Getriebeausgang an der Gelenkwelle als Antrieb simuliert. Das Achsgetriebe selbst wird im Fahrschemel verbaut und dieser in einer fixen Position am Plattenfeld des Prüfstandes befestigt. Somit wird die Nickbewegung des Fahrzeugs bei Beschleunigungs- oder Bremsvorgängen nicht berücksichtigt. Der durch die Nickdynamik hervorgerufene Knickwinkel φ an der Gelenkscheibe ist in Abbildung 18 beschrieben.

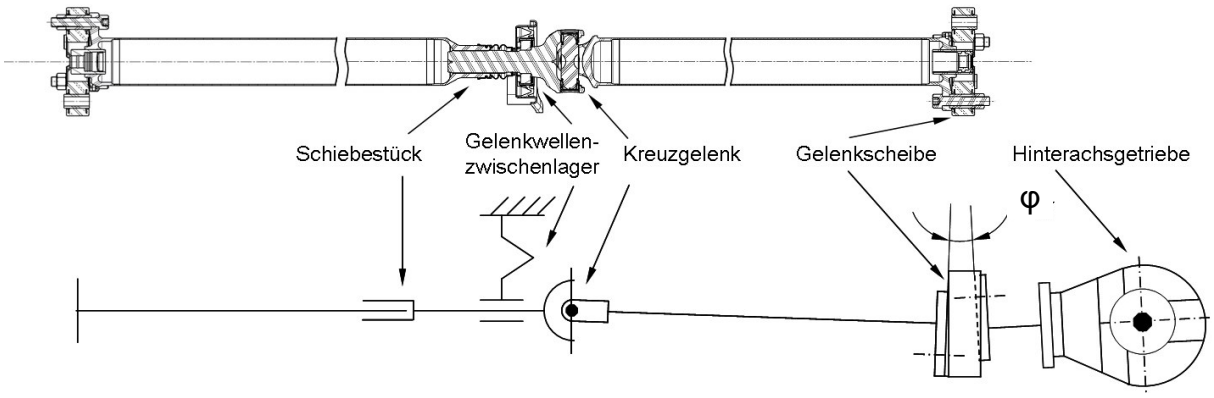


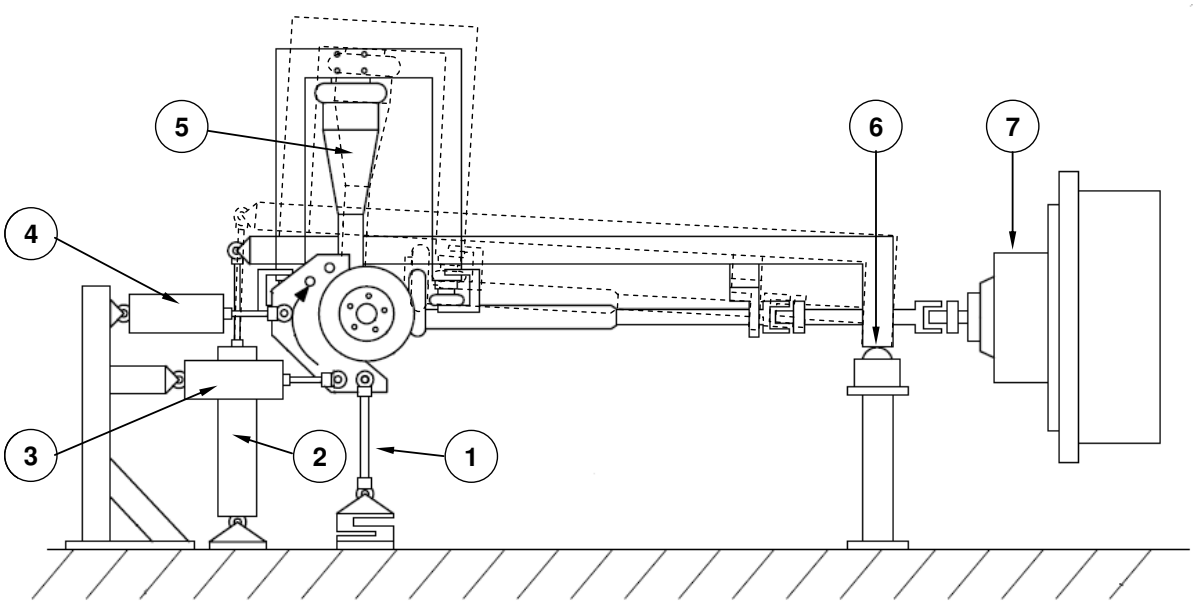
Abbildung 18: Aufbau Gelenkwelle und Knickwinkel φ [KAR12]

Für die Schädigung der Gelenkscheibe sind nach Tunker [TUN89] folgende Faktoren relevant:

- Die Umgebungsbedingungen (Temperatur, Umwelteinflüsse…)
- Das Gelenkwellenmoment
- Die Gelenkwellendrehzahl
- Der Knickwinkel

Die Umgebungsbedingungen können bei der Prüfstandserprobung prinzipiell nicht abgebildet werden. Die genannte Prüfstandskonfiguration deckt darüber hinaus nur die Faktoren Drehzahl und Drehmoment ab. Daher wurde ein Prüfstandskonzept entwi-

ckelt, welches die relevanten Bewegungen von Karosserie und Triebstrang zur Darstellung der repräsentativen Beanspruchung der Gelenkscheibe inklusive des Knickwinkels abbildet. Dazu wurde ein dynamisches Gestell zur Fahrschemellagerung entwickelt (s. Abbildung 19)



1	Pendelstützen für die Radaufstandskräfte
2	vertikaler Pneumatikzylinder für die Vertikalbewegung
3	horizontaler Pneumatikzylinder zum Aufbringen des Bremsmoments
4	horizontaler Pneumatikzylinder für die horizontalen Zugkräfte
5	Federbein zur Anpassung der Luftmenge
6	Kugelgelenk im Nickpol des Fahrzeugs
7	E-Maschine (Antrieb)

Abbildung 19: Aufbau dynamisches RIG [KAR12]

Der unbelastete Ausgangszustand des dynamischen RIGs ist in Abbildung 19 gestrichelt dargestellt. Durch die Pneumatikzylinder 2, 3 und 4 werden die für die Nickdynamik des Fahrzeugs relevanten Kräfte in den Fahrschemel eingeleitet. Der Fahrschemel selbst reagiert mit einer Nickbewegung um den Nickpol im Kugelgelenk 6 auf die eingeleiteten Kräfte. Somit ergibt sich eine dynamische Vertikalbewegung des Fahrschemels und dementsprechend ein dynamisch veränderbarer Knickwinkel an der Gelenkscheibe. Der belastete Zustand des Triebstrangs ist in Abbildung 19 mit durchgezogenen Linien dargestellt. Das entwickelte Prüfstandskonzept bildet die realen Belastungen deutlich besser ab, als ein entsprechendes Prüfkonzept mit starrer Anbindung des Fahrschemels. Es konnte gezeigt werden, dass mögliche Schadensbilder, die bei Erprobungen auf dem dynamischen RIG auftraten, mit den Schadensbildern aus der realen Fahrzeugerprobung korrelieren und somit eine repräsentative Belastung der radnahen Komponenten am Prüfstand gewährleistet wird. [KAR12]

3.4.3 Beispiel Applikationsmethode

Unter Applikation versteht man im Automotive-Bereich die optimale Bedatung und Parametrierung der Steuergerätefunktionen von zustandsgesteuerten Aggregaten. Ein Beispiel für das methodische Vorgehen bei Applikations-Fragestellungen ist die statistische Versuchsplanung, auch Design of Experiments (DoE) genannt.

Die Versuchsplanung wird angewandt, wenn bei Applikationsaufgaben für ein definiertes Fahrmanöver verschiedene Parameter aus dem Steuergerät variiert werden sollen. Abhängig von der Anzahl der Parameter und der zu variierenden Stufen ergibt sich sehr schnell ein Versuchsplan mit sehr vielen Betriebspunkten. So müssen für einen einfachen Versuchsplan mit vier Parametern, die auf vier Stufen variiert werden sollen $4^4 = 256$ Betriebspunkte absolviert werden, bei denen jeweils ein Parameter variiert wird. Man spricht in diesem Zusammenhang von einem vollfaktoriellen Versuchsplan [SIE10].

Das Ziel bei der Variation von Parametern besteht darin, einen Einfluss der Parameter auf eine definierte Zielgröße zu ermitteln und diesen mit Hilfe eines mathematischen Modells zu beschreiben. Im Gegensatz zu vollfaktoriellen Versuchsplänen werden daher bei der statistischen Versuchsplanung mehrere Parameter gleichzeitig variiert und folgende Faktoren berücksichtigt:

- Die Anzahl und Stufen der zu variierenden Parameter,
- die gewünschte Modell-Ordnung des mathematischen Zusammenhangs zwischen Parametern und Zielgrößen und
- Vorwissen über den Einfluss der Parameter.

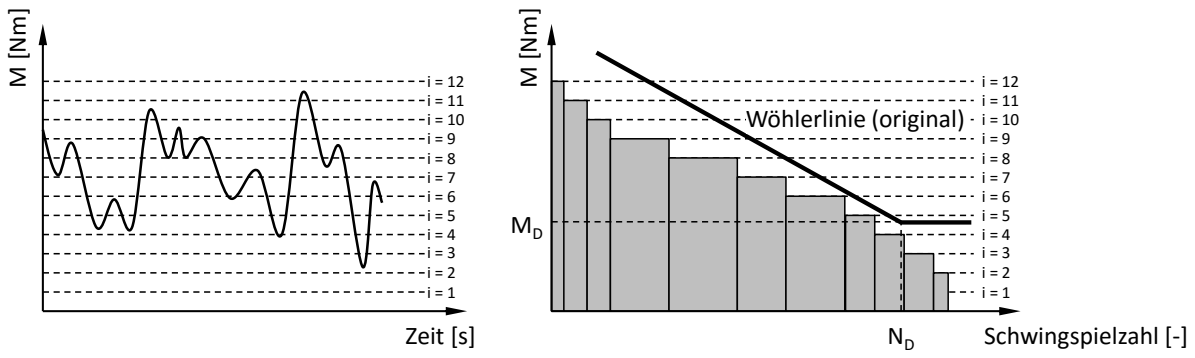
Die Methode liefert nun eine Möglichkeit die vielen Betriebspunkte eines vollfaktoriellen Versuchsplans auf ein Maß zu reduzieren, das einerseits so wenig Betriebspunkte umfasst wie möglich (um den Versuchsaufwand zu minimieren) und andererseits so viele Variationen enthält wie nötig (um den Einfluss der Parameter, deren Wechselwirkung zueinander und deren Auswirkung insgesamt auf die Zielgrößen bestimmen zu können).

3.4.4 Beispiel Auswertemethode

Ein Beispiel für eine Auswertemethode ist die bei Ziegele [ZIE02] beschriebene Lastanalyse zur Bewertung von Prüfergebnissen aus der Dauererprobung.

Die Vorgabewerte für die Prüfstandsdauererprobung entsprechen einem repräsentativen Belastungskollektiv (s. Kapitel 4). Ziel bei der Dauererprobung ist es, die Vorgabewerte so an den Prüfling weiterzugeben, dass auch das Prüfkollektiv dem repräsentativen Vorgabekollektiv entspricht. Zur Kontrolle dieser Lasten wurde eine Methode zur Lastanalyse entwickelt, die es ermöglicht, die aus dem Dauerlauf gewonnenen Last-Zeit-Daten automatisiert hinsichtlich ihrer Schädigung auszuwerten. Da die Last-Zeit-Daten aus den Dauerläufen sehr umfangreich sein können (teilweise bis zu mehreren Terra-

byte Messdaten) werden diese im ersten Schritt der Analyse mit geeigneten Zählverfahren, wie beispielsweise der Verweildauerzählung z. B. nach [HAI06] klassiert.



M_D	Nm	Momentenniveau Dauerfestigkeit
N_D	-	Ecklastspielzahl

Abbildung 20: Verweildauerzählung zur Klassierung regelloser Schwingungen

Abbildung 20 zeigt exemplarisch die Ermittlung eines Lastkollektivs aus einer Last-Zeit-Reihe. Dabei wird davon ausgegangen, dass das mittlere Lastniveau M_m gleich bleibt. Ist dies nicht der Fall, muss in den entsprechenden Abschnitten eine geeignete Transformation (z. B. Amplitudentransformation) der Daten erfolgen. Im vorliegenden Beispiel wird die Last-Zeit-Reihe in i=12 Stufen eingeteilt, die beim Lastkollektiv abhängig von der Schwingspielzahl aufgetragen werden. Die Wöhlerlinie kann optional eingezeichnet werden. Sie zeigt an, ob mit dem Lastkollektiv bereits ein Schaden des Bauteils eintritt.

Die Berechnung der Schädigung aus Wechsellast der i-ten Kollektivstufe mit n_i Lastwechseln auf dem Momentenniveau M_i erfolgt gemäß dem Nennspannungskonzept und der elementaren Form der Miner-Regel [HAI06] wie folgt:

$$SW_i = \frac{n_i}{N_D} \cdot \left(\frac{M_i}{M_D}\right)^{-k}$$

Dabei stellen die Dauerfestigkeit M_D und Ecklastspielzahl N_D den Auslegungspunkt der Wöhlerlinie dar. Die Steigung der Wöhlerlinie wird mit dem Wert k angegeben. Analog kann für die i-te Kollektivstufe mit u_i Überrollungen auf dem Momentenniveau M_i folgende Überrollungsschädigung berechnet werden:

$$SU_i = \frac{u_i}{U_D} \cdot \left(\frac{M_i}{M_D}\right)^{-k}$$

Die aufsummierten Gesamtschädigungen über alle Klassen werden sowohl für das Prüfkollektiv, als auch für das Vorgabekollektiv berechnet und beide Werte miteinander verglichen. Der Vergleich sowie die Klassierergebnisse zeigen eventuelle Differenzen zwischen beiden Kollektiven auf und ermöglichen bei größeren Abweichungen ein Eingreifen und Anpassen der Vorgabedaten.

Da es sich bei dieser Auswertung um einen Soll-Ist-Vergleich zwischen einem Vorgabekollektiv und einem Prüfkollektiv handelt, kann eine virtuelle Wöhlerlinie entsprechend dem Nennspannungskonzept nach Haibach [HAI06] verwendet werden, ohne die tatsächliche Bauteilwöhlerlinie kennen zu müssen.

4 Vorgabewerte für die Prüfstandserprobung

In der Vorbereitungsphase des Erprobungsprozesses werden wie in Kapitel 3.2.2 beschrieben repräsentative Belastungskollektive für die Sollwertvorgabe am Prüfstand ermittelt. Für die Generierung von Sollwerten zur Ansteuerung der Prüfstände im Dauerlauf unter realen Einsatzbedingungen existieren im Wesentlichen drei Quellen: Fahrzeugmessungen, Fahrdynamiksimulationen und Expertenwissen [BRA91].

Die Übernahme von Fahrzeugmessungen als Sollwertvorgabe für den Prüfstand stellt den klassischen Weg dar [EBE68]. Um hierbei realistische Belastungskollektive am Prüfstand zu erreichen, muss der Prüfaufbau dem Fahrzeug, mit dem die Fahrzeugaufzeichnung durchgeführt wurde, ähnlich sein. Das bedeutet, dass es sich beim Prüfstandsaufbau wie beim Fahrzeug um die gleiche Antriebstrangtopologie handeln muss (beispielsweise Standardantrieb mit 4-Zylinder Diesel-Motor und 7-Gang-Automatgetriebe) und die verbauten Komponenten möglichst identisch sein müssen. Bevor die Datenübernahme vorgenommen werden kann, müssen die Signalverläufe in der Regel manuell von Messfehlern und Unstetigkeiten befreit sowie an das Automatisierungssystem des Prüfstands angepasst werden.

Die steigende Variantenvielfalt sowie die hohe Komplexität bei Durchführung einer Messfahrt führten in der Vergangenheit zu einem großen Aufwand bei der Erstellung von Sollwerten auf Basis von Fahrzeugmessungen. Durch die Entwicklung geeigneter Simulationswerkzeuge entstand die Möglichkeit, Sollwerte anhand von Fahrsimulationen zu erstellen [MÜL02]. Im ersten Entwicklungsschritt wurden die Simulationsergebnisse wie von einem Tonband dem Prüfling vorgegeben. Diese Vorgabeart wird auch als Bandvorgabe bezeichnet und ist in Kapitel 4.2.1 näher beschrieben. Die Weiterentwicklung der Bandvorgabe ist die sog. Online-Simulation (s. Kapitel 4.2.2), bei der die Sollwerte in einer parallel zur Erprobung mitlaufenden Echtzeitsimulation erstellt werden.

Das zugehörige Regelungskonzept, mit dem die in der Simulation generierten Vorgabegrößen dem Prüfstand vorgegeben werden, wird hauptsächlich durch die Signale bestimmt, die als Sollwerte für die Ansteuerung des Prüfstands dienen. Diese sind üblicherweise der Pedalwert und eine geschwindigkeitsproportionale Abtriebsdrehzahl des Prüflings, wie in Kapitel 4.1 erläutert.

4.1 Vorgabegrößen

Für die Prüfstandssteuerung werden Vorgabedaten benötigt, die während des Prüflaufs nachgefahren werden. Diese Vorgabedaten werden auch Sollwertvorgabedaten genannt, weil sie direkt zur Maschinenregelung verwendet werden. Im Regelungsverfahren ‚Drehzahl-Pedalwert', werden die Abtriebsdrehzahlen aus der Triebstrangsimulation als Vorgabewerte direkt am Prüfstand nachgefahren. Um eine Belastung auf den Triebstrang aufzuprägen wird zusätzlich zu den Abtriebsdrehzahlen der Pedalwert am

Motor zugesteuert. Dadurch verspannt sich der Triebstrang entsprechend den Vorgabedaten [SCHE11] [KLOS11].

Weitere Prüfstands-Regelungsarten wurden in [SCHE11] behandelt und verglichen.

Die relevanten Sollwerte bei diesem Regelkonzept sind demzufolge der Pedalwert und die Abtriebsdrehzahl. Die Regelungsart wird daher als n/PW-Regelung bezeichnet. Das Pedalwertsignal wird in ein Spannungssignal gewandelt, das dem Motorsteuergerät zugeführt wird. Dort erfolgen diverse Umrechnungen bis schließlich anhand verschiedener Parameter (z. B. Einspritzmenge oder Luftmenge) ein Motormoment induziert wird. Das Motormoment wird nach der Gesamtübersetzung des Triebstrangs an die Gelenkwelle (Powerpack-Prüfstand) oder an die Seitenwelle weitergeleitet und muss dort von den Bremsmaschinen gestützt werden [SCHE11].

Durch die Aufprägung der Abtriebsdrehzahl werden die Freiheitsgrade des Triebstrangs im Vergleich zum Fahrzeug reduziert. Beispielweise kann ein Momentenpeak nicht durch ein entsprechendes Schlupfverhalten am Rad entlastet werden. Eine mögliche Reaktion auf Momentenpeaks wird bei der realitätsnahen Vorgabe von Sollwerten durch die Onlinesimulation diskutiert (s. Kapitel 4.2.2). Diese Vorgabeart ermöglicht es beispielsweise den Radschlupf bereits in der Simulation zu berücksichtigen und entsprechende Drehzahländerungen als Sollwerte an den Prüfling weiterzuleiten. Somit ist eine direkte Reaktion auf das Prüflingsverhalten und ein entsprechend realitätsnahes Fahrverhalten am Prüfstand gewährleistet.

Im Folgenden Kapitel werden die Vorgabearten zur Sollwertvorgabe gemäß dem n/PW-Regelungskonzept beschrieben.

4.2 Vorgabearten

Für die Vorgabe von Sollwerten, die einem repräsentativen Belastungskollektiv entsprechen, werden in der Prüfstandserprobung üblicherweise zwei verschiedene Vorgabearten unterschieden [KLOS11]. Diese sind die Bandvorgabe und die Onlinesimulation.

4.2.1 Bandvorgabe

Die Prüfstandsansteuerung mit Hilfe von Sollwertvorgabedaten, die zeitlich vor der eigentlichen Erprobung erstellt wurden, wird Bandvorgabe genannt. Die generierten Sollwerte werden wie von einem Tonband starr an den Prüfstand weitergeleitet. Die Übermittlung der Daten erfolgt Zeile für Zeile anhand der erstellten Vorgabe. Das Vorgabekonzept der Bandvorgabe wird in der Regel im Zusammenhang mit der n/PW-Regelung verwendet. [SCHE11]

Die Vorgabedaten können wie beschrieben auf verschiedene Arten erstellt werden. Der effizienteste Weg, die Sollwertvorgaben zu erstellen führt in der Regel über die Triebstrangsimulation. Die so erstellten Daten werden mit Kollektivaufzeichnungen aus

Fahrzeugmessungen verglichen und validiert. In Ausnahmefällen können die Fahrzeugaufzeichnungen auch direkt als Vorgabewerte verwendet werden (vgl. Kapitel 2.5).

In der Triebstrangsimulation wird der Zielaufbau auf dem Prüfstand möglichst genau abgebildet. Die Genauigkeit der Simulationsergebnisse bestimmt maßgeblich die Erprobungsergebnisse am Prüfstand bei der n/PW-Regelung. Abweichungen zwischen den Vorgabedaten und den Prüfergebnissen werden entweder automatisiert über Abschaltbedingungen überwacht, oder mit entsprechenden Werkzeugen zur Schadensberechnung anhand der Messergebnisse bewertet.

Durch das Aufprägen der Lasten erfährt der Triebstrang die in der Simulation berechneten Kräfte und Momente. Das Nachfahren bestimmter Testzyklen oder Strecken entspricht dem zeilenweisen Abarbeiten der tabellarisch abgespeicherten Last-Zeit-Funktion mit Zeitschritten im Abstand von 0,01s.

Valide Erprobungsergebnisse werden nur erzielt, wenn der Prüfaufbau mit den Vorgabedaten möglichst gut übereinstimmt. Abweichungen in den Kennwerten und Parametern von Triebstrangkomponenten führen zu fehlerhaftem Nachfahrverhalten. Aufgrund des adaptiven Triebstrangverhaltens der Getriebesteuerung und der Software ist es nicht möglich, das Getriebesteuergerät ideal abzubilden. Dies ist auf alle zustandsgesteuerten Antriebstrangelemente übertragbar, beispielsweise auch auf die Motorsteuerung. Weiterhin können Umwelteinflüsse, wie z. B. die Querbeschleunigung, auf dem Prüfstand nicht simuliert werden.

Ebenfalls problematisch sind Alterungseffekte wie beispielsweise die Ölalterung. Durch die Ölalterung wird das Reibwertverhalten im Automatgetriebe maßgeblich beeinflusst. Dies kann in Einzelfällen zu längeren Schaltzeiten bei gleicher Druckansteuerung führen. Derartige Effekte und deren Auswirkungen auf das Triebstrangverhalten können durch die Vorgabedaten nicht berücksichtigt werden [HÄC07].

Ein weiteres Problem bei der Bandvorgabe stellt das teilweise extrem nichtlineare Pedalwertverhalten dar. Der Pedalwert wird vom Sollwertvorgabesystem an die Motorsteuerung weitergegeben. Schnell wechselnde Softwarestände sowie die komplexe Umrechnung des Pedalwerts im Motorsteuergerät führen dazu, dass das Pedalwertverhalten nicht vorhergesagt werden kann. Bei der Berechnung des Motormoments im Steuergerät aus der Pedalstellung wird die Außentemperatur, der Fahrprogrammcode, die Änderungsgeschwindigkeit des Pedalwerts sowie der Umgebungsluftdruck berücksichtigt, um nur einige Einflüsse zu nennen. Der Zusammenhang zwischen Pedalwert und Motormoment ist daher kaum zu bestimmen. Dadurch können sich bei Vorgabe eines bestimmten Pedalwerts am Prüfstand je nach hinterlegter Kennlinie höhere oder niedrigere Momente einstellen als in der Vorgabe. Auch beim Simulationsmodell des Fahrzeugs ist eine Pedalwertkennlinie hinterlegt. Diese stimmt aufgrund der genannten Schwierigkeiten nur in seltenen Fällen mit der aktuellen Kennlinie des untersuchten Antriebstrangs überein. Die daraus entstehenden Differenzen wirken sich auf die Lastverteilung beim Prüflauf aus.

4.2.2 Online-Simulation

Die Onlinesimulation wurde aus der Vorgabeart Bandvorgabe weiterentwickelt. Die für die Regelung benötigten Vorgabegrößen sind weiterhin der Pedalwert sowie die Abtriebsdrehzahl. Die Generierung dieser Größen erfolgt in Echtzeit durch eine parallel zur Erprobung mitlaufende Fahrsimulation. Bei der Onlinesimulation besitzt der Prüfling den größtmöglichen Freiheitsgrad, sich der jeweiligen Fahrsituation anzupassen [SCHE11].

Im Unterschied zur Bandvorgabe erfolgt der Datentransfer zum Prüfstand bidirektional. Einerseits werden die Vorgabegrößen aus der Triebstrangsimulation dem Prüfling zugespielt, andererseits werden zentrale Triebstranggrößen des zu erprobenden Aggregats als Messgrößen rückgekoppelt. Diese sind zentrale Größen des Antriebstrangs wie beispielsweise das Gangsignal, Motor- und Raddrehzahlen sowie das Getriebeabtriebsmoment. Sie dienen der Triebstrangsimulation für den nachfolgenden Rechenschritt wiederum als Eingangsgrößen. Die Vorgabeart der Onlinesimulation kann daher in Echtzeit auf das Prüflingsverhalten reagieren [HÄC07].

Entsprechend der in Kapitel 4.2.1 beschriebenen Probleme bei der Bandvorgabe werden zwei wesentliche Kenngrößen des Antriebstrangs rückgeführt. Dabei handelt es sich um den aktuell eingelegten Gang des Prüflings sowie dessen Getriebeabtriebsmoment. Im Modell wird jeweils der Gang des Prüflings übernommen und somit die Schaltstrategie der codierten Software adaptiert. Unschärfen bei der Sollwertvorgabe infolge unterschiedlicher Schaltkennfelder können somit eliminiert werden. Weiterhin wird das Fahrverhalten bei Differenzen zwischen dem tatsächlich anliegenden Getriebeabtriebsmoment und dem simulierten Abtriebsmoment entsprechend der realen Fahrsituation angepasst. Durch die Rückführung von Prüflingsgrößen werden Differenzen, welche bei der Modellierung prinzipiell auftreten, minimiert.

Die Rückführung der Istwerte des Prüfaufbaus in das Simulationsmodell beeinflusst die Fahrstrategie des Fahrermodells bei der Onlinesimulation dahingehend, dass durch Fahrereingriffe wie beispielsweise eine Änderung der Fahrpedalstellung die Abweichungen zwischen Simulation und realem Prüflingsverhalten minimiert werden. Somit wird eine realitätsnahe Erprobung erreicht. Die Onlinesimulation bietet somit wesentliche Vorteile im Vergleich zur Bandvorgabe, da durch die flexible Sollwertvorgabe in Echtzeit speziell an den Prüfling angepasste Vorgabewerte generiert und somit Modellabweichungen ausgeglichen werden können.

4.3 Validierung Antriebstrangmodell

Sowohl die Vorgabeart der Bandvorgabe als auch die Vorgabeart Onlinesimulation basieren auf der Antriebstrangsimulationssoftware winEVA. Nachfolgend wird daher die Simulationsgüte im Vergleich zu realen Messdaten von der Straße bewertet, um eine Validierung des Antriebstrangmodells vornehmen zu können. Zu diesem Zweck wird

anhand definierter Fahrmanöver ein Vergleich zwischen der Fahrzeugmessung und der Triebstrangsimulation angestellt. Außerdem sollen am Beispiel hochdynamischer Anfahrvorgänge die Grenzen der verwendeten Simulationssoftware aufgezeigt werden. Da die grundsätzliche Eignung der Simulationssoftware zur Generierung von Lastkollektiven bei Greiner [GRE04] bereits nachgewiesen wurde, liegt nachfolgend der Fokus auf der Genauigkeit der Simulation zur Darstellung von dynamischen Fahrmanövern.

Für den Abgleich der Simulationsergebnisse mit realen Fahrzeugmessungen wurde ein aktuelles Serienfahrzeug mit entsprechender Messtechnik ausgestattet und für die Erfassung realer Fahrmanöver ertüchtigt [HÖF12], [TSI12]. Der Fahrzeugaufbau entspricht einem modernen Oberklasse-Fahrzeug mit 8-Zylinder Ottomotor und einem 7-Gang Automatgetriebe. Die detaillierte Fahrzeugbeschreibung kann aus Tabelle 12 im Anhang A entnommen werden.

Die Ertüchtigung des Fahrzeugs für Korrelationsmessungen erfolgte mit dem Ziel, Antriebstrangsimulationsergebnisse zu validieren, die Lagerung von Antriebsträngen auf Prüfständen abzugleichen und reale Fahrmanöver inklusive der Berücksichtigung von Strecken- und Verkehrsverhältnissen für die Vorgabe an Prüfständen aufzuzeichnen.

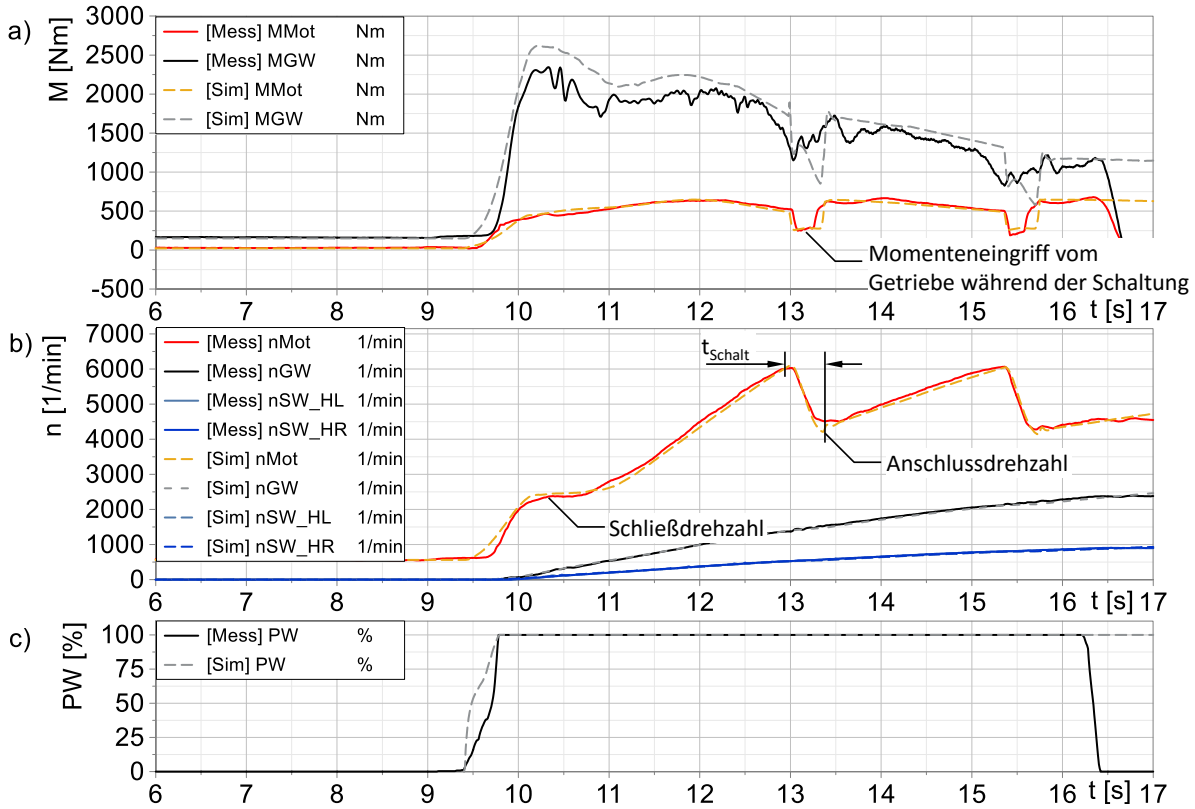
Zu diesem Zweck wurde das Korrelationsfahrzeug mit Wegaufnehmern, Drehmomentmesstechnik, Kameras, einem universell parametrierbaren Motorsteuergerät und mit einem Zugriff auf die CAN-Struktur des Fahrzeugs ausgestattet. Die zeitsynchrone Erfassung der Messsignale erfolgt mit Hilfe einer zusätzlich aufgebauten Messanlage im Kofferraum des Fahrzeugs. Die Drehmomentmesstechnik zur Untersuchung der Längsdynamik umfasst drei im Fahrzeug applizierte Drehmomentmesswellen an der Gelenkwelle sowie an den Seitenwellen. Die redundante Applikation mit Messtechnik lässt eine gezielte Analyse des Kraftflusses im Antriebstrang in allen Betriebspunkten zu.

Die für den Vergleich benötigten Fahrzeugmessungen wurden auf einer Teststrecke (Einfahrbahn Werk Untertürkheim, Daimler AG) durchgeführt. Diese Teststrecke weist neben zwei Geraden für Hochgeschwindigkeitsanteile eine querkraftfreie Steilkurve sowie eine Kreisbahn mit unterschiedlichen Fahrbahnbelägen auf. Die Messungen wurden bei trockenen Straßenverhältnissen durchgeführt. Da die gemessenen Fahrmanöver mit geringem Aufwand in der Simulationssoftware nachsimuliert werden müssen, wurden für den Vergleich synthetische Fahrmanöver aufgezeichnet (vgl. Kapitel 2.1.2).

Zum Abgleich der Simulationsergebnisse mit den realen Messfahrten wurde das in Tabelle 12 beschriebenen Fahrzeug modelliert und gemäß dem Prinzip der streckenbasierten Wunschgeschwindigkeitssimulation auf einer synthetisch generierten Strecke simuliert. Nachfolgend werden die Simulationsergebnisse anhand dynamischer Anfahrvorgänge mit den gemessenen Fahrmanövern verglichen, um das Modellverhalten anhand realer Messungen zu validieren. Abschließend werden die Grenzen der Simulationssoftware bei transienten Fahrmanövern aufgezeigt.

4.3.1 Vergleich Messung-Simulation

Für den Vergleich wird ein Volllastbeschleunigungsmanöver mit aktivierten Regelsystemen zur Antriebsschlupfregelung (ASR) verwendet. In der Simulation wie bei der Messfahrt wird das Fahrzeug auf trockener Fahrbahn aus dem Stillstand heraus ohne Festbremsen mit 100% Pedalwert beschleunigt. Abbildung 21 zeigt das oben beschriebene Fahrmanöver.



MMot	Nm	Drehmoment Verbrennungsmotor
MGW	Nm	Drehmoment Gelenkwelle / Getriebeabtrieb
nMot	1/min	Drehzahl Verbrennungsmotor
nGW	1/min	Drehzahl Gelenkwelle / Getriebeabtrieb
nSW_HL	1/min	Drehzahl Seitenwelle hinten links
nSW_HR	1/min	Drehzahl Seitenwelle hinten rechts
PW	%	Pedalwert

Abbildung 21: Vergleich Messung-Simulation bei Volllastanfahrt
a) Drehmomente
b) Drehzahlen
c) Pedalwert

Dargestellt sind die Simulationsergebnisse (gestrichelte Signale, Präfix [Sim]) im Vergleich mit den gemessenen Signalen des realen Fahrmanövers (durchgezogene Signale, Präfix [Mess]). In Abschnitt a) sind die Drehmomente am Motor (*MMot*) sowie an der Gelenkwelle (*MGW*) zu sehen. In Abschnitt b) sind die Drehzahlen am Motor (*nMot*), an

der Gelenkwelle (*nGW*) sowie an den hinteren Seitenwellen links und rechts (*nSW_HL* und *nSW_HR*) dargestellt. Abschnitt c) zeigt die Volllastbeschleunigung mit 100% Pedalwert (*PW*). Die Zeitspanne für das Durchtreten des Gaspedals liegt in beiden Fällen bei 0,3 s.

Die Messungen auf der Straße wurden mehrmals absolviert, um die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu überprüfen. Da alle Messergebnisse innerhalb einer sehr geringen Streuung liegen, die aus den nicht immer gleichen Rand- und Umgebungsbedingungen resultiert, wurde zur besseren Übersichtlichkeit in der Abbildung nur eine Messung von der Straße dargestellt.

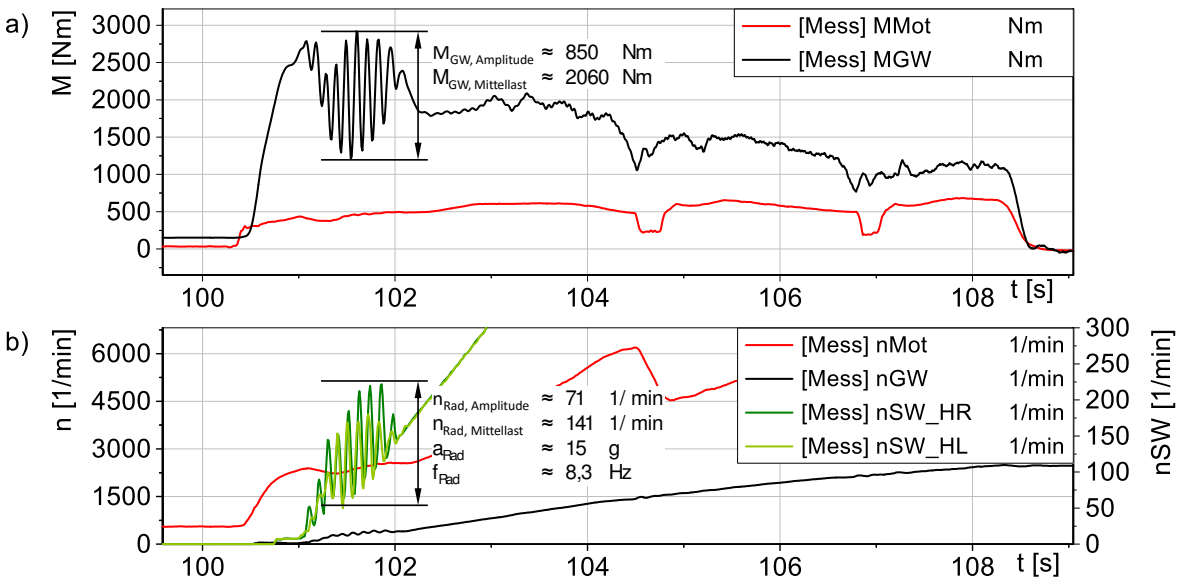
Die für die Vorgabe des Geschwindigkeitsprofils am Prüfstand benötigten Drehzahlsignale sind in Abschnitt b) dargestellt. Die Abtriebsdrehzahlen, sowohl an der Gelenkwelle, als auch an den Seitenwellen sind nahezu identisch. Auch die Motordrehzahl in der Simulation stimmt mit dem gemessenen Signal überein. Am Hochlaufverhalten der Motordrehzahl ist die realitätsnahe Modellierung und Parametrierung des Drehmomentwandlers zu erkennen. Sowohl der Hochlauf als auch die Schließdrehzahlen der Wandlerüberbrückungskupplung stimmen überein. An der Motordrehzahl kann im Bereich der Schaltungen die korrekte Abbildung des Schaltprogramms abgelesen werden. Schaltzeitpunkt, -dauer und die Anschlussdrehzahl sind mit den Messsignalen nahezu identisch.

Bei der Darstellung der Drehmomente in Abschnitt a) zeichnet sich ein ähnliches Bild ab. Der Drehmomentenverlauf des Verbrenners inklusive Tiefe und Dauer des Motoreingriffs während der Zug-Hochschaltung gleichen den realen Messsignalen. Die Abtriebsmomente in der Simulation weichen in geringem Maße von den gemessenen Signalen ab. Die Abweichungen sind auf unterschiedliche Wirkungsgrade im Antriebstrang, auf evtl. nicht berücksichtigte Nebenverbraucher und auf dynamische Effekte beim Anfahrvorgang zurückzuführen.

Insgesamt kann eine sehr gute Übereinstimmung der Simulationsergebnisse mit den realen Messdaten festgestellt werden. Diese wurde qualitativ ebenfalls bei Greiner [GRE04] bereits nachgewiesen. Die Eignung von Simulationsdaten als Vorgabegrößen für den synthetischen und dynamischen Dauerlaufbetrieb wird somit bestätigt.

4.3.2 Grenzen der Simulation

Wie in Kapitel 4.3 beschrieben, sollen nachfolgend die Grenzen der Simulation aufgezeigt werden. Bei den Messaufzeichnungen sind transiente Schwingungsvorgänge zu beobachten, die mit den beschriebenen Mitteln der Antriebstrangsimulation nur schwer berechen- oder vorhersagbar sind. Hintergrund ist das Zusammenspiel verschiedener Faktoren wie z. B. Formänderung des Reifenlatsch, Fahrbahnverhältnisse, Wechsel beim Anliegen der Zahnflanken von der Zug- auf die Schubflanke, um nur einige zu nennen.



MMot	Nm	Drehmoment Verbrennungsmotor
MGW	Nm	Drehmoment Gelenkwelle / Getriebeabtrieb
nMot	1/min	Drehzahl Verbrennungsmotor
nGW	1/min	Drehzahl Gelenkwelle / Getriebeabtrieb
nSW_HL	1/min	Drehzahl Seitenwelle hinten links
nSW_HR	1/min	Drehzahl Seitenwelle hinten rechts

Abbildung 22: Transientes Beschleunigungsmanöver (Messung)
a) Drehmomente
b) Drehzahlen

In Abbildung 22 ist ein hochdynamischer Anfahrvorgang unter Volllast analog dem in Abschnitt 4.3.1 beschriebenen Manöver, dargestellt. Im Gegensatz zum Fahrmanöver, das in Abbildung 21 dargestellt ist, wurde hier das Fahrzeug mit der Betriebsbremse festgebremst. Bei den Raddrehzahlen sowie beim gemessenen Gelenkwellenmoment sind Schwingungen im Bereich von ca. 8 Hz zu beobachten. Im vorliegenden Fall erfolgt ein hochfrequenter Wechsel vom gleitenden in den teilgleitenden Zustand. Dies kann an den Schwingungen der Seitenwellendrehzahlen an der Hinterachse erkannt werden. Wenn sich das Rad im Zustand der Gleitreibung befindet, steigt die Raddrehzahl (und analog die Seitenwellendrehzahl) aufgrund des geringeren Übertragungsverhaltens bei Gleitreibung und gemäß der Beschleunigung, die sich aufgrund des anliegenden Moments und der entgegen wirkenden Massenträgheit des Rades ergibt, stark an. Dadurch wird die Momentenübertragungsfähigkeit am Rad aufgrund der Funktionsweise des Differentialgetriebes reduziert und das noch anliegende Moment kann vom Rad wieder auf die Straße übertragen werden. Somit geht das Rad wieder in Zustand der Haftreibung über, was an dem Einfangen der Raddrehzahl auf Ausgangsniveau zu erkennen ist. Die dargestellte Schwingung ergibt sich durch mehrmalige Wiederholung des beschriebenen Zustandwechsels.

Für die Abbildung derartigen Verhaltens müsste der Triebstrang mit Steifigkeiten und Dämpfungen modelliert werden. Dies ist zwar prinzipiell möglich, jedoch wären für die

Berechnung von Drehschwingungen deutlich kleinere Rechenschrittweiten notwendig, was wiederum für die Untersuchung langer Dauerlaufstrecken mit bis zu 500 km Einzellänge ungeeignet ist. Weiterhin sind transiente Beschleunigungsmanöver wie in Abbildung 22 dargestellt mit der beschriebenen Prüftechnik (s. Kapitel 2.2.1) nicht darstellbar.

Das beschriebene Fahrmanöver zeigt die Grenzen der Simulationssoftware mit dem parametrierten Modell auf. Hochtransiente Radschlupfsituationen sind mit den verwendeten Modellen nicht darstellbar. Für den entsprechenden Anwendungsfall müssten die Simulationsmodelle um die Drehschwingungssimulation und um geeignete Rad- / Reifenmodelle erweitert und die Rechenschrittweite weiter verfeinert werden.

4.4 Realitätsnahe Sollwertvorgaben

In den vorangegangenen Unterkapiteln konnte gezeigt werden, dass mit Hilfe der Online-Simulation realitätsnahe Vorgabedaten für die Prüfstandsdauererprobung generiert werden können. Das Fahrverhalten wurde anhand von Straßenmessungen plausibilisiert und die Eignung der generierten Lastkollektive validiert. Durch die Rückkopplung von realen Messsignalen werden die Vorgabedaten zusätzlich speziell an den zu erprobenden Prüfling angepasst.

Der Begriff von realitätsnahen Vorgabedaten kann an dieser Stelle nicht quantitativ beschrieben werden. Dies ist auch nicht Ziel der vorliegenden Arbeit. Wie in Kapitel 4.3 beschrieben wird auch im weiteren Verlauf der Arbeit der Begriff qualitativ beschrieben und verwendet. Es sei hier jedoch auf den Forschungsbedarf diesbezüglich hingewiesen.

Ein weiterer Schritt hin zu realitätsnahem Fahrverhalten ist das Prüfstandsverhalten im Fehlerfall. Analog der Reaktion eines Testfahrers kann auch das in der Simulationssoftware hinterlegte Fahrermodell auf Fehler und Auffälligkeiten reagieren. Beispielsweise würde ein Testfahrer bei einer überhöhten Temperatur des Motorkühlwassers zunächst das Fahrzeug abstellen, um die Temperatur kurzfristig zu senken. Nach einer Abkühlphase würde der Testfahrer, sofern er das Problem nicht selbst lösen kann, anschließend mit reduzierter Last die nächste Werkstatt aufsuchen. Analog könnte im Prüfbetrieb nach dem Detektieren einer überhöhten Temperatur ein Prüflauf im unbemannten Betrieb kurzfristig unterbrochen werden, um den Prüflauf anschließend mit reduzierter Last so lange fortzusetzen bis ein geeignetes Prüfpersonal vor Ort ist, um den Fehler zu beheben.

Eine Auswertung von Fehlern in der Antriebstrangerprobung sowie entsprechende Strategien zur automatisierten Fehlerreaktion werden in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben.

5 Fehler in der Antriebstrangerprobung auf Prüfständen

Unreife Prüflinge und Softwarestände auf der einen Seite sowie Fehlfunktionen bei der Prüftechnik auf der anderen Seite führen bei Antriebstrangerprobungen auf Prüfständen zu Fehlern und Abschaltungen. Die Ursachen hierfür sind vielfältig und reichen von geplanten Stopps zu Wartungszwecken bis zu Prüflingsfehlfunktionen und Bauteilschäden. In den folgenden Kapiteln wird zunächst eine Einteilung der Fehler und Abschaltungen vorgenommen. Die aufgetretenen Fehler in der Vergangenheit werden anschließend umfassend und systematisch analysiert und hinsichtlich der Möglichkeiten zur autonomen Fehlerreaktion bewertet.

5.1 Einteilung und Fehlererkennung

Im ersten Schritt werden Prüfstandsabschaltungen in geplante und ungeplante Abschaltungen untergliedert. Geplante, manuelle Abschaltungen beinhalten im Wesentlichen Wartungsarbeiten, wie die Instandhaltung der Prüftechnik oder die Wartung der Prüflinge (Ölkontrolle, Sichtkontrolle…). Auch unregelmäßige Softwareupdates der Prüfstandssysteme fallen in diese Kategorie.

Ungeplante Abschaltungen beinhalten die auf Messsignalen basierenden Abschaltungen infolge von Grenzwertüberschreitungen, prüfstandsspezifische Abschaltungen und sicherheitskritische Abschaltungen. Die für die Entwicklung relevanten Abschaltungen werden durch Fehlverhalten, Fehlfunktionen oder Bauteilversagen der Prüflinge verursacht. Diese stellen auch den Großteil der Gesamtabschaltungen dar, vgl. [AKK12].

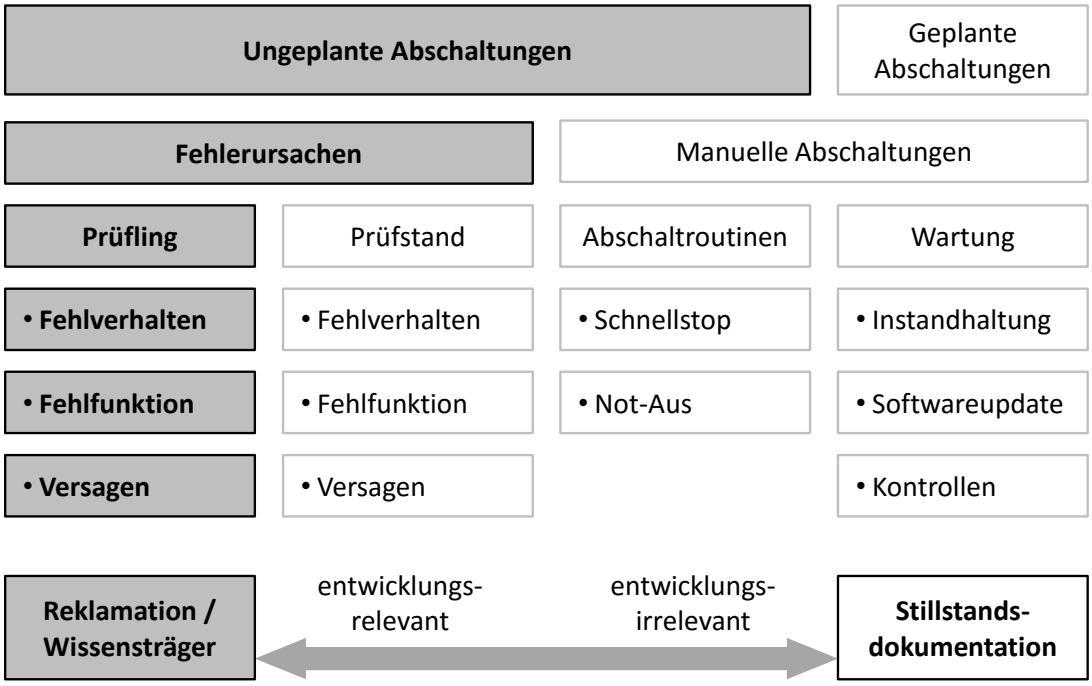


Abbildung 23: Einteilung Prüfstandsabschaltungen [SCHE12]

Die entwicklungsrelevanten Fehler (vgl. Abbildung 23) führen nach der Fehlerdokumentation zu sog. Reklamationen. Bei Reklamationen handelt es sich um Datenbank-Elemente, die der Entwicklung für die Produktoptimierung bereitgestellt werden. Auch bei mehrmaligem Auftreten des Fehlers wird eine Reklamation erstellt, sodass die Anzahl der Reklamationen Aufschluss über die Häufigkeit des aufgetretenen Fehlers gibt. Reklamationen sind Wissensträger, die alle notwendigen Informationen für die Produktentwicklung enthalten sollten. Dies sind unter anderem die Art des Fehlers inklusive Messung, Dauer und Häufigkeit der Abschaltung sowie alle Informationen zum aktuellen Prüfstandsaufbau (Typ der zustandsgesteuerten Aggregate, Softwarestände…).

Bei Fehlern und Abschaltungen, die für die Produktentwicklung nicht von Belang sind, werden in der Regel nur die Ursache und die Dauer des Stillstandes dokumentiert.

Der Fokus für die automatisierte Fehlerreaktion liegt auf den entwicklungsrelevanten Prüflingsfehlern und –abschaltungen. Aber auch Prüfstandsfehler bergen vor dem Hintergrund einer effizienten Nutzung der Prüfressourcen mit möglichst wenig Stillstandszeit ein großes Potential für die automatisierte Reaktion (vgl. Kapitel 6).

Die ungeplanten Abschaltungen der Prüflings- und Prüfstandsfehler (vgl. Abbildung 23) werden nachfolgend weiter untergliedert [SCHE12]:

			Betrifft	
Fehlertyp	**Beschreibung**	**Beispiel**	**Prüfling**	**Prüfstand**
Systemfehler	Fehlfunktion der beschriebenen Systeme	Ausfall Bussystem	x	x
Prüfstandsfehler	Technischer Fehler der Prüftechnik	Defektes Kühlwasserventil		x
Soll-/Istwert Fehler	Abweichungen zwischen Soll- und Istwerten	Grenzwertüberschreitungen	x	x
Erprobungsaggregatefehler	Erkennung von internen Fehlern	Notlauf	x	
Messfehler	Fehler bei den aufgezeichneten Messsignalen	Ausfall von Messsignalen		x
Bedienfehler	Fehlerhafte Bedienung der Systeme	Falsche Parametrierung		x

Tabelle 6: Fehlertypen

Die Soll-/Istwert Fehler sowie die Aggregatefehler stellen aus den Erfahrungen im Prüfbetrieb quantitativ den größten Anteil an der Gesamtsumme von Abschaltungen im Prüfbetrieb. Hier liegt das größte Potential für Effizienzsteigerungen durch autonome Fehlerreaktionen. Grundsätzlich können Fehler während des Prüflaufs anhand von Abweichungen zwischen Soll- und Istwerten erkannt werden. Sollwerte sind Signale oder Kennwerte beispielsweise aus Simulationen oder Fahrzeugmessungen. Es handelt sich

dabei nicht zwingend um direkte Vorgabegrößen zur Steuerung des Prüfstands. Auf dieser Basis werden sowohl das Erprobungsaggregat als auch die Prüftechnik mit Hilfe von Warn- und Grenzwerten überwacht. Die Über- oder Unterschreitung eines Grenzwertes führt zu einer Abschaltung des Prüflaufs. Der Prüfling wird über eine definierte Rampe zum Stillstand gebracht und in einen kraftfreien, betriebssicheren Zustand versetzt.

Weiterhin besteht die Möglichkeit, über die Software von zustandsgesteuerten Aggregaten Fehler zu erkennen. In der Regel sind in den Steuergeräten verschiedene Signale hinterlegt, die im Fehlerfall einen definierten Wert annehmen. Diese Signale können ebenfalls überwacht werden.

Zusätzlich können Fehler anhand von Funktionseinschränkungen erkannt werden. Bei einer Beeinträchtigung der definierten Funktion des Aggregats bzw. des Prüfstands erfolgt ebenfalls eine Abschaltung. Beispielsweise ist bei einer Beschädigung der Gelenkwelle die Funktion der Kraftübertragung vom Getriebe zur Hinterachse nicht mehr gewährleistet. Diese fehlende Funktion wird über eine intelligente Signalüberwachung erkannt. Im Falle der fehlenden Kraftübertragung zwischen Getriebe und Hinterachse wird eine große Differenzdrehzahl zwischen Getriebeabtrieb und Hinterachse detektiert, die nur auf die fehlende Kraftübertragung der zwischengeschalteten Antriebstrangkomponenten zurückgeführt werden kann. Wird diese Differenzdrehzahl detektiert erfolgt eine unmittelbare Abschaltung.

Eine weitere Möglichkeit zur Fehlerfrüherkennung liefert die Überwachung von Körperschallsignalen. Diese Methode eignet sich besonders für stationäre Prüfprogramme.

Abbildung 24 zeigt den Zusammenhang zwischen den in Kapitel 2.2.3 beschriebenen Prüfstandssystemen und den oben genannten Fehlertypen. Im oberen Bereich der Abbildung sind die Systeme aufgelistet, im unteren Bereich sind die Fehlertypen dargestellt. Die Linien kennzeichnen Verbindungen zwischen den Systemen und den Fehlertypen, die als Fehlerursachen interpretiert werden können.

Der Winkel der Kreissegmente korreliert mit der Auftrittswahrscheinlichkeit der Fehlertypten. Die relevanten Fehlertypen sind zusätzlich durch breitere Kreissegmente hervorgehoben.

Die Erprobungsaggregatefehler und Soll-/Istwert Fehler stehen bei der automatisierten Fehlerreaktion im Fokus. Die weiteren Fehlertypen werden aus drei Gründen vernachlässigt:

1. Erstens treten Systemfehler, Prüfstandsfehler, Messfehler oder Bedienfehler vergleichsweise selten auf (vgl. [AKK12]).
2. Zweitens können diese Fehlertypen kaum automatisiert behoben werden.
3. Und drittens sind nur Erprobungsaggregatefehler und Soll-/Istwert Fehler relevant für die Weiterentwicklung des Prüflingsreifegrades.

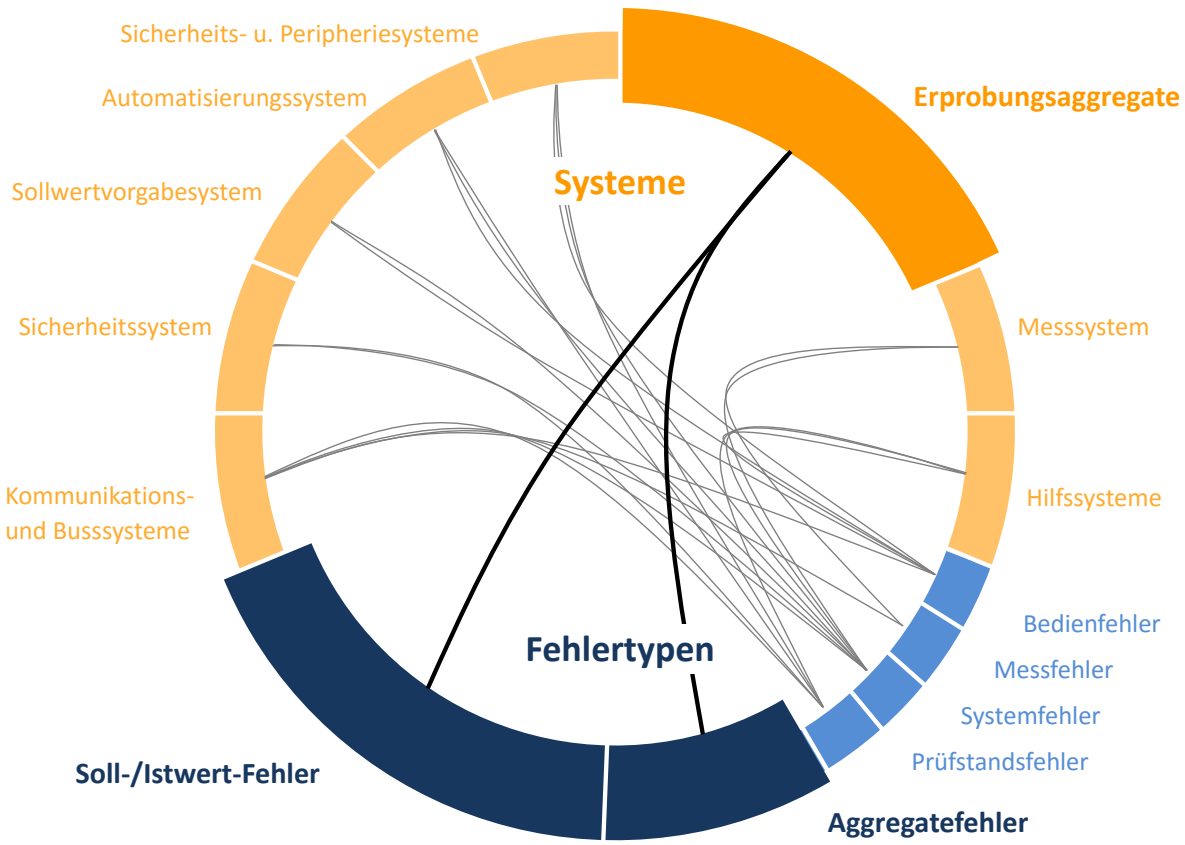


Abbildung 24: Zusammenhang Prüfstandssysteme und Fehlertypen [SCHE12]

5.2 Fehleranalyse

Ein Fehler bei mechanischen Systemen liegt nach Ortegui [ORT14] dann vor, wenn dessen Funktion nicht mehr gegeben ist, wenn aufgrund einer zu geringen Zuverlässigkeit unzulässig viele Bauteile vor Ende der ausgelegten Lebensdauer ausfallen oder wenn infolge einer falschen Auslegung Bauteilschäden bereits in frühen Phasen auftreten. Insbesondere der Aspekt der Funktionalität spielt bei der Dauererprobung eine große Rolle. Über verschiedene Überwachungskriterien und –systeme wird die geforderte Funktionalität der zu erprobenden Aggregate während des Prüflaufs überwacht.

Um einen validen Ausgangspunkt für die autonome Fehlerreaktion zu generieren, werden zunächst bereits aufgetretene Abschaltungen und potentielle Fehlerquellen systematisch und umfassend untersucht. Die angestellte Fehlerstatistik (s. Kapitel 5.2.1) umfasst alle Abschaltungen der Vergangenheit seit Einführung der schriftlichen Fehlerdokumentation in einem zugehörigen Monitoring System. Weiterhin werden in einer Korrelationsanalyse mögliche Fehlerquellen identifiziert und für anschließende Reaktionen aufbereitet (s. Kapitel 5.2.2).

5.2.1 Fehlerstatistik

Die Fehlerstatistik beschreibt eine systematische Analyse von Fehlern in der Dauererprobung und wurde bei Akkaya [AKK12] umfangreich untersucht. Analysiert wurden abgeschlossene und vollständig dokumentierte Dauerläufe. Da Prüfläufe aus einer großen statistischen Masse einbezogen werden, hat die Auswertung aufgrund der großen Datenmenge repräsentativen Charakter.

Im ersten Schritt werden die auftretenden Reklamationen in Fehlerkategorien eingeteilt. Die physikalische Größe, aufgrund derer die Abschaltung erfolgt, ist dabei ausschlaggebend. Die erste Definition ergibt acht verschiedene Fehlerkategorien, welche mit Hilfe einer Pareto Analyse auf folgende fünf Kategorien reduziert werden:

1. Drehzahl
2. Druck
3. Drehmoment
4. Zustand
5. Temperatur

Abbildung 25 zeigt die fünf genannten Kategorien sowie die zusätzlichen drei Kategorien, die nach der Pareto Analyse entfallen. Die Kategorien werden aufgeteilt auf die untersuchten Getriebeprojekte. Diese sind die konventionellen Stufenautomatgetriebe in Planetenbauweise mit einem Drehmomentwandler als Anfahrelement (*konventionell*), die gleiche Getriebevariante als Allradantrieb (*Allrad*), der Stufenautomat als P2-Hybrid (*Hybrid*) und ein Sportgetriebe mit nasser Anfahrkupplung als Anfahrelement (*Sport*).

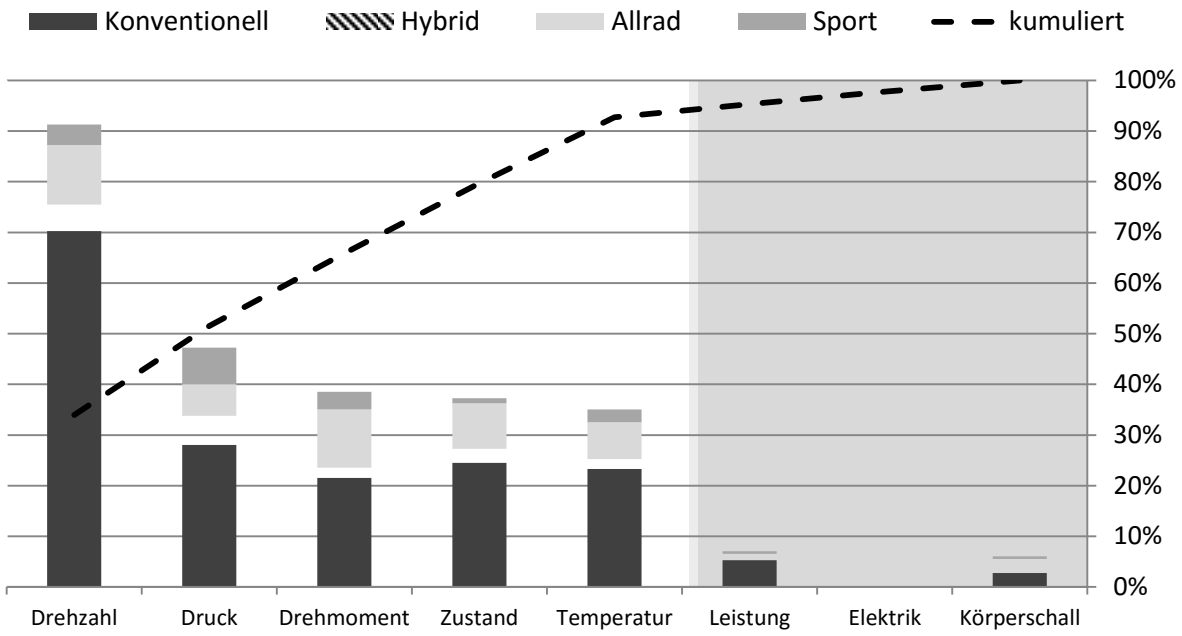


Abbildung 25: Fehlerkategorien nach dem Pareto-Prinzip [SCHE12]

Die Kategorie mit den meisten Fehlern und Abschaltungen ist die Drehzahlkategorie. Zur weiteren Aufgliederung der Fehler werden Fehlerklassen eingeführt. Jede Fehlerkategorie beinhaltet verschiedene Fehlerklassen. Diese sind am Beispiel der Kategorie Drehzahl weiter in die folgenden Klassen unterteilt [AKK12]:

- Durchgehen bei Gangwechsel:
  fehlerhafte Überschneidungsschaltung bei Volllast und Hochdrehen des Verbrennungsmotors während des Gangwechsels
- Überdrehzahl:
  Grenzwertüberschreitungen von Drehzahlsignalen (z. B. Verbrennungsmotor)
- Schlupfregelung:
  fehlerhafte Ansteuerung von schlupfgesteuerten Lamellen-Kupplungen / -Bremsen
- Unterdrehzahl:
  Grenzwertunterschreitungen von Drehzahlsignalen (z. B. Motorabwürgen)
- Differenzdrehzahl:
  Unzulässig hohe Drehzahlunterschiede (z. B. Abtriebe des Verteilergetriebes)

Den einzelnen Fehlerklassen kann nun eine Häufigkeit zugeordnet werden, die einen empirischen Wert zur Auftrittswahrscheinlichkeit eines Fehlers darstellt. Die nachfolgende qualitative Häufigkeitsdarstellung in Abbildung 26 ist über der Fehlerkategorie sowie der Fehlerklasse aufgetragen.

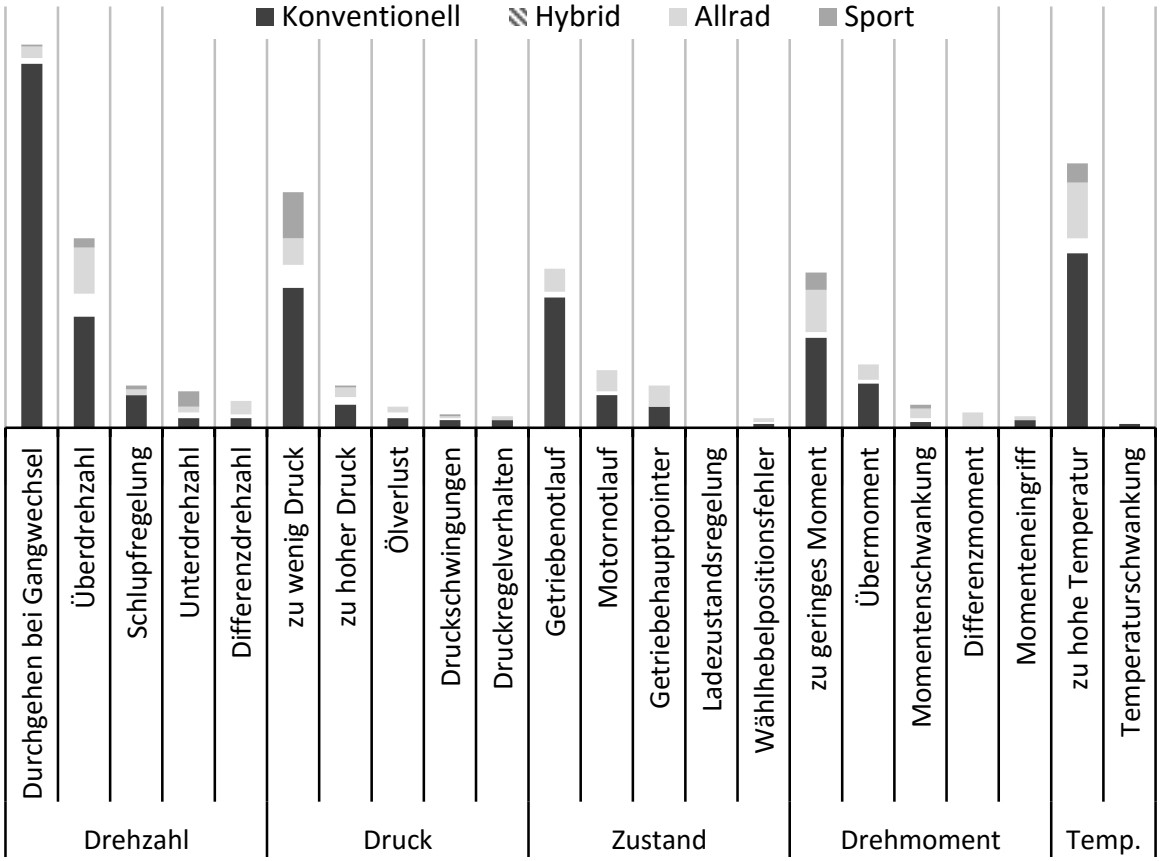


Abbildung 26: Relative Häufigkeit bei Fehlerkategorien und Fehlerklassen [AKK12]

Die Information zur Fehlerhäufigkeit stellt den Ausgangspunkt für die automatisierte Fehlerreaktion dar. Eine umfassende Fehleranalyse zur eindeutigen Identifikation des Fehlerbilds ist daher Grundvoraussetzung für die Reaktion. Da bei seltenen Fehlern die Datengrundlage für eine eindeutige Bestimmung der Fehlerursache nicht ausreichend groß ist, kann bei der automatisierten Fehlerreaktion nur auf häufige, genau beschriebene Fehler reagiert werden.

Auf Basis der Fehlerhäufigkeiten kann die Auswahl einer geeigneten Reaktion erfolgen. Diese Vorgehensweise ist in Kapitel 6 beschrieben. Als weitere Entscheidungsgrundlage bei der Wahl einer Reaktion wird nachfolgend mit der Korrelationsanalyse eine zusätzliche Auswertemöglichkeit vorgestellt.

5.2.2 Korrelationsanalyse

Die Korrelationsanalyse liefert eine weitere Möglichkeit zur Beschreibung des aufgetretenen Fehlers, insbesondere zur Auftrittswahrscheinlichkeit bestimmter Fehlertypen. Sie untersucht die in Kapitel 5.1 beschriebenen Soll-/Istwert Fehler, die durch Abweichungen der Prüfergebnisse zu den Vorgabesignalen entstehen.

5.2.2.1 Vorgehensweise

Prinzipiell können alle aufgezeichneten Signale mit Vorgaben bzw. Kennwerten verglichen werden. Im vorliegenden Fall werden jedoch ausschließlich Vorgabesignale aus der Antriebstrangsimulation mit den Prüfergebnissen verglichen. Das bedeutet, dass Prüflingsgrößen, die nicht Teil der Längssimulation sind (z. B. Temperaturen, Drücke…), bei der nachfolgend beschriebenen Korrelationsanalyse vernachlässigt werden.

Während der Erprobung treten Abweichungen zwischen der Vorgabe und dem realen Prüflingsverhalten auf. Um die größten Abweichungen zu ermitteln, erfolgt ein Vergleich der Vorgabedaten mit den zugehörigen Prüfergebnissen. Für einen derartigen Vergleich müssen drei Voraussetzungen erfüllt sein:

1. Zunächst werden vergleichbare **Kennzahlen** benötigt,
2. weiterhin müssen die Kennzahlen über **Parameter** beschrieben werden,
3. abschließend werden **Ergebnisse** ermittelt, anhand derer der Vergleich quantifiziert werden kann.

Zu Punkt 1.)
Als Kennzahlen werden Größen aus dem Prüflauf herangezogen, die zur Beschreibung der Prüfergebnisse geeignet sind. Hierbei handelt es sich im Wesentlichen um Drehzahlen und Drehmomente, jeweils am Getriebeantrieb und am Getriebeabtrieb, sowie Schaltzeiten, Gangverteilungen und weitere Triebstrangkennwerte, wie beispielsweise Differenzdrehzahlen.

Zu Punkt 2.)
Zur Beschreibung der Kennzahlen dienen hauptsächlich Verweildauerkollektive. Für die

Untersuchung von Schaltzeiten werden zusätzlich Häufigkeitsverteilungen aus der Statistik verwendet. Beim Vergleich von singulären Kennzahlen genügt ein direkter Vergleich der Parameter.

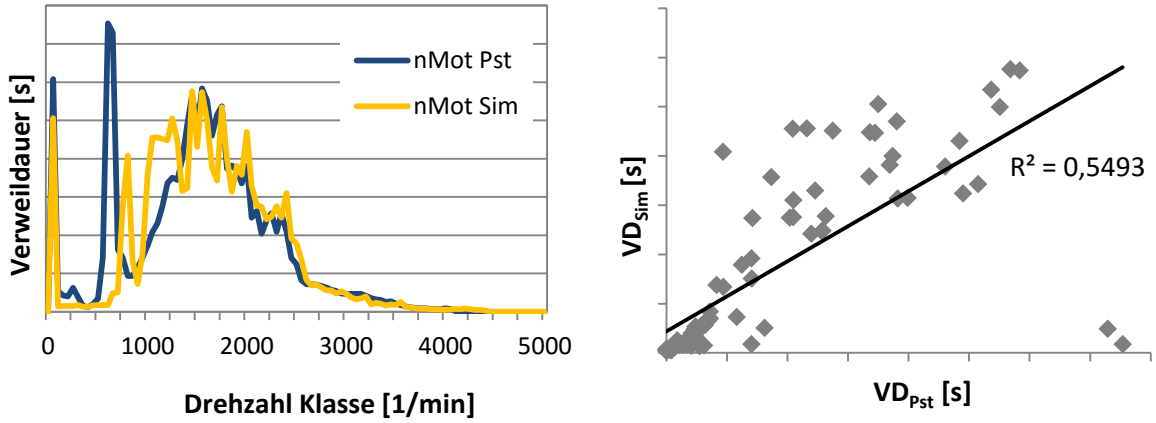
Zu Punkt 3.)
Die beschreibenden Parameter und Kennzahlen werden anschließend hinsichtlich der Korrelation zwischen Prüflauf und Simulation untersucht. Als Werkzeug dient hierfür der Korrelationskoeffizient r. Für den Vergleich zweier Verweildauerkollektive VD mit n Klassen und den Merkmalsausprägungen VD_{Sim} und VD_{Pst} berechnet sich der Korrelationskoeffizient aus der Kovarianz und den Standardabweichungen zu:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}(VD_{Sim} - \overline{VD_{Sim}}) \cdot (VD_{Pst} - \overline{VD_{Pst}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(VD_{Sim} - \overline{VD_{Sim}})^2 \cdot \sum_{i=1}^{n}(VD_{Pst} - \overline{VD_{Pst}})^2}}$$

Der Korrelationskoeffizient gibt den Grad des linearen Zusammenhangs der beiden Verweildauerkollektive an [FAH09]. Der quadrierte Korrelationskoeffizient gibt das Bestimmtheitsmaß r^2 bei der linearen Regressionsanalyse an. Diese Faktoren geben Aufschluss über die Korrelation von Soll- und Ist-Wert Signalen basierend auf ausgewerteten Verweildauerkollektiven.

Am Beispiel der Kennzahl Motordrehzahl wird nachfolgend das Vorgehen der Korrelationsanalyse näher erläutert.

Die Motordrehzahl aus den Prüfstandsmessungen sowie aus den Simulationsergebnissen wird mit Hilfe einer Verweildauerzählung klassiert und anschließend die ermittelten Verweildauern über den Drehzahlklassen dargestellt, vgl. Abbildung 27 auf der linken Seite. Untersucht wurde ein dynamisches Streckenprofil einer Stadtstrecke.



nMot	1/min	Motordrehzahl
r^2	-	Bestimmtheitsmaß
VD Pst	[s]	Verweildauer der klassierten Prüfstandsmessung
VD Sim	[s]	Verweildauer der klassierten Simulation

Abbildung 27: Drehzahlkollektiv und Bestimmtheitsmaß am Beispiel Motordrehzahl [SCHE13]

Die einzelnen Klassen der Verweildauerkollektive VD_{Sim} und VD_{Pst} aus dem linken Teil der Abbildung werden gegeneinander aufgetragen. Somit ergibt sich für jede Zählung in den jeweiligen Klassen ein Datenpunkt, der das Drehzahlkollektiv des Prüflaufs und der Simulation bezüglich dieser Klasse vergleicht, s. Abbildung 27 rechts. Die Anzahl der Datenpunkte entspricht daher der Anzahl der Klassen n aus der Verweildauerzählung. Zusätzlich werden eine Ausgleichsgerade sowie das zugehörige Bestimmtheitsmaß dargestellt.

Ausgehend von den Datenpunkten und der Ausgleichsgeraden wird der Korrelationskoeffizient für die Kennzahl Motordrehzahl berechnet:

$$r = 0{,}741$$

Der Korrelationskoeffizient ist ein Maß für den Zusammenhang der beiden Drehzahlkollektive im Wertebereich von -1 bis 1. Die Werte -1 und 1 entsprechen dabei einer perfekten Übereinstimmung, wobei ein negativer Korrelationskoeffizient eine Gerade mit negativer Steigung, ein positiver Korrelationskoeffizient eine Gerade mit positiver Steigung beschreibt. Je weiter sich die Korrelationskoeffizienten in Richtung 0 verschieben, desto schlechter ist die Übereinstimmung der untersuchten Regression [KLE13].

5.2.2.2 Ergebnisse Korrelationskoeffizienten bei der Vorgabeart Onlinesimulation

Im Folgenden sind Verweildauerkollektive sowie die daraus abgeleiteten Korrelationskoeffizienten dargestellt. Ausgangspunkt der Untersuchungen ist ein dynamischer Prüfstandsdauerlauf. Der Erprobungsfokus liegt auf einem 9-Gang-Automatgetriebe in Planetenbauweise.

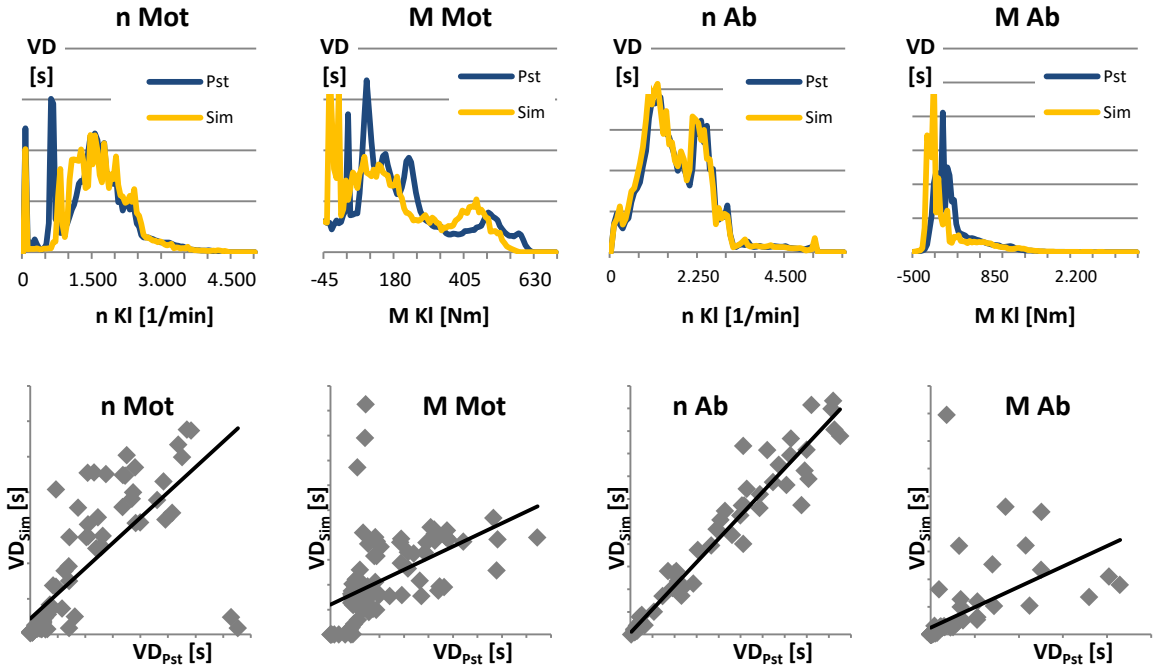
Die Auswertung erfolgt in zwei Schritten. Im ersten Schritt werden Drehzahlen und Drehmomente jeweils am Getriebeantrieb und am Getriebeabtrieb untersucht. Die zugehörigen Kennzahlen sind: Motordrehzahl, Motormoment, Getriebeabtriebsdrehzahl und Getriebeabtriebsmoment.

Anschließend wird die Analyse auf folgende Kennzahlen ausgeweitet: die Zeitanteile in den jeweiligen Gängen, Schalthäufigkeiten sowie weitere Triebstrangparameter (beispielsweise Gangübersetzungen). Diese Kennzahlen können teilweise auch ohne Verweildauerkollektive miteinander verglichen werden.

Die Analyse der Drehzahl-/ Drehmomentkollektive sowie die daraus abgeleiteten Korrelationskoeffizienten ergeben den in Abbildung 28 dargestellten Vergleich.

Es ist ersichtlich, dass bei der Abtriebsdrehzahl die Prüfergebnisse sehr genau den Simulationsergebnissen entsprechen. Der hohe Korrelationskoeffizient $r = 0{,}975$ ist darauf zurückzuführen, dass die Abtriebsdrehzahl, wie in Kapitel 4.1 beschrieben, eine direkte Vorgabegröße bei der Steuerung des Prüfstands ist. Daher ist das Drehzahlkollektiv des Prüflings am Getriebeabtrieb nahezu identisch zu dem Kollektiv aus der Simulation. Die weiteren Kennzahlen weichen unterschiedlich stark von der Simulation ab,

was im Wesentlichen auf die größtmögliche Freiheit des Prüflings zur Wahl seines Betriebspunktes zurückzuführen ist. Das bedeutet, dass der Prüfling außer im Fall der genannten Sollwertvorgaben die Fahrzustände zur Fahrsituation frei wählt.

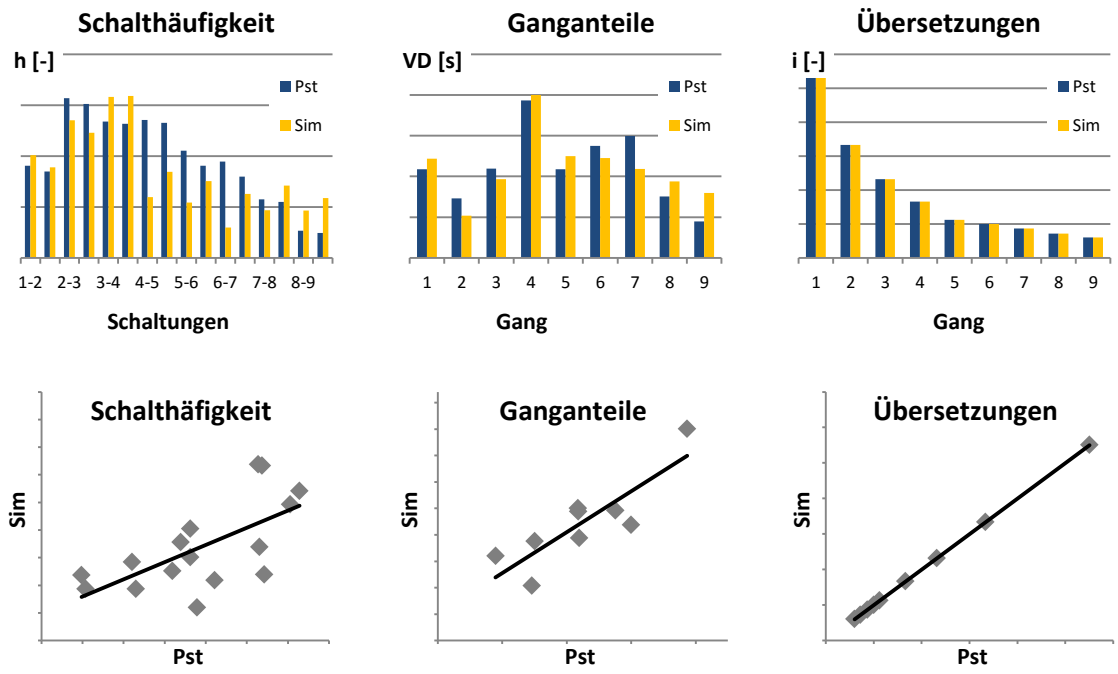


r = 0,741 r = 0,472 r = 0,975 r = 0,531

nMot	1/min	Motordrehzahl
nAb	1/min	Getriebeabtriebsdrehzahl
MMot	Nm	Motormoment
MAb	Nm	Getriebeabtriebsmoment

Abbildung 28: Korrelationsanalyse Drehzahlen und Drehmomente

Im zweiten Schritt werden die Schalthäufigkeiten, die Ganganteile sowie die Gangübersetzungen analysiert. Da die Übersetzungen bekannt sind und sich beim Stufenautomat nicht ändern, ergibt sich beim Vergleich von Simulation und Prüflauf ein Korrelationskoeffizient von r = 1. Die weiteren Kennzahlen weichen dagegen im Prüflauf von der Simulation ab. Ursache hierfür ist die in den Steuergeräten hinterlegte Betriebsstrategie, die zwischen dem real verbauten Steuergerät am Prüfstand und der angenommenen Betriebsstrategie in der Simulation große Unterschiede aufweisen kann. Die Betriebsstrategie unterliegt außerdem einer ständigen Weiterentwicklung. Durch den zeitlichen Abstand zwischen Modellierung und Durchführung des Versuchs auf dem Prüfstand, lassen sich Abweichungen in den Modellen nicht vermeiden.



r = 0,648 r = 0,850 r = 1,000

h	-	absolute Häufigkeit
VD	s	Verweildauer
i	-	Übersetzungsverhältnis

Abbildung 29: Korrelationsanalyse Gangverteilungen [SCHE13]

Die exemplarische Korrelationsanalyse ergibt zusammengefasst nachfolgend dargestellte Korrelationskoeffizienten in Abhängigkeit der betrachteten Kennzahlen. Dargestellt sind alle untersuchten Kennzahlen vom Fehlertyp Soll-/Istwert Fehler.

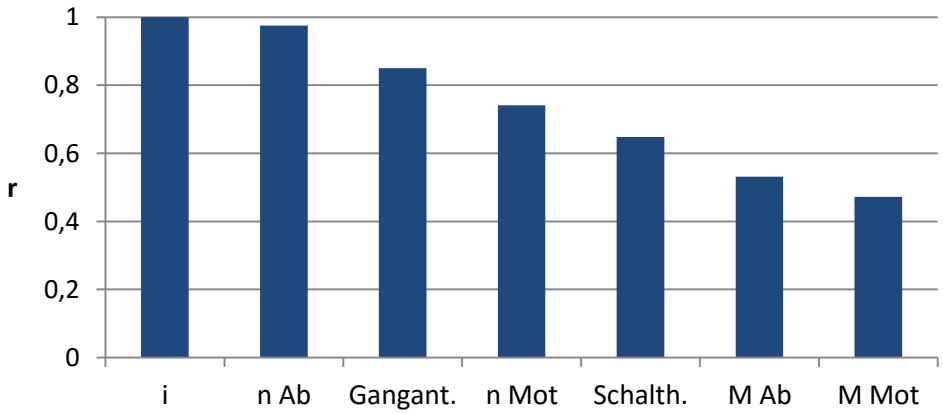


Abbildung 30: Korrelationskoeffizienten [SCHE13]

Der Korrelationskoeffizient beschreibt die Übereinstimmung der simulierten Signale mit den tatsächlich im Prüflauf gemessenen Signalen und liefert somit einen Anhaltspunkt für die nachfolgende Bewertung von Fehlern.

5.3 Bewertung von Fehlern

Die Korrelationsanalyse zwischen Prüfergebnis und Vorgabe in Verbindung mit der Fehlerstatistik untersucht sowohl Soll-/Istwert Fehler, als auch Erprobungsaggregatefehler. Somit können Erkenntnisse für die Vorgabeart Onlinesimulation sowie für die automatisierte Fehlerreaktion abgeleitet werden.

Bei der Onlinesimulation werden Messgrößen des Prüflings in das Simulationsmodell rückgekoppelt, um Abweichungen zwischen Simulationsmodell und realem Prüfling zu minimieren. Die Entscheidung, welche Größen rückgeführt werden müssen, wird durch das Ergebnis der Korrelationsanalyse unterstützt. Da insbesondere die Signale für die Ganganteile und Schalthäufigkeiten stark zwischen Simulation und Prüfergebnis abweichen können, wird bei der Onlinesimulation das Gangsignal des Prüflings zurückgespiegelt. Auf diese Weise werden speziell an das Prüflingsverhalten angepasste Vorgabedaten generiert.

Der Vergleich der Fehlerstatistik mit der Korrelationsanalyse lässt darauf schließen, dass die untersuchten Kennzahlen mit den größten Abweichungen zur Vorgabe maßgeblich verantwortlich für Soll-/Istwert Fehler im Prüfbetrieb sind. Diese Kennzahlen mit niedrigen Korrelationskoeffizienten finden sich in den Fehlerklassen Drehzahl, Drehmoment und Zustand (Schalthäufigkeiten und Ganganteile) bei der Fehlerstatistik wieder. Die Fehlerstatistik liefert weiterhin Informationen über die Häufigkeit der beschriebenen Fehlerklassen, die wiederum für die automatisierte Fehlerreaktion benötigt werden.

Mit Hilfe der beschriebenen Fehleranalyse können somit die möglichen Fehler in der Antriebstrangerprobung eingeteilt werden in häufige und seltene Fehler, vgl. Pareto-Prinzip in Abbildung 25. Außerdem wird das Potential von Prüflingssignalen zur Abschaltung in Folge von Soll-/Istwert Fehlern aufgezeigt.

Beide Untersuchungen, sowohl die Fehlerstatistik, als auch die Korrelationsanalyse, zeigen mögliche Fehlerquellen auf, die im Fokus der weitergehenden Untersuchungen für die Fehlererkennung stehen. Die Fehlererkennung, also das eindeutige Bestimmen eines bestimmten Fehlerbilds, ist der Ausgangspunkt für die nachfolgend beschriebene autonome Fehlerreaktion.

6 Automatisierte Fehlerreaktion

Die Fehleranalyse bildet die Basis für die adaptiven Verhaltensstrukturen im Prüfbetrieb. Dabei wird die Vorgabe von speziell an den Prüfling angepassten Sollwerten bei der Onlinesimulation erweitert um realitätsnahe Fehlerreaktionen bei Abschaltungen. Die Strategie zur Auswahl einer geeigneten Fehlerreaktion bei Abschaltungen inklusive der zugehörigen Fehlerdokumentation wird in einem neu entwickelten System, dem sog. Fehlermanager realisiert.

6.1 Systembeschreibung

In den folgenden Kapiteln werden der Fehlermanager und dessen Funktionsumfang beschrieben sowie die ideale Integration in die bestehende Prüfstandsarchitektur näher erläutert.

6.1.1 Funktionsumfang

Der Fehlermanager stellt einen Softwareumfang dar, welcher in die Prüfstandsarchitektur bei der Dauererprobung von Antriebsträngen integriert wird. Die Aufgabe des Fehlermanagers umfasst die realitätsnahe Reaktion auf Fehler in der Erprobung sowie die dazugehörige Fehlerdokumentation. Letztere ist jedoch nicht Teil der vorliegenden Arbeit.

Für die realitätsnahe Fehlerreaktion werden das Messsystem sowie das Automatisierungssystem für die Fehlerdetektion, also die eindeutige Bestimmung eines Fehlerbilds, ertüchtigt. Diese detektierenden Systeme leiten die Information über den Fehler an den Fehlermanager weiter. Dort wird mit Hilfe zusätzlicher Informationen über den aktuellen Dauerlauf auf Basis sog. Entscheidungsmatrizen eine geeignete Fehlerreaktion definiert. Ausgangspunkt für die Fehlerreaktion ist die in Kapitel 5.2 vorgestellte Fehleranalyse. Mit den Informationen über die detaillierte Fehlerbeschreibung (Fehlerkategorie, Fehlerklasse und Detektionsort) sowie mit der empirisch ermittelten Fehlerauftrittswahrscheinlichkeit und dem analytisch ermittelten Abschaltpotential bei Soll- /Ist-Wert-Fehlern sind die Grundinformationen für die automatisierte Fehlerreaktion bekannt. Diese werden durch weitere Informationen wie beispielsweise die aktuelle Dauerlaufstrecke oder der Laufleistung der Erprobungsaggregate ergänzt. Die Auswahl einer geeigneten Fehlerreaktion erfolgt anhand verschiedener Reaktionsstrategien (vgl. Kapitel 6.4.2). Am Ende steht entweder eine Fehlerreaktion mit anschließender Fortführung des Prüflaufs oder bei kritischen Fehlern die Entscheidung zur Abschaltung des Prüflaufs.

6.1.2 Systemintegration

Für die Umsetzung realitätsnaher Fehlerreaktionen muss der Fehlermanager an geeigneter Stelle in die Prüfstandsarchitektur (vgl. Abbildung 6) eingegliedert werden. Aufgrund des relativ geringen Funktionsumfanges im Vergleich zu den weiteren Prüfstandssystemen (s. Kapitel 2.2.3) wurde der Fehlermanager nicht als solitäres Reaktionssystem aufgebaut, sondern in ein bereits bestehendes System integriert. Wegen der zentralen Anbindung an die restlichen Prüfstandssysteme kommen für die Integration das Automatisierungssystem (AuSy) sowie das Sollwertvorgabesystem (SoSy) in Frage. Die Entscheidung, welches System besser geeignet ist wurde methodisch durch das Werkzeug der Nutzwertanalyse unterstützt.

Für die Nutzwertanalyse wurden 13 verschiedene Kriterien definiert, anhand derer die beiden Systeme verglichen wurden. Diese sind in nachfolgender Tabelle dargestellt:

Kriterium	**Beschreibung**
Zeit	Entwicklungszeit zur Umsetzung und Integration des Fehlermanagers
Black-Box	Möglichkeit zur Komprimierung des Sollwertvorgabesystems auf einem Rechner mit dem Ziel, das Sollwertvorgabesystem inklusive Online-Simulation und Fehlermanager auch bei einem Prüfdienstleister einsetzen zu können
Verfügbarkeit	(Vor-Ort-) Verfügbarkeit der beauftragten Softwareentwickler
Kommunikation	Kommunikationsmöglichkeiten mit den beauftragten Softwareentwicklern
Aufwand Signale	Möglicher Aufwand zur Implementierung zusätzlich benötigter Signale in die vorhandene Kommunikationsstruktur (CAN und Profibus)
Anbindung Simulation	Möglichkeiten zur direkten Anbindung der Antriebstrangsimulationssoftware
Eigenentwicklung	Zugriff auf den Quellcode und Möglichkeit zur Anpassung der Softwarefunktionalität
Onlineklassierung	Zugriff auf bereits vorhandene Tools der Systeme
Eingriff Strecken	Eingriff in das Prüfprogramm z. B. durch Veränderung der Streckendurchmischung bei Dauerlaufprogrammen
Eingriff Prüfling	Direkte Kommunikation mit den Erprobungsaggregaten
Know-How Transfer	Weitergabe des Entwicklungs-Know-Hows an Dritte
Schnittstelle EMS	Anbindung an das Erprobungs-Monitoring-System (EMS) für die Fehlerdokumentation
Zugriff Signale	Zugriff auf Messsignale aus allen Quellen (Steuergeräte, CANs…)

Tabelle 7: Kriterien für die Nutzwertanalyse

Um die oben genannten Kriterien zu gewichten wurde eine Gewichtungsmatrix erstellt, in der eine Wertung der Kriterien zueinander vorgenommen wurde. Die Matrix enthält die Kriterien jeweils in den Zeilen sowie in den Spalten. Gewertet werden die jeweiligen Zeilenkriterien im Vergleich zu den Spaltenkriterien anhand der Vergleichsziffern $VZ = 0$ (Zeilenkriterium ist unwichtiger als Spaltenkriterium), $VZ = 1$ (Zeilenkriterium ist gleich wichtig wie Spaltenkriterium) und $VZ = 2$ (Zeilenkriterium ist wichtiger als Spaltenkriterium). Die Zeilensumme der Gewichtungen $\sum_i VZ$ für das Kriterium i in der i-ten Zeile ergibt bezogen auf die Gesamtsumme der Zeilensummen $\sum \sum_i VZ$ eine Gewichtung G der Kriterien:

$$G = \frac{\sum_i VZ}{\sum \sum_i VZ} \cdot 100\ [\%]$$

Abbildung 31 zeigt die Gewichtungsmatrix mit den Gesamtgewichtungen. Da die Matrix symmetrisch ist, wird nur die obere Dreiecksmatrix ausgewertet, die Werte unterhalb der Hauptdiagonalen sind ausgegraut.

	Zeit	Black-Box	Verfügbarkeit	Kommunikation	Aufwand Signale	Anbindung Sim.	Eigen-entwicklung	Onlineklassierung	Eingriff Strecken	Eingriff Prüfling	Schnittstelle EMS	Know-How Transfer	Zugriff Messsignal	Σ_i VZ	**Gewichtung G**
Zeit	x	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	23	**15%**
Black-Box	0	X	0	0	2	0	0	1	0	0	0	0	0	3	**2%**
Verfügbarkeit	0	2	X	1	2	1	2	2	2	2	0	1	2	17	**11%**
Kommunikation	0	2	1	X	2	1	2	2	1	1	0	1	0	13	**8%**
Aufwand Signale	0	0	0	0	X	0	0	1	0	0	0	0	0	1	**1%**
Anbindung Sim.	0	2	1	1	2	X	0	0	1	1	0	0	0	8	**5%**
Eigenentwicklung	0	2	0	0	2	2	X	1	0	0	0	0	0	7	**4%**
Onlineklassierung	0	1	0	0	1	2	1	X	0	0	0	0	0	5	**3%**
Eingriff Strecken	0	2	0	1	2	1	2	2	X	1	0	0	1	12	**8%**
Eingriff Prüfling	0	2	0	1	2	1	2	2	1	X	1	0	2	14	**9%**
Schnittstelle EMS	0	2	2	2	2	2	2	2	2	1	X	0	2	19	**12%**
Know-How Transfer	1	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	X	2	21	**13%**
Zugriff Messsignal	0	2	0	2	2	2	2	2	1	0	0	0	x	13	**8%**
Σ_j VZ	1	21	7	11	23	16	17	19	12	10	5	3	11	156	**100%**

Abbildung 31: Gewichtungsmatrix

In Abbildung 31 zeigt beispielsweise die Vergleichsziffer 2 (s. Rahmen) in der ersten Zeile beim Vergleich der Kriterien ‚Zeit' und ‚Black-Box' an, dass die Zeit wichtiger eingestuft wird als die Black-Box-Funktion. Die Vergleichsziffern wurden in einem Expertenkreis von 5 Personen mit Teilnehmern aus verschiedenen Bereichen ermittelt. Sie weisen somit einen möglichst objektiven Charakter auf, auch wenn die Bewertung individuell und subjektiv erfolgte.

Mit Hilfe der ermittelten Gewichtung G ist die Basis für die eigentliche Nutzwertanalyse geschaffen.

Bei der Nutzwertanalyse wurden wiederum in einem interdisziplinären Expertenkreis Faktoren für die beiden zur Verfügung stehenden Systeme festgelegt, die beschreiben, wie gut das jeweilige System die oben beschriebenen Kriterien erfüllt. Dabei richtet sich die Bewertung nach folgender Tabelle.

Bewertung	**Beschreibung**
1	Anforderung nicht erfüllt
2	Anforderung zu einem geringen Teil erfüllt
3	Anforderung teilweise erfüllt
4	Anforderung weitgehend erfüllt
5	Anforderung in vollem Umfang erfüllt

Tabelle 8: Bewertungsfaktoren Nutzwertanalyse

Die Bewertung der einzelnen Faktoren nach Tabelle 8 ist nachfolgend in Tabelle 9 dargestellt.

Kriterium	**Gewichtung**	**Faktor AuSy**	**Faktor SoSy**	**AuSy gewichtet**	**SoSy gewichtet**
Zeit	15%	4	4	59	59
Black-Box	2%	1	4	2	8
Verfügbarkeit	11%	5	3	54	33
Kommunikation	8%	4	3	33	25
Aufwand Signale	1%	4	3	3	2
Anbindung Sim	5%	3	5	15	26
Eigenentwicklung	4%	3	1	13	4
Onlineklassierung	3%	4	3	13	10
Eingriff Strecken	8%	2	5	15	38
Eingriff Prüfling	9%	4	3	36	27
Know-How Transfer	13%	2	4	27	54
Schnittstelle EMS	12%	3	3	37	37
Zugriff Messsignal	8%	3	3	25	25
Σ	**100%**			**333**	**347**

Tabelle 9: Nutzwertanalyse Systemintegration

Das Ergebnis der Nutzwertanalyse ist in der letzten Zeile in Tabelle 9 dargestellt. Die Summe der gewichteten Faktoren ist beim Sollwertvorgabesystem höher als beim Automatisierungssystem. Das bedeutet, dass eine Integration des Fehlermanagers nach objektiven Gesichtspunkten in das Sollwertvorgabesystem besser geeignet ist, als eine Integration in das Automatisierungssystem. Das knappe Ergebnis der Nutzwertanalyse sowie die Anzahl der ungewichteten Punkte lassen darauf schließen, dass es für beide Lösungsmöglichkeiten sowohl Vorteile als auch Nachteile gibt. Da jedoch insbesondere die Kriterien, die die Eingriffsmöglichkeiten in die Programmvorgabe beschreiben (z. B.

Anbindung Simulation und Eingriff Strecken), als sehr wichtig interpretiert wurden und dementsprechend stark gewichtet wurden, fiel die Wahl auf die Integration des Fehlermanagers in das Sollwertvorgabesystem.

Nach dieser Auswertung wurde eine Erweiterung des Sollwertvorgabesystems um die Funktionen des Fehlermanagers beschlossen und beauftragt.

6.2 Reaktionstypen

Die möglichen Fehler werden in die Kategorien „Online“ und „Offline“ gegliedert. Online-Fehler sind Fehler, die durch Überschreitung von Warngrenzen detektiert werden, die aber noch nicht zu einer Abschaltung des Prüfstands führen. Offline-Fehler verursachen im Gegensatz dazu durch Überschreitung eines Alarm-Grenzwerts eine Abschaltung des Prüflaufs. Das bedeutet, dass die Drehzahl des Prüflings über eine definierte Rampe auf null reduziert wird und der Prüfling in einen kraftfreien Zustand versetzt wird.

6.2.1 Online-Reaktion

Online-Reaktionen werden entsprechend der Definition des Online-Fehlers während des Prüflaufs durchgeführt, noch bevor es zu einer Abschaltung kommt. Dabei wird die Über- oder Unterschreitung einer Warngrenze im Messsystem erkannt und diese Information an den im Sollwertvorgabesystem integrierten Fehlermanager weitergeleitet. Durch geeignete Anpassungen der Vorgabedaten, die in Echtzeit durch eine parallel zur Erprobung mitlaufende Antriebstrangsimulation generiert werden (s. Online-Simulation Kapitel 4.2.2), wird versucht, die Grenzwertüberschreitung und demzufolge eine Abschaltung des Prüflaufs zu vermeiden.

Um während des Prüflaufs auf Fehlertrends reagieren zu können, muss der zugrunde liegende Fehler auf Signalen basieren, die sich nicht hochdynamisch ändern. Ein typisches Beispiel hierfür sind Temperatursignale. Da sich die überwachten Temperaturen in der Regel mit vergleichsweise geringen Gradienten ändern, kann nach Erkennung eines entsprechenden Trends noch vor der Abschaltung durch die Grenzwertüberwachung auf den Fehler reagiert werden. Im Gegensatz dazu ändern sich beispielsweise Drehmomentsignale so dynamisch, dass eine Reaktion vor Überschreiten des Grenzwertes zeitlich nicht möglich ist, da meist nur wenige Millisekunden zwischen dem Überschreiten einer Warngrenze und der Grenzwertverletzung liegen.

Den Warn- bzw. Alarmgrenzenüberschreitungen von Temperatursignalen liegen meist zwei verschiedene Ursachen zu Grunde. Einerseits treten Temperaturfehler auf, wenn hardwareseitige Fehler oder Fehlfunktionen aufgetreten sind, wenn also beispielsweise eine Kühlleitung defekt ist oder ein Ventil für die zuständigen Kühlaggregate geschlossen ist. Diese Fehler können nicht durch automatisierte Fehlerreaktionen behoben werden, sondern müssen manuell korrigiert werden. Die zweite übliche Fehlerquelle für Temperaturfehler sind zu hohe Energieeinträge in die Antriebstrangkomponenten. Bei

den Energieeinträgen handelt es sich um das Zeitintegral der durch den Triebstrang geführten Leistung:

$$E = \int_{t_0}^{t} M \cdot \omega$$

Die Einflussfaktoren auf den Energieeintrag sind abhängig von den last- oder geschwindigkeitsproportionalen Sollwertvorgabegrößen. Als mögliche Online-Reaktionen kommen daher die temporäre Absenkung der maximalen Geschwindigkeit im Simulationsmodell, eine temporäre Lastrücknahme auf der aktuellen Dauerlaufstrecke oder der Wechsel auf eine andere Dauerlaufstrecke in Frage. Dies entspricht der Reaktion eines Testfahrers im Dauerlaufbetrieb, der bei detektiertem Fehlverhalten des Prüflings die Last reduziert oder eventuell auf eine weniger kritische Dauerlaufstrecke ausweicht. Insbesondere bei der Begrenzung von Last- oder Geschwindigkeitsprofilen muss während und nach der Reaktion geprüft werden, ob die geforderten Lastkollektive erfüllt und die Erprobungsziele eingehalten werden.

Die Online-Reaktion ist beendet, wenn die definierte Warngrenze wieder unterschritten wird oder wenn eine zulässige Dauer für die Reaktion erreicht wird. Für die Unterschreitung der Warngrenze wird zusätzlich eine Hysterese definiert, um bei einem Pendeln des Signals um die Warngrenze unnötig viele Fehlerreaktionen zu vermeiden.

6.2.2 Offline-Reaktion

Analog der Reaktion eines Testfahrers soll für das System die Möglichkeit geschaffen werden, auf Auffälligkeiten und Fehlertrends reagieren zu können. Im Fehlerfall erfolgt zunächst das Versetzen des Prüflings in einen betriebssicheren Zustand, was dem Abstellen des Testfahrzeugs am Straßenrand oder auf dem Seitenstreifen entspricht. Im Anschluss können geeignete Maßnahmen zur Fehlerbehebung ergriffen werden.

Bei Offline-Reaktionen wird ein definierter Grenzwert über- oder unterschritten, was zu einer Abschaltung am Prüfstand und zu einer Unterbrechung des Prüflaufs führt. Im ersten Schritt wird der zugesteuerte Pedalwert auf 0 gesetzt und der Antriebstrang somit in einen weitgehend lastfreien Zustand versetzt. Anschließend wird der Prüfling aus dem aktuellen Betriebszustand über eine festgelegte Drehzahlrampe zum Stillstand gebracht. Nach Erreichen des Stillstandes wird das Getriebe in einen kraftfreien Zustand in die Position „N“ geschaltet. Somit ist ein betriebssicherer Zustand des Prüflings eingestellt.

Im weiteren Verlauf erfolgt die Übermittlung des Fehlerbilds vom detektierenden System an den Fehlermanager. Dort wird über entsprechende Matrizen eine geeignete Fehlerreaktion definiert und dem Prüfstand übermittelt. Die Fehlerreaktion wird auf der Basis eines stehenden Prüflings durchgeführt und erst nach erfolgter Reaktion der Prüflauf an beliebiger Stelle wieder fortgesetzt. Bei kritischen oder unbekannten Fehlern dagegen bleibt der Prüflauf aus Sicherheitsgründen unterbrochen.

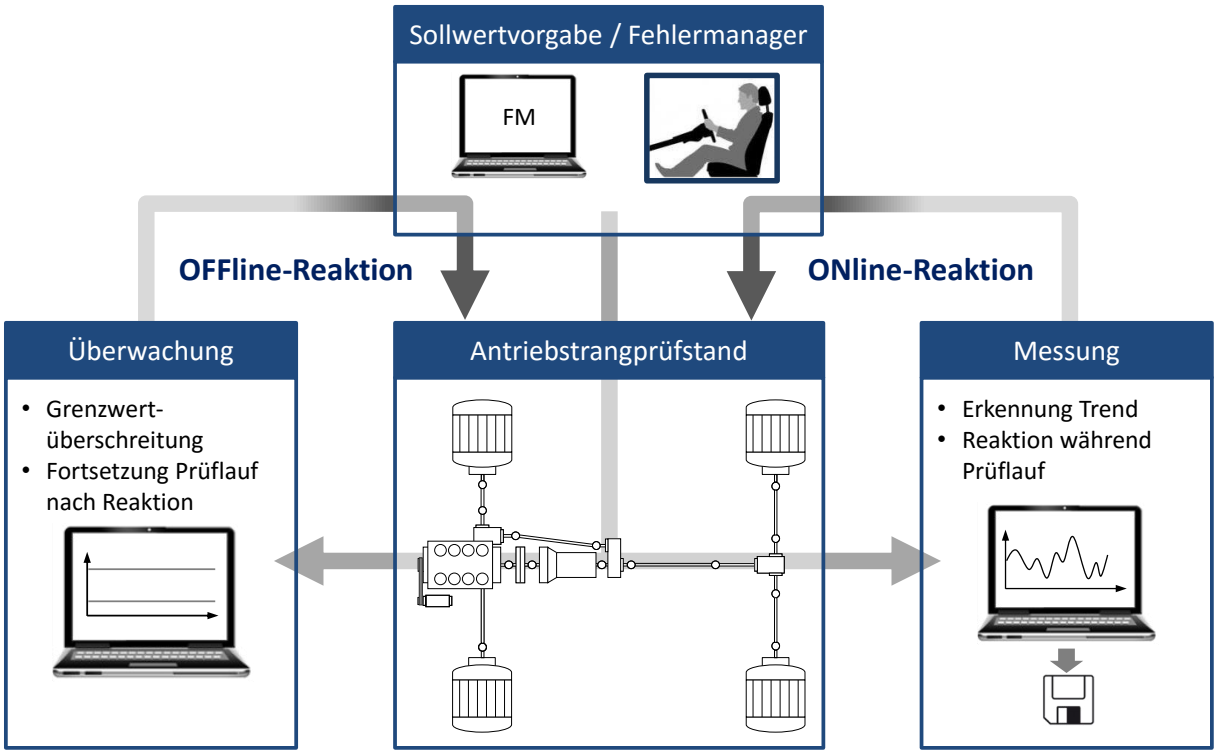


Abbildung 32: Schematische Unterscheidung Online- und Offlinereaktion

Abbildung 32 zeigt die prinzipielle Unterscheidung zwischen Online- und Offline-Reaktionen. Bei Online-Reaktionen wird über Warngrenzen ein Trend hin zu einer Grenzwertüberschreitung detektiert und in Echtzeit ohne Unterbrechung des Prüflaufs auf das Fehlerverhalten des Prüflings reagiert.

6.3 Einflussfaktoren auf das Reaktionsverhalten

Neben den bereits beschriebenen Einflussfaktoren aus der Fehleranalyse, der empirischen Fehlerstatistik (s. Kapitel 5.2.1) und der analytischen Korrelationsanalyse (s. Kapitel 5.2.2), spielen auch weitere Faktoren eine Rolle bei der Wahl einer geeigneten Fehlerreaktion. Diese sind im Wesentlichen der Reifegrad der zustandsgesteuerten Aggregate, das Prüfstandskonzept sowie die spezielle Fehlerklasse. Ein weiterer wesentlicher Einflussfaktor auf die Wahl einer geeigneten Reaktionsstrategie sind die unterschiedlichen Dauerlaufstrecken, welche in Kapitel 6.3.2 charakterisiert werden.

6.3.1 Prüflingsreifegrad

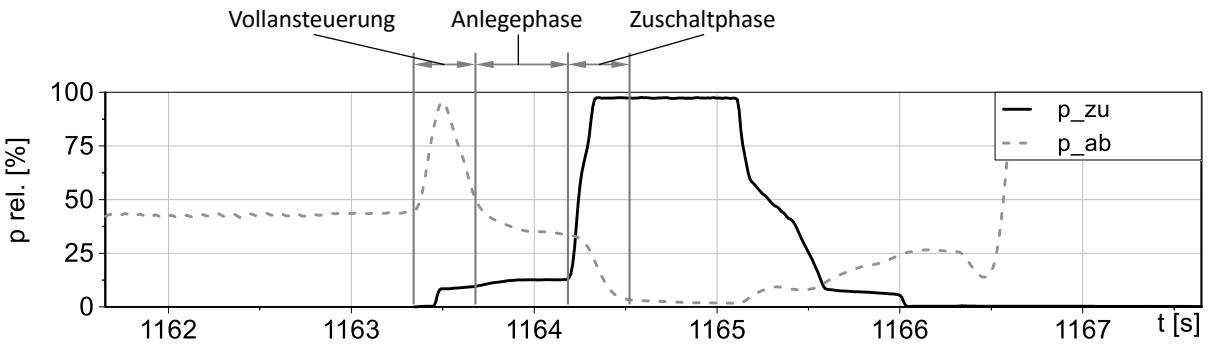
Der Reifegrad der Erprobungsaggregate spielt nicht nur bei der dynamischen Dauererprobung sondern in der gesamten Entwicklung eine entscheidende Rolle, um zielgerichtet Einfluss auf den Produktentwicklungsprozess nehmen zu können [KRE08]. Bei der Wahl einer geeigneten Reaktion muss der Produktreifegrad aller zustandsgesteuerten Aggregate berücksichtigt werden. In frühen Phasen der Produktentwicklung sind einerseits bestimmte Hardwarekomponenten noch nicht vollständig ausgereift, andererseits

ist die Software noch im Stadium der Entwicklung und in vielen Fällen unvollständig und fehlerhaft. Ein geringer Reifegrad kann sich auf bestimmte Betriebspunkte und Fahrsituationen negativ auswirken und zu Abschaltungen während des Prüflaufs führen. Diese sollen am Beispiel einer 2-1 Rückschaltung sowie am Beispiel des Momenteneingriffs durch das Getriebe näher erläutert werden.

In der Regel führt eine schlecht applizierte 2-1 Rückschaltung in Fahrsituationen, die unter Volllast absolviert werden, zu Überschreitungen des zulässigen Getriebeabtriebsmoments. Das zulässige Getriebeabtriebsmoment ergibt sich aus dem im Lastenheft spezifizierten maximal zulässigen Getriebeeingangsmoment multipliziert mit der kürzesten Übersetzung des Getriebes, also der des ersten Ganges. Eine 2-1 Zugrückschaltung ist in der Regel als Freigabeschaltung, also als Überschneidungsschaltung mit negativer Überschneidung ausgeführt (vgl. [NAU07]).

Das bedeutet, dass für einen kurzen Zeitabschnitt das zu- und das abschaltende Schaltelement so schwach mit Druck beaufschlagt sind, dass der Motor entsprechend der hohen Momentenanforderung im Zugbetrieb freigegeben wird und beschleunigen kann. Bei Synchrondrehzahl wird das zuschaltende Schaltelement aktiviert und somit die Beschleunigung des Motors gestoppt. Diese Art der Schaltung erfordert eine sehr präzise Druckansteuerung der Schaltelemente. Die Ansteuerung der Schaltelemente wird dabei in drei Phasen untergliedert. Zunächst wird in der Phase der Vollansteuerung der Kolben des abschaltenden Elements maximal mit Druck beaufschlagt, um das verbrennungsmotorische Moment zu stützen. Anschließend in der Anlegephase wird der Kolben des zuschaltenden Elements soweit zugesteuert, dass die zuschaltende Primärseite der Kupplung möglichst sanft an der Sekundärseite anlegt. In der Zuschaltphase erfolgt die Beaufschlagung des Kolbens mit dem notwendigen Druck, um das zu übertragende Drehmoment zu stützen. Diese Freigabeschaltung mit den entsprechenden Phasen ist in Abbildung 33 dargestellt.

Die Abbildung zeigt die Druckverläufe des zu- sowie des abschaltenden Kupplungselements. In der ersten Phase ist die Vollansteuerung des abschaltenden Elements zu sehen, um das Moment des Verbrennungsmotors abzustützen. In der zweiten Phase wird die zuschaltende Kupplung sanft angelegt und der Druck am abschaltenden Element wird bereits reduziert. In dieser Phase wird der Motor freigegeben und kann ohne Beschleunigung der Drehmassen des Resttriebstrangs beschleunigen. In der Zuschaltphase wird das zuschaltende Element voll angesteuert, um den Verbrenner wieder einzufangen. Nach dieser Phase ist die Schaltung beendet und der Antriebstrang beschleunigt weiter im ersten Gang.



p_zu	%	relativer Druck zuschaltendes Schaltelement
p_ab	%	relativer Druck abschaltendes Schaltelement

Abbildung 33: Druckverläufe bei einer 2-1 Zug-Rückschaltung

Bei falscher Applikation kann es vorkommen, dass die Füllzeiten und Fülldrücke insbesondere für die Anlegephase nicht optimal im Steuergerät hinterlegt sind und somit durch eine frühzeitige Vollansteuerung des Schaltelements zusätzliche dynamische Momentenpeaks in den Antriebstrang eingebracht werden. Der Fahrer nimmt dies als Schaltruck wahr. Die zusätzlichen Momentenpeaks können im Prüfbetrieb zu einer Überschreitung des zulässigen Abtriebsmoments und somit zu einer Abschaltung des Prüflaufs führen.

Als zweites Beispiel wird die Absenkung des Motormoments während einer Lastschaltung, der sog. negative Motoreingriff (s. [NAU07]) näher erläutert. Wie bereits beschrieben werden für Automatgetriebe im Lastenheft maximal zulässige Getriebeeingangsdrehmomente spezifiziert. Diese bestimmen die Auslegung und Dimensionierung des Getriebes. Üblicherweise ist das maximal zulässige Eingangsdrehmoment in den niedrigen Gängen mit kurzen Übersetzungen kleiner, als in den oberen Gängen. Daher muss bei Antriebs-Kombinationen mit besonders leistungsstarken Verbrennungsmotoren dessen Drehmoment in den kleinen Gängen begrenzt werden, um das Getriebe und die radnahen Antriebstrangkomponenten vor Überlasten zu schützen. Dieser Triebstrangschutz oder auch Motoreingriff erfolgt auf die gleiche Weise, wie beim Absenken des Motormoments während einer Schaltung zur Unterstützung der Schaltelemente. Vom Getriebesteuergerät wird ein Signal an das Motorsteuergerät gesendet, welches den idealen Drehmomentenverlauf exakt vorgibt. In stationären Betriebspunkten entspricht die Vorgabe den im Lastenheft spezifizierten Eckpunkten für das maximal zulässige Eingangsdrehmoment. Bei dynamischen Fahrmanövern muss jedoch zusätzlich Drehmoment für die Beschleunigung der Drehmassen im gesamten Antriebstrang bereitgestellt werden. Der Motoreingriff berücksichtigt dieses zusätzliche Drehmoment und erhöht das maximale Getriebeeingangsmoment um diesen Wert. Die Berechnung des zusätzlich benötigten Drehmoments setzt allerdings genaue Kenntnisse über die Massenträgheitsmomente sowie über die transienten Beschleunigungsvorgänge im Getriebe voraus. In frühen Phasen der Produktentwicklung bei geringen Prüflingsreifegraden sind diese Werte meist nicht vollständig bekannt bzw. müssen aus dem Versuch er-

mittelt werden. Bei einer fehlerhaften Parametrierung des Motoreingriffs besteht die Möglichkeit, dass zu viel Drehmoment vom Verbrennungsmotor angefordert wird. Ein zu hohes Drehmoment am Getriebeeingang übersetzt mit der kürzesten Übersetzung des Getriebes im ersten Gang führt zu einer Überschreitung des zulässigen Getriebeabtriebsmoments.

Diese beiden Beispiele zeigen, dass der Prüflingsreifegrad und die damit zusammenhängende Funktionalität der Software in den Steuergeräten eine wesentliche Rolle bei der Fehlererkennung sowie bei der Wahl einer geeigneten Fehlerreaktion spielen. Durch eine nicht vollständig ausgereifte Software kann es in manchen Betriebspunkten reproduzierbar zu einem Fehlverhalten des Prüflings kommen. Dieses Fehlverhalten gilt es durch geeignete Erprobungsstrategien bis zur softwareseitigen Behebung zu umgehen. Hintergrund ist einerseits die Minimierung von unnötigen Stillstandszeiten, die entstehen, wenn zu lange auf eine Anpassung der Software gewartet werden muss. Andererseits werden durch eine Veränderung der Software der Prüflingsaufbau, bzw. die Eigenschaften des zu erprobenden Antriebstrangs verändert. Somit kann eine durchgehende, integrative Erprobung aller Elemente des Antriebstrangs (inklusive Software) sowie deren Zusammenwirken im Systemverbund nicht mehr vollständig gewährleistet werden.

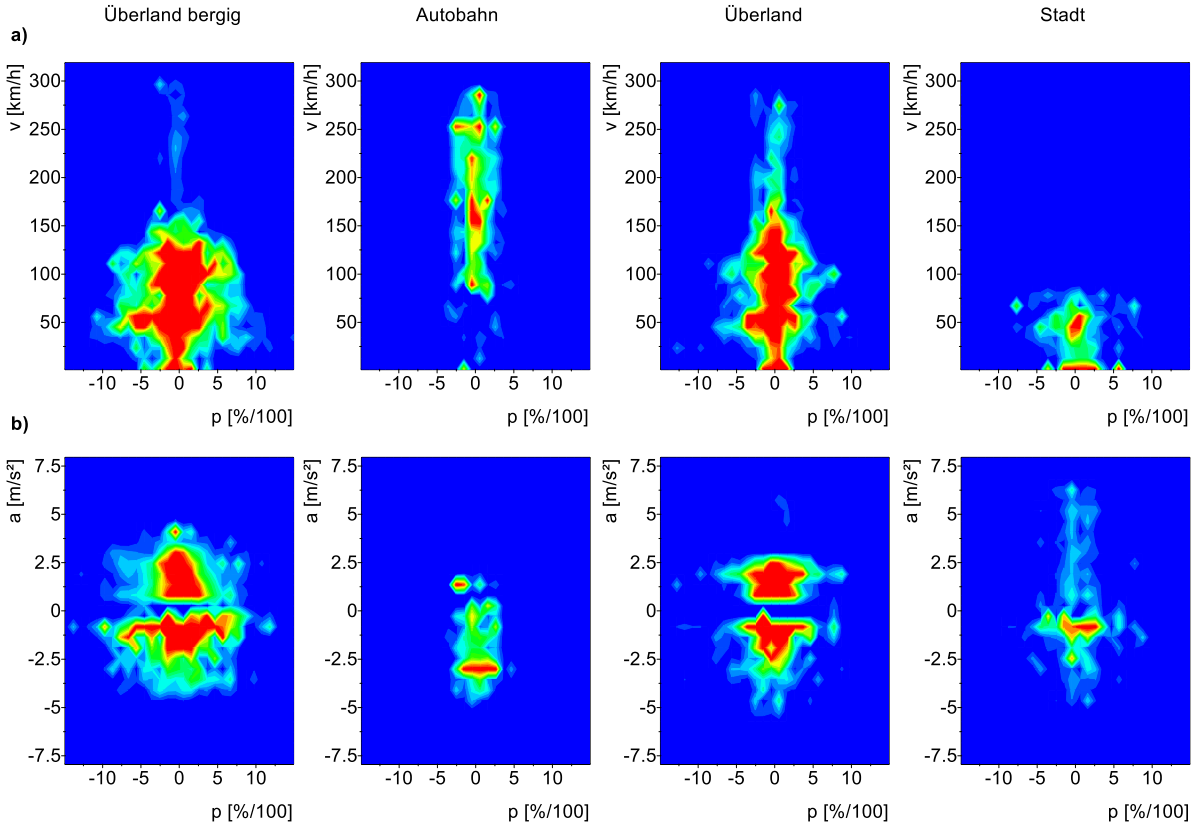
6.3.2 Streckencharakterisierung

Der Fehlermanager wird bei der Dauererprobung von Antriebsträngen eingesetzt. Die Grundlagen für die Dauererprobung sind in Kapitel 2.1 beschrieben. Bei der dynamischen Dauererprobung auf Prüfständen werden reale Straßenprofile simuliert und die Sollwerte ‚Pedalwert' und ‚Abtriebsdrehzahl' als Vorgabegrößen dem Prüfling vorgegeben. Diese bestehen aus einzelnen Dauerlaufstrecken, die je nach Art des Dauerlaufs unterschiedlich durchmischt und gewichtet werden. Die Dauerlaufprofile bilden das reale Kundenfahrverhalten nach. Sie beinhalten nach Müller-Kose [MÜL02] üblicherweise vier verschiedene Streckentypen.

1. Autobahnfahrt
2. Überlandfahrt
3. bergige Überlandfahrt
4. Stadtfahrt

Diese sind in ihrer Ausprägung meist unternehmensspezifisch. Die Streckentypen weißen unterschiedliche Charakteristika auf, die bei der Wahl einer geeigneten Fehlerreaktion berücksichtigt werden müssen. Als charakteristische Größen werden in Anlehnung an Seifried [SEI73-2] die Geschwindigkeitsprofile, die Beschleunigungsverteilung sowie die Höhenprofile herangezogen.

Abbildung 34 zeigt diese Parameter bezogen auf die genannten Dauerlaufstrecken mit Hilfe einer zweiparametrischen Verweildauerzählung.



a	m/s^2	Fahrzeugbeschleunigung
v	km/h	Fahrzeuggeschwindigkeit
p	%/100	Fahrbahnneigung

Abbildung 34: Streckencharakterisierung der Dauerlaufstrecken
a) Geschwindigkeitsprofil
b) Beschleunigungsverteilung

Im oberen Teil der Abbildung ist das Geschwindigkeitsprofil in Abhängigkeit der Steigung dargestellt, der untere Teil zeigt, ebenfalls abhängig von der Steigung, die Beschleunigungsverteilung. Im Geschwindigkeitsprofil der Autobahnstrecke ist ersichtlich, dass es sich bei dem untersuchten Fahrzeug um ein sportliches, stark motorisiertes Fahrzeug ohne Geschwindigkeitsbegrenzung handelt. Somit kann der Extremfall bei den Geschwindigkeiten und bei den Beschleunigungen dargestellt werden. Ebenfalls ersichtlich ist, dass auch auf den beiden Überlandstrecken kurze Autobahnanteile, also hohe Geschwindigkeiten beinhaltet sind. Das Geschwindigkeitsprofil gibt Aufschluss über die maximalen Drehzahlbelastungen, während die Beschleunigungsverteilung in Verbindung mit dem Steigungsprofil als Indikator für die zu erwartenden Lasten gewertet werden kann.

Der untere Teil in Abbildung 34 zeigt die Fahrzeugbeschleunigungen bzw. die Lastverteilung für die unterschiedlichen Streckentypen. Es ist ersichtlich, dass auf der bergigen Überlandstrecke infolge der großen Steigungen vergleichsweise hohe Drehmomente zu erwarten sind. Geschwindigkeiten werden jedoch nur bis ca. 150 km/h erwartet, mit

Ausnahme der kurzen Autobahnanteile. Die Verteilungen auf der Autobahnstrecke ergeben hohe Geschwindigkeiten und demzufolge maximale Drehzahlbelastungen. Im Gegensatz dazu sind jedoch aufgrund der geringen Steigungsverteilung sowie aufgrund der relativ geringen Beschleunigungen keine großen Momente abtriebsseitig zu erwarten. Auf der Überlandstrecke werden moderate Geschwindigkeiten und moderate Lasten gefahren. Hierbei handelt es sich um den Streckentyp mit der geringsten Belastung für den Antriebstrang. Auf der Stadtstrecke sind aufgrund der vielen Anfahrvorgänge aus dem Stillstand die größten Beschleunigungen verzeichnet. Daher handelt es sich hierbei aufgrund der hohen Abtriebsmomente um die Strecke mit der maximalen Belastung für das Getriebe und die radnahen Antriebstrangkomponenten.

Um die Aussagen über die Schädigungen sowohl motorseitig, als auch getriebeabtriebseitig zu quantifizieren, wurde für jede Dauerlaufstrecke eine Überrollungsschädigung an den genannten Positionen im Antriebstrang berechnet. Prinzipiell sind für die Analyse der Schädigung sowohl Angaben zur Schädigung aus Überrollung als auch zur Schädigung aus Wechsellasten zulässig, vgl. Kapitel 3.4.4. Da im vorliegenden Fall jedoch die Signalgrößen am Getriebeabtrieb untersucht werden, ist eine Analyse der Überrollungsschädigung aufgrund der Berücksichtigung der Schädigungsmechanismen von Zahnrädern und Lagern an dieser Stelle besser geeignet.

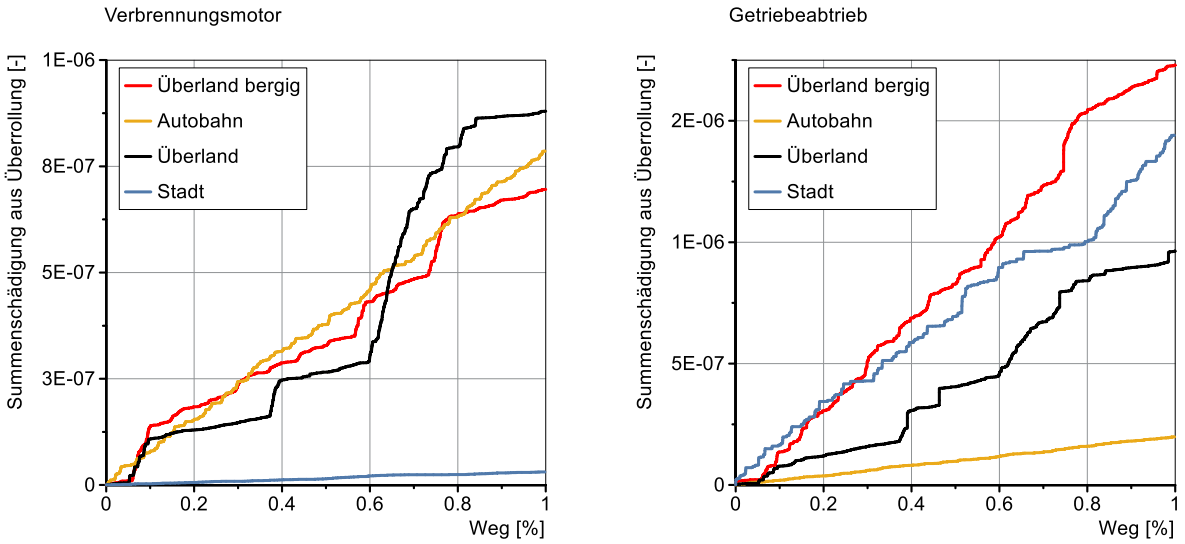


Abbildung 35: Wegabhängige Schädigung am Verbrennungsmotor und am Getriebeabtrieb

Abbildung 35 zeigt die berechnete Schädigung aus Überrollung am Verbrennungsmotor sowie am Getriebeabtrieb auf Basis der oben beschriebenen Simulationsdaten. Die Summenschädigung wurde über der normierten Wegstrecke aufgetragen. Diese absolute Betrachtung gibt Aufschluss über die Gesamtschädigung für jede Dauerlaufstrecke. Der Vergleich zeigt am Getriebeantrieb eine ähnlich große Schädigung bei den Überlandstrecken und der Autobahn, sowie eine deutlich geringere Schädigung in der Stadtstrecke. Am Getriebeabtrieb ergeben sich die größten Schädigungen auf der bergigen Überlandstrecke sowie auf der Stadtstrecke. Die Getriebeabtriebsschädigung auf der Autobahnstrecke ist vergleichsweise gering.

Bei der absoluten Betrachtung werden die Gesamtschädigungen für jede Dauerlaufstrecke ermittelt. Um einen relativen Vergleich anstellen zu können, wird die Überrollungsschädigung bezogen auf 100 km berechnet. Somit wird der Einfluss der unterschiedlichen Streckenlängen berücksichtigt. Nachfolgend ist daher für die Dauerlaufstrecken die auf 100 km normierte Schädigung im logarithmischen Maßstab dargestellt.

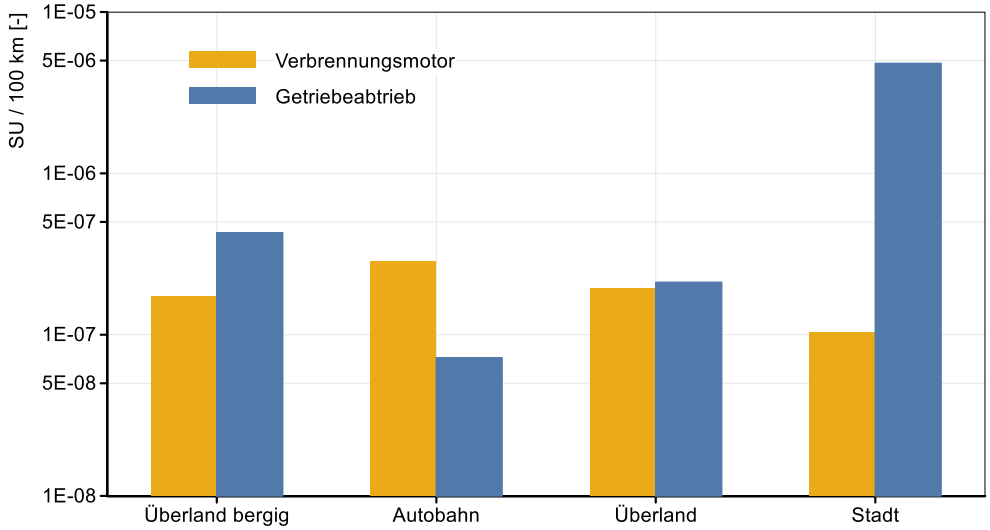


Abbildung 36: Normierte Schädigung der Dauerlauf-Strecken

Die normierte Darstellung zeigt, welche Dauerlauf-Strecken pro gefahrenem Kilometer die größten Schädigungen hervorrufen. Bezogen auf den Verbrennungsmotor wird auf der Autobahnstrecke, die einen hohen Volllastanteil aufweist, die größte Schädigung erzielt. Getriebeabtriebseitig treten die größten Schädigungen in der Stadtstrecke auf. Hintergrund sind die vielen Anfahrvorgänge, bei denen das volle Moment des Verbrennungsmotors mit der größten Getriebeübersetzung im ersten Gang auf den Abtrieb übertragen wird.

Die hier beschriebenen Ergebnisse stellen im folgenden Kapitel 6.4 den Ausgangspunkt für bestimmte Fehlerreaktionen dar, bei denen aufgrund eines detektierten Fehlers auf eine besser geeignete Dauerlaufstrecke gewechselt wird. Wenn beispielsweise ein Fehler detektiert wird, bei dem wiederholt hohe Überrollungsschädigungen am Getriebeabtrieb zu einer Beschädigung des entsprechenden Bauteils führen könnten, wird auf Strecken ausgewichen, die eine vergleichsweise niedrige normierte Schädigung am Getriebeabtrieb aufweisen (z.B. Wechsel von Stadtstrecke auf Autobahn- oder Überlandstrecke, s. Abbildung 36)

6.4 Fehlerreaktion

Die Fehleranalyse (Kapitel 5) beschreibt die Grundlage für die automatisierte Fehlerreaktion auf Antriebstrangprüfständen. Der aktuelle Stand der Technik zur (manuellen) Fehlerreaktion wurde in Kapitel 2.4 beschrieben. Nachfolgend werden eine automatisierte Methode zur Fehlerreaktion sowie mögliche Fehlerreaktionen und deren Kombi-

nationen näher erläutert. Diese können in Abhängigkeit der oben beschriebenen Einflussfaktoren zu einer Reaktionsstrategie zusammengefasst werden. Zuletzt wird ein detaillierter Ablaufplan im Fehlerfall dargestellt.

6.4.1 Reaktionskatalog

Der Reaktionskatalog stellt eine Ansammlung von exemplarischen Online- und Offline-Reaktionsmöglichkeiten für die dynamische Dauererprobung auf Prüfständen dar. Hier werden in Abhängigkeit der Dauerlaufstrecken, des Prüflings und weiterer Einflussfaktoren Fehlerreaktionen dargestellt, die idealerweise die Ursache des detektierten Fehlers beheben und eine Fortsetzung des Prüflaufs ermöglichen sollen.

Nachfolgend wird ein Auszug der grundsätzlich möglichen Fehlerreaktionen in einem Katalog zusammengefasst, der als Grundlage für die Ableitung von Reaktionsstrategien dient. Der Reaktionskatalog liefert einen Überblick über die prinzipiellen Reaktionsmöglichkeiten der Prüfstandssysteme (vgl. Kapitel 2.2.3). Es wird unterschieden zwischen Offline-Reaktionen (Tabelle 10) und Online-Reaktionen (Tabelle 11). Nachfolgend in Tabelle 10 werden die Offline-Reaktionen der jeweiligen Systeme aufgelistet.

System	Reaktion	Beschreibung
Messsystem	Busruhe	Abschaltung aller Bussysteme (Voraussetzung zum Reset aller Steuergeräte)
Messsystem	Fehlerspeicher Getriebesteuergerät löschen	Anliegende Fehler im Fehlerspeicher des Getriebesteuergeräts löschen und neu auslesen
Messsystem	Fehlerspeicher Motorsteuergerät löschen	Anliegende Fehler im Fehlerspeicher des Motorsteuergeräts löschen und neu auslesen
Messsystem	Messung Stop	Stoppen der aktuell laufenden Messung zum Abspeichern der Messdatei
Messsystem	Messung Start	Neustart einer Messung
Automatisierung	Zündungslauf	Ablauf zum Aus- und Wiedereinschalten der Zündung zum Resetieren der Steuergeräte
Automatisierung	Automatikmodus	Wechsel in den Automatikmodus zur Vorbereitung für die automatisierte Durchführung von Prüfprogrammen
Automatisierung	Basismodus	Wechsel in den Basismodus inklusive Abschaltung aller Prüfstandssysteme (Prüfzellenkonditionierung, Abgasabsaugung, Bestromung der Bremsmaschinen)
Automatisierung	Aktivierung zusätzlicher Grenzwerte	Aktivierung von Grenzwerten für eine zusätzliche Überwachung
Sollwertvorgabe	Durchführung Adaptionslauf	Prüfprogramm zur Adaption der Schaltgliederelemente eines Automatgetriebes bzw. zur Adaption von Anfahrelementen
Sollwertvorgabe	Anpassung Fahrprogramm	Globaler Wechsel des vorgegebenen Fahr-

		programmcodes (FPC) z. B. von E (Economy) nach S (Sport) für alle Dauerlaufstrecken
Sollwertvorgabe	Wiederaufsetzen	Wiederaufsetzen des Prüflaufs an der Stelle, an der zuvor abgeschaltet wurde
Sollwertvorgabe	Strecke von vorne starten	Aufsetzen des Prüflaufs zu Beginn der Dauerlaufstrecke, auf der abgeschaltet wurde
Sollwertvorgabe	Nächste Strecke starten	Aufsetzen des Prüflaufs auf der nachfolgenden Dauerlaufstrecke in der Streckendurchmischung
Sollwertvorgabe	Auf beliebiger Strecke starten	Aufsetzen des Prüflaufs auf einer beliebigen Dauerlaufstrecke

Tabelle 10: Reaktionskatalog Offline-Reaktionen

In Tabelle 11 sind die möglichen Online-Reaktionen in einem Katalog aufgelistet. Das ausführende System ist dabei, wie in Kapitel 6.2.1 beschrieben, das Simulationssystem. Dort werden Änderungen bezüglich des Fahrermodells vorgenommen, die reaktiv bestimmte Fehlertypen beeinflussen.

System	Reaktion	Beschreibung
Simulation	Änderung Fahrprogramm	Lokaler Wechsel des Fahrprogramms (z. B. von E nach S) auf einzelnen Dauerlaufstrecken oder auf einzelnen Streckenabschnitten
Simulation	Begrenzung v_{max}	Begrenzung der maximalen Geschwindigkeit für die Antriebstrangsimulation (nur temporär)
Simulation	Begrenzung Pedalwert	Begrenzung des maximalen Pedalwerts, um Volllastanteile zu verhindern (nur temporär)
Simulation	Anpassung Pedalwertdämpfung	Anpassung des Pedalwertverhaltens im Fahrermodell
Simulation	Anpassung Fahrermotivation	Anpassung der Motivationsfaktoren im Fahrermodell zur Korrektur der Lasten
Simulation	Begrenzung Beschleunigungsniveaus	Anpassung der Beschleunigungsniveaus im Fahrermodell zur Korrektur der Lasten
Simulation	Anpassung dynamischer Hochlauf	Anpassung des dynamischen Hochlaufverhaltens des modellierten Verbrennungsmotors zur Adaption an den Prüfling
Simulation	Anpassung Anfahrbegrenzung	Begrenzung der maximalen Anfahrbeschleunigung zur Korrektur der Lasten

Tabelle 11: Reaktionskatalog Online-Reaktionen

Die einzelnen Reaktionen können solitär nicht für eine sinnvolle Fehlerreaktion mit anschließender Fortsetzung des Prüflaufs verwendet werden. Hierfür ist das Zusammen-

spiel der einzelnen Systeme und demzufolge eine Kombination der einzelnen Reaktionen notwendig. Diese Reaktionsstrategien werden im nachfolgenden Kapitel erläutert.

6.4.2 Reaktionsstrategien

Vorbild für die Reaktionsstrategien ist das reale Fahrverhalten des Kunden bzw. eines Testfahrers. Aus den Kombinationen verschiedener Fehlerreaktionen ergibt sich eine Vielzahl an Reaktionsstrategien, von denen jedoch nicht jede sinnvoll ist. Für die Erstellung einer Reaktionsstrategie werden detaillierte Kenntnisse der Prüftechnik einerseits und der Prüflinge andererseits benötigt. Ausgangspunkt für die Erstellung von Reaktionsstrategien ist das reale Fehlerreaktionsverhalten sowohl im Fahrversuch auf der Straße als auch im Prüfstandsbetrieb.

Im ersten Schritt wurden daher verschiedene manuelle Fehlerreaktionen aufgenommen und in einem Ablaufplan dargestellt. Abbildung 37 zeigt den Ablaufplan für eine Reaktion auf einen Start-Stop-Fehler. Der Fehler beschreibt ein Fehlverhalten des Verbrennungsmotors, der in einer speziellen Fahrsituation die Start-Stop-Funktionalität nicht erkennt und trotz entsprechender Anforderung nicht stoppt. Zunächst wurde bei der Fehleranalyse aus der Erfahrung heraus eine Streckenabhängigkeit identifiziert, da dieser spezielle Fehler auf der aktuellen Strecke bereits mehrfach aufgetreten ist. Im Anschluss wurde als Reaktion ein Zündungslauf durchgeführt, was zu einem Reset der Steuergeräte führt. Im Anschluss wurde der Dauerlauf auf der nachfolgenden Strecke fortgeführt.

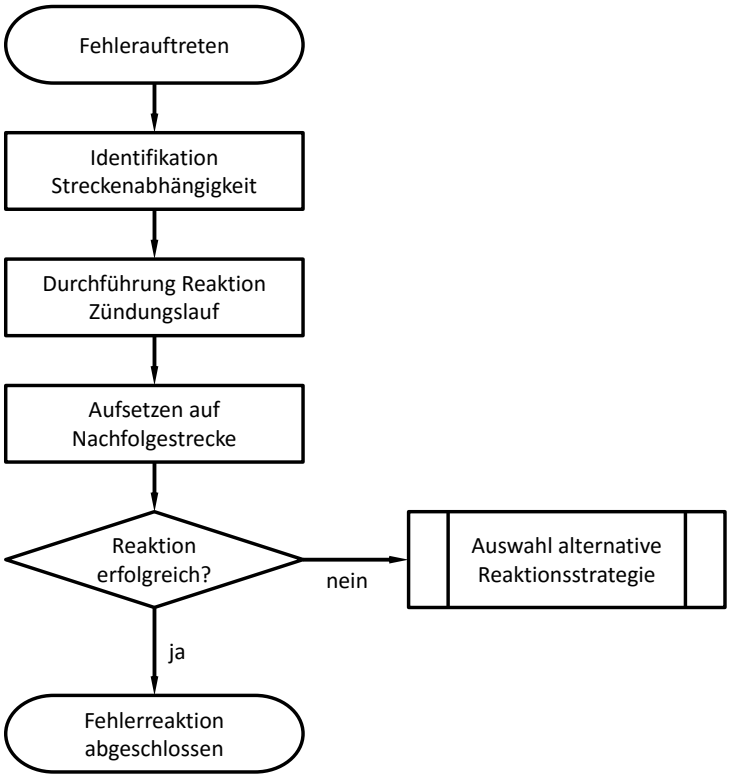


Abbildung 37: Ablaufplan manuelle Fehlerreaktion

Dieses einfache Beispiel zeigt eine Vorgehensweise im Fehlerfall, die als Reaktionsstrategie festgelegt wurde und die mit Hilfe des Fehlermanagers automatisiert durchgeführt werden kann. Wenn die gewählte Fehlerreaktion nicht zum Erfolg führt, kann eine weitere Fehlerreaktion zur Behebung des Problems durchgeführt werden.

Für einen Dauerlauf werden abhängig von den Prüflingen und deren spezifischen Fehlern geeignete Reaktionsstrategien festgelegt. Diese hängen weiterhin ab vom Einfluss der Strecken sowie vom Einfluss des Reifegrads der Prüflinge, also der aktuell verbauten Entwicklungscharge. Der Zusammenhang zwischen bestimmten Fehlern und den geeigneten Reaktionsstrategien ist in Abbildung 38 dargestellt.

	Fehler-beschreibung		Strecken-einfluss				Chargen-einfluss			Reaktions-strategien		
	Fehlerkategorie	Fehlerart	Bergige Überlandstrecke	Autobahnstrecke	Überlandstrecke	Stadtstrecke	Charge 1	Charge 2	Charge 3	**Strategie 1**	**Strategie 2**	**Strategie 3**
										x	x	
												x
										x		x
											x	
Fehler 1	5	1		--						1		2
Fehler 2	3	3				-					1	
Fehler 3	5	1								1	2	3
Fehler 4	3	1	-			---				2		1
Fehler 5	2	4						-		3	1	2

Zündungslauf
Busruhe
Wiederaufsetzen
Nächste Strecke

Einzel-reaktionen

Abbildung 38: Beispielhafter Zusammenhang Fehler und Reaktionsstrategien

In der Matrix in Abbildung 38 ist in den ersten beiden Spalten eine Beschreibung des aufgetretenen Fehlers hinterlegt. Diese umfasst die in Kapitel 5.2 definierten Beschreibungsbegriffe Fehlerkategorie und Fehlerart. Weiterhin zeigt die Matrix den Einfluss verschiedener Dauerlaufstrecken auf den jeweiligen Fehler. Negative Einflüsse werden mit einem ‚-' gekennzeichnet. Wenn ein verstärkter negativer Einfluss auftritt, wird dies durch zusätzliche ‚-' Zeichen beschrieben. Die nächsten drei Spalten zeigen nach der gleichen Vorgehensweise den Einfluss der Entwicklungschargen. In den letzten drei Spalten ist die Priorisierung für die jeweiligen Reaktonsstrategien hinterlegt. Die Ziffer 1 bedeutet, dass diese Reaktionsstrategie aufgrund der gelernten Historie aus bereits aufgetretenen Fehlern am höchsten priorisiert wird. Analog werden die Prioritäten an weitere denkbare Reaktionsstrategien für diesen Fehler verteilt. Die Reaktionsstrategien sind wie in Kapitel 6.4.1 beschrieben aus einzelnen Fehlerreaktionen zusammengesetzt.

Die Auswahl einer geeigneten Reaktionsstrategie berücksichtigt daher folgende zusätzlichen Parameter:

- Die Streckenkoordinate:
  Zur Überprüfung, ob die Abschaltung von der Fahrsituation abhängt.
- Die Strecke:
  Zur Überprüfung von Streckenabhängigkeiten.
- Die Charge:
  Bei negativen Einflüssen durch den Prüflingsreifegrad.
- Die Anzahl der Abschaltungen mit diesem Fehler:
  Bei Überschreitung einer kritischen Schwelle (vgl. Schwellwert x_A in Kapitel 6.4.3) wird nicht mehr automatisiert auf diesen Fehler reagiert.

Der Ablauf einer automatisierten Fehlerreaktion wird im nachfolgenden Kapitel beschrieben.

6.4.3 Ablaufplan Fehlerreaktion

Im ersten Schritt nach Auftreten eines Fehlers wird auf Basis der Fehlerstatistik (vgl. Kapitel 5.2.1) die Auftrittshäufigkeit des Fehlers p_A bestimmt. Die Fehlerstatistik ändert sich dynamisch mit jedem weiteren Fehler, der im Dauerlauf auftritt. Anschließend erfolgt die Prüfung anhand eines definierten Grenzwerts x_A, ob es sich um einen seltenen oder einen häufigen Fehler handelt:

$p_A \geq x_A$ → häufiger Fehler
$p_A < x_A$ → seltener Fehler

Bei seltenen Fehlern wird davon ausgegangen, dass die Informationen über die Fehlerart noch nicht ausreichen, um eine automatisierte Reaktion auf diesen Fehler durchzuführen. Daher erfolgt direkt eine Abschaltung des Prüflaufs; die Reaktion muss manuell auf dem konventionellen Weg erfolgen.

Bei häufigen Fehlern folgt der nächste Schritt. Vom detektierenden System werden Informationen über den Grenzwert, die Fehlerkategorie F_K sowie die Fehlerart F_A ermittelt. Mit den Parametern Fehlerkategorie, Fehlerart und Auftrittswahrscheinlichkeit wird mittels Entscheidungsmatrix die Reaktionsstrategie für diesen Fehler identifiziert.

In der Entscheidungsmatrix sind n verschiedene mögliche Reaktionen R_1 … R_n für einen bestimmten Fehler hinterlegt. Nach jeder automatisierten Reaktion wird im Anschluss überprüft, ob die Reaktion erfolgreich war. Als Maßzahl wird hierfür die Lösungshäufigkeit h_L eingeführt.

Die Lösungshäufigkeit berechnet sich aus der Anzahl erfolgreicher Fehlerreaktionen R_e für einen speziellen Fehler bezogen auf die Gesamtanzahl der durchgeführten Reaktionen R_{ges} für diesen speziellen Fehler:

$$h_L = \frac{R_e}{R_{ges}}$$

Eine Fehlerreaktion ist erfolgreich, wenn nach der Durchführung für eine definierte Zeitspanne von 5 Minuten der zugrunde liegende Fehler nicht mehr auftritt. Dieser Wert wurde empirisch auf Basis des vorhandenen Erfahrungsschatzes ermittelt.

Durch eine Gewichtung von h_L gemäß der Zeit, in der nach erfolgreicher Reaktion der gleiche Fehler nicht mehr auftritt (k_L), wird die Gesamtlösungshäufigkeit $h_{L,\,ges}$ berechnet:

$$h_{L,\,ges} = k_L \cdot h_L$$

Anhand von $h_{L,\,ges}$ wird dynamisch eine Reihenfolge für die Eignung der definierten Fehlerreaktionen festgelegt. Somit wird erreicht, dass die erfolgreichste Reaktion auf einen bestimmten Fehler mit oberster Priorität bei einem erneuten Auftreten des Fehlers herangezogen wird.

Für die Parameter $h_{L,\,ges}$ und h_L werden als Startwerte empirisch ermittelte Werte verwendet, die einer bestmöglichen, a priori bekannten Reihenfolge für Fehlerreaktionsstrategien entspricht.

Die Priorisierung der Fehlerreaktionsstrategien, die anhand des Parameters h_L festgelegt wird, ändert sich dann, wenn die relative Lösungshäufigkeit für eine bestimmte Reaktionsstrategie durch nicht erfolgreiche Reaktionen aufgrund des Quotienten

$$h_L = \frac{R_e}{R_{ges}}$$

bezogen auf die Gesamtreaktionen geringer wird.

Nach der Zuordnung der geeignetsten Fehlerreaktion wird diese Reaktion über das Automatisierungssystem an den Prüfling weitergereicht. Die Durchführung der Reaktion wird vom Automatisierungssystem quittiert und der Prüflauf fortgesetzt. [SCHE13]. Hierfür ist eine bidirektionale Kommunikation zwischen dem im Sollwertvorgabesystem (SoSy) implementierten Fehlermanager und dem Automatisierungssystem (AuSy) vorgesehen. Diese Kommunikation ist in Abbildung 39 an einem einfachen Beispiel dargestellt. Bei einer Offlinereaktion wird der Prüfling wie in Kapitel 6.2.2 beschrieben in einen betriebssicheren Zustand versetzt. Im folgenden Beispiel wird als einfachste aller Reaktionen nur der Automatikmodus wieder angefordert und der Prüflauf ohne weitere Reaktionen fortgesetzt. Der Wechsel in den Automatikmodus muss dabei vom AuSy quittiert werden.

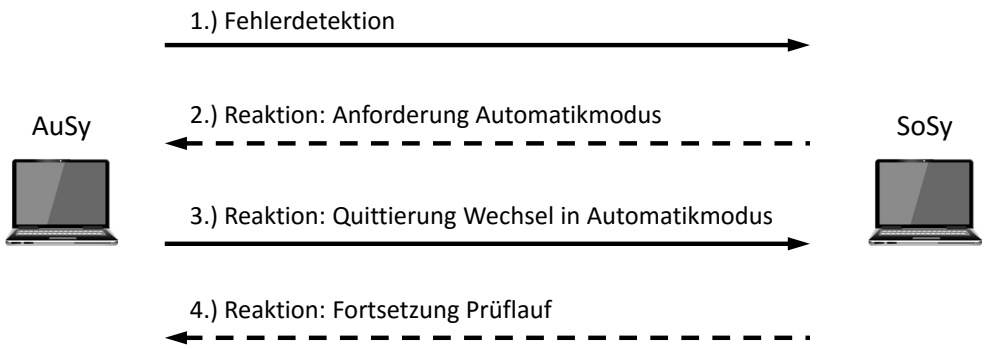


Abbildung 39: Kommunikation zwischen Automatisierungssystem und Sollwertvorgabesystem

Nach erfolgreicher Reaktion wird der Prüflauf an der unterbrochenen Stelle wieder fortgesetzt. Diese einfache Reaktion kann bei bekannten, unkritischen Fehlern erfolgen, deren Behebung durch eine Änderung der Software erfolgt. Da diese Art der Änderung in der Regel einige Zeit in Anspruch nimmt, muss in der Zwischenzeit eine effiziente Nutzung des Prüfstands gewährleistet werden.

Der gesamte Ablauf der automatisierten Fehlerreaktion ist in nachfolgender Abbildung dargestellt.

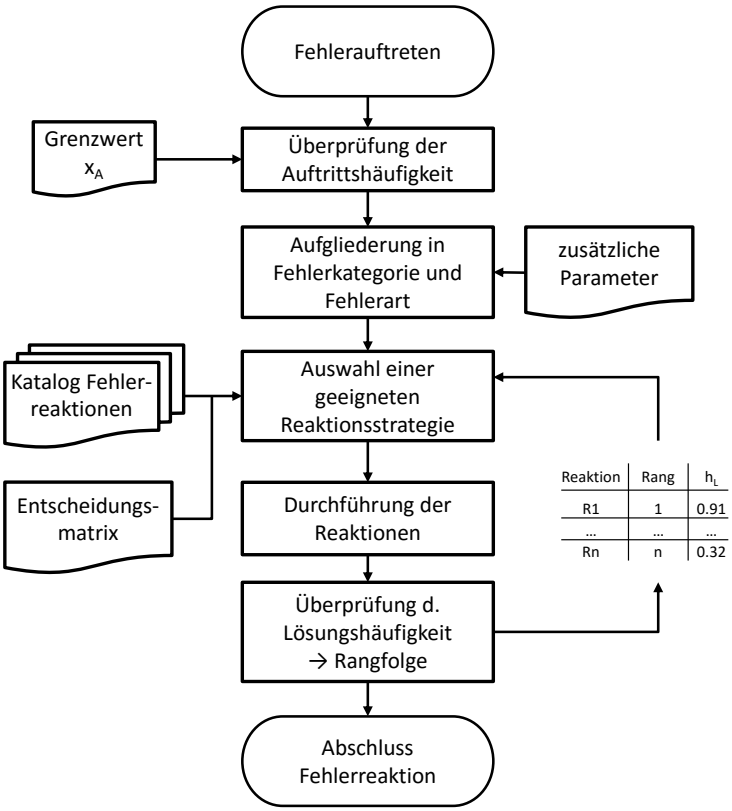


Abbildung 40: Ablaufplan automatisierte Fehlerreaktion

Durch die automatisierten Fehlerreaktionen werden die Lastkollektive des Prüflaufs sowie die Sicherheit der Prüflinge beeinflusst. Daher sind diese Aspekte gesondert zu betrachten.

6.4.4 Sicherheit und Lastkollektive

Für die oben beschriebene Vorgehensweise sind sowohl Aspekte der Sicherheit, als auch die Auswirkungen auf die Lastkollektive und somit auf die Erprobungsqualität zu beachten.

Bei der Detektion des Fehlers und der anschließenden Zuordnung einer Reaktion muss mit größter Sorgfalt und hohem Aufwand das zugrunde liegende Fehlverhalten des Prüflings erkannt werden. Die automatisierte Fehlerreaktion birgt die Gefahr, dass durch ungeeignete oder unnötige Reaktionen das Erprobungsaggregat oder der Prüfstand beschädigt werden. Der Schutz von Aggregaten und Prüfstand steht immer im Vordergrund. Zu diesem Zweck werden die Fehlerbilder von häufigen Fehlern ($p_A > x_A$) hinsichtlich des Signalverlaufs exakt analysiert und eindeutige Merkmale des Fehlers zu dessen Identifikation in den detektierenden Systemen hinterlegt. Ziel ist es, mit sehr großer Wahrscheinlichkeit nur solche Fehler an die Entscheidungsmatrix weiterzugeben, die bekannt sind und bei denen eine Reaktion nicht zu Schäden am Prüfling oder Prüfstand führt.

Gleichzeitig muss bei der automatisierten Fehlerreaktion stets die Einhaltung der geforderten Lastkollektive im Vordergrund stehen. Eine signifikante Schwächung der Lasten beispielsweise durch Absenken der Maximalgeschwindigkeit muss in jedem Fall verhindert werden, um eine Prüfvorschrift-konforme Erprobung gewährleisten zu können. Zu diesem Zweck werden in regelmäßigen Abständen Lastanalysen durchgeführt, um Abweichungen bei den Lastkollektiven früh zu erkennen. Bei Überschreitung einer zulässigen Anzahl an automatisierten Fehlerreaktionen wird der Anwender aufgefordert, zusätzlich zu den Auswertungen nach festgelegten Intervallen eine Lastanalyse durchzuführen. Die Überprüfung der Lastkollektive erfolgt anhand der aus der Simulation festgelegten Zielschädigung inklusive firmenspezifisch festgelegter Toleranzen.

Unter Berücksichtigung dieser beiden Aspekte kann die automatisierte Fehlerreaktion dazu beitragen, die Effizienz von Prüfläufen zu steigern und somit die Ausnutzung der Prüfstandsressourcen zu optimieren. Außerdem werden durch das realitätsnahe Reaktionsverhalten, welches dem Verhalten eines realen Fahrers entspricht, die Anforderungen nach einer möglichst realitätsnahen Erprobung erfüllt. [SCHE13]

6.5 Risikoanalyse

Für die Umfänge des neu implementierten Systems wurde mit Hilfe der FMEA-Methode [BER04]; [VDA12] eine Risikoanalyse durchgeführt, um im Vorfeld eventuelle Schwachstellen zu identifizieren. Die FMEA (Fehler-Möglichkeits- und Einfluss-Analyse) beschreibt eine präventive Zuverlässigkeitsmethode. Sie dient dazu, für beliebige Systeme alle möglichen Ausfall- und Fehlerarten zu ermitteln und somit bestimmte Risiken zu bewerten und entsprechende Optimierungsmaßnahmen abzuleiten.

Für die Risikoanalyse wurde eine System-FMEA angewandt. Der Fehlermanager wird hierbei als abgeschlossenes System mit verschiedenen Funktionen und definierten Ein- und Ausgangsgrößen verstanden. Die jeweiligen Hauptfunktionen sind wie beschrieben die Fehlerdetektion, die Fehleranalyse, die Auswahl einer Fehlerreaktion und die Durchführung der Reaktion. Für jede Hauptfunktion des Systems Fehlermanager wurde eine FMEA durchgeführt, um für die verschiedensten Fehlerarten mit den jeweiligen Fehlerursachen eine qualitative Aussage über das Fehlerrisiko treffen zu können. Eine Bewertung der Fehler wird anhand verschiedener Kennzahlen vorgenommen. Diese sind die Bedeutung bzw. die Schwere des Fehlers B, dessen Auftretenswahrscheinlichkeit A sowie die Entdeckungswahrscheinlichkeit E. Das Produkt dieser drei Faktoren wird Risikoprioritätszahl RPZ genannt, vgl. [BER04]. Die RPZ gibt Auskunft über das Risiko, dass von jedem Fehler ausgeht. Im Folgenden werden Grenzwerte definiert, ab denen ein Fehler als bedeutend bzw. als kritisch eingestuft wird. Diese Grenzen wurden für den vorliegenden Fall wie folgt definiert:

- RPZ $\geq$ 40 (gelb) bedeutender Fehler
- RPZ $\geq$ 80 (rot) kritischer Fehler

Abbildung 41 zeigt exemplarisch die durchgeführte FMEA für die Fehleranalyse. Grau hinterlegt sind jeweils die oben beschriebenen Faktoren B, A und E. In der letzten Spalte befindet sich die Risikoprioritätszahl mit einer dem Ampelsystem entsprechenden farblichen Kennzeichnung gemäß den genannten Grenzwerten.

Prozessschritt				B	Fehlerart		A	Fehlerursache		E	RPZ
2.	Fehleranalyse	2.1.	Erstellung Signalmatrizen	5	2.1.	Fehlerhafte Matrizen	2	2.1.1.	Falsche / Fehlende Signale	3	30
2.	Fehleranalyse	2.2.	Erstellung Fehlerkatalog	8	2.2.	Fehlerhafter Katalog	2	2.2.1.	Fehler in Katalog nicht berücksichtigt	3	48
2.	Fehleranalyse	2.3.	Entwicklung Fehlererkennungssoftware	8	2.3.	Fehlerhafte Software	2	2.3.1.	Fehlerhafte Definition	2	32
2.	Fehleranalyse	2.3.	Entwicklung Fehlererkennungssoftware	8	2.3.	Fehlerhafte Software	2	2.3.2.	Fehlerhafte Umsetzung	2	32
2.	Fehleranalyse	2.4.	Detektion von Fehlern anhand von Grenzwerten	9	2.4.	Fehlerhafte Grenzwerte	2	2.4.1.	Grenzwerte nicht aktiv	6	108
2.	Fehleranalyse	2.4.	Detektion von Fehlern anhand von Grenzwerten	9	2.4.	Fehlerhafte Grenzwerte	2	2.4.2.	Grenzwerte falsch	7	126
2.	Fehleranalyse	2.5.	Messung von Prüflingssignalen	3	2.5.	Messfehler	3	2.5.1.	Bus-Kommunikation fehlerhaft	4	36
2.	Fehleranalyse	2.5.	Messung von Prüflingssignalen	3	2.5.	Messfehler	3	2.5.2.	Messgerät fehlerhaft	9	81
2.	Fehleranalyse	2.6.	Definition Abschaltreaktion	6	2.6.	Fehlerhafte Abschaltreaktion	6	2.6.1.	Falsche Parametrierung	4	144
2.	Fehleranalyse	2.7.	Verkabelung Messtechnik	4	2.7.	Verkabelungsfehler Messtechnik	2	2.7.1.	Kabel fehlt	1	8
2.	Fehleranalyse	2.7.	Verkabelung Messtechnik	4	2.7.	Verkabelungsfehler Messtechnik	2	2.7.2.	Falsche Verkabelung	1	8
2.	Fehleranalyse	2.8.	Bewertung Kritikalität	7	2.8.	Fehlerhafte Auswertung	5	2.8.1.	Falsche Kriterien für Fehlerkritikalität	4	140
2.	Fehleranalyse	2.9.	Bewertung Auftrittshäufigkeit	7	2.9.	Fehlerhafte Auswertemethoden	5	2.9.1.	Falsche Berechnung	2	70
2.	Fehleranalyse	2.10.	Identifikation Fehlerursache	6	2.10.	Falsche Zuordnung der Auftrittshäufigkeit	4	2.10.1.	Softwarefehler	2	48
2.	Fehleranalyse	2.11.	Identifikation Fehlerbild	7	2.11.	Fehlerhafte Identifikation einer Ursache	6	2.11.1.	falsche Ursache	2	84
2.	Fehleranalyse	2.11.	Identifikation Fehlerbild	7	2.11.	Fehlerhafte Identifikation einer Ursache	6	2.11.2.	keine Ursache	2	84
2.	Fehleranalyse	2.11.	Identifikation Fehlerbild	7		Falsche Zuordnung des Fehlerbildes	4	2.11.3.	Softwarefehler	2	56
2.	Fehleranalyse	2.12.	Bestimmung Fehlerart (Online/Offline)	4	2.12.	Falsche Bestimmung der Fehlerart	4	2.12.1.	Falsche Parametrierung	4	64

Abbildung 41: System-FMEA für die Haupt-Funktion Fehleranalyse

Die Risikobewertung mit Hilfe der FMEA zeigt kritische Fehler auf, die bei der späteren Umsetzung zu Problemen führen können. Der Vorteil der FMEA besteht nun darin, dass diese Analyse noch vor der Implementierung des Softwareumfangs durchgeführt wurde und somit die Schwachstellen identifiziert werden konnten. Für jeden kritischen Fehler wurde eine Maßnahme definiert, um das Risiko zu minimieren. Hierfür können entweder Maßnahmen zur Minimierung der Auftrittswahrscheinlichkeit oder Maßnahmen zur Erhöhung der Entdeckungswahrscheinlichkeit getroffen werden. In beiden Fällen wird die Risikoprioritätszahl und somit das Fehlerrisiko minimiert.

Prozessschritt		Fehlerart		Fehlerursache		RPZ	Maßnahme
2.	Fehleranalyse	2.4.	Fehlerhafte Grenzwerte	2.4.1.	Grenzwerte nicht aktiv	108	Präskritptives methodisches Vorgehensmodell
2.	Fehleranalyse	2.4.	Fehlerhafte Grenzwerte	2.4.2.	Grenzwerte falsch	126	Kontrolle durch Vorab-Testläufe
2.	Fehleranalyse	2.5.	Messfehler	2.5.2.	Messgerät fehlerhaft	81	Regelmäßige Überprüfung anhand Referenzmessdaten
2.	Fehleranalyse	2.6.	Fehlerhafte Abschaltreaktion	2.6.1.	Falsche Parametrierung	144	Präskritptives methodisches Vorgehensmodell
2.	Fehleranalyse	2.8.	Fehlerhafte Auswertung	2.8.1.	Falsche Kriterien für Fehlerkritikalität	140	Regelmäßige Abstimmung mit Fachbereich
2.	Fehleranalyse	2.11.	Fehlerhafte Identifikation einer Ursache	2.11.1.	falsche Ursache	84	Ermittlung Fehlerursachen in interdisziplinärem Gremium
2.	Fehleranalyse	2.11.	Fehlerhafte Identifikation einer Ursache	2.11.2.	keine Ursache	84	Ermittlung Fehlerursachen in interdisziplinärem Gremium

Abbildung 42: Kritische Fehler aus FMEA und ergriffene Maßnahmen

Abbildung 42 zeigt für die Fehler mit einer hohen Risikoprioritätszahl die ergriffenen Maßnahmen. Exemplarisch wird eine Optimierungsmaßnahme für den Fehler 2.6.1. aus Abbildung 41 und Abbildung 42 näher erläutert. Die hohe Risikoprioritätszahl des Fehlers von 144 ist unter anderem auf eine relativ hohe Auftretenswahrscheinlichkeit (Bewertung = 6) zurückzuführen. Der Fehler beschreibt eine falsche Abschaltreaktion also die fehlerhafte Parametrierung des Fehlermanagers für Grenzwertüberschreitungen, bei denen eine Abschaltung des Prüflaufs erfolgen sollte. Durch einen zusätzlichen Kontrollmechanismus in Form eines präskriptiven methodischen Vorgehensmodells bei der Parametrierung des Fehlermanagers konnte die Auftretenswahrscheinlichkeit von 6 auf 4 reduziert werden, was zu einer geringeren Risikoprioritätszahl von 72 führt.

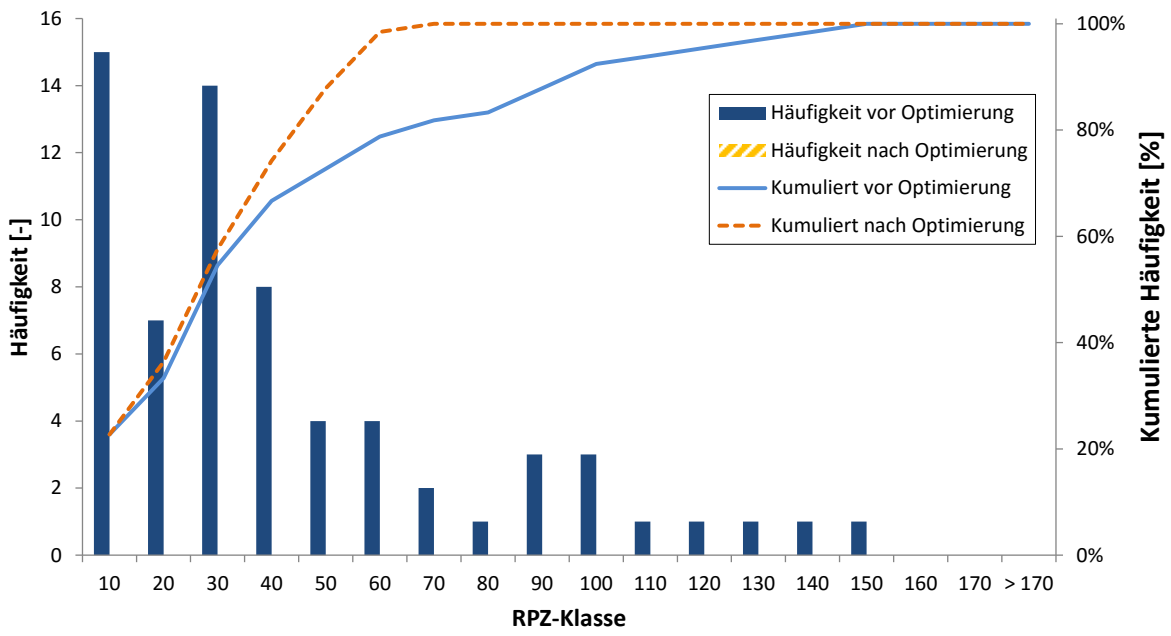


Abbildung 43: Histogramm Risikoanalyse

Die Risikobewertung aus Abbildung 41 wurde für jede Funktion des Systems Fehlermanager durchgeführt. Die Auswertung der ermittelten Risikoprioritätszahlen ist im Histogramm in Abbildung 43 dargestellt. Das Histogramm zeigt auf der ersten Achse die absolute Häufigkeit an Fehlern in einer bestimmten RPZ-Klasse. Auf der zweiten Achse ist deren kumulierte Häufigkeit in [%] aufgetragen. Dargestellt sind sowohl der Zustand vor den abgeleiteten Optimierungsmaßnahmen (gefüllt) sowie nach den durchgeführten Optimierungsmaßnahmen (gestrichelt).

Abbildung 43 zeigt, dass durch frühzeitigen Einsatz präventiver Zuverlässigkeitsmethoden mögliche Fehlerquellen bereits vor der Umsetzung der jeweiligen Systeme identifiziert und entschärft werden konnten. Die absoluten Häufigkeiten von Fehlern mit einer hohen RPZ-Klasse werden nach der Optimierung hin zu niedrigeren RPZ-Klassen verschoben. In Abbildung 43 ist dies insbesondere bei den kumulierten Häufigkeiten (Liniendarstellung) ersichtlich.

6.6 Systemumsetzung

In Kapitel 6.1.2 wurde ausgeführt, dass das System Fehlermanager idealerweise in das Sollwertvorgabesystem integriert wird.

Die Systemarchitektur aller für den Fehlermanager relevanten Systeme aus Abbildung 6 ist in nachfolgender Abbildung als Detaildarstellung näher ausgeführt. Dargestellt sind das Automatisierungssystem, das Sollwertvorgabesystem, das Messsystem sowie die Antriebstrangsimulationssoftware.

Der größte Umfang für die Entwicklung des Fehlermanagers entfällt auf die Erweiterung der Sollwertvorgabe-Software. Es mussten jedoch auch Anpassungen in der Parametrierung des Messsystems sowie des Automatisierungssystems vorgenommen werden. Hier wurde auf Basis der Fehleranalyse, wie in Kapitel 5.2 beschrieben, die Möglichkeit geschaffen, entstandene Warn- bzw. Alarmgrenzenüberschreitungen zu detektieren, zu codieren und über die vorhandene Bus-Architektur an das Sollwertvorgabesystem weiterzuleiten.

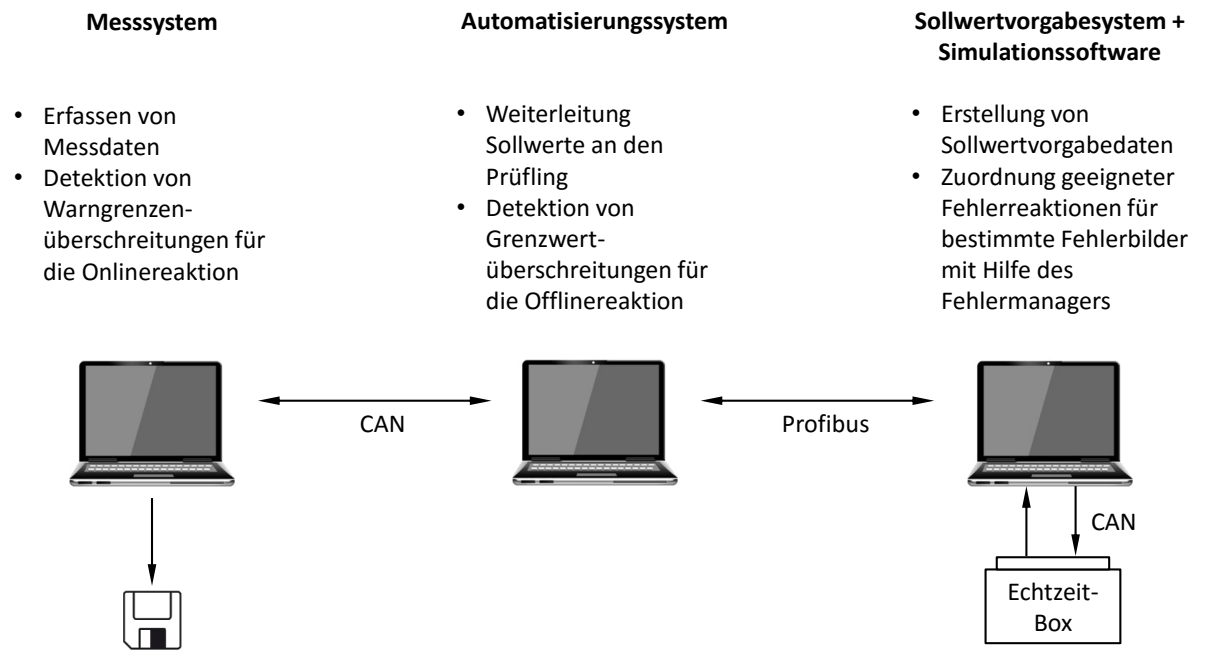


Abbildung 44: Systemarchitektur Fehlermanager und Systemfunktionen

Die Verarbeitung der detektierten Grenzwertüberschreitungen erfolgt im Sollwertvorgabesystem und dort im neu implementierten Fehlermanager. Für die Kommunikation mit dem Automatisierungssystem wurde die Profibus-Verbindung zwischen beiden Systemen entsprechend erweitert. Die Zuordnung einer geeigneten Reaktion sowie die Definition der Fehlerreaktionen erfolgt in einfach editierbaren CSV-Dateien. Somit sind eine einfache Handhabung des Systems und eine unkomplizierte Erweiterung gewährleistet. In Abbildung 38 ist beispielsweise die Entscheidungsmatrix für die Zuordnung einer Reaktion zu einem definierten Fehler dargestellt. Diese Matrix wird ebenfalls als CSV-Datei im System implementiert.

Zusätzlich wird das Sollwertvorgabesystem an eine Datenbank gekoppelt. Jeder aufgetretene Fehler wird somit entsprechend seiner Fehlerklasse und seiner Fehlerkategorie (vgl. Kapitel 5.2.1) dokumentiert. Die Fehlerdokumentation erfolgt unabhängig davon, ob auf den Fehler auch eine Reaktion erfolgt ist. Damit wird eine durchgängige Datenbasis für weitere Fehleranalysen und –statistiken geschaffen. Die Fehleranalyse, die den Ausgangspunkt der automatisierten Fehlerreaktion darstellt, wird somit für weitere Projekte entscheidend vereinfacht. [KAR13]

7 Evaluation und Testfälle

Das neu entwickelte System wurde an zwei Dauerläufen im realen Prüfbetrieb validiert. Im Folgenden werden zunächst ein konventioneller Dauerlauf sowie ein Dauerlauf mit der Vorgabeart Onlinesimulation miteinander verglichen. Die Onlinesimulation stellt den ersten Entwicklungsschritt für die automatisierte Fehlerreaktion und insbesondere für die Onlinereaktion dar. Im Vergleich mit einem konventionellen Prüflauf werden die Unterschiede der Vorgabearten herausgestellt. Anschließend erfolgen eine Betrachtung zweier Dauerläufe, bei denen aktive Eingriffe des Fehlermanagers in den Prüfbetrieb erfolgten sowie ein Vergleich mit einem Dauerlauf ohne automatisierte Fehlerreaktion. Weiterhin werden einige Ergebnisse aus der Fehlerdatenbank sowie die aufgetretenen Fehler und deren Häufigkeiten an den oben genannten Beispielen vorgestellt. Die Fehlerdatenbank bildet die Basis für die automatisierte Fehlerreaktion. Der Ablauf einer Fehlerreaktion im Prüfbetrieb wird an einem Beispiel mit Hilfe des zughörigen Signalverlaufs näher erläutert und darauf aufbauend eine detaillierte Laufzeitauswertung angestellt. Da die Dauerlaufziele zur Absicherung von Kundenlasten durch die Fehlerreaktion nicht beeinträchtigt werden dürfen, werden im letzten Kapitel die im Prüflauf erzielten Lasten streckenabhängig bewertet.

7.1 Vergleich Prüflauf konventionell und Onlinesimulation

Der Vergleich eines konventionellen Prüflaufs (Vorgabeart Bandvorgabe) mit einem Prüflauf mit der Vorgabeart Onlinesimulation wurde anhand einer Zeitdatenanalyse durchgeführt, s. [AKK12]. Die Laufzeiten wurden aus einer Erprobungsdatenbank ermittelt und in zwei Blöcke aufgegliedert: Laufzeit und Stillstandszeit.

Wie in Kapitel 4.2 beschrieben, bietet die Onlinesimulation wesentliche Vorteile bei der Vorgabe von Sollwerten. Durch eine flexible Generierung der Sollwerte in Echtzeit können diese an das Prüflingsverhalten angepasst werden. Somit werden Stillstandszeiten infolge von Fehlern bei der Vorgabe von Sollwerten minimiert.

Die Effizienzsteigerung bzw. die Reduktion der Abschaltungen bei der Antriebstrangerprobung erfolgt, wie bereits erwähnt, anhand flexibler Vorgabedaten. Die Verwendung rückgekoppelter Messsignale des Prüflings als Eingangsgrößen für die Simulation ermöglicht eine Anpassung der Simulationsgrößen an das reale Prüflingsverhalten in Echtzeit.

Die Ergebnisse aus der Analyse der Prüfstandslaufzeiten werden an zwei Vergleichsbeispielen erläutert. Dabei handelt es sich jeweils um zwei vergleichbare Triebstrangdauerläufe, von denen einer mit der Vorgabeart Bandvorgabe, der andere mit der Vorgabeart Onlinesimulation absolviert wurde. Die Vergleichbarkeit der Dauerläufe ist aufgrund folgender Kriterien gegeben:

- Gleiche Antriebstrangtopologie:
  Vergleich zweier Hybrid-Getriebe,
- Gleiche Prüfstandstopologie:
  Antrieb über Verbrennungsmotor, Abtrieb durch eine elektromotorische Bremsmaschine,
- Gleicher Dauerlauf:
  Dynamischer, kundennaher Dauerlauf mit repräsentativer Durchmischung,
- Gleicher Zielaufbau:
  Fahrzeugbaureihe E-Klasse.

Unterschiede ergeben sich lediglich in der Art der Motorisierung, da der erste Prüflauf mit einem Ottomotor, der Zweite mit einem Dieselmotor durchgeführt wurde. Weitere Untersuchungen zeigen jedoch, dass die Motorisierungsart auf die Anzahl der Reklamationen bzw. auf die Laufzeiten keinen nennenswerten Einfluss hat [AKK12]. Ein weiterer Unterschied der Prüfläufe ist auf den unterschiedlichen Prüflingsreifegrad der Aggregate zurückzuführen, der jedoch in der nachfolgenden Betrachtung durch einen Chargeneinfluss kompensiert wird (vgl. Abbildung 45).

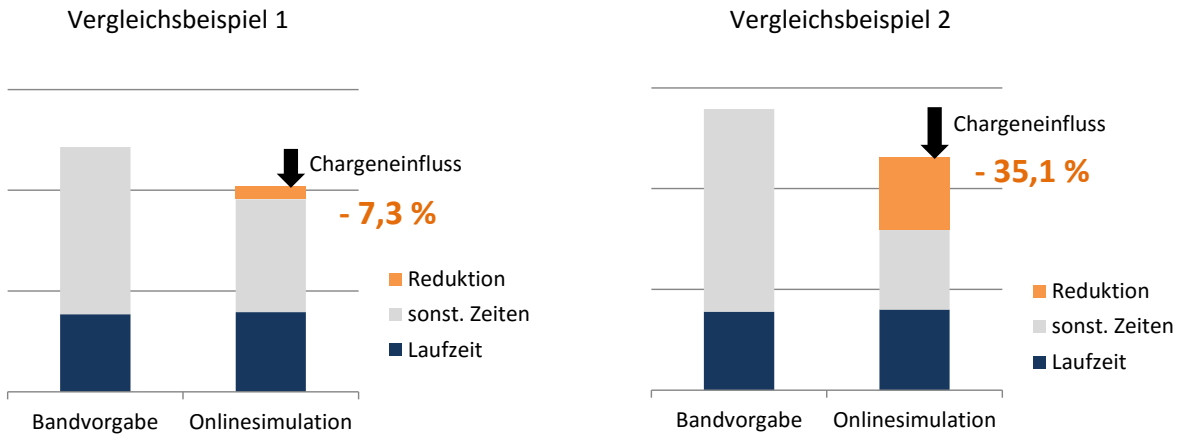


Abbildung 45: Zeitdatenanalyse Vergleich Bandvorgabe – Onlinesimulation [SCHE12]

Betrachtet man die Prüflaufzeiten (Abbildung 45) so ist zunächst die Aufgliederung in Laufzeiten und sonstige Zeiten erkennbar. Die sonstigen Zeiten beinhalten geplante und ungeplante Abschaltungen und Stillstandzeiten gemäß Abbildung 23. Da der Prüflauf der Onlinesimulation in einer späteren Entwicklungsphase erfolgt ist, muss der Chargeneinfluss auf die Stillstandzeiten eingerechnet werden. Der Chargeneinfluss ist ein Faktor, der die Verkürzung der Stillstandzeit während eines Prüflaufs infolge des fortgeschrittenen Aggregatreifegrads angibt. In der Erprobungsplanung wird hierfür erfahrungsgemäß eine Reduktion um 25 % berücksichtigt.

Deutlich erkennbar ist die stets gleiche Prüflingslaufzeit, die aus der identischen Art des Dauerlaufs resultiert. Diesem liegt eine definierte Laufstrecke zu Grunde, welche über die errechnete Durchschnittsgeschwindigkeit bei gleichen Aufbauten zur identischen Laufzeit führt.

Abbildung 45 zeigt beim ersten Vergleichsbeispiel eine Verringerung der sonstigen Zeiten um 7,3 %, im zweiten Vergleichsbeispiel eine Verringerung um 35,1 % bei der Onlinesimulation im Vergleich zur Bandvorgabe. Diese Verringerung ist auf eine Reduktion der Abschaltungen und somit auf weniger ungeplante Stillstandzeiten zurückzuführen. [SCHE12]

7.2 Vergleich Prüflauf mit und ohne automatisierter Fehlerreaktion

Im nächsten Schritt erfolgt eine weitere Laufzeitbetrachtung zweier Prüfläufe. Es handelt sich erneut um vergleichbare Dauerläufe, die in allen oben genannten Kriterien übereinstimmen. Für den Vergleich wurden zwei Dauerläufe mit der Vorgabeart Onlinesimulation ausgewählt, wobei bei einem Vergleichspartner pilothaft der neu entwickelte Fehlermanager zum Einsatz kam.

Der Prüflauf ohne automatisierte Fehlerreaktion wurde mit der Vorgabeart Onlinesimulation durchgeführt. Daher sind die oben beschriebenen Effizienzsteigerungen bereits enthalten. Abbildung 46 zeigt die Auswertung der Prüfstandslaufzeit über der Zeit des Dauerlaufs.

Ausgenommen ist die Inbetriebnahmephase der Prüflinge zu Beginn der Erprobung. In dieser Phase erfolgen einerseits der mechanische Aufbau der Prüflinge am Prüfstand und der Anschluss an die entsprechenden Versorgungsmedien, andererseits werden die Prüflinge elektrisch in Betrieb genommen. Zur elektrischen Inbetriebnahme zählt das Aufspielen der zu erprobenden Software auf die Steuergeräte sowie die entsprechenden Datenstände, die Inbetriebnahme der Messtechnik inklusive prüflingsspezifischer Zusatzmesstechnik, die Vernetzung der einzelnen Steuergeräte und vieles mehr. Durch diese Aufwände entstehen zu Beginn jeder Erprobung lange Stillstandszeiten. Nach der Inbetriebnahme wird die eigentliche Erprobung gestartet, indem zunächst alle Dauerlaufstrecken testweise absolviert werden.

Die Laufzeit-Auswertung des konventionellen Prüflaufs (s. Abbildung 46) wurde mit einem Antriebstrang, bestehend aus einem 4-Zylinder Ottomotor und einem 9-Gang Automatgetriebe in Planetenbauweise, absolviert. Eine detaillierte Beschreibung zum Aufbau des Antriebstrangs kann aus Tabelle 13 in Anhang A entnommen werden.

Mit Beginn dieser Testphase der Dauerlaufstrecken beginnt die Laufzeitauswertung in Abbildung 46. Zu Beginn mussten noch einige Probleme bezüglich der Streckendaten behoben werden, was in der Stillstandszeit zu Beginn des Dauerlaufs zu erkennen ist. Im weiteren Verlauf traten, mit Ausnahme der etwas längeren Stillstandszeit bei der Hälfte des Prüflaufs, bei der ein defektes Teil getauscht werden musste, die üblichen Stillstandszeiten infolge von Grenzwertverletzungen während einer Erprobung auf. Die ausgewertete Prüflingslaufzeit ist mit einer Auslastung von 61% sehr hoch. Es handelt sich um einen sehr robusten Prüflauf mit hoher Effizienz.

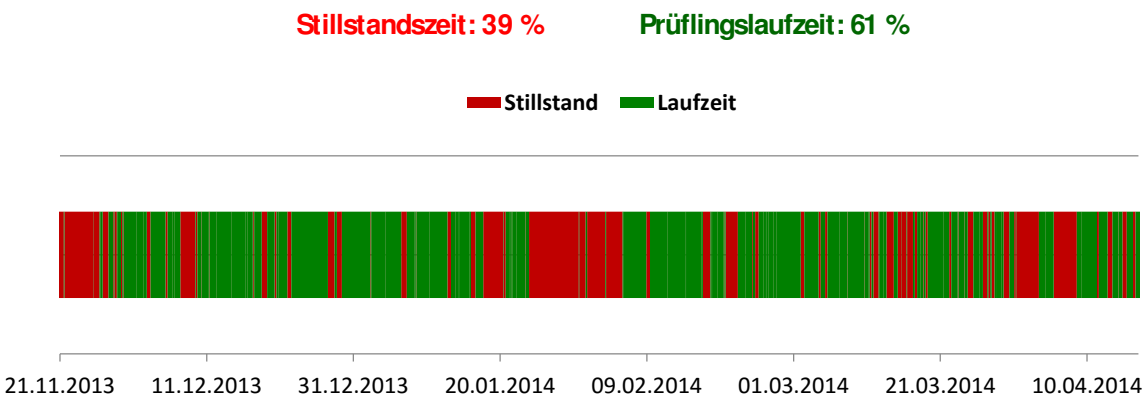


Abbildung 46: Laufzeitauswertung konventioneller Prüflauf mit Onlinesimulation

Im Vergleich dazu wurde auf dem Pilotprüfstand für den Fehlermanager ein weiterer Dauerlauf mit der Vorgabeart Onlinesimulation ausgewertet. Die zu erprobenden Prüflinge stammen aus derselben Charge, weisen also einen vergleichbaren Aggregatereifegrad auf. Der Aufbau ist zudem dem oben genannten Aufbau sehr ähnlich, wodurch die Vergleichbarkeit der beiden Prüfläufe gewährleistet ist. Unterschiede in der Laufzeit erklären sich somit ausschließlich aufgrund der jeweiligen Methodik, nicht aus den Aggregaten oder einem unterschiedlichen Reifegrad.

Die Details des Vergleichsaufbaus können in Tabelle 14 im Anhang A nachgelesen werden.

Im ersten Schritt mussten zu Beginn der Erprobung die benötigten Matrizen des Fehlermanagers (vgl. Kapitel 6.4.2) gefüllt werden. Dazu wurde zunächst auf den empirischen Teil der Fehleranalyse zurückgegriffen, um die häufigsten Fehler aus früheren Dauerläufen zu identifizieren. Im nächsten Schritt wurden die Fehler, die zu Beginn des Prüflaufs auftraten, in die Fehlermatrizen aufgenommen und eine geeignete Reaktionsstrategie hinterlegt.

Da sich das System noch in einer Pilotphase befand, wurden vergleichsweise einfache Reaktionsstrategien gewählt. Auch wurde bei der Wahl der Fehler, auf die reagiert werden sollte, kein Risiko eingegangen. Das bedeutet, dass nur für einen Bruchteil der aufgetretenen Fehler, bei dem eine Gefährdung der Prüflinge zweifelsfrei ausgeschlossen werden konnte, eine Reaktionsstrategie hinterlegt wurde. Für die weiteren Fehler wurde als Reaktion wie bisher eine Abschaltung definiert.

Trotz der geringen Anzahl an Fehlern, für die eine Reaktionsstrategie definiert wurde und trotz der bereits vorhandenen Vorteile der Onlinesimulation konnte die Prüflingslaufzeit in diesem Pilotprojekt nochmals signifikant gesteigert werden, s. Abbildung 47.

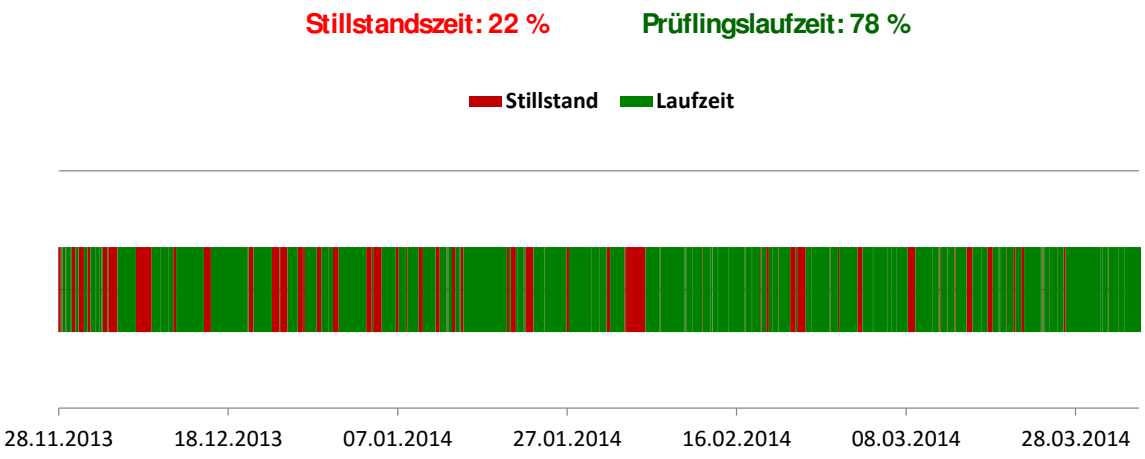


Abbildung 47: Laufzeitauswertung Piloterprobung mit automatisierter Fehlerreaktion

Abbildung 47 zeigt die Laufzeitauswertung des Pilotprüfstandes mit implementiertem Fehlermanager über der Dauerlaufzeit. Wie bereits im obigen Vergleichsbeispiel erwähnt, wurde auch bei dieser Erprobung die Inbetriebnahmephase ausgeklammert. Deutlich zu erkennen sind die häufigen Stillstandphasen zu Beginn des Prüflaufs. Diese sind auf die vermehrten Abschaltungen zurückzuführen, die wiederum in die Fehlermatrizen des Fehlermanagers aufgenommen wurden. Somit konnte die Auslastung des Prüfstandes über der Laufzeit optimiert werden. Insbesondere die Fehlerreaktionen in personalfreier Zeit führen zu einer deutlichen Verbesserung der Effizienz. Die Auslastung des Pilot-Dauerlaufs beträgt 78%. Es konnte nochmals eine deutliche Steigerung der Effizienz im Vergleich zu den bereits beschriebenen Vorteilen der Onlinesimulation erzielt werden.

Die vergleichsweise hohe Prüflingslaufzeit ist auch auf die aufwändige Betreuung des Prüfstandes zurückzuführen. Da es sich hierbei um ein Pilotprojekt handelt, wurde dem genannten Prüfstand besondere Aufmerksamkeit zu Teil. Dies machte sich in der zeitaufwändigen Anpassung der Simulationsmodelle sowie in der permanenten Betreuung des Prüflaufs durch zwei Prüfstandsingenieure bemerkbar.

7.3 Fehlerdatenbank

Ein weiterer Vorteil des Fehlermanagers ist die Anbindung an das bereits vorhandene Erprobungs-Monitoring-System bzw. an die entsprechende Datenbank. Die Entwicklung des Systems zur Fehlerdokumentation ist nicht Teil dieser Arbeit. Die verwendeten Ergebnisse stammen aus einem internen Bericht der Daimler AG (s. [KAR14]).

Alle im Prüflauf aufgetretenen Fehler wurden gemäß ihrer Fehlerkategorie und ihrer Fehlerklasse in der angebundenen Datenbank erfasst und für eine statistische Auswertung aufbereitet. Zu Beginn treten noch nicht erfasste Fehler auf, die als unbekannte Fehler in der Datenbank abgelegt werden. Nach dem ersten Auftreten eines unbekann-

ten Fehlers wird dieser mit einer Codierung entsprechend seiner Fehlerkategorie und seiner Fehlerart versehen und somit in der Datenbank mitgeführt.

Somit wird die Basis für die Fehleranalyse, also die statistische Bewertung über die Auftrittswahrscheinlichkeit eines bestimmten Fehlertyps, geschaffen. Nachfolgend sind Auswertungen auf der Datenbasis des Pilot-Prüflaufs näher ausgeführt.

Im ersten Schritt wird in Abhängigkeit der Laufleistung die Anzahl der Abschaltungen aufgetragen. Die Abschaltungen sind gegliedert in die unterschiedlichen Fehlerkategorien. Abbildung 48 zeigt zu Beginn des Prüflaufs eine hohe Anzahl an Abschaltungen aufgrund von Kommunikationsproblemen. Diese sind auf die pilothafte Anwendung des neuen Systems und auf dessen Integration in die vorhandene Systemarchitektur zurückzuführen. Mit zunehmender Laufleistung konnten diese Fehler jedoch relativ schnell behoben werden. Weiterhin ist ersichtlich, dass etwa zur Mitte des Prüflaufs vermehrt Abschaltungen infolge einer fehlerhaften Ansteuerung der Ölpumpe auftraten. Es konnte nicht der von der Getriebesoftware geforderte Druck aufgebaut werden, was zu einer Grenzwertunterschreitung und demzufolge zu einer Abschaltung führte. Hintergrund war eine Softwareänderung, die negative Auswirkungen auf die Druckansteuerung hatte. Auch dieser Fehler konnte gegen Ende des Prüflaufs weitgehend behoben werden. Die Abschaltungen, die zum Ende des Prüflaufs in Erscheinung traten, sind überwiegend auf Verschleiß und Lebensdauerprobleme zurückzuführen. Insbesondere die Abschaltungen der Drehmoment-Kategorie resultieren aus dem Leistungsabbau des Verbrennungsmotors infolge von Verschleißerscheinungen. Diese Abschaltungen sind jedoch gegen Ende eines kundennahen, dynamischen Dauerlaufs nicht ungewöhnlich. Sie stellen die Spätausfälle aufgrund von Lebensdauerproblemen dar, die aus der Zuverlässigkeitstechnik bekannt sind (vgl. Badewannen-Kurve in [BER04]).

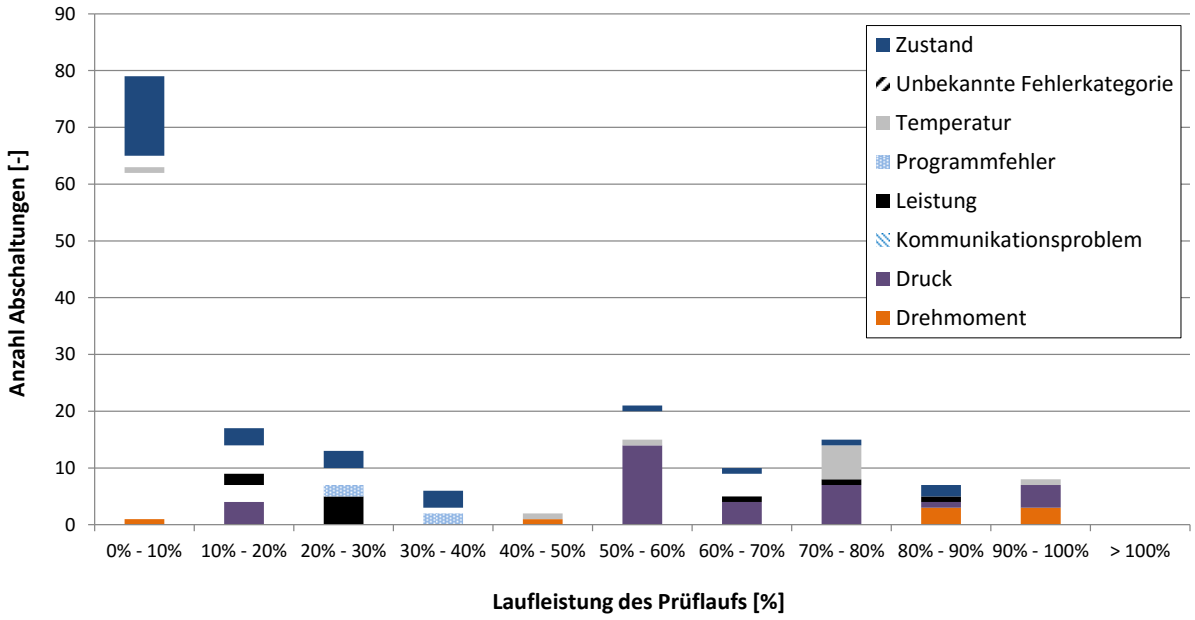


Abbildung 48: Fehleranalyse - Fehler in Abhängigkeit der Laufleistung

In Kapitel 6.4 wurde die Korrelation bestimmter Fehler mit den unterschiedlichen Dauerlaufstrecken diskutiert. Im Folgenden ist dieser Zusammenhang am Beispiel des Pilot-Prüflaufs dargestellt. Abbildung 49 zeigt die Anzahl der aufgetretenen Fehler entsprechend der Fehlerkategorien. Die Anzahl der Fehler pro Kategorie ist auf die einzelnen Dauerlaufstrecken aufgegliedert.

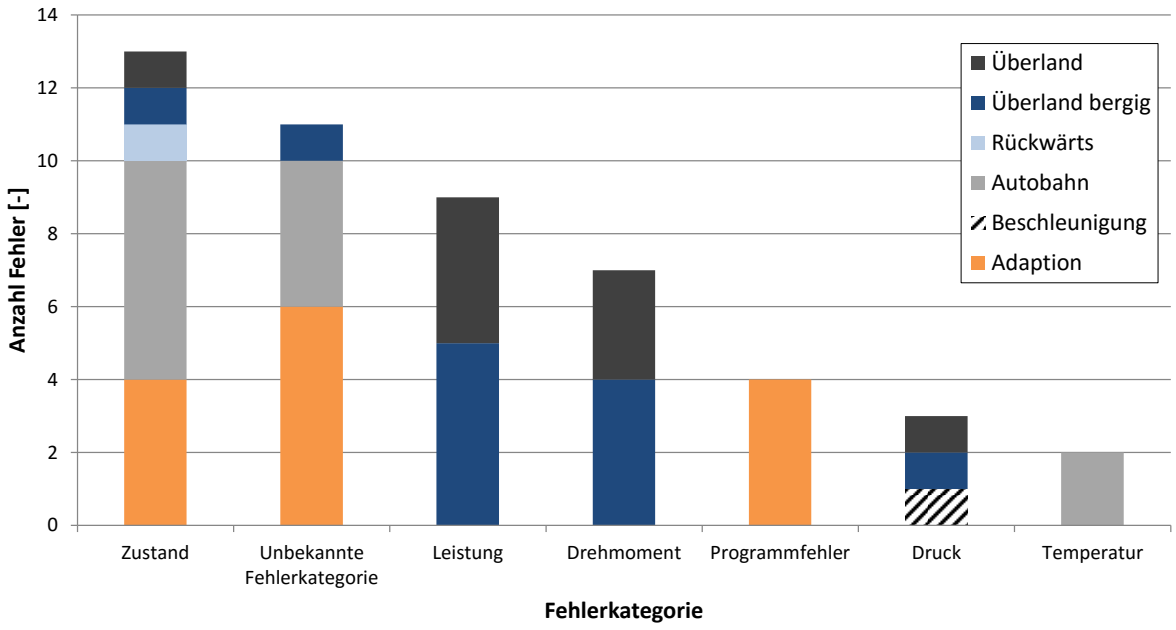


Abbildung 49: Fehleranalyse - Fehler in Abhängigkeit von Kategorie und Strecke

Aufgeführt sind an zweiter Stelle die unbekannten Fehler, die aus der frühen Phase des Prüflaufs stammen. In dieser Phase mussten zunächst alle noch nicht detektierten Fehler in die Datenbasis aufgenommen werden. Nach der Spezifikation der unbekannten Fehler, werden diese entsprechend ihrer Fehlerkategorie und ihrer Fehlerart in der Datenbank korrekt dokumentiert. Außerdem ist mit der Fehlerspezifikation die Basis geschaffen, um eine geeignete Reaktion zuzuordnen.

Es ist weiterhin ersichtlich, dass beispielsweise Leistungs- und Drehmomentfehler vor allem auf den Überlandstrecken auftreten. Die häufigen Lastwechsel sowie die hohen Drehmomentanforderungen bei Anfahrvorgängen an Steigungen führen vermehrt zu dieser Art von Abschaltungen.

Abbildung 50 zeigt eine weitere Aufgliederung der Fehler in die Fehlerarten unabhängig von Fehlerkategorie und Dauerlaufstrecken. Den konkreten Fehlerarten werden in den Fehlermatrizen Reaktionsstrategien zugeordnet. An oberster Stelle sind erneut die Fehler der unbekannten Fehlerart zu finden, die vor der Aufnahme in die Fehlermatrizen zunächst spezifiziert werden müssen. Nach dem Pareto-Prinzip werden häufig auftretende Fehler mit oberster Priorität behandelt. Seltene Fehler führen aufgrund mangelnder Informationen über die Abschaltursachen häufig zu Abschaltungen und Unterbrechungen des Prüflaufs. Die Fehleranalyse entsprechend der Fehlerarten schafft hierfür die Basis.

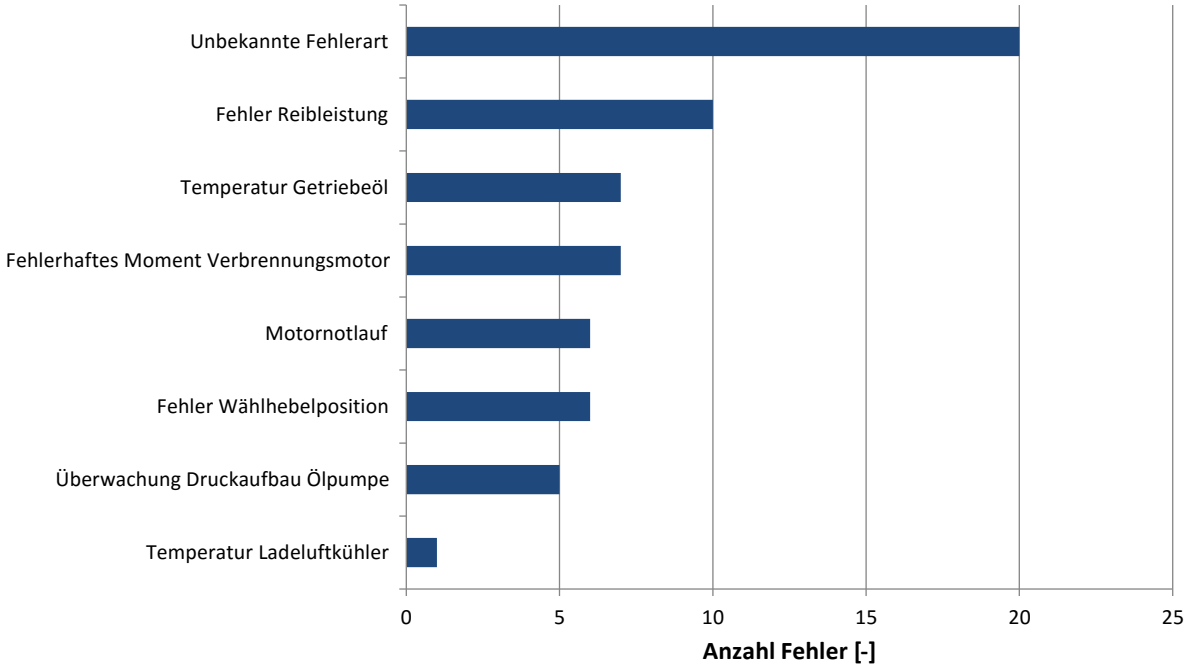


Abbildung 50: Fehleranalyse – Fehlerarten [KAR14]

7.4 Beispiel automatisierte Fehlerreaktion

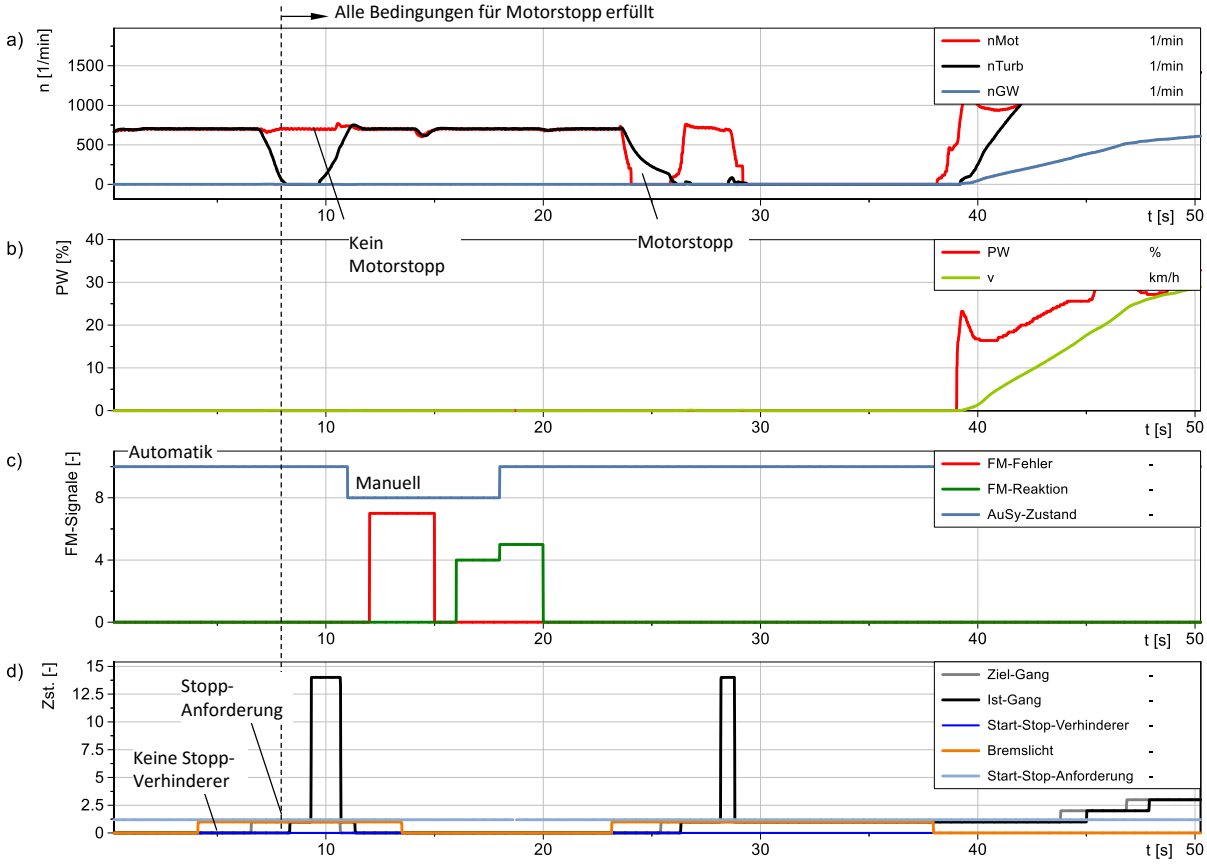
Im Folgenden soll anhand eines Beispiels der Ablauf einer automatisierten Fehlerreaktion im Signalverlauf dargestellt werden. Das Beispiel zeigt eine Reaktion des oben beschriebenen Pilot-Prüflaufs. Es handelt sich um ein kundennahes dynamisches Prüfprogramm.

Das Beispiel beschreibt einen Fehler der Motorsteuerung, der dazu führt, dass im Start-Stop-Betrieb die Anforderung für einen Motor-Stop nicht umgesetzt wird. Für einen Motor-Stop müssen mehrere Anforderungen erfüllt sein. Im ersten Schritt werden die vom Fahrer beeinflussbaren Größen überwacht. Ein Stop wird nur durchgeführt, wenn vom Fahrer keine Fahrleistung angefordert wird, das Fahrpedal also bei 0% steht. Weiterhin ist eine Bremsung notwendig. Das Treten der Betriebsbremse wird überwacht, indem einerseits das Bremslicht-Bit überprüft wird, andererseits muss das anliegende Bremsmoment einen gewissen Grenzwert überschreiten. Sind diese Kriterien erfüllt werden weitere Überprüfungen durch die Software durchgeführt. Beispielsweise hat die aktuelle Temperatur des Motoröls sowie des Kühlwassers einen Einfluss auf das Start-Stop-Verhalten. Bei zu hohen Temperaturen muss der Motor weiter betrieben werden, um die Wasserpumpe des Fahrzeugs für die Kühlung am Laufen zu halten. Auch weitere Temperaturen des Verbrennungsmotors müssen sich in einem definierten Bereich befinden, damit ein Motor-Stop zulässig ist. Wenn alle Bedingungen erfüllt sind, wird vom Steuergerät eine entsprechende Anforderung gesendet und der Verbrennungsmotor stoppt. Sollte auch nur eines der beschriebenen Kriterien nicht erfüllt sein, wird ein Start-Stop-Verhinderer-Signal gesetzt, das den entsprechenden Stop-Vorgang des Verbrenners verhindert. Im vorliegenden Fall sind alle genannten Bedingungen erfüllt und die Anfor-

derung für den Start-Stop-Betrieb wird gesendet, dennoch wird kein Motor-Stop durchgeführt.

In Abbildung 51 sind verschiedene Teilfenster aufgetragen. Teilfenster a) zeigt die Drehzahlen des Verbrennungsmotors *nMot*, die Turbinendrehzahl am Getriebeeingang *nTurb* sowie die Drehzahl der Gelenkwelle am Getriebeabtrieb *nGW*. In Teilfenster b) sind der Pedalwert *PW* sowie die aktuelle Fahrgeschwindigkeit *v* dargestellt. Teilfenster c) zeigt die Zustandssignale des Prüfstands sowie des Fehlermanagers. Dargestellt sind der Prüflaufzustand des Automatisierungssystems *AuSy-Zustand*, der anliegende Fehler *FM-Fehler* sowie die gewählte Reaktion des Fehlermanagers *FM-Reaktion*. Im Teilfenster d) sind schließlich weitere Zustände des Prüflings dargestellt. Es sind der *Ziel-Gang* sowie der *Ist-Gang* des Getriebes, das Signal für die *Start-Stop-Verhinderer*, das *Bremslicht* sowie die *Start-Stop-Anforderung* jeweils über der Zeit aufgetragen.

Bei ca. 10s auf der Zeitachse ist in Teilfenster d) zu erkennen, dass eine Stop-Anforderung gesendet wird und gleichzeitig das Signal für die Start-Stop-Verhinderung auf 0 steht. Das Getriebe befindet sich zu diesem Zeitpunkt in der Fahrstellung D bei eingelegtem erstem Gang. Trotz der Anforderung erfolgt kein Motor-Stop, was an der konstant auf Leerlauf bleibenden Motordrehzahl (rot) in Teilfenster a) zu erkennen ist.



nMot	1/min	Drehzahl Verbrennungsmotor
nTurb	1/min	Drehzahl Getriebeeingang
nGW	1/min	Drehzahl Gelenkwelle / Getriebeabtrieb
PW	%	Pedalwert

v	km/h	Fahrzeuggeschwindigkeit
FM-Fehler	-	Fehlersignal des Fehlermanagers
FM-Reaktion	-	Reaktionssignal des Fehlermanager
AuSy-Zustand	-	Zustandssignal des Automatisierungssystems
Ziel-Gang	-	Ziel-Gang des Getriebes
Ist-Gang	-	Ist-Gang des Getriebes
Start-Stop-Verhinderer	-	Verhinderung der Start-Stop-Funktion
Bremslicht	-	Bremslicht-Bit
Start-Stop-Anforderung	-	Anforderungssignal für Start-Stop-Funktion

Abbildung 51: Exemplarische Fehlerreaktion bei Start-Stop-Fehler
a) Drehzahlen
b) Pedalwert und Fahrzeuggeschwindigkeit
c) Fehlermanager-Signale
d) Start-Stop-spezifische Signale

Das Start-Stop-Verhalten des Verbrennungsmotors wird im Automatisierungssystem überwacht. Entsprechend wechselt der Zustand des Automatisierungssystems (AuSy-Zustand) nach nicht erfolgtem Motor-Stop vom Automatik-Zustand (9) in den manuellen Zustand (8), s. Teilfenster b) in Abbildung 51. Dieser Wechsel wird immer im Fehlerfall ausgeführt. Somit wird verhindert, dass eventuelle Sollwerte des Sollwertvorgabesystems den Prüfling gefährden. Im Fehlerfall übernimmt das Automatisierungssystem die Sollwertvorgabe. Der Prüfling wird über einen definierten Drehzahlgradienten bis zum Stillstand gerampt und in einen lastfreien Zustand versetzt. Da der Prüfling im vorliegenden Fall bereits steht und 0% Pedalwert vorgegeben werden, entfällt dieser Schritt. Der Wechsel in den manuellen Modus ist in Teilfenster b) bei ca. 11 s erkennbar.

Anschließend wird eine Offline-Reaktion (vgl. Kapitel 6.2.2) durchgeführt. Zunächst wird der anliegende Fehler vom Automatisierungssystem detektiert und ein entsprechendes Fehlersignal *FM-Fehler* an das Sollwertvorgabesystem bzw. an den dort implementierten Fehlermanager gesendet. Im vorliegenden Fall ist der Start-Stop-Fehler mit der Fehlernummer 7 codiert, s. Teilfenster c). Zur besseren Darstellung wird an dieser Stelle auf die weitere Unterteilung in Fehlerkategorie und Fehlerart verzichtet. Nach der Übermittlung des Fehlers wird im Fehlermanager geprüft, ob es sich um einen kritischen Fehler handelt. Da im vorliegenden Fall der Fehler bekannt war und bereits aufgetreten ist, konnte in Abstimmung mit der entsprechenden Fachabteilung der Fehler als unkritisch eingestuft werden. Weiterhin wird nach einer geeigneten Fehlerreaktionsstrategie in den Fehlermatrizen gesucht. Hier ist die einfachste aller Fehlerreaktionen hinterlegt: das einfache Wiederaufsetzen des Prüflaufs und die Fortsetzung des Dauerlaufs.

Die Fehlerreaktion beinhaltet demnach zwei Schritte. Im ersten Schritt muss das Automatisierungssystem wieder in den Automatik-Modus versetzt werden, so dass Sollwerte vom Sollwertvorgabesystem akzeptiert werden. Im zweiten Schritt wird der Prüflauf an der Stelle wiederaufgesetzt, an der aufgrund des Fehlers abgeschaltet wurde. Diese beiden vom Fehlermanager gesendeten Reaktionen sind im Signal *FM-Reaktion* im Teilfens-

ter c) zu erkennen. Das Reaktionssignal nimmt zunächst den Wert 4 an. Dadurch wird im Automatisierungssystem der Automatikmodus angefordert, d.h. das System erwartet die Sollwerte zur Ansteuerung von Prüfling und E-Maschinen vom Sollwertvorgabesystem. Der Wechsel in den Automatikmodus wird vom Automatisierungssystem quittiert (nicht in Abbildung 51 dargestellt). Anschließend springt das Reaktionssignal auf den Wert 5 und triggert somit die Fortsetzung des Prüflaufs an der Stelle, an der zuvor abgestellt wurde.

Der Kommunikationsablauf zwischen Automatisierungssystem und Fehlermanager ist in Abbildung 39 dargestellt. Der beschriebene Kommunikationsverlauf bezieht sich auf das hier genannte Beispiel. Die genannte Reaktionsstrategie des einfachen Wiederaufsetzens beinhaltet die Fehlerdetektion und somit die Beschreibung des aufgetretenen Fehlers, die Anforderung des Automatikmodus vom Automatisierungssystem, die Quittierung dieser Anforderung nach dem Wechsel in den Automatikmodus sowie die Fortsetzung des Prüflaufs.

Bei ca. 28s wird erneut eine Stop-Anforderung an den Verbrennungsmotor gesendet, ohne dass entsprechende Verhinderer aktiv wären. Im Teilfenster a) ist zu erkennen, dass in diesem Fall der Motor, wie gefordert stoppt (Motordrehzahl fällt auf 0 ab). Der Motor startet wieder mit der Anforderung einer Fahrleistung. In Teilfenster b) ist der entsprechende Fahrerwunsch anhand des Pedalwerts PW dargestellt. Mit dem Fahrerwunsch startet der Motor und der Prüfling setzt sich in Bewegung, erkennbar an der Fahrgeschwindigkeit v, ebenfalls in Teilfenster b).

7.5 Detailauswertung Laufzeit

Die Laufzeitauswertung des Pilot-Prüflaufs zeigt in Summe eine deutliche Steigerung der Erprobungseffizienz durch Minimierung der unnötigen Stillstandszeiten. Im Folgenden wird eine Detailauswertung eines Prüflaufs mit aktiviertem Fehlermanager über einen Zeitraum von 4 Wochen beschrieben. Es handelt sich um einen weiteren Pilot-Prüflauf mit automatisierter Fehlerreaktion jedoch auf einem anderen Prüfstand. Erneut wurde ein kundennaher, dynamischer Prüflauf gewählt.

Beim untersuchten Prüfling handelt es sich um einen Aufbau mit 6-Zylinder Dieselmotor und einem 9-Gang Automatgetriebe in Planetenbauweise. Details zum Aufbau können in Tabelle 15 im Anhang A nachgeschlagen werden.

Abbildung 52 zeigt auf oberster Ebene die geschätzte Anwesenheitszeit des Fachpersonals (Prüfingenieur) über den genannten Zeitraum von vier Wochen. Die rot schraffierten Flächen stellen die Abwesenheitszeiten dar, die grün gepunkteten Flächen die geschätzten Anwesenheitszeiten. Deutlich zu erkennen sind die längeren Abwesenheitszeiten an den Wochenenden sowie die kürzeren Abwesenheitszeiten über Nacht.

Im mittleren Bereich der Abbildung ist wie in Abbildung 46 und Abbildung 47 die Laufzeit (grün) und die Stillstandszeit (rot) des Prüflings dargestellt. Die Laufzeitdarstellung ist in Abbildung 52 ergänzt durch Kommentare zu bestimmten Stillstandszeiten.

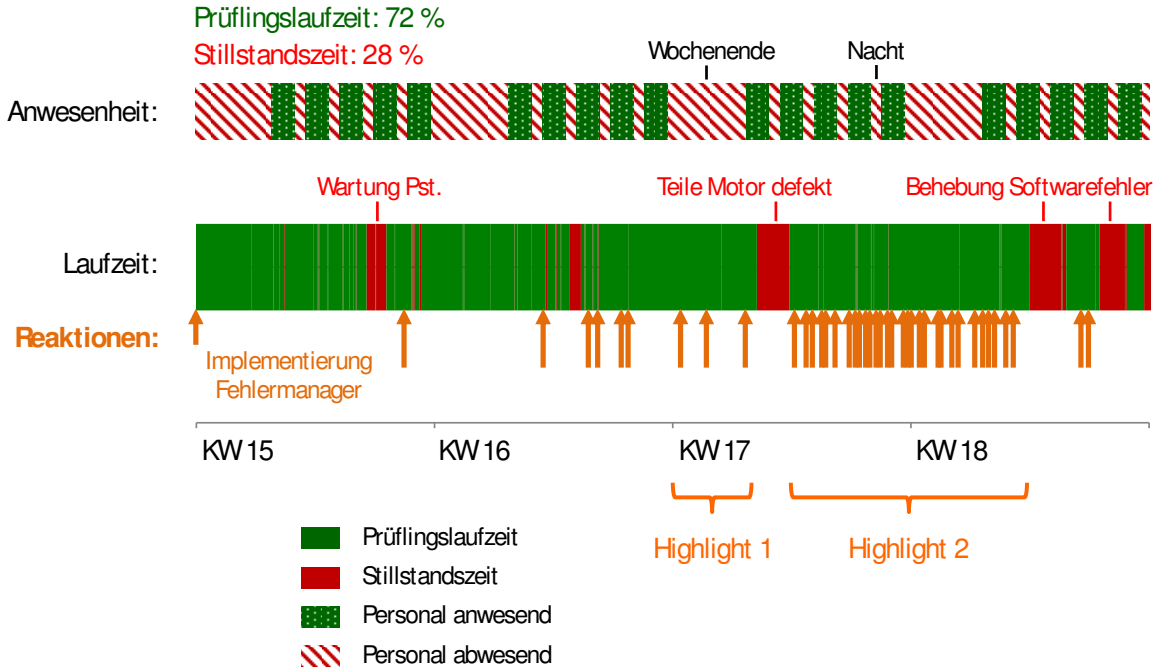


Abbildung 52: Detailauswertung Prüflaufzeit mit Fehlerreaktionen

Der untere Bereich der Abbildung zeigt anhand der orangenen Pfeile den Eingriff des Fehlermanagers in den Prüflauf durch automatisierte Fehlerreaktionen. Jede Reaktion ist durch einen Pfeil gekennzeichnet.

Zu Beginn der Laufzeitauswertung wurde der Fehlermanager am Prüfstand implementiert und die bereits aufgenommenen und spezifizierten Fehler in die entsprechenden Fehlermatrizen übertragen. Nach der Inbetriebnahme des Fehlermanagers traten bereits nach kurzer Zeit mehrere automatisierte Fehlerreaktionen auf. Die erste etwas länger andauernde Stillstandszeit trat gegen Ende der KW 15 auf. In diesem Zeitraum mussten Wartungsarbeiten am Prüfstand durchgeführt werden, weshalb der Prüflauf unterbrochen wurde. Die weiteren kürzeren Stillstandszeiten, die nicht näher kommentiert sind, resultieren aus Abschaltungen, die als kritisch eingestuft wurden und daher nicht zu einer automatisierten Prüflauffortsetzung führten, sondern einer manuellen Fehlerbehebung bedurften. In Abbildung 52 sind außerdem zwei Zeitbereiche als Highlight hervorgehoben, die im Folgenden näher beschrieben werden.

Der mit „Highlight 1“ umschriebene Zeitbereich umfasst drei Fehlerreaktionen in personalfreier Zeit am Wochenende. Die zugrunde liegenden Fehler wurden als unkritisch eingestuft. Somit konnte eine automatisierte Fehlerreaktion durchgeführt und der Prüflauf in allen drei Fällen wieder aufgesetzt werden. Die gesamte Laufzeit seit der ersten Fehlerreaktion bis zum Beginn der Frühschicht am darauf folgenden Montag ist demnach auf die automatisierte Fehlerreaktion zurückzuführen. Der Zeitraum vom Ende der

Spätschicht bis zur ersten Reaktion umfasst ca. 3,5 Stunden. Die Abwesenheitszeit am Wochenende beträgt 56 Stunden. Durch die automatisierte Fehlerreaktion konnte die Prüflingslaufzeit auf den gesamten personalfreien Zeitraum von 56 Stunden erweitert werden. Ohne automatisierte Fehlerreaktion wäre der Prüflauf nach den genannten 3,5 Stunden unterbrochen worden. Somit ergibt sich im Vergleich für den Zeitraum des genannten Wochenendes eine fiktive Prüfstandsauslastung von

$$\frac{3{,}5\ \text{Stunden}}{56\ \text{Stunden}} \cdot 100\% = 6{,}25\%$$

ohne automatisierte Fehlerreaktion im Vergleich zu einer Laufleistung von

$$\frac{56\ \text{Stunden}}{56\ \text{Stunden}} \cdot 100\% = 100\%$$

mit aktiviertem Fehlermanager und automatisierter Fehlerreaktion.

Der als „Highlight 2“ gekennzeichnete Zeitraum umfasst ca. 30 automatisierte Fehlerreaktionen in einem sehr kurzen Zeitraum von fünf Tagen. Die den Reaktionen zugrunde liegenden Fehler sind fast ausschließlich auf das in Kapitel 7.4 beschriebene Softwareproblem des Start-Stop-Betriebs zurückzuführen. Durch die vielen Reaktionen konnte bereits nach kurzer Zeit eine statistische Grundlage für die Fehleranalyse geschaffen werden. Der vermehrt auftretende Start-Stop-Fehler ließ eine Fehlfunktion des Verbrennungsmotors vermuten. Nach den genannten fünf Tagen wurde eine ausführliche Signalanalyse mit dem entsprechenden Fachbereich durchgeführt und ein Softwarefehler im Motorsteuergerät identifiziert. Dieser wurde umgehend behoben. Nach der Erstellung eines neuen Softwarestandes wurde der Prüflauf zunächst fortgesetzt. Da jedoch nach kurzer Zeit der Fehler erneut auftrat, mussten weitere Verbesserungen vorgenommen werden. Das erneute Auftreten des Fehlers ist an den beiden Fehlerreaktionen gegen Ende der KW18 in Abbildung 52 erkennbar. Die zweite Verbesserung des Softwarestandes konnte schließlich den Start-Stop-Fehler vollständig beheben und der Prüflauf wurde fortgesetzt. Die schnelle Erkenntnis, dass es sich bei dem genannten Fehlertyp um einen gravierenderen Softwarefehler handelt, trat bereits nach sehr kurzer Zeit ein. Die Grundlage für diese Erkenntnis lieferten die vermehrten automatisierten Reaktionen sowie deren ausführliche, statistische Dokumentation. Ohne Fehlermanager wäre der Prüflauf zunächst manuell wieder aufgesetzt worden. Der Zeitraum bis zur Erkenntnis, dass die tatsächliche Notwendigkeit zur Fehlerbehebung besteht, hätte sich durch die zusätzlichen Stillstandszeiten, insbesondere in der personalfreien Zeit am Wochenende, deutlich verlängert.

7.6 Lastbewertung

In diesem Unterkapitel werden die im Pilot-Prüflauf (vgl. Kapitel 7.2, Abbildung 47) erzielten Lasten näher betrachtet. Wie bereits erwähnt, steht bei den dynamischen Dauer-

laufprogrammen die Erzielung der geforderten Lastkollektive an erster Stelle für eine valide und aussagekräftige Erprobung.

Die Gefahr, einer Beeinflussung der Lastkollektive tritt insbesondere bei den in Kapitel 6.2.1 beschriebenen Online-Reaktionen auf. Allerdings können auch bestimmte Offline-Reaktionen bzw. die vermehrte Durchführung bestimmter Offline-Reaktionen zu einer Reduktion der geforderten Lasten führen. Wenn beispielsweise bei Überlasten auf einer bestimmten Dauerlaufstrecke als Reaktion diese Strecke übersprungen wird, um Laufzeit zu generieren, werden die eingeprägten Lasten im Prüfling entscheidend beeinflusst. Um eine derartige Beeinflussung zu verhindern, müssen in regelmäßigen Abständen Lastanalysen zur Kontrolle der Lastkollektive durchgeführt werden.

Die Berechnung der Lasten erfolgt bei dynamischen Prüfprogrammen mit Hilfe von Klassierverfahren und darauf aufbauend entsprechenden Schädigungsrechnungen (vgl. Kapitel 2.5). Für die Lastbewertung wurden die schädigungsrelevanten Signale in Abhängigkeit der Dauerlaufstrecken klassiert und eine mechanische Schädigung aus Überrollung an zwei zentralen Positionen im Antriebstrang berechnet:

- an der Turbine (Getriebeantrieb) sowie
- an der Gelenkwelle (Getriebeabtrieb).

Die Berechnung einer Schädigung aus Überrollung ist in Kapitel 3.4.4 näher beschrieben.

Abbildung 53 zeigt die Ergebnisse der Schädigungsrechnung für jede Dauerlaufstrecke. In der ersten Zeile im Teilfenster a) sind die Überrollungsschädigungen für den Verbrennungsmotor, also am Getriebeeingang, dargestellt. Teilfenster b) zeigt die Schädigungen an der Gelenkwelle, also am Getriebeabtrieb. Die Schädigung ist jeweils über der Laufstrecke der einzelnen Dauerlaufstrecken aufgetragen. In rot ist das Referenzkollektiv aus der Simulation dargestellt. Mit Hilfe verschiedener Regressionsrechnungen kann die Ziel-Schädigung für einen bestimmten Fahrzeugaufbau bestimmt werden (vgl. Ullmann [ULL86]). Die Simulationsrechnung wird anschließend auf exakt diese Ziel-Schädigung abgestimmt und dient als Referenz für die im Dauerlauf erzielte Ist-Schädigung. Die Ist-Schädigungen für die Dauerlaufstrecken sind in Abbildung 53 in den Grau-Tönen dargestellt. Es wurden jeweils drei verschiedene Streckenprofile aus dem gesamten Dauerlauf ausgewertet. Das mit „Prüflauf 1“ gekennzeichnete Profil wurde zu Beginn des Dauerlaufs aufgenommen, das Profil des „Prüflauf 2“ stammt aus der Mitte des Dauerlaufs und die Auswertung „Prüflauf 3“ beschreibt eine Strecke zum Ende des Dauerlaufs. Auf diese Weise kann ein Einfluss auf die Lasten in Abhängigkeit der Laufleistung der Prüflinge ermittelt werden.

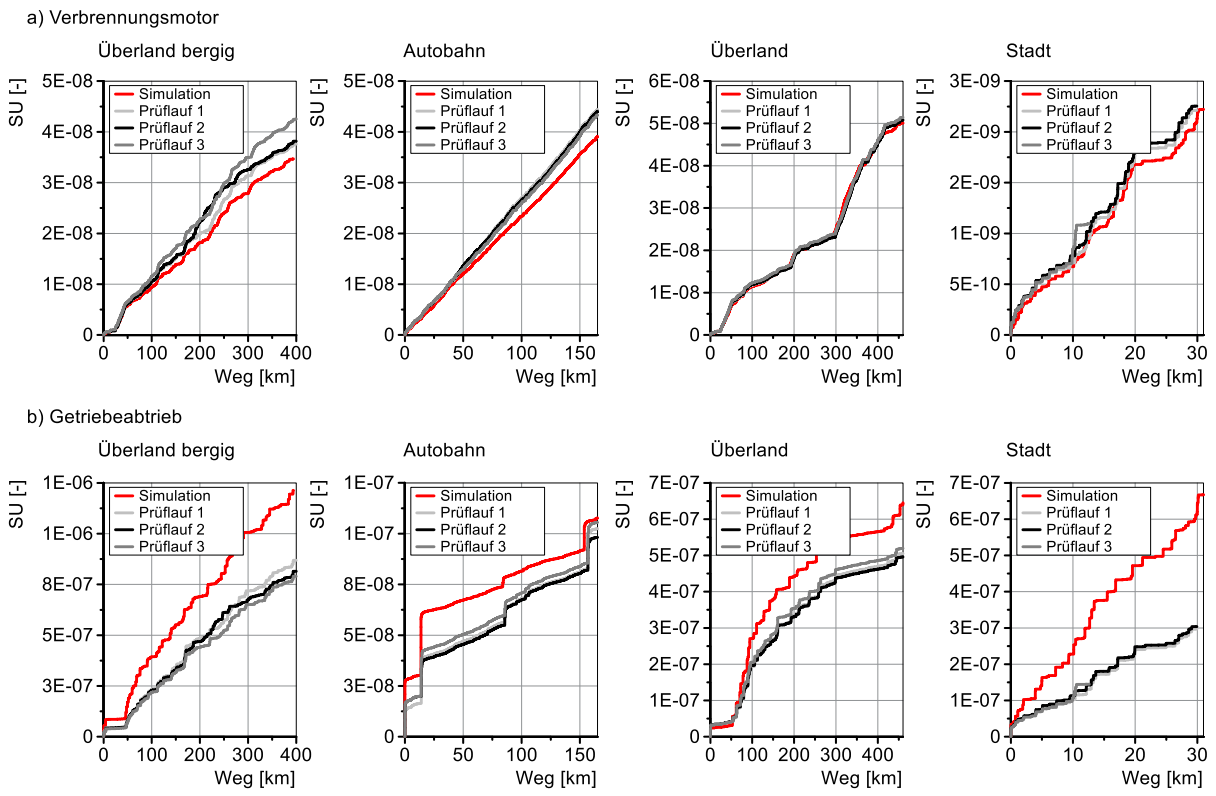


Abbildung 53: Streckenabhängige Lastbewertung
a) Mechanische Schädigung aus Überrollung an der Kurbelwelle
b) Mechanische Schädigung aus Überrollung am Getriebeabtrieb

Zunächst ist in Abbildung 53 eine sehr geringe Streuung der Ist-Schädigungen aus dem Prüflauf zu erkennen. Dies lässt darauf schließen, dass der Einfluss der Laufleistung der Prüflinge vernachlässigbar klein ist. Im Vergleich mit der Simulation ergeben sich bereits größere Unterschiede.

Bei der Schädigungsrechnung ist jedoch zu berücksichtigen, dass bereits kleinere Abweichungen zu einer deutlich höheren bzw. niedrigeren Schädigung führen können. Aus diesem Grund wird für die Bewertung der Ist-Schädigung im Vergleich zur Ziel-Schädigung eine Toleranz von ± 50 % angegeben.

Die geforderten Lasten mit der angegebenen Toleranz werden auf nahezu allen Dauerlaufstrecken erfüllt. Lediglich in der Stadtstrecke sind am Getriebeabtrieb niedrigere Ist-Schädigungen im Vergleich zum Referenzkollektiv zu verzeichnen. Diese sind jedoch auf eine geänderte Schaltstrategie im Getriebesteuergerät zurückzuführen, welche im Modell nicht berücksichtigt wurde. Da die Simulationsdaten, die die Grundlage für das Referenzkollektiv bilden, deutlich vor Beginn der eigentlichen Erprobung erzeugt werden, müssen für die Erstellung des Antriebstrangmodells bestimmte Annahmen getroffen werden. Eine dieser Annahmen betrifft die im Getriebesteuergerät hinterlegten Schaltkennlinien. Durch die Schaltkennlinien wird festgelegt, bei welcher Last und welcher Drehzahl das Getriebe in einen bestimmten Gang schaltet. Weicht nun das tatsächlich hinterlegte Schaltprogramm während des Dauerlaufs von den Schaltkennlinien im Simu-

lationsmodell ab, verschieben sich entsprechend die Ganganteile. Im vorliegenden Fall führt die geänderte Schaltstrategie dazu, dass die niedrigen Gänge mit den hohen Übersetzungen weniger häufig verwendet werden, als in der Simulation angenommen. Diese Verschiebung hat insbesondere auf der Stadtstrecke große Auswirkungen, da nahezu alle Fahranteile in den niedrigeren Gängen bei geringen Geschwindigkeiten erfolgen. Durch die fehlenden Rückschaltungen und die sich daraus ergebenden hohen Momente kann es zu entsprechenden Lastreduktionen kommen, wie sie in Abbildung 53, Teilabschnitt b) erkennbar sind.

In Summe wurden die geforderten Lasten sehr gut getroffen und das Erprobungsziel innerhalb der zulässigen Toleranz bezogen auf die Zielschädigung erfüllt. Bei der kundennahen, dynamischen Erprobung wurden die gewünschten Lastkollektive erzielt und gleichzeitig durch die automatisierte Fehlerreaktion die Stillstandszeiten während des Prüflaufs deutlich reduziert.

7.7 Bewertung der Testfälle

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass mit Hilfe des Fehlermanagers die Auslastung von Prüfständen signifikant gesteigert werden kann. Durch die automatisierte Fehlerreaktion werden bei bekannten Fehlern Reaktionsstrategien zur Fehlerbehebung und Fortsetzung des Prüflaufs angewandt. Diese können von einfachen Fehlerreaktionen wie dem Wiederaufsetzen des Prüflaufs bis hin zu komplexen Adaptionsläufen für die Schaltglieder von Automatgetrieben reichen. Die Fehlerreaktion richtet sich dabei nach dem realen Fehlerreaktionsverhalten eines Testfahrers im Dauerlauf auf der Straße.

Durch die automatisierte Fehlerreaktion wird aufgrund von umfangreichen Überwachungen die Qualität des Prüflaufs nicht beeinträchtig. Die angestellte Lastbewertung zeigt, dass trotz automatisierter Fehlerreaktionen das Erprobungsziel hinsichtlich der zu erzielenden Lasten erfüllt wurde.

An dieser Stelle soll neben den gezeigten Vorteilen des Fehlermanagers hinsichtlich Effizienzsteigerung von Dauererprobungen auf Prüfständen auch eine kritische Betrachtung erfolgen.

Zunächst lässt sich festhalten, dass für die Inbetriebnahme eines Prüflaufs ein erhöhter Zeitaufwand benötigt wird. Hintergrund ist die Parametrierung des Fehlermanagers, die zusätzlich zu den sonstigen Inbetriebnahmetätigkeiten wie beispielsweise der Konfiguration des Messsystems, der Anpassung der Grenzwerte oder der Parametrierung des Sollwertvorgabesystems erfolgen muss. Zur Parametrierung des Fehlermanagers zählt im Wesentlichen die Erstellung der Entscheidungsmatrix, also die Zuordnung von Reaktionsstrategien zu bereits bekannten, unkritischen Fehlern. Neben der Zuordnung in einer Matrix muss wie bereits beschrieben mit Hilfe einer Fehleranalyse sowie dem empirischen Erfahrungswissen des zuständigen Prüfstandsingenieuers eine Liste von bekannten und unkritischen Fehlern erstellt werden. Diesen muss anschließend, ebenfalls

unter Zuhilfenahme des Erfahrungswissens eine geeignete Reaktionsstrategie zugeordnet oder diese im Bedarfsfall aus Einzelreaktionen generiert werden.

Außerdem bedarf ein Prüflauf mit implementiertem Fehlermanager eines höheren Betreuungsaufwandes. Hintergrund sind die kontinuierliche Anpassung der Entscheidungsmatrix, um auf neue Fehler reagieren zu können sowie der erhöhte zeitliche Aufwand zur Betreuung eines zusätzlichen Systems. Die Erweiterung der Prüfstandsarchitektur um ein weiteres System führt zu einer erhöhten Fehleranfälligkeit des Gesamtverbundes der Vorgabesysteme. Wie in Kapitel 2.2.3 beschrieben besteht dieser Verbund aus einem Sollwertvorgabesystem, das an das Automatisierungssystem angebunden ist, und aus einer Software zur Antriebstrangsimulation, die die Sollwerte in Echtzeit generiert und zur Vorgabe bereit stellt. Dieser Verbund wird durch den Fehlermanager ergänzt. Durch das zusätzliche System, die zugehörigen Schnittstellen sowie die benötigten Kommunikationswege auch zu anderen Systemen wird die Komplexität des Verbunds zur Sollwertvorgabe erhöht, was in einem höheren Betreuungsaufwand resultiert.

Für die Fehleranalyse muss ebenfalls ein erhöhter Aufwand betrieben werden. Diese unterscheidet sich bei Prüfläufen mit aktiviertem Fehlermanager wesentlich von Prüfläufen mit konventioneller Vorgabe durch Onlinesimulation. Während bei konventionellen Prüfläufen noch jeder Fehler zu einer Abschaltung führt, die gesondert betrachtet analysiert wird, findet bei Prüfläufen mit Fehlermanager die Fehleranalyse bestimmter Fehler erst im Nachhinein statt. Da bei bekannten, unkritischen Fehlern eine automatisierte Fehlerreaktion erfolgt, muss anhand der Fehlerdokumentation nachträglich entschieden werden, ob beispielsweise die Häufung eines bestimmten Fehlers doch genauer untersucht werden muss, vgl. Detailauswertung zur Laufzeit (Kapitel 7.5).

Diese angeführten Nachteile stehen den beschriebenen Vorteilen hinsichtlich Effizienzsteigerung durch Laufzeiterhöhung gegenüber. In Summe überwiegen jedoch die Vorteile, die durch eine Verkürzung der Prüfzeiten schneller zu repräsentativen Erprobungsergebnissen und somit zu einer Verkürzung der Entwicklungszeit und zu einer Senkung von Entwicklungskosten führen.

Nachfolgend werden in der Schlussbetrachtung die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst und ein kurzer Ausblick über weitere Forschungsinhalte skizziert.

8 Schlussbetrachtung

Die vorliegende Arbeit beschreibt eine unterstützende Erprobungsmethode zur Steigerung der Effizienz bei der Dauererprobung von Antriebsträngen auf Prüfständen. Im Folgenden werden die Ergebnisse zusammengefasst und diskutiert sowie ein Ausblick auf weitere Entwicklungsfelder gegeben.

8.1 Zusammenfassung

Die Versuchsmethodik wurde analog der Technologie von Antrieben im Fahrzeug seit der Erfindung des Automobils kontinuierlich weiterentwickelt und verbessert. Während zu Beginn noch einfache Werkstoffbetrachtungen im Fokus der Versuchsmethodik standen, wurden im Laufe der Zeit immer komplexere Prüfstände und Prüfmethoden zur systematischen Erprobung von Funktion und Dauerhaltbarkeit entwickelt. Somit konnte ein Teil der Fahrversuche auf den Prüfstand verlagert werden. Mit der zusätzlichen Möglichkeit zur Streckensimulation entstand ein weiteres Standbein bei der Erprobung von Antriebsträngen. Die Simulation unterstützt einerseits die Prüfstandserprobung, beispielsweise durch die Generierung von Sollwerten, und übernimmt andererseits Teile der Versuchsumfänge vom Prüfstand oder sogar aus den Straßenversuchen, beispielsweise bei der Abschätzung von Auslegungs-Kollektiven.

Durch die stetige Weiterentwicklung bei der Topologie von Antriebsträngen sowie durch die Einführung von Steuergeräten als zusätzliche Antriebstrangkomponente steigen auch die Anforderungen an die Versuchsmethodik. Das Zusammenspiel zustandsgesteuerter Aggregate führt zu komplexeren Erprobungsumfängen und demzufolge zu vermehrten Abschaltungen und Stillstandszeiten bei der Antriebstrangerprobung auf Prüfständen sowie zu Fehlern und Problemen im Straßenversuch, wie in dieser Arbeit aufgezeigt wurde. Eine weitere Dimension zur Steigerung der Anforderungen bei Prüfstandserprobung tritt durch die Zunahme von Fahrzeugvarianten zu Tage.

Diese steigende Variantenvielfalt, die immer kürzer werdenden Entwicklungszyklen sowie die Komplexität sowohl der Antriebstränge als auch der Prüfaufgabe bedingen zwingend effiziente Methoden zur Funktions- und Dauerhaltbarkeitserprobung. Mit dem Fehlermanager, einem System zur automatisierten Fehleranalyse und Fehlerreaktion, wurde eine effiziente Erprobungsmethode entwickelt und vorgestellt.

Die erzielten Ergebnisse werden nachfolgen erläutert und diskutiert.

8.2 Ergebnisdiskussion

Im ersten Teil der Arbeit wird eine durchgängige Versuchsmethodik skizziert, die während des gesamten Erprobungsprozesses unterstützend angewandt werden kann. Zu-

nächst wurde eine allgemeine Vorgehensweise im Versuch definiert. Diese besteht aus den Einzelprozessschritten: Planung, Vorbereitung, Durchführung und Auswertung. Die Versuchsmethodik selbst kann ebenfalls gegliedert werden in die Planungsmethoden, die Erprobungsmethoden, die Applikationsmethoden sowie die Auswertemethoden. Angewandt werden die einzelnen Methoden jeweils auf drei Ebenen: in der Simulation, auf Prüfständen sowie im realen Fahrversuch. In frühen Entwicklungschargen erfolgen Auslegungsrechnungen und erste Abschätzungen auf der Anwendungsebene der Simulation. Mit der Fertigung erster Prototypen beginnt der Hardwareversuch bezüglich Dauerhaltbarkeit und Absicherung der Funktionalität. Die zugehörige Anwendungsebene ist die Prüfstandserprobung. Abschließend für die Validierung durchgeführter Applikationsaufgaben sowie zur Bestätigung der Dauerhaltbarkeitserprobung erfolgt der reale Fahrversuch auf der Straße.

Eingegliedert in den Erprobungsprozess werden anschließend zwei unterschiedliche Möglichkeiten zur Vorgabe von Sollwerten bei der Prüfstandsdauererprobung erläutert. Die Generierung von Vorgabewerten ist Teil der Versuchsvorbereitung im Gesamtprozess des Versuchs. Es wurden die Vorteile der Onlinesimulation gegenüber der Bandvorgabe erarbeitet und das für die Simulation verwendete Antriebstrangmodell hinsichtlich seiner Modellgüte mit Hilfe von Straßenmessungen validiert.

Anschließend wird eine neue Erprobungsmethode aus der skizzierten Versuchsmethodik entwickelt, die zur Effizienzsteigerung in der Antriebstrangerprobung sowie zur Qualitätssteigerung der Prüfergebnisse führen soll. Es handelt sich um die Methode zur automatisierten Fehlerreaktion.

Ausgangspunkt für die automatisierte Fehlerreaktion ist eine umfangreiche und systematische Analyse von bekannten, in der Vergangenheit aufgetretenen Fehlern sowie von Fehlerpotentialen bei unbekannten Fehlerquellen. Die Fehleranalyse wurde demnach in zwei Schritten durchgeführt. Im ersten Schritt wurden empirisch alle Fehler in der Antriebstrangerprobung auf Prüfständen ermittelt, kategorisiert und in Klassen eingeteilt. Somit konnte auf statistischer Basis eine Aussage über die Häufigkeit bestimmter Fehlerklassen getroffen werden. Im zweiten Schritt wurde auf analytischem Wege mit Hilfe einer Korrelationsanalyse das Potential von Fehlern ermittelt und quantitativ bewertet. Zusätzlich wird jeder in der Antriebstrangerprobung auftretende Fehler bezüglich seiner Kritikalität im Hinblick auf Bauteilsicherheit und Entwicklungsrelevanz quantisiert. Somit ist durch die eindeutige Beschreibung der Fehlerbilder die Basis für die automatisierte Fehlerreaktion geschaffen.

Die automatisierte Fehlerreaktion selbst beginnt mit der Fehleranalyse, also der eindeutigen Identifikation des aktuell im Prüflauf aufgetretenen Fehlers. Wenn der Fehler eindeutig identifiziert werden kann und als unkritisch eingestuft wurde, wird über eine Matrix eine entsprechende Reaktionsstrategie zugeordnet. Diese besteht aus einzelnen Fehlerreaktionen, die zusammengesetzt zu einer Reaktionsstrategie alle erforderlichen Abläufe beinhalten, um den Fehler zu beheben und den Prüflauf fortzusetzen. Nach erfolgter Fehlerreaktion wird anhand eines Algorithmus überprüft, ob die Reaktion erfolg-

reich war. Diese Information wird bei der Zuordnung einer Reaktionsstrategie bei zukünftig auftretenden Fehlern wieder verwendet.

Die Umsetzung der beschriebenen Methode zur automatisierten Fehlerreaktion erfolgt durch eine Erweiterung des bereits vorhandenen Sollwertvorgabesystems. Hier wurde eine neue Komponente, der sog. Fehlermanager, konzipiert und entwickelt. Um Fehler bei der Inbetriebnahme des neuen Systems zu minimieren und bereits im Vorfeld Schwachstellen identifizieren zu können wurde parallel zur Softwareentwicklung eine Risikoanalyse durchgeführt. Mit Hilfe der FMEA-Methode wurde der gesamte Prozess bei der automatisierten Fehlerreaktion untersucht, mögliche Fehlerquellen identifiziert und diese durch geeignete Gegenmaßnahmen beseitigt.

Die Umsetzung des Systems erfolgte im realen Dauerlaufbetrieb auf einem A1-Prüfstand. Für die kundennahe, dynamische Dauererprobung eines Antriebstrangs wurde das neu entwickelte System am Prüfstand in Betrieb genommen und während des gesamten Dauerlaufs getestet. Die Ergebnisse dieser Tests zeigen einerseits die Generierung einer breiten Datenbasis zur Auswertung von Fehlern in der Dauererprobung, andererseits eine deutliche Effizienzsteigerung bei der Auslastung der Prüfstände. Es wurde gezeigt, dass durch die automatisierte Fehlerreaktion die Stillstandszeiten des Dauerlaufs im Vergleich zu einem konventionellen Dauerlauf um ca. 50% (vgl. Kapitel 7.2) reduziert werden konnten. Die so erzielte Effizienzsteigerung führt zu einer Verkürzung der Gesamtzeit des Prüflaufs und somit zu einer Reifegradsteigerung der Prüflinge, da in einer definierten Zeitspanne mehr Prüflaufzeit zur Verfügung gestellt werden kann.

8.3 Ausblick

Die beschriebene Erprobungsmethode beschreibt das realitätsnahe Reaktionsverhalten des Prüfstands im Fehlerfall. Für die Optimierung des Realitätsbezugs und die Steigerung der Prüflaufzeiten sind noch weitere Schritte denkbar.

Ein Ansatz zur bedarfsgerechten Dauererprobung ist die Bereitstellung von reifegradabhängigen Prüfkollektiven. Es wurde beschrieben, dass die Zuverlässigkeit der Softwarefunktionalitäten und somit auch die Fehleranfälligkeit der Systeme entscheidend vom Entwicklungsreifegrad abhängen. Durch eine reifegradabhängige Sollwertvorgabe wird diesem Umstand Rechnung getragen.

Derzeit werden Prüflinge in frühen Entwicklungschargen hauptsächlich mit stationären oder synthetischen Prüfprogrammen erprobt, da die Funktionalität für dynamische Fahrmanöver noch nicht gegeben ist. Die Stationär-Erprobung dient der Absicherung von Lastenheft-Eckpunkten, liefert aber im Hinblick auf das Gesamtsystemverhalten weniger Informationen als dynamische Prüfprogramme.

Durch die flexible Generierung von Sollwerten mit Hilfe einer Antriebstrangsimulation kann das Fahrermodell an den Reifegrad der Prüflinge angepasst werden. Das bedeutet, dass in frühen Entwicklungschargen ein sehr schonender Fahrer parametriert wird, der

durch ein vergleichsweise sanftes Fahrverhalten nicht die volle Dynamik der Aggregate abruft.

Somit könnte die Möglichkeit geschaffen werden, bereits in frühen Entwicklungschargen einen Teil der Stationär-Programme durch dynamische Prüfprogramme zu ersetzen. Die Entwicklung des Reifegrads würde dadurch aufgrund des höheren Erkenntnisgewinns bei dynamischer Antriebstrangerprobung beschleunigt.

9 Literaturverzeichnis

[AKK12] AKKAYA, F. (2012): Fehleranalyse und Auswertung von Prüfstandsabschaltungen bei konventionellen und hybriden Antriebsträngen. Studienarbeit. Universität Stuttgart. IKTD.

[APO00] APOLD, D. (2000): Mobile Ermittlung von topologischen Straßendaten für dynamische Prüfstandsversuche und Rechnersimulationen. In: *ATZ* 2000 (6). S. 410–417.

[BEN67] BENDEL, R. (1967): Magnetbandgesteuerter Prüfstand für automatische Getriebe. In: *ATZ* 1967 (9). S. 322–329.

[BER04] BERTSCHE, B.; LECHNER, G. (2004): Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer.

[BRA92] BRAESS, H.-H. (1992): Selbstorganisation und Selbstoptimierung. Chancen einer fraktalen Entwicklung der Meß- und Versuchstechnik im Automobilbau. In VDI (Hg.): Meß- und Versuchstechnik im Fahrzeugbau. VDI Berichte 1189. Berlin. S. 1–15.

[BRA91] BRANDT, H.; KÜCÜKAY, F.; SEICHTER, R. (1991): Rechnerunterstützte Prüfstands- und Fahrzeugerprobung. In VDI (Hg.): Getriebe in Fahrzeugen. VDI Berichte 878. München. S. 567–595.

[COM05] COMBE, T. (2005): Modellabbildung des Antriebstrangs. Echtzeitsimulation der Längsdynamik. In: *ATZ* 2005 (1). S. 50–56.

[DIR92] DIRSCHMID, W. (1992): Einsatz der Simulationstechnik unter dem Gesichtspunkt des Nutzen-Kosten-Aspektes. In: *ATZ* 1992 (9). S. 488–491.

[DRE06] DRESIG, H. (2006): Schwingungen und mechanische Antriebssysteme. Modelbildung, Berechnung, Analyse, Synthese. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer.

[DRE11] DRESIG, H.; HOLZWEIßIG, F. (2011): Maschinendynamik. Co-Autoren: Rockhausen, L. 10. Aufl. Heidelberg: Springer.

[EBE68] EBERAN-EBERHORST, R. (1968): Ein Automobil-Prüfstand mit mechanisch-simulierter Fahrdynamik. In: *ATZ* 1968 (11). S. 373–378.

[FAH09] FAHRMEIR, L.; KNEIB, T.; LANG, S. (2009): Regression. Modelle, Methoden und Anwendungen. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer.

[FÖR91] FÖRSTER, H. J. (1991): Automatische Fahrzeuggetriebe. Grundlagen, Bauformen, Eigenschaften, Besonderheiten. 1. Aufl. Berlin: Springer.

[GRE04] GREINER, J.; DÖRR, C.; KLOS, W.; SCHWÄMMLE, T. (2004): Lastkollektive 7-Gang Automatikgetriebe W7A700. Durchgängige Bewertung und Betrachtung im Entwicklungsprozess bei Mercedes-Benz. In VDI (Hg.): Getriebe in Fahrzeugen. VDI Berichte 1827. Friedrichshafen. S. 585–607.

[GUM07] GUMPOLTSBERGER, G. (2007): Systematische Synthese und Bewertung von mehrgängigen Planetengetrieben. Dissertation. Technische Universität Chemnitz.

[HÄC07] HÄCKH, J. (2007): Untersuchung und Optimierung der Steuerung von Prüfständen zur Streckensimulation von PKW Antriebssträngen unter realistischen Einsatzbedingungen. Masterthesis. HS Ulm.

[HÄC06] HÄCKH, J.; WILLMERDING, G. (2006): Untersuchung der Einsatzverhältnisse von Getrieben unter realistischen Bedingungen durch Kombination von Messdatenerfassung und Computersimulation. In VDI (Hg.): Getriebe in Fahrzeugen. VDI Berichte 1943. Friedrichshafen.

[HAI06] HAIBACH, E. (2006): Betriebsfestigkeit. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer.

[HÖF12] HÖFERT, A. (2012): Validierung von Fahrzeugversuchsmessungen zum Vergleich Prüfstand - Straßenbetrieb. Studienarbeit. DHBW Stuttgart.

[HOM68] HOMANN, R. (1968): Fahrzeugprüfstände - Bauarten und Erfahrungen aus Konstruktion und Anwendung. In: *ATZ* 1968 (70). S. 52–59.

[JAU89] JAUCH, F. (1989): Optimierung des Antriebsstranges von Kraftfahrzeugen durch Fahrsimulation. Dissertation. Universität Stuttgart. IMA.

[KAR13] KARTHAUS, C.; SCHENK, M.; KLOS, W.; BINZ, H. und BERTSCHE, B. (2013): Automatisierte Fehlerreaktion und lernfähige Fehleranalyse zur Erhebung von Erprobungswissen auf Antriebstrangprüfständen. In SSP (Hg.): Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung. Stuttgart.

[KAR14] KARTHAUS, C. (2014): Abschlussbericht Projekt Fehlerdokumentation 2014.

[KAR12] KARTHAUS, C.; BINZ, H.; KLOS, W. (2012): Triebstrangbelastungen unter Berücksichtigung von Fahrwerkseinflüssen auf Prüfständen. In FKFS (Hg.): Internationales Stuttgarter Symposium "Automobil und Motorentechnik". Stuttgart.

[KAR15] KARTHAUS, C.; BINZ, H.; ROTH, D. (2015): Studie zur Kooperation und zum Informationsaustausch zwischen Konstruktions- und Erprobungsabteilungen. IKTD, U. S. (Hg.). Stuttgart 2015.

[KIR07] KIRCHNER, E. (2007): Leistungsübertragung in Fahrzeuggetrieben. Grundlagen der Auslegung, Entwicklung und Validierung von Fahrzeuggetrieben und deren Komponenten. 1. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer.

[KLE13] KLEPPMANN, W. (2013): Versuchsplanung. Produkte und Prozesse optimieren. 8. Aufl.: Hanser.

[KLOS04] KLOS, W. (2004): Gruppenschaltungsansteuerung von Nutzfahrzeuggetrieben. Dissertation. Universität Stuttgart. IMK.

[KLOS11] KLOS, W.; SCHENK, M.; SCHWÄMMLE, T.; MÜLLER, M. und BERTSCHE, B. (2011): Antriebstrangerprobung bei der Daimler AG. Moderne Erprobungsmethodik. In

AVL und TU Darmstadt (Hg.): 4. Internationales Symposium für Entwicklungsmethodik. Wiesbaden.

[KÖH10] KÖHLER, M.; JENNE, S.; PÖTTER, K.; ZENNER, H. (2010): Zählverfahren in der Betriebsfestigkeit. 1. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer.

[KRE08] KREHMER, H.; PAETZOLD, K. (2008): Eine Betrachtung zur ganzheitlichen Abschätzung des Produktreifegrades auf Basis des Verhaltens. 19. Symposium Design for X (Hg.). Neukirchen 2008.

[KUN02] KUNZ, M. (2002): Ermittlung des Einflusses fahrzeug-, fahrer- und verkehrsspezifischer Parameter auf die Getriebelastkollektive mittels Fahrsimulation. Dissertation. Universität Stuttgart. IMA.

[LAS88] LASCHET, A. (1988): Simulation von Antriebssystemen. Modellbildung der Schwingungssysteme und Beispiele aus der Antriebstechnik. Berlin, Heidelberg: Springer.

[LAS05] LASCHET, A. (2005): Systemanalyse in der Kfz-Antriebstechnik III. Dynamisches Gesamtsystemverhalten von Fahrzeugantrieben. Renningen: Expert.

[LER12] LERCH, R. (2012): Elektrische Messtechnik. Analoge, digitale und computergestützte Verfahren. 6. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer.

[LIN09] LINDEMANN, U. (2009): Methodische Entwicklung technischer Produkte. Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden. 3. Aufl. Berlin: Springer.

[MAI07] MAISCH, M. (2007): Zuverlässigkeitsorientiertes Erprobungskonzept für Nutzfahrzeuggetriebe unter Berücksichtigung von Betriebsdaten. Dissertation. Universität Stuttgart. IMA.

[MIT04] MITSCHKE, M.; WALLENTOWITZ, H. (2004): Dynamik der Kraftfahrzeuge. 4. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer.

[MÜL02] MÜLLER-KOSE, J.-P. (2002): Repräsentative Lastkollektive für Fahrzeuggetriebe. Dissertation. TU Braunschweig.

[NAU07] NAUNHEIMER, H.; BERTSCHE, B.; LECHNER, G. (2007): Fahrzeuggetriebe. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer.

[OHN05] OHNO, T. (2005): Das Toyota-Produktionssystem. 1. Aufl.: Campus.

[ORT14] ORTEGUI, J. L. (2014): Failure Analysis. Fundamentals and Applications in Mechanical Components. 1. Aufl. Heidelberg, Berlin: Springer.

[PAE06] PAETZOLD, K. (2006): Ansätze für eine funktionale Repräsentation multidisziplinärer Produkte. 17. Symposium Design for X (Hg.). Neukirchen.

[PAH07] PAHL, G.; BEITZ, W. (2007): Konstruktionslehre. Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Methoden und Anwendung. 7. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer.

[PIL12] PILLAS, J.; KIRSCHBAUM, F. (2012): Model based calibration of a load change reaction minimizing control function using hybrid state space models. In ATZ

(Hg.): 12. Internationales Stuttgarter Symposium 2012 Automobil- und Motorentechnik. Stuttgart. S. 505–517.

[RIL94] RILL, G. (1994): Simulation von Kraftfahrzeugen. 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg, Teubner.

[SCHE11] SCHENK, M. (2011): Erstellen von Prüfvorgaben für die PKW Triebstrangdauererprobung unter Verwendung moderner Simulationsmethoden. Masterthesis. HS Ulm.

[SCHE12] SCHENK, M.; KARTHAUS, C.; KLOS, W.; BINZ, H. und BERTSCHE, B. (2012): Effizienzsteigerung bei der Antriebstrangerprobung. Einsatz moderner Erprobungsmethoden und Optimierung der Fehleranalyse. In VDI (Hg.): SIMVEC - Berechnung, Simulation und Erprobung im Fahrzeugbau. VDI Berichte 2169. Baden Baden.

[SCHE13] SCHENK, M.; KARTHAUS, C.; KLOS, W.; BEHRENDT, H.; BERTSCHE, B. und BINZ, H. (2013): Automatisierte Fehlerreaktion am Antriebstrangprüfstand. In AVL und TU Darmstadt (Hg.): 5. Internationales Symposium für Entwicklungsmethodik. Wiesbaden.

[SCHI98] SCHIBERNA, P. (1998): Geschwindigkeitsvorgabe für Fahrsimulationen mittels Verkehrssimulation. Dissertation. Universität Stuttgart. IMA.

[SCHR13] SCHRAMM, D.; HILLER, M.; BARDINI, R. (2013): Modellbildung und Simulation der Dynamik von Kraftfahrzeugen. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer.

[SCI01] SCIUTO, M. (2001): "Road to Rig" - Simulationskonzept an Powertrain-Prüfständen in der Getriebeerprobung. In: *ATZ* 2001 (4). S. 298–306.

[SEI73-2] SEIFRIED, A. (1973): Statistische Fahrmechanik als Grundlage zur Berechnung von Fahrzeugantrieben. Teil 2. In: *ATZ* 1973 (8). S. 290–294.

[SIE10] SIEBERTZ, K.; VAN BEBBER, D. (2010): Statistische Versuchsplanung. Design of Experiments (DoE). Berlin: Springer.

[SPÖ96] SPÖRL, T. (1996): Modulares Fahrsimulationsprogramm für beliebig aufgebaute Fahrzeugtriebstränge und Anwendung auf Hybridantriebe. Dissertation. Universität Stuttgart. IMA.

[SPR09] SPRING, E. (2009): Elektrische Maschinen. 3. Aufl. Heidelberg: Springer.

[TSI12] TSIROGLUOU, I. (2012): Aufbau und Validierung einer Fahrzeugmessanlage für Korrelationsmessungen zwischen Straßen- und Prüfstandsbetrieb. Bachelorarbeit. HS Esslingen.

[TUN89] TUNKER, H.; PETERSEN, J. (1989): Erfassung von relevanten Größen für den Festigkeits- und Verschleißnachweis an Gelenkwellen im Fahrbetrieb. In VDI (Hg.): Meß- und Versuchstechnik im Fahrzeugbau. VDI Berichte 741. Fellbach. S. 87–103.

[ULL86] ULLMANN, T. (1986): Herleitung eines standardisierten Lastablaufes als Grundlage für die Berechnung und Erprobung von Triebstrangbauteilen. Diplomarbeit. Fachhochschule für Technik Esslingen.

[VDA12] VDA - Verband der Automobilindustrie (2012): Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie - Sicherung der Qualität in der Prozesslandschaft. Produkt- und Prozess-FMEA. Band 4.

[VDI93] VDI (1993): Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte: Beuth Verlag 1993 (2221).

[VDI04] VDI (2004): Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme: Beuth Verlag 2004 (2206).

[WEI05] WEIDLER, A. (2005): Ermittlung von Raffungsfaktoren für die Getriebeerprobung. Dissertation. Universität Stuttgart. IMA.

[WIL03] WILLMERDING, G.; HÄCKH, J. und KÖRNER, T. (2003): Ein durchgängiges Antriebsstrangsimulationssystem im Entwicklungs- und Optimierungsprozess von Automatikgetrieben. In Haus der Technik e.V. (Hg.): Dynamisches Gesamtsystemverhalten von Fahrzeugantrieben. München.

[WIL12] WILLMERDING, G.; KLOS, W.; HÄCKH, J. und GRAMLICH, G. (2012): Reales Fahrverhalten auf Prüfständen mittels Online-Simulation. In VDI (Hg.): Getriebe in Fahrzeugen. VDI Berichte 2158. Friedrichshafen.

[ZEL90] ZELLER, P. (1990): Rechnerintegriertes Informations- und Testsystem in der BMW Antriebsentwicklung. In: *ATZ* 1990 (9). S. 516–524.

[ZIE02] ZIEGELE, J.-P. (2002): Auswertung von klassierten Getriebelastkollektiven. Diplomarbeit. Universität Stuttgart. IMK.

Anhang A

Detailbeschreibungen

Aufbau Korrelationsfahrzeug zur Validierung der streckenbasierten Wunschgeschwindigkeitssimulation anhand realer Straßenmessungen:

Baureihe:	V221 (S-Klasse)
Motorisierung:	V8 Ottomotor mit 4.6 l und zweistufiger Aufladung
Getriebe:	7-Gang Wandlerautomat „7G-Tronic Plus“
Achsgetriebe:	Fuel-Economy Achsgetriebe mit einer Übersetzung von i = 2,65
Antriebsart:	Standardantrieb

Tabelle 12: Aufbau Korrelationsfahrzeug

Versuchsparameter des konventionellen Prüflaufs zum Vergleich mit einem Prüflauf mit der Vorgabeart Onlinesimulation:

Baureihe:	X253 (GLK-Klasse)
Motorisierung:	Reihen-4-Zylinder Ottomotor mit 2.0 l Hubvolumen
Getriebe:	9-Gang Wandlerautomat „9G-Tronic“
Antriebsart:	Standardantrieb

Tabelle 13: Versuchsparameter konventioneller Vergleichsprüflauf

Versuchsparameters des Vergleichsaufbaus mit der Methode Onlinesimulation:

Baureihe:	W166 (M-Klasse)
Motorisierung:	Reihen-4-Zylinder Dieselmotor mit 2.2 l Hubvolumen
Getriebe:	9-Gang Wandlerautomat „9G-Tronic“
Antriebsart:	Standardantrieb

Tabelle 14: Versuchsparameter Vergleichsprüflauf mit Fehlermanager

Versuchsparameter Prüfaufbau für detaillierte Laufzeitauswertung:

Baureihe:	W166 (M-Klasse)
Motorisierung:	V6-Zylinder Dieselmotor mit 3.0 l Hubvolumen
Getriebe:	9-Gang Wandlerautomat „9G-Tronic“
Antriebsart:	Allradantrieb

Tabelle 15: Versuchsparameter Detailauswertung

Liste der bisher erschienenen Berichte aus dem IMA:

Nr.	Verfasser	Titel
1	H.K. Müller	Beitrag zur Berechnung und Konstruktion von Hochdruckdichtungen an schnellaufenden Wellen
2	W. Passera	Konzentrisch laufende Gewinde-Wellen-Dichtung im laminaren Bereich
	K. Karow	Konzentrische Doppelgewindewellendichtung im laminaren Bereich
3	F.E. Breit	Die Kreiszylinderschalendichtung: Eine Axialspaltdichtung mit druckabhängiger Spaltweite
	W. Sommer	Dichtungen an Mehrphasensystemen: Berührungsfreie Wellendichtungen mit hochviskosen Sperrflüssigkeiten
4	K. Heitel	Beitrag zur Berechnung und Konstruktion konzentrisch und exzentrisch betriebener Gewindewellendichtungen im laminaren Bereich
5	K.-H. Hirschmann	Beitrag zur Berechnung der Geometrie von Evolventenverzahnungen
6	H. Däuble	Durchfluß und Druckverlauf im radial durchströmten Dichtspalt bei pulsierendem Druck
7	J. Rybak	Einheitliche Berechnung von Schneidrädern für Außen- und Innenverzahnungen. Beitrag zu Eingriffsstörungen beim Hohlrad-Verzahnen mittels Schneidräder
8	D. Franz	Rechnergestütztes Entwerfen von Varianten auf der Grundlage gesammelter Erfahrungswerte
9	E. Lauster	Untersuchungen und Berechnungen zum Wärmehaushalt mechanischer Schaltgetriebe
10		Festschrift zum 70. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. K. Talke
11	G. Ott	Untersuchungen zum dynamischen Leckage- und Reibverhalten von Radialwellendichtringen
12	E. Fuchs	Untersuchung des elastohydrodynamischen Verhaltens von berührungsfreien Hochdruckdichtungen
13	G. Sedlak	Rechnerunterstütztes Aufnehmen und Auswerten spannungsoptischer Bilder
14	W. Wolf	Programmsystem zur Analyse und Optimierung von Fahrzeuggetrieben
15	H. v. Eiff	Einfluß der Verzahnungsgeometrie auf die Zahnfußbeanspruchung innen- und außenverzahnter Geradstirnräder
16	N. Messner	Untersuchung von Hydraulikstangendichtungen aus Polytetrafluoräthylen
17	V. Schade	Entwicklung eines Verfahrens zur Einflanken-Wälzprüfung und einer rechnergestützten Auswertemethode für Stirnräder
18	A. Gührer	Beitrag zur Optimierung von Antriebssträngen bei Fahrzeugen
19	R. Nill	Das Schwingungsverhalten loser Bauteile in Fahrzeuggetrieben
20	M. Kammüller	Zum Abdichtverhalten von Radial-Wellendichtringen
21	H. Truong	Strukturorientiertes Modellieren, Optimieren und Identifizieren von Mehrkörpersystemen
22	H. Liu	Rechnergestützte Bilderfassung, -verarbeitung und -auswertung in der Spannungsoptik
23	W. Haas	Berührungsfreie Wellendichtungen für flüssigkeitsbespritzte Dichtstellen
24	M. Plank	Das Betriebsverhalten von Wälzlagern im Drehzahlbereich bis 100.000/min bei Kleinstmengenschmierung
25	A. Wolf	Untersuchungen zum Abdichtverhalten von druckbelastbaren Elastomer- und PTFE-Wellendichtungen
26	P. Waidner	Vorgänge im Dichtspalt wasserabdichtender Gleitringdichtungen
27	Hirschmann u.a.	Veröffentlichungen aus Anlaß des 75. Geburtstags von Prof. Dr.-Ing. Kurt Talke
28	B. Bertsche	Zur Berechnung der Systemzuverlässigkeit von Maschinenbau-Produkten
29	G. Lechner; K.-H.Hirschmann; B. Bertsche	Forschungsarbeiten zur Zuverlässigkeit im Maschinenbau
30	H.-J. Prokop	Zum Abdicht- und Reibungsverhalten von Hydraulikstangendichtungen aus Polytetrafluoräthylen
31	K. Kleinbach	Qualitätsbeurteilung von Kegelradsätzen durch integrierte Prüfung von Tragbild, Einflankenwälzabweichung und Spielverlauf
32	E. Zürn	Beitrag zur Erhöhung der Meßgenauigkeit und -geschwindigkeit eines Mehrkoordinatentasters
33	F. Jauch	Optimierung des Antriebsstranges von Kraftfahrzeugen durch Fahrsimulation
34	J. Grabscheid	Entwicklung einer Kegelrad-Laufprüfmaschine mit thermografischer Tragbilderfassung
35	A. Hölderlin	Verknüpfung von rechnerunterstützter Konstruktion und Koordinatenmeßtechnik
36	J. Kurfess	Abdichten von Flüssigkeiten mit Magnetflüssigkeitsdichtungen
37	G. Borenius	Zur rechnerischen Schädigungsakkumulation in der Erprobung von Kraftfahrzeugteilen bei stochastischer Belastung mit variabler Mittellast
38	E. Fritz	Abdichtung von Maschinenspindeln
39	E. Fritz; W. Haas; H.K. Müller	Berührungsfreie Spindelabdichtungen im Werkzeugmaschinenbau. Konstruktionskatalog

Nr.	Verfasser	Titel
40	B. Jenisch	Abdichten mit Radial-Wellendichtringen aus Elastomer und Polytetrafluorethylen
41	G. Weidner	Klappern und Rasseln von Fahrzeuggetrieben
42	A. Herzog	Erweiterung des Datenmodells eines 2D CAD-Systems zur Programmierung von Mehrkoordinatenmeßgeräten
43	T. Roser	Wissensbasiertes Konstruieren am Beispiel von Getrieben
44	P. Wäschle	Entlastete Wellendichtringe
45	Z. Wu	Vergleich und Entwicklung von Methoden zur Zuverlässigkeitsanalyse von Systemen
46	W. Richter	Nichtwiederholbarer Schlag von Wälzlagereinheiten für Festplattenlaufwerke
47	R. Durst	Rechnerunterstützte Nutprofilentwicklung und clusteranalytische Methoden zur Optimierung von Gewindewerkzeugen
48	G.S. Müller	Das Abdichtverhalten von Gleitringdichtungen aus Siliziumkarbid
49	W.-E. Krieg	Untersuchungen an Gehäuseabdichtungen von hochbelasteten Getrieben
50	J. Grill	Zur Krümmungstheorie von Hüllflächen und ihrer Anwendung bei Werkzeugen und Verzahnungen
51	M. Jäckle	Entlüftung von Getrieben
52	M. Köchling	Beitrag zur Auslegung von geradverzahnten Stirnrädern mit beliebiger Flankenform
53	M. Hildebrandt	Schadensfrüherkennung an Wälzkontakten mit Körperschall-Referenzsignalen
54	H. Kaiser	Konstruieren im Verbund von Expertensystem, CAD-System, Datenbank und Wiederholteilsuchsystem
55	N. Stanger	Berührungsfrei abdichten bei kleinem Bauraum
56	R. Lenk	Zuverlässigkeitsanalyse von komplexen Systemen am Beispiel PKW-Automatikgetriebe
57	H. Naunheimer	Beitrag zur Entwicklung von Stufenlosgetrieben mittels Fahrsimulation
58	G. Neumann	Thermografische Tragbilderfassung an rotierenden Zahnrädern
59	G. Wüstenhagen	Beitrag zur Optimierung des Entlasteten Wellendichtrings
60	P. Brodbeck	Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Bauteilzuverlässigkeit und zur Systemberechnung nach dem Booleschen Modell
61	Ch. Hoffmann	Untersuchungen an PTFE-Wellendichtungen
62	V. Hettich	Identifikation und Modellierung des Materialverhaltens dynamisch beanspruchter Flächendichtungen
63	K. Riedl	Pulsationsoptimierte Außenzahnradpumpen mit ungleichförmig übersetzenden Radpaaren
64	D. Schwuchow	Sonderverzahnungen für Zahnradpumpen mit minimaler Volumenstrompulsation
65	T. Spörl	Modulares Fahrsimulationsprogramm für beliebig aufgebaute Fahrzeugtriebstränge und Anwendung auf Hybridantriebe
66	K. Zhao	Entwicklung eines räumlichen Toleranzmodells zur Optimierung der Produktqualität
67	K. Heusel	Qualitätssteigerung von Planetengetrieben durch Selektive Montage
68	T. Wagner	Entwicklung eines Qualitätsinformationssystems für die Konstruktion
69	H. Zelßmann	Optimierung des Betriebsverhaltens von Getriebeentlüftungen
70	E. Bock	Schwimmende Wellendichtringe
71	S. Ring	Anwendung der Verzahnungstheorie auf die Modellierung und Simulation des Werkzeugschleifens
72	M. Klöpfer	Dynamisch beanspruchte Dichtverbindungen von Getriebegehäusen
73	C.-H. Lang	Losteilgeräusche von Fahrzeuggetrieben
74	W. Haas	Berührungsfreies Abdichten im Maschinenbau unter besonderer Berücksichtigung der Fanglabyrinthe
75	P. Schiberna	Geschwindigkeitsvorgabe für Fahrsimulationen mittels Verkehrssimulation
76	W. Elser	Beitrag zur Optimierung von Wälzgetrieben
77	P. Marx	Durchgängige, bauteilübergreifende Auslegung von Maschinenelementen mit unscharfen Vorgaben
78	J. Kopsch	Unterstützung der Konstruktionstätigkeiten mit einem Aktiven Semantischen Netz
79	J. Rach	Beitrag zur Minimierung von Klapper- und Rasselgeräuschen von Fahrzeuggetrieben
80	U. Häussler	Generalisierte Berechnung räumlicher Verzahnungen und ihre Anwendung auf Wälzfräserherstellung und Wälzfräsen
81	M. Hüsges	Steigerung der Tolerierungsfähigkeit unter fertigungstechnischen Gesichtspunkten
82	X. Nastos	Ein räumliches Toleranzbewertungssystem für die Konstruktion
83	A. Seifried	Eine neue Methode zur Berechnung von Rollenlagern über lagerinterne Kontakt-Beanspruchungen
84	Ch. Dörr	Ermittlung von Getriebelastkollektiven mittels Winkelbeschleunigungen
85	A. Veil	Integration der Berechnung von Systemzuverlässigkeiten in den CAD-Konstruktionsprozeß
86	U. Frenzel	Rückenstrukturierte Hydraulikstangendichtungen aus Polyurethan
87	U. Braun	Optimierung von Außenzahnradpumpen mit pulsationsarmer Sonderverzahnung
88	M. Lambert	Abdichtung von Werkzeugmaschinen-Flachführungen
89	R. Kubalczyk	Gehäusegestaltung von Fahrzeuggetrieben im Abdichtbereich

Nr.	Verfasser	Titel
90	M. Oberle	Spielbeeinflussende Toleranzparameter bei Planetengetrieben
91	S. N. Dogan	Zur Minimierung der Losteilgeräusche von Fahrzeuggetrieben
92	M. Bast	Beitrag zur werkstückorientierten Konstruktion von Zerspanwerkzeugen
93	M. Ebenhoch	Eignung von additiv generierten Prototypen zur frühzeitigen Spannungsanalyse im Produktentwicklungsprozeß
94	A. Fritz	Berechnung und Monte-Carlo Simulation der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit technischer Systeme
95	O. Schrems	Die Fertigung als Versuchsfeld für die qualitätsgerechte Produktoptimierung
96	M. Jäckle	Untersuchungen zur elastischen Verformung von Fahrzeuggetrieben
97	H. Haiser	PTFE-Compounds im dynamischen Dichtkontakt bei druckbelastbaren Radial-Wellendichtungen
98	M. Rettenmaier	Entwicklung eines Modellierungs-Hilfssystems für Rapid Prototyping gerechte Bauteile
99	M. Przybilla	Methodisches Konstruieren von Leichtbauelementen für hochdynamische Werkzeugmaschinen
100	M. Olbrich	Werkstoffmodelle zur Finiten-Elemente-Analyse von PTFE-Wellendichtungen
101	M. Kunz	Ermittlung des Einflusses fahrzeug-, fahrer- und verkehrsspezifischer Parameter auf die Getriebelastkollektive mittels Fahrsimulation
102	H. Ruppert	CAD-integrierte Zuverlässigkeitsanalyse und -optimierung
103	S. Kilian	Entwicklung hochdynamisch beanspruchter Flächendichtverbindungen
104	A. Flaig	Untersuchung von umweltschonenden Antriebskonzepten für Kraftfahrzeuge mittels Simulation
105	B. Luo	Überprüfung und Weiterentwicklung der Zuverlässigkeitsmodelle im Maschinenbau mittels Mono-Bauteil-Systemen
106	L. Schüppenhauer	Erhöhung der Verfügbarkeit von Daten für die Gestaltung und Berechnung der Zuverlässigkeit von Systemen
107	J. Ryborz	Klapper - und Rasselgeräuschverhalten von Pkw- und Nkw- Getrieben
108	M. Würthner	Rotierende Wellen gegen Kühlschmierstoff und Partikel berührungsfrei abdichten
109	C. Gitt	Analyse und Synthese leistungsverzweigter Stufenlosgetriebe
110	A. Krolo	Planung von Zuverlässigkeitstests mit weitreichender Berücksichtigung von Vorkenntnissen
111	G. Schöllhammer	Entwicklung und Untersuchung inverser Wellendichtsysteme
112	K. Fronius	Gehäusegestaltung im Abdichtbereich unter pulsierendem Innendruck
113	A. Weidler	Ermittlung von Raffungsfaktoren für die Getriebeerprobung
114	B. Stiegler	Berührungsfreie Dichtsysteme für Anwendungen im Fahrzeug- und Maschinenbau
115	T. Kunstfeld	Einfluss der Wellenoberfläche auf das Dichtverhalten von Radial-Wellendichtungen
116	M. Janssen	Abstreifer für Werkzeugmaschinenführungen
117	S. Buhl	Wechselbeziehungen im Dichtsystem von Radial-Wellendichtring, Gegenlauffläche und Fluid
118	P. Pozsgai	Realitätsnahe Modellierung und Analyse der operativen Zuverlässigkeitskennwerte technischer Systeme
119	H. Li	Untersuchungen zum realen Bewegungsverhalten von Losteilen in Fahrzeuggetrieben
120	B. Otte	Strukturierung und Bewertung von Eingangsdaten für Zuverlässigkeitsanalysen
121	P. Jäger	Zuverlässigkeitsbewertung mechatronischer Systeme in frühen Entwicklungsphasen
122	T. Hitziger	Übertragbarkeit von Vorkenntnissen bei der Zuverlässigkeitstestplanung
123	M. Delonga	Zuverlässigkeitsmanagementsystem auf Basis von Felddaten
124	M. Maisch	Zuverlässigkeitsorientiertes Erprobungskonzept für Nutzfahrzeuggetriebe unter Berücksichtigung von Betriebsdaten
125	J. Orso	Berührungsfreies Abdichten schnelllaufender Spindeln gegen feine Stäube
126	F. Bauer	PTFE-Manschettendichtungen mit Spiralrille - Analyse, Funktionsweise und Erweiterung der Einsatzgrenzen
127	M. Stockmeier	Entwicklung von Klapper- und rasselgeräuschfreien Fahrzeuggetrieben
128	M. Trost	Gesamtheitliche Anlagenmodellierung und -analyse auf Basis stochastischer Netzverfahren
129	P. Lambeck	Unterstützung der Kreativität von verteilten Konstrukteuren mit einem Aktiven Semantischen Netz
130	K. Pickard	Erweiterte qualitative Zuverlässigkeitsanalyse mit Ausfallprognose von Systemen
131	W. Novak	Geräusch- und Wirkungsgradoptimierung bei Fahrzeuggetrieben durch Festradentkopplung
132	M. Henzler	Radialdichtungen unter hoher Druckbelastung in Drehübertragern von Werkzeugmaschinen
133	B. Rzepka	Konzeption eines aktiven semantischen Zuverlässigkeitsinformationssystems
134	C.G. Pflüger	Abdichtung schnelllaufender Hochdruck-Drehübertrager mittels Rechteckring und hocheffizient strukturierter Gleitfläche
135	G. Baitinger	Multiskalenansatz mit Mikrostrukturanalyse zur Drallbeurteilung von Dichtungsgegenlaufflächen

Nr.	Verfasser	Titel
136	J. Gäng	Berücksichtigung von Wechselwirkungen bei Zuverlässigkeitsanalysen
137	Ch. Maisch	Berücksichtigung der Ölalterung bei der Lebensdauer- und Zuverlässigkeitsprognose von Getrieben
138	D. Kirschmann	Ermittlung erweiterter Zuverlässigkeitsziele in der Produktentwicklung
139	D. Weber	Numerische Verschleißsimulation auf Basis tribologischer Untersuchungen am Beispiel von PTFE-Manschettendichtungen
140	T. Leopold	Ganzheitliche Datenerfassung für verbesserte Zuverlässigkeitsanalysen
141	St. Jung	Beitrag zum Einfluss der Oberflächencharakteristik von Gegenlaufflächen auf das tribologische System Radial-Wellendichtung
142	T. Prill	Beitrag zur Gestaltung von Leichtbau-Getriebegehäusen und deren Abdichtung
143	D. Hofmann	Verknüpfungsmodell zuverlässigkeitsrelevanter Informationen in der Produktentwicklung mechatronischer Systeme
144	M. Wacker	Einfluss von Drehungleichförmigkeiten auf die Zahnradlebensdauer in Fahrzeuggetrieben
145	B. Jakobi	Dichtungsgeräusche am Beispiel von Pkw-Lenkungen – Analyse und Abhilfemaßnahmen
146	S. Kiefer	Bewegungsverhalten von singulären Zahnradstufen mit schaltbaren Koppelungseinrichtungen
147	P. Fietkau	Transiente Kontaktberechnung bei Fahrzeuggetrieben
148	B. Klein	Numerische Analyse von gemischten Ausfallverteilungen in der Zuverlässigkeitstechnik
149	M. Klaiber	Betriebs- und Benetzungseigenschaften im Dichtsystem Radial-Wellendichtung am Beispiel von additivierten synthetischen Schmierölen
150	A. Baumann	Rasselgeräuschminimierung von Fahrzeuggetrieben durch Getriebeöle
151	M. Kopp	Modularisierung und Synthese von Zuverlässigkeitsmethoden
152	M. Narten	Abdichten von fließfettgeschmierten Getrieben mit Radialwellendichtungen – Reibungsminderung durch Makrostsrukturierung der Dichtungsgegenlauffläche
153	P. Schuler	Einfluss von Grenzflächeneffekten auf den Dichtmechanismus der Radial-Wellendichtung
154	A. Romer	Anwendungsspezifischer Zuverlässigkeitsnachweis auf Basis von Lastkollektiven und Vorwissen
155	A. Daubner	Analyse, Modellierung und Simulation von Verschleiß auf mehreren Skalen zur Betriebsdauervorhersage von Wellendichtringen aus PTFE-Compound
156	J. Rowas	Ökologischer Einsatz der Traktionsarten im System Bahn
157	D. J. Maier	Sensorlose online Zustandserfassung von Vorschubantriebskomponenten in Werkzeugmaschinen
158	J.-P. Reibert	Statisches Abdichten auf nicht idealen Dichtflächen in der Antriebstechnik
159	M. Sommer	Einfluss des Schmierfetts auf das tribologische System Radial-Wellendichtung – Betriebsverhalten und Funktionsmodell
160	W. Haas	Basics der Dichtungstechnik
161	U. Nißler	Dichtheit von Hydraulikstangendichtringen aus Polyurethan
162	S. M. Neuberger	Entwicklung einer gasgeschmierten Gleitringdichtung für den Einsatz im Verbrennungsmotor
163	W. Goujavin	Strömungsmechanische Untersuchungen zur Funktionsweise von Manschettendichtungen aus PTFE-Compounds mit Rückförderstrukturen
164	K. Mutter	Simulation der Zuverlässigkeit von Gesamtfahrzeugfunktionen am Beispiel Fahrkomfort
165	S. Sanzenbacher	Reduzierung von Getriebegeräuschen durch Körperschallminderungsmaßnahmen
166	O. Koller	Zuverlässigkeit von Leistungsmodulen im elektrischen Antriebsstrang
167	M. Remppis	Untersuchungen zum Förderverhalten von Dichtsystemen mit Radial-Wellendichtringen aus Elastomer
168	M. Baumann	Abdichtung drallbehafteter Dichtungsgegenlaufflächen – Messung, Analyse, Bewertung und Grenzen