

Sven Nikolaus Charles Cortès

**Ein Beitrag zur Kalibrierung und
Validierung von Fahrzeugantriebssystemen
auf einem Rollenprüfstand auf Basis des
IPEK-X-in-the-Loop-Ansatzes**

A contribution to the calibration and
validation of vehicle drive systems
on a chassis dynamometer based on the
IPEK-X-in-the-Loop approach

Band 192

Systeme ■ Methoden ■ Prozesse

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers
Univ.-Prof. Dr.-Ing. S. Matthiesen
(Hrsg.)

Ein Beitrag zur Kalibrierung und Validierung von Fahrzeugantriebssystemen auf einem Rollenprüfstand auf Basis des IPEK-X-in-the-Loop-Ansatzes

A contribution to the calibration and validation of vehicle drive systems on a chassis dynamometer based on the IPEK-X-in-the-Loop approach

Herausgeber Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers
Univ.-Prof. Dr.-Ing. S. Matthiesen

Copyright	IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2026 Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Die Universität in der Helmholtz-Gemeinschaft Alle Rechte vorbehalten
Druck	Stolzenberger Druck und Werbung GmbH & Co. KG, Leimen 06224-7697915
ISSN	1615-8113

Ein Beitrag zur Kalibrierung und Validierung von Fahrzeugantriebssystemen auf einem Rollenprüfstand auf Basis des IPEK-X-in-the-Loop-Ansatzes

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)
von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

angenommene

DISSERTATION

von

M. Eng. Sven Nikolaus Charles Cortès

Tag der mündlichen Prüfung:	09.12.2025
Hauptreferent:	Univ.Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Christian Dettmann

Vorwort der Herausgeber

Wissen ist einer der entscheidenden Faktoren in den Volkswirtschaften unserer Zeit. Der Unternehmenserfolg wird mehr denn je davon abhängen, wie schnell ein Unternehmen neues Wissen aufnehmen, zugänglich machen und verwerten kann. Die Aufgabe eines Universitätsinstitutes ist es, hier einen wesentlichen Beitrag zu leisten. In den Forschungsarbeiten wird ständig Wissen generiert. Dieses kann aber nur wirksam und für die Gemeinschaft nutzbar werden, wenn es in geeigneter Form kommuniziert wird. Diese Schriftenreihe dient seit mehr als 20 Jahren als eine Plattform zum Transfer und macht damit das Wissenspotenzial aus aktuellen Forschungsarbeiten am IPEK - Institut für Produktentwicklung Karlsruhe* am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) verfügbar. Die Forschung des IPEK ist dabei strukturiert in die Kategorien Systeme, Methoden und Prozesse, um so der Komplexität heutiger Produktentwicklung ganzheitlich gerecht zu werden. Erst die Verknüpfung dieser drei Kategorien ermöglicht die Synthese innovativer Systeme durch Nutzung neuester Methoden und Prozesse. Gleichzeitig werden durch die Systemsynthese die erforschten neuen Methoden und Prozesse validiert und deren Mehrwert für die Praxis abgesichert. Dieses Forschungskonzept prägt nicht nur das IPEK-Leitbild, sondern auch den Charakter dieser Schriftenreihe, da immer alle drei Kategorien und deren Wechselwirkungen berücksichtigt werden. Jeder Band setzt hier individuelle Schwerpunkte und adressiert dabei folgende Forschungsgebiete des IPEK:

- das Entwicklungs- und Innovationsmanagement,
- die Entwicklungs- und Konstruktionsmethodik,
- der Leichtbau von der Ebene des ganzen Systems bis hinunter zur Optimierung des Bauteils,
- die Validierung technischer Systeme auch unter Berücksichtigung der NVH Aspekte (Noise, Vibration, Harshness) mit dem Fokus auf Schwingungen und Akustik an Komponenten und in den Gesamtsystemen sowie deren subjektiver Beurteilung durch den Menschen,
- die Antriebssystemtechnik mit den Schwerpunkten komplette Antriebslösungen für Fahrzeuge und Maschinen,
- das Design, die Tribologie und Erprobung von Kupplungen und Bremsen sowie
- die Gerätetechnik mit dem Schwerpunkt auf Power-Tools.

Die Forschungsberichte stellen Ergebnisse unserer Forschung sowohl anderen Wissenschaftlern als auch den Unternehmen zu Verfügung, um damit die Produktentwicklung in allen ihren Facetten mit innovativen Impulsen zu optimieren.

Albert Albers und Sven Matthiesen

* Eh.: Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau, Universität Karlsruhe (TH)

Vorwort zu Band 192

Die Entwicklung moderner Fahrzeugantriebssysteme steht vor einem grundlegenden Wandel. Elektrifizierung, steigende Systemkomplexität, strengere gesetzliche Vorgaben und ein hoher Innovationsdruck erfordern neue Ansätze, um das reale Fahrverhalten zuverlässig zu erfassen und zu bewerten und in die Entwicklungsprozesse zu integrieren. Klassische Entwicklungs- und Prüfprozesse stoßen zunehmend an ihre Grenzen, da sie die Vielfalt realer Einsatzbedingungen und dynamischer Wechselwirkungen nicht mehr vollständig abbilden können.

Im Zentrum dieser Herausforderungen in der heutigen und zukünftigen Produktentwicklung steht die Validierung – also der Nachweis, dass ein technisches System unter realen Randbedingungen die geforderten Funktionen aus Sicht des Kunden und Anwenders erfüllt. Während Verifikation auf den Nachweis der Erfüllung spezifizierter Anforderungen zielt, beschreibt Validierung den Abgleich mit der Realität des Nutzungskontextes. Gerade dieser Aspekt wird im Zuge der Einführung von RDE (Real Driving Emissions) und der WLTP-Regelung immer bedeutender, da er unmittelbaren Einfluss auf Energieeffizienz, Emissionsverhalten und Funktionssicherheit hat.

Vor diesem Hintergrund können die Konzepte der Karlsruher Schule für Produktentwicklung – KaSPro – mit ihren Modellen zur Systemgenerationsentwicklung – SGE, dem SPALTEN-Prozess als generischem Ansatz zur Problemlösung und dem IPEK-X-in-the-Loop-Ansatz einen wichtigen Beitrag leisten. Diese Konzepte erlauben es bei konsequenter Umsetzung bezogen auf die Validierungsaktivitäten diese frühzeitig in den Entwicklungsprozess zu integrieren und reale, virtuelle und hybride Testumgebungen systematisch aufzubauen und zu verknüpfen.

Die wissenschaftliche Arbeit von Herrn Dr.-Ing. Sven Cortès greift diese Herausforderung auf und entwickelt eine methodische Lösung, um reale Fahr- und Lastverläufe auf dem Rollenprüfstand reproduzierbar abzubilden und dadurch die Validierung von Fahrzeugantriebssystemen zu beschleunigen und zu präzisieren. Durch die konsequente Nutzung des IPEK-XiL-Frameworks und die Erweiterung zum Road-to-Rig-to-Simulation-Ansatz (R2R2S) wird ein geschlossenes Validierungskonzept geschaffen, das experimentelle und virtuelle Datenquellen verbindet. Damit positioniert sich die Arbeit im Spannungsfeld zwischen empirischer Versuchstechnik, modellbasierter Simulation und systemischer Entwicklungslogik. Sie leistet einen wichtigen Beitrag dazu, die Validierung von einer heute oft erst spät angeordneten Aktivität zu einem integralen kontinuierlichen Bestandteil der Produktentwicklungsprozesse für Fahrzeuge zu machen – ein zentrales Anliegen der KaSPro und zugleich ein Schlüssel für die zukünftige Wettbewerbsfähigkeit der Fahrzeugentwicklung. Die Arbeit gibt wissenschaftliche Impulse für weitere Forschung und gleichzeitig wichtige Impulse für die Praxis. Die Arbeit entstand in enger Kooperation

mit der Hochschule für angewandte Wissenschaften Ulm, Prof. Dettmann, dem ich besonders danke. Die Arbeit ist ein hervorragendes Beispiel wie durch eine vertrauensvolle Kooperation zwischen den verschiedenen Hochschultypen hochwertige Forschung realisiert werden kann.

Dezember, 2025

Albert Albers

Kurzfassung

In den vergangenen Jahren hat sich die Aufmerksamkeit von Herstellern und Entwicklern von Kraftfahrzeugen und der entsprechenden Zulassungsbehörden weltweit mehr und mehr auf die im realen Fahrbetrieb auftretenden Betriebszustände der Fahrzeuge gerichtet. Über die Novellierung der Abgasgesetzgebung um Real Driving Emissions zusätzlich zu dem gesetzlichen Fahrzyklen entsteht die Notwendigkeit, reale Fahrszenarien in der Fahrzeugentwicklung verstärkt zu berücksichtigen. Sowohl zufälliges Verkehrsgeschehen als auch die Topologie der Fahrbahn sind große Herausforderungen bei der Kalibrierung von Fahrzeugantriebssystemen. Aus Sicht der Entwickler entsteht ein deutlich gesteigerter Validierungsbedarf und -umfang, um diese Kalibrierung in einem gesicherten Umfeld im realen Fahrversuch oder auf Prüf- und Testgeländen zu validieren. Mittels des „Road to Rig“-Ansatzes wird die Verlagerung von Straßenfahrten auf Prüfstände zusammengefasst. Vor allem bereits bestehende Validierungsumgebungen, wie Rollenprüfstände, können durch Erweiterung und Weiterentwicklung der Prüfstandsregelarten angepasst werden, um auf diese Anforderungen zu reagieren.

Diese Arbeit leistet einen Beitrag zur Kalibrierung und Validierung von Fahrzeugantriebssystemen auf Basis des IPEK-X-in-the-Loop-Ansatzes, um dem gesteigerten Validierungsbedarf Rechnung zu tragen. Über eine Realfahrtmesskampagne, welche sich an den Randbedingungen der RDE-Gesetzgebung orientiert, werden kundennahe Längsdynamiklasten erfasst und anhand statistischer Methoden ausgewertet. Die signifikanten Parameter werden anschließend auf ihre Regelfähigkeit auf einem Rollenprüfstand untersucht. Durch einen Vergleich von bereits bestehenden und neu entwickelten Prüfstandsregelarten erfolgt eine Empfehlung für eine Testkonfiguration, welche die vorliegende Problemstellung genauestmöglich beantwortet. Nach dem Transfer von Reallasten von der Straße auf den Prüfstand, wird die Möglichkeit zur Erzeugung dieser Lasten mittels Längsdynamiksimulation bewertet. Eine Erweiterung des „Road to Rig“ zum „Road to Rig to Sim“-Ansatz beschreibt eine Vorgehensweise, welche es ermöglicht, den Rollenprüfstand als zentrale Validierungsumgebung zu erweitern. Das vereinfachte Simulationsmodell wird dort manöverbasiert validiert, um anschließend generisch erzeugte Reallastverläufe auf dem Rollenprüfstand zu reproduzieren. Abschließend werden die Messergebnisse mittels mehrerer statistischer Kennwerte analysiert und interpretiert.

Abstract

In recent years, manufacturers and developers of motor vehicles and the relevant approval authorities worldwide have focussed on the operating conditions of vehicles in real driving conditions. The amendment of emissions legislation to include Real Driving Emissions in addition to the mandatory driving cycles has created the need to take greater account of real driving scenarios in vehicle development. Random traffic events and the topology of the road conditions are major challenges when calibrating vehicle drive systems. From the developers' point of view, there is a significantly increased need for in the scope of validation in order to validate those calibrations in a safe environment in real driving tests or on test and proving grounds. The 'Road to Rig' approach summarises the transfer of road tests to test rigs. Existing validation environments in particular, such as chassis dynamometers, can be adapted to respond to these requirements by expanding and further developing the types of test bench control types.

In order to meet the increased need for validation this research work shall contribute to the calibration and validation of vehicle drive systems based on the IPEK-X-in-the-loop approach. A real driving measurement campaign, which is based on the boundary conditions of the RDE legislation, is used to record customer-related longitudinal dynamic loads and analyse them using statistical methods. The significant parameters are then analysed for their controllability on a chassis dynamometer. By comparing existing and newly developed test bench control types, a recommendation is made for a test configuration that answers the presented challenge as accurately as possible. After the transfer of real loads from the road to the test bench, the possibility of generating these loads by using longitudinal dynamics simulation is evaluated. An extension of the "Road to Rig" into "Road to Rig to Sim" approach describes a procedure that enables an expansion of the chassis dynamometer as a central validation environment. The simplified simulation model is validated there using manoeuvre-based test cases in order to subsequently reproduce generically generated real load curves on the chassis dynamometer. Finally, the measurement results are analysed and interpreted using required statistical characteristics.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen einer kooperativen Promotion am Institut für Produktentwicklung (IPEK) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) in Zusammenarbeit mit dem Institut für Fahrzeugsystemtechnik (IFS) der Technischen Hochschule Ulm (THU).

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Univ. Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers für die wissenschaftliche Betreuung und die Möglichkeit, diese Arbeit am IPEK durchführen zu dürfen. Ebenso danke ich Prof. Dr.-Ing. Christian Dettmann herzlich für die Übernahme des Korreferats sowie für seine Unterstützung und die wertvollen Anregungen während des gesamten Promotionsvorhabens.

Ein großer Dank gilt zudem den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des IPEK und des IFS für die kollegiale Zusammenarbeit, den regen fachlichen Austausch und die angenehme Arbeitsatmosphäre. Namentlich möchte ich Prof. Dr.-Ing. Thomas Mayer, Christian Amiridse, Orhan Demirkaja und Alexander Reichel hervorheben, die durch ihr Engagement und ihre Unterstützung wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Für das sorgfältige Probelesen, die konstruktiven Diskussionen und den anregenden wissenschaftlichen Diskurs danke ich Philipp Boche und Oliver Heilmann ganz herzlich.

Mein tief empfundener Dank gilt meiner Familie, die mich auf diesem langen Weg stets begleitet und gestärkt hat. Vor allem meiner Mutter möchte ich danken – für ihren Rückhalt, ihre Geduld und das Vertrauen in meinen Weg, auch in herausfordernden Zeiten.

Mit besonderer Verbundenheit denke ich an meine Großeltern, deren Vorbild an Disziplin, Neugier und Wissenshunger mich geprägt und angetrieben hat. Ihr Beispiel hat mich gelehrt, mit Ausdauer und Freude an der Sache zu arbeiten – Werte, die mich durch die gesamte Promotion getragen haben.

Ein herzliches Dankeschön gilt meiner Frau Birgit, die mich – trotz der intensiven Promotionszeit – geheiratet hat, mir in jeder Phase mit Verständnis, Geduld und Humor zur Seite stand und mich immer wieder daran erinnert hat, was im Leben wirklich zählt.

Ein wichtiger Antrieb in dieser Zeit war mein Sohn Finn, der mir gezeigt hat, wie wichtig Neugier, Staunen und Freude am Entdecken sind – Eigenschaften, die jede Forschung bereichern.

Ullingen, im Dezember 2025

Sven Cortès

Je veux être calife à la place du calife.
René Goscinny

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	i
Abstract	iii
Abbildungsverzeichnis	xiii
Tabellenverzeichnis	xvii
Abkürzungsverzeichnis	xix
Formelzeichen	xxiii
1 Einleitung	1
2 Grundlagen und Stand der Forschung	3
2.1 Karlsruher Schule für Produktentwicklung	3
2.1.1 ZHO-Modell	3
2.1.2 Das erweiterte ZHO-Modell	6
2.1.3 Fünf Hypothesen zur Produktentstehung.....	7
2.1.4 Problemlösung gemäß SPALTEN-Prozess	8
2.1.5 Das integrierte Produktentstehungsmodell (iPeM)	11
2.2 Validierung im Produktentstehungsprozess	12
2.2.1 Validierung und Verifikation	13
2.2.2 IPEK-X-in-the-Loop-Ansatz.....	15
2.2.3 Manöverbasierte Validierung	18
2.2.4 Pull-Prinzip der Validierung.....	19
2.3 Validierung von Fahrzeugantriebssystemen	21
2.3.1 Road to Rig.....	22
2.3.2 Fahrversuch.....	23
2.3.3 Simulationenmethoden	25
2.3.4 Prüfstandstypen.....	27
2.4 Statistische Methoden zur Datenanalyse.....	38
2.4.1 Deskriptivstatistische Methoden	38
2.4.2 Interferenzstatistische Methoden	46
2.5 Six Sigma (6σ).....	50
2.5.1 DMAIC-Zyklus	52
2.5.2 Regelkarten	52
3 Motivation, Zielsetzung und Forschungsfragen	55
3.1 Motivation und Zielsetzung	55
3.2 Forschungsfragen	58

4	Beschreibung der Vorgehensweise	61
5	Systematische Auswahl von relevanten Zielgrößen aus Realfahrten	67
5.1	Validierungsumgebung	68
5.2	Versuchsplanung	69
5.2.1	Streckendefinition	69
5.2.2	Parameterauswahl	71
5.2.3	Messtechnischer Versuchsaufbau	73
5.3	Versuchsdurchführung	75
5.4	Versuchsauswertung	76
5.4.1	Methoden zur Auswahl signifikanter Parameter	76
5.4.2	Analyse der Ergebnisse	83
5.5	Interpretation der Ergebnisse	86
5.6	Zwischenfazit	88
6	Validierung von reproduzierten Realfahrten auf einem Rollenprüfstand 91	
6.1	Validierungsumgebung	92
6.2	Weiterentwicklung Validierungsumgebung	93
6.2.1	Prüfstandsinfrastruktur	93
6.2.2	Prüfstandsregelarten	96
6.3	Versuchsplanung	99
6.3.1	Streckendefinition	99
6.3.2	Parameterauswahl	100
6.3.3	Messtechnischer Versuchsaufbau	101
6.4	Versuchsdurchführung	104
6.5	Versuchsauswertung	105
6.5.1	Auswertemethode	106
6.5.2	Analyse der Ergebnisse	106
6.6	Interpretation der Ergebnisse	121
6.7	Zwischenfazit	123
7	Synthese von Reallastverläufen mittels Längsdynamiksimulation	125
7.1	Validierungsumgebung	126
7.2	Aufbau Simulationsmodell	127
7.3	Versuchsplanung	133
7.3.1	Manöverbasierte Validierung des Simulationsmodells	133
7.3.2	Generische Erzeugung von Reallastverläufen	136
7.3.3	Messtechnischer Versuchsaufbau	139
7.4	Versuchsdurchführung	139
7.5	Versuchsauswertung	140
7.5.1	Auswertemethode	140
7.5.2	Analyse der Ergebnisse	140

7.6	Interpretation der Ergebnisse	146
7.7	Zwischenfazit.....	147
8	Zusammenfassung und Ausblick	149
	Literaturverzeichnis.....	I
	Publikationsliste	XIII
Anhang A.....		XV
A1	Chi-Quadrat-Verteilung.....	XV
A2	Beispiel Ermittlung Testgröße $T(x,y)$	XVI
Anhang B.....		XIX
B1	Statistische Auswertung Fahrzeuggeschwindigkeit	XX
B2	Statistische Auswertung Gaspedalstellung	XXII
B3	Statistische Auswertung Motordrehmoment	XXIV
B4	Statistische Auswertung Bremskraft	XXVI
B5	Statistische Auswertung Ist-Gang.....	XXVIII
B6	Statistische Auswertung Motordrehzahl.....	XXX
B7	Statistische Auswertung Abgasmassenstrom	XXXII
B8	Statistische Auswertung kumulierte CO ₂ -Masse.....	XXXIV
B9	Statistische Auswertung kumulierte CO-Masse	XXXVI
B10	Statistische Auswertung kumulierte NO ₂ -Masse	XXXVIII
B11	Statistische Auswertung kumulierte NO-Masse	XL
Anhang C.....		XLIII
C1	Modellparameter	XLIV
C2	Statistische Auswertung Fahrzeuggeschwindigkeit	XLVII
C3	Statistische Auswertung Gaspedalstellung.....	XLIX
C4	Statistische Auswertung Zugkraft	LI
C5	Statistische Auswertung Motordrehzahl.....	LIII
C6	Statistische Auswertung Ist-Gang.....	LV

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Motorbetriebspunkte eines Mittelklasse-Pkw für NEFZ, WLTP und RDE	1
Abbildung 2.1:	Systeme der Systemtechnik nach Ropohl	4
Abbildung 2.2:	Erweitertes ZHO-Modell	6
Abbildung 2.3:	Problemlösung nach SPALTEN	10
Abbildung 2.4:	Das integrierte Produktentstehungsmodell (iPeM)	12
Abbildung 2.5:	Design und Validierung im Produktentstehungsprozess.....	15
Abbildung 2.6:	IPEK-XiL-Framework.....	17
Abbildung 2.7:	System-in-Development (SiD) und System-under-Investigation (Sul)	18
Abbildung 2.8:	Beispielhafter Manöver-Katalog	19
Abbildung 2.9:	Push- und Pull-Prinzip der Validierung	21
Abbildung 2.10:	Vorwärts- und Rückwärtssimulation am Beispiel eines hybriden Antriebsstrangs	26
Abbildung 2.11:	Unterschiedliche Prüfstandstypen innerhalb des Produktentwicklungsprozess nach	27
Abbildung 2.12:	Dynamischer Motorenprüfstand der THU.	29
Abbildung 2.13:	Allrad-Antriebsstrangprüfstand	31
Abbildung 2.14:	Powertrain-in-the-Loop-Prüfstand	32
Abbildung 2.15:	4x2-Rollenprüfstand der THU.....	34
Abbildung 2.16:	Prinzip der Regelart v- α	37
Abbildung 2.17:	Histogramm einer gruppierten Stichprobe mit k Klassen.....	41
Abbildung 2.18:	Darstellung der Trefferzahlen $N_{i,j}$ in einer Kontingenztafel ...	49
Abbildung 2.19:	Six Sigma Kurve mit 1,5 σ Shift.....	51
Abbildung 2.20:	Definition Six Sigma-Methode	51
Abbildung 2.21:	Regelkarte mit Grenzwerten.....	53
Abbildung 3.1:	Rollenprüfstand als zentrale Validierungsumgebung innerhalb eines Road to Rig to Simulation Ansatzes.....	57
Abbildung 4.1:	Das integrierte Design Support Development Modell (iDSDM) nach Marxen	61

Abbildung 4.2:	Forschungsvorgehen nach Marxen für diese Dissertation (horizontal).....	63
Abbildung 4.3:	Forschungsvorgehen nach Marxen für diese Dissertation (vertikal).....	64
Abbildung 5.1:	Konfiguration des IPEK-XiL-Frameworks für die Realfahrtmesskampagne.	68
Abbildung 5.2:	RDE-konforme Strecke um Ulm.....	70
Abbildung 5.3:	Parameterdiagramm Fahrversuche	72
Abbildung 5.4:	Messkonfiguration des Versuchsfahrzeugs	74
Abbildung 5.5:	Vorgehensweise in der Versuchsauswertung.	79
Abbildung 5.6:	Peakfinder: Bestimmung der Events.....	81
Abbildung 5.7:	Peakfinder: Bestimmung der Testfälle.	82
Abbildung 5.8:	Darstellung der Teilmanöverdefinition.....	86
Abbildung 6.1:	Konfiguration des IPEK-XiL-Frameworks für die Prüfstandsmesskampagne.	92
Abbildung 6.2:	Prüfstandsinfrastruktur der Validierungsumgebung für die Prüfstandsmesskampagne	95
Abbildung 6.3:	Schematische Darstellung des Fahrerwunschemomentes durch Fahr- und Bremspedalaktuierung	98
Abbildung 6.4:	RDE-konforme Strecke um Ulm.....	100
Abbildung 6.5:	Versuchsplan mit den Faktoren Fahrer, Regelart und Fahranforderung.....	101
Abbildung 6.6:	Messkonfiguration des Versuchsfahrzeuges der Prüfstandsmesskampagne	103
Abbildung 6.7:	Zeitlicher Verlauf Fahrzeuggeschwindigkeit und kumulierter Fehler	109
Abbildung 6.8:	Zeitlicher Verlauf Gaspedalstellung und kumulierter Fehler ..	110
Abbildung 6.9:	Zeitlicher Verlauf Motordrehmoment und kumulierter Fehler	112
Abbildung 6.10:	Zeitlicher Verlauf Bremskraft und kumulierter Fehler	113
Abbildung 6.11:	Zeitlicher Verlauf Ist-Gang.....	115
Abbildung 6.12:	Zeitlicher Verlauf kumulierte CO ₂ -Emissionen für jede Testkonfiguration	118
Abbildung 6.13:	Zeitlicher Verlauf des Abgasmassenstroms für alle Testkonfigurationen	120

Abbildung 6.14:	Kumulierter Fehler des Abgasmassenstroms für alle Testkonfigurationen.....	121
Abbildung 7.1:	Synthese von Reallastverläufen mittels Längsdynamiksimulation.	125
Abbildung 7.2:	Konfiguration des IPEK-XiL-Frameworks für die Synthese von Reallastverläufen aus einer Längsdynamiksimulation.	127
Abbildung 7.3:	Aufbau der Längsdynamiksimulation nach dem IPEK-XiL-Framework.....	129
Abbildung 7.4:	Validierung und Verifikation des Längsdynamikmodells auf Basis des ZHO-Modells.....	130
Abbildung 7.5:	Topologie des Längsdynamikmodells in Rückwärtssimulation	131
Abbildung 7.6:	Topologie des Längsdynamikmodells in Vorwärtssimulation.	132
Abbildung 7.7:	Geschwindigkeitsverlauf der generischen RDE-Strecke.....	137
Abbildung 7.8:	Fahrpedalvorgabe des virtuellen Fahrers für die generische RDE- Strecke.	138
Abbildung 7.9:	Zeitlicher Verlauf Fahrzeuggeschwindigkeit und Differenzfunktion	141
Abbildung 7.10:	Zeitlicher Verlauf Gaspedalstellung und Differenzfunktion	142
Abbildung 7.11:	Zeitlicher Verlauf Motordrehzahl und Differenzfunktion	143
Abbildung 7.12:	Zeitlicher Verlauf Ist-Gang und Differenzfunktion	144
Abbildung 7.13:	Zeitlicher Verlauf Zugkraft und Differenzfunktion	145

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Kern- und Basisaktivitäten des iPeM nach Albers	11
Tabelle 2.2:	Regelarten auf Rollenprüfständen nach Paulweber	35
Tabelle 2.3:	Klassierung von Korrelationskoeffizienten nach Cohen	43
Tabelle 5.1:	Kriterien zur RDE-Konformität einer Strecke	69
Tabelle 5.2:	Technische Daten Versuchsfahrzeug Realfahrtmesskampagne	73
Tabelle 5.3:	Messtechnik der Realfahrtmesskampagne	74
Tabelle 5.4:	Verwendete Software der Realfahrtmesskampagne	75
Tabelle 5.5:	Randbedingungen der Realfahrtmesskampagne	76
Tabelle 5.6:	Eingangs- und Ausgangssignale für Chi-Quadrat- Unabhängigkeitstest	78
Tabelle 5.7:	Chi-Quadrat-Unabhängigkeitstest für gesamten Betrachtungs- zeitraum	83
Tabelle 5.8:	Chi-Quadrat-Unabhängigkeitstest für Event NO _x 0	84
Tabelle 5.9:	Chi-Quadrat-Unabhängigkeitstest für Testfälle NO _x 0A, 0B, 0C, 0D	85
Tabelle 5.10:	Darstellung der abhängigen Eingangsgrößen mit Zuordnung zum SiD und Sul	87
Tabelle 6.1:	Darstellung der abhängigen Eingangsgrößen mit Zuordnung zum SiD und Sul	93
Tabelle 6.2:	Forschung an Regelarten am Institut für Fahrzeugsystemtechnik der THU	96
Tabelle 6.3:	Technische Daten Versuchsfahrzeug Prüfstandsmesskampagne	102
Tabelle 6.4:	Messtechnik der Prüfstandsmesskampagne	104
Tabelle 6.5:	Verwendete Software der Prüfstandsmesskampagne	104
Tabelle 6.6:	Randbedingungen der Prüfstandsmesskampagne nach Zugehörigkeit zu SiD und Sul	105
Tabelle 6.7:	Versuchsplan, Anzahl Wiederholung je Testkonfiguration	105
Tabelle 6.8:	Determinationskoeffizienten für Fahrzeuggeschwindigkeit und Gaspedalstellung für alle Testkonfigurationen	111

Tabelle 6.9:	Determinationskoeffizienten für Motordrehmoment und Bremskraft für alle Testkonfigurationen	114
Tabelle 6.10:	Auswertung aktueller Gangdurch Anzahl Schaltungen, Abweichung zu Referenz und Determinationskoeffizient	116
Tabelle 6.11:	Zusammenfassung Determinationskoeffizienten aller Testkonfigurationen in Heatmap	122
Tabelle 7.1:	Forschung an Längsdynamikmodellen am Institut für Fahrzeugsystemtechnik der THU	128
Tabelle 7.2:	Generischer Manöverkatalog zur Validierung der Längsdynamiksimulation	133
Tabelle 7.3:	Manöverkatalog zur Validierung der TF Getriebe	134
Tabelle 7.4:	Manöverkatalog zur Validierung der TF Verbrennungsmotorischer Fahrbetrieb TF 2.1 und TF 2.2 ...	135
Tabelle 7.5:	Manöverkatalog zur Validierung der TF Verbrennungsmotorischer Fahrbetrieb TF 2.3 und TF 2.4 ...	136
Tabelle 7.6:	Vorgaben GT-RealDrive Streckenzusammensetzung.....	137
Tabelle 7.7:	Vorgaben GT-RealDrive PI-Regler virtueller Fahrer	138
Tabelle 7.8:	Verwendete Software der Simulationskampagne	139
Tabelle 7.9:	Randbedingungen der Simulationskampagne	139
Tabelle 7.10:	Wertetabelle zu Abbildung 7.13	146

Abkürzungsverzeichnis

AD	analog-digital
BMBF	Bundesministeriums für Bildung und Forschung
C&C ² -M	Contact & Channel Modell
CAN	engl. Controller Area Network
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CS	engl. Connected Systems (interagierende Systeme)
DPF	Dieselpartikelfilter
DRM	engl. Design Research Methodology
DSG	Direktschaltgetriebe
E	Event
EFM	engl. Exhaust Flow Meter (Abgasmassenstrommesser)
EG	Europäische Gemeinschaft
EMV	elektromagnetische Verträglichkeit
ETK	Emulatortastkopf
F	Fahrer (menschlich)
FF	Forschungsfrage
FW	Fahrerwunsch
GPS	engl. Global Positioning System (satellitengestützte Positionsbestimmung)
H	Hypothese
HiL	Hardware-in-the-Loop
iDSDM	engl. Integrated Design Support Development Model
IFS	Institut für Fahrzeugsystemtechnik
IPEK	Institut für Produktentwicklung
iPeM	integriertes Produktentstehungsmodell
J	automatisierter Fahrroboter (James)
KaSPro	Karlsruher Schule für Produktentwicklung

KIT	Karlsruher Institut für Technologie
LS	Lastsimulation
MiL	Model-in-the-Loop
mS	mit Steigung
MSA	Messsystemanalyse
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NN	Normalnull
NO	Stickstoffmonoxid
NO ₂	Stickstoffdioxid
NO _x	Stickstoffoxide
NVH	engl. Noise Vibration Harshness (Geräusch, Vibration, Rauigkeit)
OBD	On-Board-Diagnose
OEG	obere Eingriffsgrenze
OSG	obere Spezifikationsgrenze
OTG	obere Toleranzgrenze
OWG	obere Warngrenze
oS	ohne Steigung
PC	engl. Particle Counter (Patrikelzähler)
PEMS	engl. Portable Emission Measurement System (portable Emissionsmesstechnik)
PEP	Produktentwicklungsprozess
PGE	Produktgenerationsentwicklung
PN	engl. Particle Number (Partikelmenge)
PWR	Pulswechselrichter
R2R	engl. Road to Rig (von der Straße auf den Prüfstand)
R2R2S	engl. Road to Rig to Simulation (von der Straße auf den Prüfstand zur Simulation)
RDE	engl. Real Driving Emissions (reale Fahremissionen)
SCR	engl. Selective Catalytic Reduction (Selektive katalytische Reduktion)
SiD	System-in-Development
SiL	Software-in-the-Loop

SQE	engl. sum of squares explained (erklärte Streuung)
SQR	engl. sum of squares residuals (Residualstreuung)
SQT	engl. sum of squares total (Gesamtstreuung)
Sul	System-under-Investigation
T	Teilmanöver
TF	Technische Funktionen
TFF	Teilforschungsfrage
THU	Technische Hochschule Ulm
TOTE-Modell	Test-Operate-Test-Exit-Modell
UEG	untere Eingriffsgrenze
USG	untere Spezifikationsgrenze
UTG	untere Toleranzgrenze
UWG	untere Warngrenze
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
ViL	Vehicle-in-the-Loop
WLTC	engl. Worldwide Harmonised Light Duty Test Cycle
XiL	X-in-the-Loop

Formelzeichen

A	Straßenlastkoeffizient statischer Anteil
B	Straßenlastkoeffizient linearer Anteil
C	Straßenlastkoeffizient quadratischer Anteil
$F_{Antrieb}$	Antriebskraft
F_{Besch}	Beschleunigungswiderstand
F_{FW}	Fahrwiderstandskraft
$F_{FW,soll}$	Soll-Fahrwiderstandskraft
F_{Luft}	Luftwiderstand
F_{Mess}	Gemessene Zugkraft an Kraftmessdose (Rollenprüfstand)
F_{Roll}	Rollwiderstand
F_{Steig}	Steigungswiderstand
F_{Zug}	Zugkraft
FW_{Soll}	Soll-Fahrerwunsch
H_0	Nullhypothese
H_1	Alternativhypothese
M_0	Null-Fahrerwunschmoment
M_{max}	Maximales Fahrerwunschmoment
M_{min}	Minimales Fahrerwunschmoment
$M_{Schlepp}$	Schleppmoment durch Fahrerwunsch
$P_{Antrieb}$	Antriebsleistung
R^2	Bestimmtheitsmaß oder Determinationskoeffizient
T	Testgröße
$T_{MotorOBD}$	Motortemperatur aus OBD-Schnittstelle
T_{Umg}	Umgebungstemperatur

$\dot{V}$	Volumenstrom
X	Zufallsvariable X
Y	Zufallsvariable Y
c_{Exh}	Abgaskonzentration
h_i	Relative Häufigkeit
i_n	Übersetzung im n-ten Gang
k	Anzahl verschiedener Werte einer Stichprobe
$\dot{m}_{LuftOBD}$	Luftmassenstrom aus OBD-Schnittstelle
$\dot{m}_{Exh}$	Abgasmassenstrom
n	Drehzahl
n_A	Ausgangsdrehzahl
n_E	Eingangsdrehzahl
n_{fehl}	Anzahl Fehlschaltungen
n_{Rad}	Raddrehzahl
n_{Mot}	Verbrennungsmotordrehzahl
n_{MotOBD}	Verbrennungsmotordrehzahl aus OBD-Schnittstelle
n	Stichprobenumfang
n_i	Absolute Häufigkeit
$N_{i,j}$	Anzahl der Treffer der Wertepaare (x_i, y_j) innerhalb der Stichprobe
$N_{i,\blacksquare}$	Anzahl der Treffer für den Wert x_i innerhalb der Stichprobe
$N_{\blacksquare,j}$	Anzahl der Treffer für den Wert y_j innerhalb der Stichprobe
p	Relative Häufigkeit
p_{Umg}	Umgebungsdruck
r	Korrelationskoeffizient
r_H	Relative Luftfeuchtigkeit
r_{xy}	Bravais-Pearson-Korrelationskoeffizient
s_x	Standardabweichung Zufallsvariable X

s_y	Standardabweichung Zufallsvariable Y
s_{xy}	empirische Kovarianz
s	Standardabweichung einer Stichprobe
s	Strecke
s^2	Varianz einer Stichprobe
t_{Schalt}	Schaltzeit zwischen Simulation und Rollenprüfstand
v	Fahrzeuggeschwindigkeit
$\overline{v}_{Autobahn}$	Mittlere Fahrzeuggeschwindigkeit Autobahnanteil
v_{bes}	Fahrzeuggeschwindigkeitsrampe
v_{Corr}	Fahrzeuggeschwindigkeit Correvit-Sensor
v_{GPSxy}	Fahrzeuggeschwindigkeit aus GPS-Sensor
v_{Ist}	Ist-Fahrzeuggeschwindigkeit
$\overline{v}_{Land}$	Mittlere Fahrzeuggeschwindigkeit Landanteil
v_{max}	Maximale Fahrzeuggeschwindigkeit
v_{OBD}	Fahrzeuggeschwindigkeit aus OBD-Schnittstelle
v_{Soll}	Soll-Fahrzeuggeschwindigkeit
$\overline{v}_{Stadt}$	Mittlere Fahrzeuggeschwindigkeit Stadtanteil
v_{VBOX}	Fahrzeuggeschwindigkeit aus VBOX
x_i	Stichprobenwert
$\tilde{x}_i$	Klassenmitte
Δx	Klassenbreite
$\bar{x}$	Arithmetisches Mittel von x
α	Irrtumsniveau oder Signifikanzniveau
α	Gaspedalstellung
α_{ist}	Ist-Gaspedalstellung
α_{soll}	Soll-Gaspedalstellung
α	Achsenabschnitt bei linearer Regression

$\hat{\alpha}$	Kleinste-Quadrate-Schätzer von α
β	Geradensteigung bei linearer Regression
$\hat{\beta}$	Kleinste-Quadrate-Schätzer von β
β_{ist}	Ist-Bremspedalstellung
β_{soll}	Soll-Bremspedalstellung
γ	Konfidenzniveau
ε_i	Fehlerterm bei linearer Regression
$\hat{\varepsilon}_i$	Residuen des Regressionsmodells
χ^2	Testschranke Chi-Quadrat-Test
μ_0	hypothetischer Wert einer Nullhypothese

1 Einleitung

Seit Einführung der Worldwide Harmonised Light Vehicle Test Procedure (WLTP) und vor allem der Real Driving Emissions (RDE) für die Homologation von Personenkraftwagen im September 2017, hat sich der Fokus auf die Prüfung und Zertifizierung derselben unter realen Straßenbedingungen verschoben (Tschöke, 2019). Während viele Entwicklungsthemen bisher nahezu ausschließlich unter Laborbedingungen auf Basis gesetzlich vorgeschriebener Fahrzyklen bearbeitet werden konnten, geht RDE mit einer deutlichen Ausweitung des zertifizierungsrelevanten Betriebsbereichs von Antriebsstrang, Emissionsverhalten sowie Kraftstoff- und Energieverbrauch einher. Abbildung 1.1 zeigt dies am Beispiel eines Mittelklasse-Pkw (Cortès, Dettmann, Boche, Schneider & Heubuch, 2021).

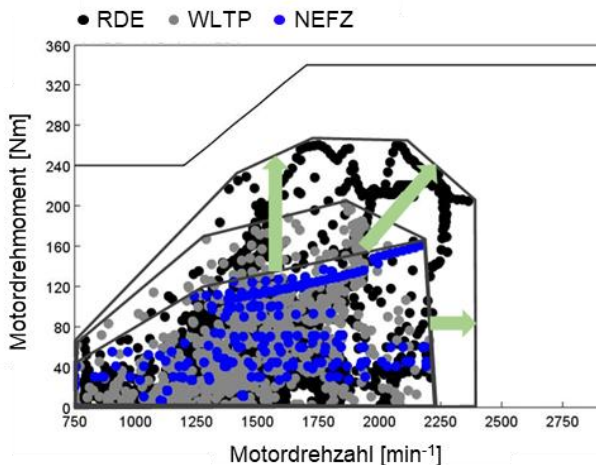


Abbildung 1.1: Motorbetriebspunkte eines Mittelklasse-Pkw für NEFZ, WLTP und RDE (Cortès et al., 2021). Ausweitung des zertifizierungsrelevanten Betriebsbereiches des Antriebsstrangs aufgrund realer Straßenbedingungen. Durch das Abbilden des realen Kundenverhaltens im realen Straßenverkehr erweitert sich die Lastanforderung an den Antrieb. Dabei werden beispielsweise der Verkehr, die Außentemperatur und die Steigungsverhältnisse berücksichtigt.

Das RDE-Testverfahren unterliegt einer Reihe von Vorgaben und Anforderungen, die ein Fahren unter Bedingungen sicherstellen soll, das dem durchschnittlichen, alltäglichen Gebrauch eines Fahrzeugs real nahekommt. Gleichzeitig werden extreme Fahrweisen wie besonders sportliches oder auffallend zurückhaltendes Fahren vermieden. Dennoch verbleibt ein weites Feld möglicher Betriebspunkte, das durch das breite Spektrum möglicher Umweltbedingungen (z. B. Verkehr, Temperatur, Umgebungsdruck/Höhe über Null, Feuchtigkeit) weiter vergrößert wird (Tschöke, 2019).

Eine große Herausforderung für Fahrzeugentwickler ist die Zufälligkeit von Verkehrseignissen und Umweltbedingungen. Es ist nicht möglich, eine Straßenfahrt ereignis- und somit ergebnisgleich zu reproduzieren, um spezifische Fragestellungen wie die Kalibrierung von Motor- und Getriebesteuergeräten zu untersuchen. Dies kann derzeit nur in geeigneten Laborumgebungen durchgeführt werden. Die Übertragung von Straßentests in eine kontrollierte, wiederholbare Entwicklungsumgebung wird somit zu einem wertvollen Instrument für die Fahrzeugentwicklung.

Um eine Straßenfahrt auf einem Prüfstand korrekt nachzubilden, müssen die Belastungsparameter des Antriebsstrangs exakt simuliert werden. Der herkömmliche Ansatz der Lastsimulation auf einem Rollenprüfstand weist dabei jedoch Schwächen auf. Während die Nachbildung der Fahrzeuggeschwindigkeit aufgrund der einfachen und präzisen Erfassung keine große Herausforderung darstellt, ist die Nachbildung des Drehmoments des Antriebssystems wesentlich komplexer (Cortès, Albers, Dettmann & Boche, 2023). Die Qualität der Lastsimulation auf dem Prüfstand wird von der Qualität der verwendeten Fahrzeugausrollkoeffizienten und schwer messbaren Größen wie dem Rollwiderstand in Abhängigkeit vom Streckenverlauf und insbesondere der Straßenneigung beeinflusst (Cortès et al., 2021). Letztere hat einen erheblichen Einfluss auf den Zugkraftbedarf des Fahrzeugs - die erreichbare Messqualität ist hierbei allerdings selten ausreichend (Cortès, Albers, Dettmann & Boche, 2022). Diese erfordert eine aufwändige und zeitintensive Nachbearbeitung des Höhenprofils, die manchmal mehrere Signalarten kombiniert und dennoch meist unbefriedigende Ergebnisse liefert (Cortès et al., 2021).

Die Validierung stellt die zentrale Aktivität der Produktentwicklung dar (Albers, 2010). Deshalb muss passend zur Synthese eines Produktes auch die jeweils passende Validierung des Produktes und seiner Eigenschaften erfolgen, um einen kundenfähigen Reifegrad zu erreichen. Die vorliegende Arbeit leistet hierbei einen Beitrag zur Kalibrierung und Validierung von Fahrzeugantriebssystemen auf einem Rollenprüfstand.

2 Grundlagen und Stand der Forschung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Kalibrierung und Validierung von Fahrzeugantriebssystemen auf einem Rollenprüfstand auf Basis des IPEK-X-in-the-Loop-Ansatzes. In diesem Kontext werden die Grundlagen für die Validierung technischer Systeme der Karlsruher Schule für Produktentwicklung (KaSPro) zusammengefasst. Anschließend werden unterschiedliche Validierungsumgebungen aus der Entwicklung von Fahrzeugantrieben vorgestellt. Das Kapitel 2 schließt mit der Vorstellung der statistischen Methoden, welche zur Analyse von ermittelten Messdaten verwendet wurden.

2.1 Karlsruher Schule für Produktentwicklung

Die KaSPro ist ein grundlegendes Forschungskonzept des Instituts für Produktentwicklung (IPEK) am Karlsruher Institut für Produktentwicklung. Dieses umfasst sowohl Forschungsaktivitäten, welche sich mit der Synthese und Validierung technischer Systeme befassen als auch dem zeitgleichen Forschen an Methoden und Prozessen der Produktgenerationsentwicklung (PGE).

Die KaSPro stellt eine intellektuelle Grundlage und Interessensgemeinschaft dar, auf deren Basis, unter Einsatz der entwickelten Bausteine, unterschiedliche Problemstellungen methodisch gelöst werden können. Im Folgenden werden diese Ansätze vorgestellt.

2.1.1 ZHO-Modell

Das ZHO-Modell beschreibt einen systemtechnischen Ansatz, der drei wechselwirkende Systeme der Produktentwicklung beschreibt. Dieses sogenannte Systemtripel basiert auf Ropohls Interpretation der Ingenieursaufgaben und -tätigkeiten innerhalb von Aufgabenfeldern (Ropohl, 1975). Abbildung 2.1 zeigt diese Systemklassen und deren Zusammenhang. In diesem Regelkreis wird deutlich, dass ein Handlungssystem gemäß den Zielvorgaben innerhalb des Zielsystems ein Sachsystem hervorbringt. Dabei wechselwirkt das Handlungssystem mit dem Zielsystem, während das entwickelte Sach- auf das Handlungssystem zurückwirkt.

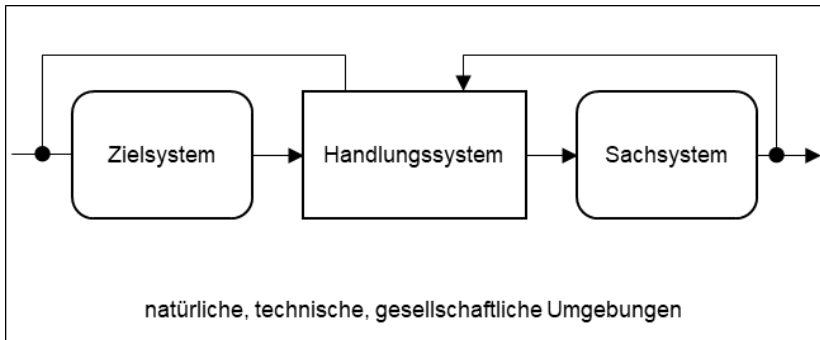


Abbildung 2.1: Systeme der Systemtechnik nach Ropohl (Ropohl, 1975). Das Handlungssystem erzeugt demnach anhand der Zielvorgaben ein Sachsystem. Das Handlungssystem selbst wird sowohl vom Sachsystem als auch von den natürlichen, technischen und gesellschaftlichen Umgebungen beeinflusst. Gleichzeitig wechselwirkt das Handlungssystem ebenfalls mit dem Zielsystem.

Albers entwickelt dieses weiter und definiert wie folgt:

- **Zielsystem**
- **Handlungssystem**
- **Objektsystem**

Zielsystem...

... umfasst die mentale Vorstellung der geplanten Eigenschaften eines Produkts und alle dafür notwendigen Restriktionen, deren Abhängigkeiten und Randbedingungen. Die Ziele beschreiben dabei den gewünschten zukünftigen Zustand der Produkts (und seiner Komponenten) und dessen Kontext, jedoch nicht die Lösung als solche. Die Zielsystem wird im Verlauf der Produktentstehungsprozesses fortwährend erweitert und konkretisiert.

Handlungssystem...

... ist ein sozio-technisches System, das aus strukturierten Aktivitäten, Methoden und Prozessen aufgebaut ist. Es enthält weiterhin alle für die Realisierung einer Produktentstehung notwendigen Ressourcen (Entwickler, Budget, Infrastruktur etc.). Das Handlungssystem erstellt sowohl das Ziel- als auch das Objektsystem. Beide Systeme sind ausschließlich durch das Handlungssystem miteinander verbunden.

Objektsystem...

... enthält alle Dokumente und Artefakte, die als Teillösungen während des Entstehungsprozesses anfallen. Es ist vollständig, sobald der geplante Zielzustand erreicht ist. Das eigentliche Produkt ist neben den Entwicklungsgenerationen und Zwischenprodukten eines der Elemente des Objektsystems. Das Handlungssystem nimmt während des Produktentwicklungsprozesses ständig Teile des Objektsystems auf und leitet daraus durch Schritte der Analyse und Validierung neue Ziele ab.

(Albers, Braun, Heimicke & Richter, 2020)

2.1.2 Das erweiterte ZHO-Modell

Auf der Basis des ZHO-Modells und der fünf Hypothesen zur Produktentstehung von Albers, siehe Abschnitt 2.1.3, entsteht das erweiterte ZHO-Modell, welches den Menschen als Mittelpunkt der Entwicklung nennt. Dieser ist Teil des Handlungssystems und somit für die Überführung des Zielsystems in ein Objektsystem verantwortlich. Die entwickelten Lösungen können dabei in virtuelle oder physische Objekte umgesetzt werden, siehe Abschnitt 2.2.2. Lohmeyer stellt heraus, dass die Validierung als Aktivität entlang des gesamten Produktentwicklungsprozesses (PEP) Unsicherheiten eines zu Projektbeginn noch unvollständig formulierten Zielsystems durch den Aufbau einer fachspezifischen Wissensbasis schrittweise abbauen kann (Albers, Lohmeyer & Ebel, 2011; Lohmeyer, 2013; Meboldt, Matthiesen & Lohmeyer, 2012)

Wie auch Ropohl schon in seiner Darstellung (Abbildung 2.1) herausstellt, ist die Wechselwirkung von Ziel- und Objektsystem über das Handlungssystem für Albers die Basis, um darin Synthese- und Analyseschritte zu integrieren und stellt somit nach der Menschzentrierung das zweite wesentliche Charakteristikum des erweiterten ZHO-Modells dar. Die „Liegende Acht“, Abbildung 2.2, ist das Ergebnis dieser Überlegungen und verdeutlicht, dass durch ein um Wissensbasis und Lösungsraum erweitertes Handlungssystem nun eine kontinuierliche und iterative co-evolutionäre Entwicklung von Ziel- und Objektsystem abbildet.

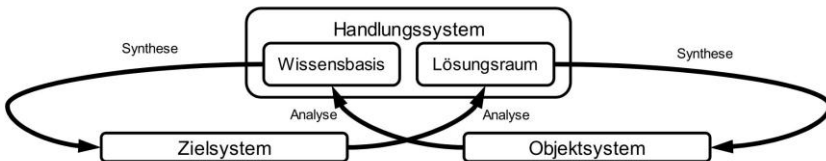


Abbildung 2.2: Erweitertes ZHO-Modell (Albers et al., 2011). Die Wechselwirkung zwischen Ziel-/Objekt- und Handlungssystem sind durch die Wissensbasis und den Lösungsraum kontinuierlich dargestellt. Die kontinuierliche Validierung von Objekt- und Zielsystem stellt dessen zentrale Bedeutung für den Produktentwicklungsprozess dar.

Vor allem ist hier zu erwähnen, dass die Validierung die zentrale Aktivität ist, durch welche die Wissensbasis wächst und die folglich jede weitere Synthese des Zielsystems um deren Erkenntnisse erweitert. Gleichwohl findet diese Erweiterung bei der neuen Gestaltung einer Lösung Berücksichtigung, indem der Fortschritt im Wissen den Lösungsraum der nächsten Lösungsiteration unterstützt.

2.1.3 Fünf Hypothesen zur Produktentstehung

Die fünf Hypothesen zur Produktentstehung wurden von Albers auf Basis seiner über Jahrzehnte erlangten Erfahrung in der Produktentwicklung formuliert (Albers, 2010). Sie bilden das Fundament der KaSPro. Auf ihr baut das integrierte Produktentstehungsmodell (iPeM) auf (Abschnitt 2.1.5) (Albers & Braun, 2011).

H1: Einzigartigkeit von Produktentstehungsprozessen

Innerhalb der technischen Entwicklung wird ein Prozess nie identisch wiederholt. Aufgrund von unterschiedlichen Zielsetzungen und Randbedingungen sowie veränderten Handlungssystemen ist jeder Prozess einzigartig. Deshalb ist es notwendig, ein Modell zu entwickeln, welches die grundsätzlichen ähnlichen Beziehungen zwischen Zielsetzung und Entwicklungsartefakten abbildet.

H2: System der Produktentstehung

Das System der Produktentstehung besteht aus den Teilsystemen Ziel-, Handlungs- und Objektsystem. Diese Unterteilung basiert auf den Grundlagen der Systemtheorie und interagieren, bzw. hängen voneinander ab. Das Zielsystem ist zu Beginn eher vage formuliert und wird durch die Überführung über das Handlungssystem in ein konkretes Objektsystem erzeugt (Albers, 2010).

Die Interaktion zwischen den Systemen erfolgt kontinuierlich durch Analyse und Synthese neuer Artefakte, die wiederum das Ziel konkretisieren. Die Definitionen der einzelnen Systeme sind in Abschnitt 2.1.1 aufgeführt.

H3: Validierung

Die zentrale Aktivität neben der Synthese des Entwicklungsprozesses ist die Validierung desselben (Albers, 2010). Die Validierung misst kontinuierlich den Zielerreichungsgrad, bzw. den Reifegrad. Somit entsteht neues Wissen, welches essenziell ist, um das Zielsystem und somit den Fortschritt im Produktentwicklungsprozess zu schärfen.

H4: Zielbeschreibung in der Problemlösung

Der Soll-Zustand eines Produktes enthält über den Produktentwicklungsprozess hinweg betrachtet nicht nur die funktions- und gestaltbestimmenden Informationselemente, sondern auch die Mittel und den Weg, mit welchem der Soll-Zustand erreicht werden soll. Dabei ist es aufgrund hoher Dynamik innerhalb der Projektteams notwendig, diese Ziele und die damit verbundenen Aktivitäten in

einem Modell zusammenzuführen. Somit können Inkonsistenzen innerhalb von Entwicklungsteams, beispielsweise aufgrund unterschiedlicher Qualifikation, und deren Auswirkung auf die Zielerreichung vermieden werden (Albers, 2010).

H5: Beschreibung von Funktionen

Die Funktionen eines technischen Systems können mittels des von Albers entwickelten Contact & Channel Modells (C&C²-M) mit Hilfe der Grundelemente Wirkfläche und Leitstützstrukturen beschrieben werden (Matthiesen, 2002). Mit Wirkflächenpaaren werden zwei Wirkflächen beschrieben, die zeitweise, ganz oder teilweise, in Kontakt stehen und zwischen denen Energie, Stoff oder Information übertragen wird. Die Leitstützstrukturen sind die Körper, Flüssigkeiten oder Gase oder felddurchsetzte Räume, welche die Wirkflächen miteinander verbinden. Sie ermöglichen den Energie-, Stoff- und/oder Informationstransport zwischen den Wirkflächen. Zusätzlich wird durch Konnektoren eine Art Wirkfläche beschrieben, welche alle Einflussgrößen, Parameter, Randbedingungen und deren Vernetzung an der Systemgrenze abbildet.

2.1.4 Problemlösung gemäß SPALTEN-Prozess

Ehrlenspiel et al. sprechen vom Menschen als Problemlöser. Dafür wurden für den Problemlöser im Einzelnen, als auch im Team zur effektiven und effizienten Problemlösung mehrere Vorgehensmodelle entwickelt (Ehrlenspiel & Meerkamm, 2013). Auf Basis des Test-Operate-Test-Exit-Modells (TOTE-Modell) entspricht die Problemlösung einem regelkreisartigen, iterativen Vorgehen, welches laufend den Ist-Zustand mit dem Soll-Zustand vergleicht. Bei jedem Durchlauf wird ein neuer Zustand synthetisiert und anschließend analysiert (Ehrlenspiel & Meerkamm, 2013).

Albers et al. entwickelten auf dieser Ausgangsbasis „SPALTEN“, das Vorgehensmodell für Problemlösung (Albers, Burkhardt, Meboldt & Saak, 2005). Das Akronym SPALTEN steht für:

- **S**ituationsanalyse: Für die zielgerichtete Problemlösung werden einführend die notwendigen Informationen des Forschungsfeldes zusammengetragen und strukturiert.
- **P**roblemeingrenzung: Auf Basis der Analyse wird das vorliegende Problem beschrieben. Hierbei sollen typische Problemzusammenhänge erkannt und die Vielfalt der Informationen spezifiziert werden.
- **A**lternative Lösungssuche: Für die Lösung des zuvor beschriebenen Problems sind zunächst mehrere Lösungsvarianten zu generieren. Um den Lösungsraum dabei möglichst vollständig und exakt abdecken zu

können, sollte hierbei eine hohe Quantität der Lösungsvarianten angestrebt werden.

- **Lösungsauswahl:** In diesem Zwischenschritt werden die zuvor generierten Lösungen miteinander korreliert und anhand vorab definierter Kriterien bewertet. Diese Kriterien sind spezifisch anhand der Problemsituation zu definieren.
- **Tragweitenanalyse:** Die Tragweitenanalyse dient dem Erkenntnisgewinn der Risiken und Chancen der ausgewählten Lösung.
- **Entscheiden und Umsetzen:** Abschließend werden die gedanklich vorliegenden Lösungen in der Realität umgesetzt. Die identifizierten Risiken und Chancen der Tragweitenanalyse sind während der Realisierung zu fokussieren.
- **Nachbereiten und Lernen:** Zum Abschluss der Methode können die durchlaufenen Zwischenschritte rekapituliert werden. Dies dient der nachhaltigen Sicherung des entstandenen Wissens. Die Reflexion des Problemlösungsprozesses dient der Dokumentation dieses Wissens für zukünftige Prozesse.

Abbildung 2.3 zeigt diese Vorgehensweise. Dabei kann jeder der Schritte wieder fraktal aufgeteilt werden, um darin jeweils wiederum SPALTEN anzuwenden.

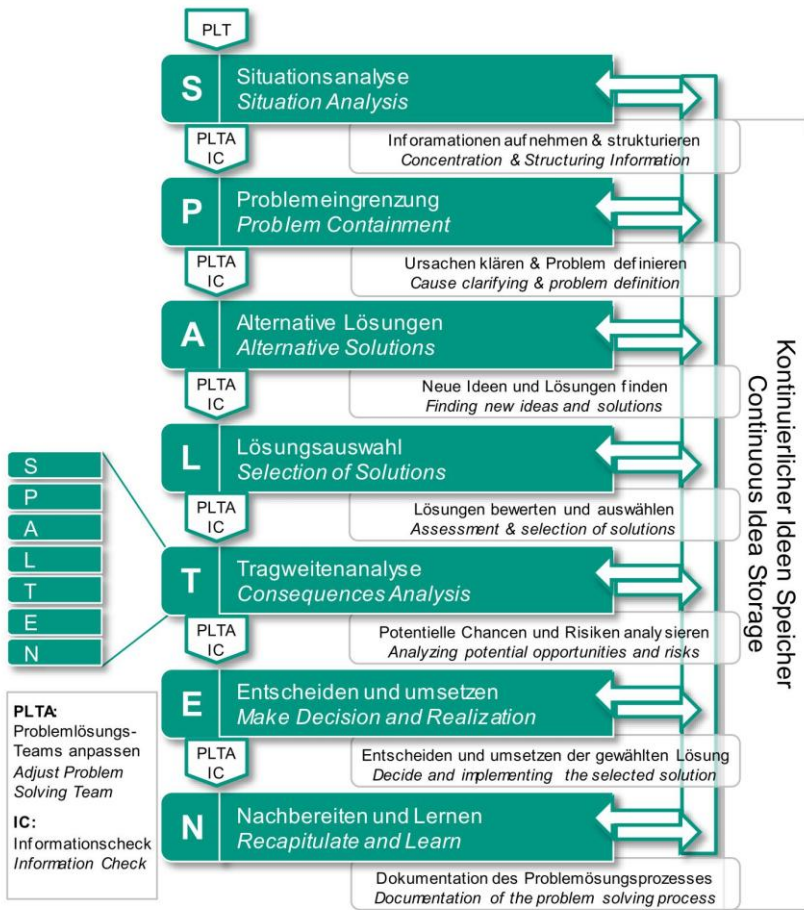


Abbildung 2.3: Problemlösung nach SPALTEN (Albers, Reiß, Bursac & Breitschuh, 2016). Diese sieben Schritte bearbeiten den Verlauf des Problemlösungsprozess sequenziell und können nutzerspezifisch durchschritten werden.

Zudem sei betont, dass SPALTEN ein teamorientiertes Vorgehensmodell ist. Die Zusammensetzung dieses Teams ist zu jedem Schritt zu überprüfen und gegebenenfalls hinsichtlich der notwendigen Kompetenzen anzupassen (PLTA). Der

Informationscheck (IC) innerhalb jedes Schrittes hat zum Ziel, dass die beste-hende Wissensbasis überprüft wird und ausreichend für die Ausführung des da-rauffolgenden Schrittes ist.

2.1.5 Das integrierte Produktentstehungsmodell (iPeM)

Das integrierte Produktentstehungsmodell (iPeM) wurde innerhalb der KaSPro mehrfach weiterentwickelt (Albers, Muschik & Braun, 2010; Albers & Braun, 2011; Albers, Reiss, Bursac & Richter, 2016; Meboldt, 2009). In Abbildung 2.4 ist der von Albers et al. (2016) veröffentlichte Stand aufgeführt. Diese Darstellung erweitert das Metamodell des iPeM um mehrere Layer, welche nun parallel die Produktentstehung, also auch die Entwicklung eines Validierungs-/Produktions- und Strategiesystems umfassen.

Innerhalb eines Layers steht stets die Überführung eines Zielsystems in ein Objektsystem, von links nach rechts, nach dem Verständnis des erweiterten ZHO-Modells im Mittelpunkt. Dabei ist das Handlungssystem in statische und dynamische Aktivitäten unterteilt. Erstere sind tabellarisch aufgelistet, während zweite in Form eines Phasenmodells definiert sind.

Die statischen Aktivitäten werden in Kern- und Basisaktivitäten unterteilt (Tabelle 2.1).

Tabelle 2.1: Kern- und Basisaktivitäten des iPeM nach Albers (Albers, Reiss et al., 2016)

Basisaktivitäten	Kernaktivitäten
Projekte managen	Profile finden
Validieren und Verifizieren	Ideen finden
Wissen managen	Prinzip und Gestalt modellieren
Änderungen managen	Prototyp aufbauen
	Produzieren
	Markteinführung analysieren und gestalten
	Nutzung analysieren und gestalten
	Abbau analysieren und gestalten

Das Phasenmodell zeigt, dass die Basisaktivitäten parallel und mehrfach zu den anderen Aktivitäten durchgeführt werden. Dadurch unterstützen, verbessern und stabilisieren sie den Produktentwicklungsprozess (Albers, Reiss et al., 2016). Die Kernaktivitäten können auf jeden Produktentwicklungsprozess angewendet werden.

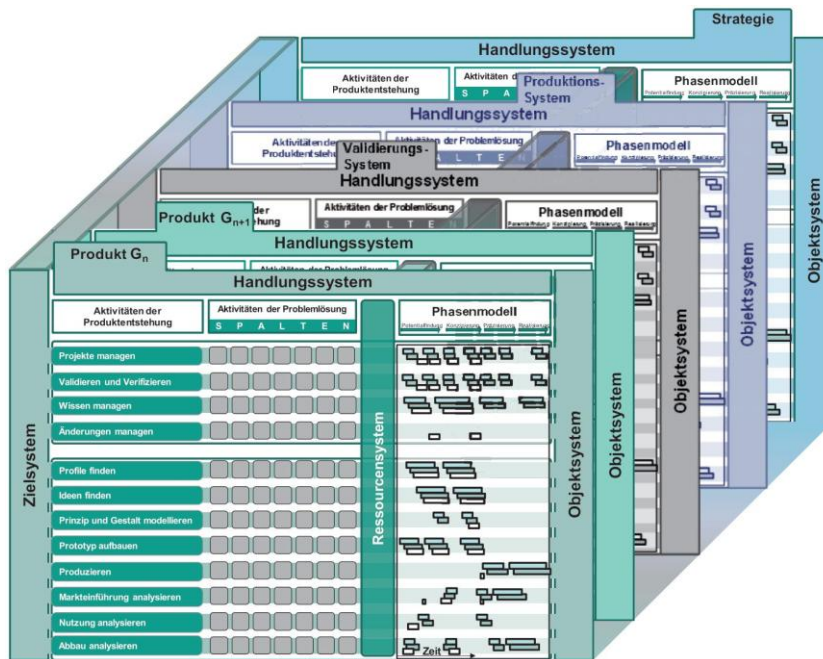


Abbildung 2.4: Das integrierte Produktentstehungsmodell (iPeM) (Albers, Reiss et al., 2016, S. 104). Das iPeM vereint das Verständnis des erweiterten ZHO-Modells mit einem Phasenmodell, bei dem jede einzelne Aktivitäten mit der Problemlösungsmethodik SPALTEN spezifiziert wird.

2.2 Validierung im Produktentstehungsprozess

Wie bereits in Abschnitt 2.1 ausgeführt, stellt die Validierung die zentrale Aktivität im Produktentstehungsprozess dar. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, zunächst die Begriffe Validierung und Verifikation zu definieren (Abschnitt 2.2.1). Im Anschluss

daran werden mehrere Ansätze zur effektiven Validierung wie der IPEK-X-in-the-Loop- (IPEK-XiL-) Ansatz (Abschnitt 2.2.2), die manöverbasierte Validierung (Abschnitt 2.2.3) und das Pull-Prinzip der Validierung (Abschnitt 2.2.4) eingeführt. Diese stellen innerhalb dieser Arbeit einen Schwerpunkt dar.

2.2.1 Validierung und Verifikation

Albers et al. stellen in ihren Ausführungen mehrere verfügbare Definitionen der Begrifflichkeiten Validierung und Verifikation zur Diskussion (Albers, Behrendt, Klingler & Matros, 2016). Sie stellen dabei fest, dass die Begriffe durchaus heterogen innerhalb von Normen wie der VDI 2206 oder der DIN ISO 9000 verwendet werden (VDI-Richtlinie 2206 Blatt 1; DIN EN ISO 9000).

Albers et al. schlägt vor die Begriffe anhand zweier Fragen zu definieren. Demnach ist die Verifikation mit der Frage „**Wird ein Produkt korrekt entwickelt?**“ (Albers, Behrendt et al., 2016, S. 542) und die Validierung mit „**Wird das richtige Produkt entwickelt?**“ (Albers, Behrendt et al., 2016, S. 542) zu beschreiben.

Innerhalb der VDI-Richtlinie 2206 Blatt 1 lassen sich diese Definitionen in Bezug auf die Entwicklung technischer Produkte und Systeme sinngemäß wiederfinden:

Verifikation

„Verifikation ist die Bestätigung durch den objektiven Nachweis, dass eine spezifizierte Anforderung erfüllt ist.“

„Die Anforderungen werden auf der gleichen Systemebene verifiziert, auf der sie spezifiziert wurden. Jede Anforderung muss durch eine geeignete Maßnahme verifiziert werden, z. B. durch Analyse, Inspektion, Demonstration oder Test. Eine Verifikationsmaßnahme kann mehrere Anforderungen nachweisen.“

(VDI-Richtlinie 2206 Blatt 1, S. 17)

Die Verifikation ist demnach ein Schritt, der die aktuelle Spezifikation mit der Zielsetzung vergleicht. Im Sinne des erweiterten ZHO-Modells wird also das aktuelle Objektsystem mit dem zu dem Zeitpunkt vorliegenden Zielsystem verglichen.

Validierung

„Die Validierung beweist, dass das Arbeitsergebnis vom Anwender für die spezifizierte Anwendung genutzt werden kann.“

„Die Validierung des Systems erfolgt mit dem Kunden oder zwischen Anforderungsgeber und -empfänger. Die Validierung des Systems erfolgt gegenüber den übergeordneten Anforderungen (nächst höhere Systemebene) und dient als Nachweis für die Erfüllung des Kundenwerts und der Bedürfnisse der Stakeholder der zugehörigen Systemebene.“

(VDI-Richtlinie 2206 Blatt 1, S. 18)

Die Validierung hat also einen konkreten Bezug zu den Stakeholderanforderungen und schließt somit den Kreis, ob das entwickelte Produkt auch tatsächlich den Kundenwert erfüllt. Somit ist die Verifikation als Teil der Validierung zu verstehen. Gemeinsam sichern diese Analyseaktivitäten die Eigenschaften des technischen Systems ab.

Diesen Sachverhalt stellen Albers et al. in Abbildung 2.5 dar.

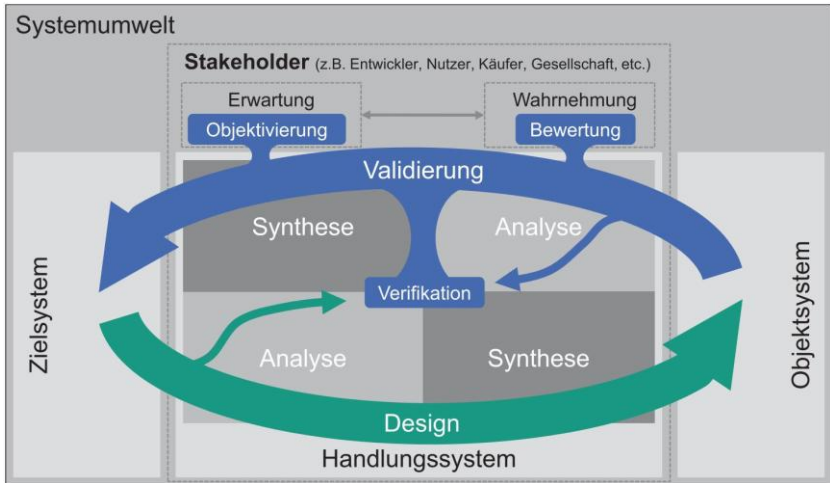


Abbildung 2.5: Design und Validierung im Produktentstehungsprozess (Albers, Behrendt et al., 2016, S. 545). Die Verifikation ist ein Teil der Validierung. Sie vergleicht die aktuelle Iteration von Ziel- und Objektsystem, während die Validierung die Stakeholderanforderungen nachweist. Das Design ist als Aktivität zu verstehen, die eine Lösung nach aktuellem Zielsystem synthetisiert.

2.2.2 IPEK-X-in-the-Loop-Ansatz

Um eine kontinuierliche Validierung im Produktentstehungsprozess einzubetten, ist es notwendig, von Entwicklungsbeginn an alle Aktivitäten den zukünftigen Anwendungsfällen gegenüberzustellen und somit den Kundenwunsch, bzw. die Stakeholderanforderungen sicherzustellen.

Über den Produktentwicklungsprozess hinweg liegt das zu validierende System oft nur in Teilen vor. Demzufolge unterscheiden sich die Teilsysteme auch in ihren jeweiligen Reifegraden. Daraus ergibt sich, dass die Validierung nicht nur im Gesamtsystem stattfinden kann, sondern schon in den Teilsystemen stattfinden muss. Deshalb ist es notwendig, bei der Modellbildung der Teilsysteme die notwendigen Wechselwirkungen über entsprechende Restsystemmodelle sicherzustellen, um trotzdem das Gesamtsystemverhalten zu validieren (Albers, Behrendt et al., 2016).

Albers et al. entwickelten den IPEK-XiL-Ansatz auf Basis dieses Grundsatzes (Albers & Düser, 2010). Aus der Steuergeräteentwicklung sind Model-in-the-Loop (MiL), Software-in-the-Loop (SiL) bzw. Hardware-in-the-Loop-Ansätze (HiL) bekannt. Hier werden einzelne Teilsysteme, virtuell oder physisch vorliegend, in virtuelle Gesamtsysteme eingebunden und somit in unterschiedlichen Reifegraden getestet. Dieser Ansatz wird konsequent um mechanische bzw. mechatronische Belange erweitert und beschreibt in Form des IPEK-XiL-Ansatzes das grundlegende Verständnis, dass die Validierung eines Teilsystems in das Gesamtsystem einzubetten ist. In Abbildung 2.6 ist hier beispielhaft ein Framework dargestellt, welches sich mit der Fahrzeugantriebsstrangentwicklung beschäftigt. Hierbei ist ein Gesamtfahrzeug als System „Fahrzeug“ sowohl in die Systeme Umwelt und Fahrer eingebunden. Die mit dem zu untersuchenden System interagierenden Systeme werden dabei als Connected Systems¹ (CS) bezeichnet. Diese als auch das System „Fahrzeug“ können dabei in physischen, virtuellen oder gemischt physisch-virtuellen Ausprägungen vorliegen. Somit ist es möglich das zu untersuchende System von der Gesamtsystem- über Teilsystem- bis zur Wirkflächenebene herunterzubrechen. Abhängig von der Ebene und dem entsprechenden Verifikations- bzw. Validierungsziel muss das Rest-Fahrzeug-Modell modelliert werden.

¹ engl. „connected systems“ = interagierende Systeme

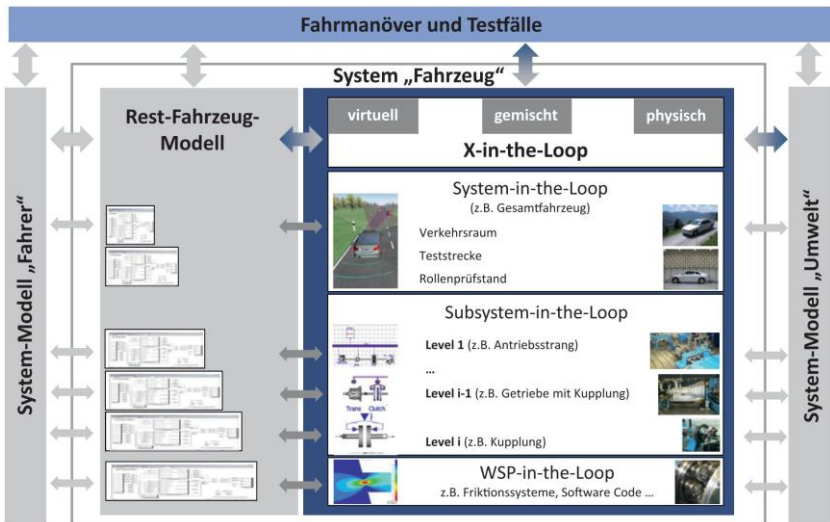


Abbildung 2.6: IPEK-XiL-Framework (Albers, Behrendt et al., 2016, S. 560). In der Ausprägung als Vehicle-in-the-Loop liegt hier ein in-the-Loop-Ansatz vor. Er zeigt das System Fahrzeug in unterschiedlichen Ausprägungen, in physischer, virtueller oder gemischter Form, als ganzes System oder als Teilsystem mit komplementären Restsystemmodell, jeweils in Interaktion mit den Systemen Umwelt und Fahrer.

Albers definiert das zu untersuchende System als „X“. Dieses ist hierbei definiert als „... das physische und/oder virtuelle (Teil)-System, welches im Fokus einer spezifischen Validierungsaktivität ist und über welches dabei Erkenntnisse gewonnen werden sollen.“ (Albers, Behrendt et al., 2016, S. 560)

Hierbei ergeben sich zwei Sichtweisen. Diese sind in Abbildung 2.7 beschrieben. Das System-in-Development (SiD) beschreibt das (Teil)-System, welches sich momentan in der Entwicklung befindet. Bei der Validierung des SiD werden vorrangig Eigenschaften und Funktionen getestet.

Die Bezeichnung System-under-Investigation (Sul) wird gewählt, wenn das (Teil)-System gar nicht entwickelt wird, sondern die Gewinnung von Wissen über dieses im Fokus steht.

Demzufolge kann ein Sul einen Teil des SiD darstellen, das gesamte SiD sein, oder außerhalb des SiD liegen (siehe Abbildung 2.7).

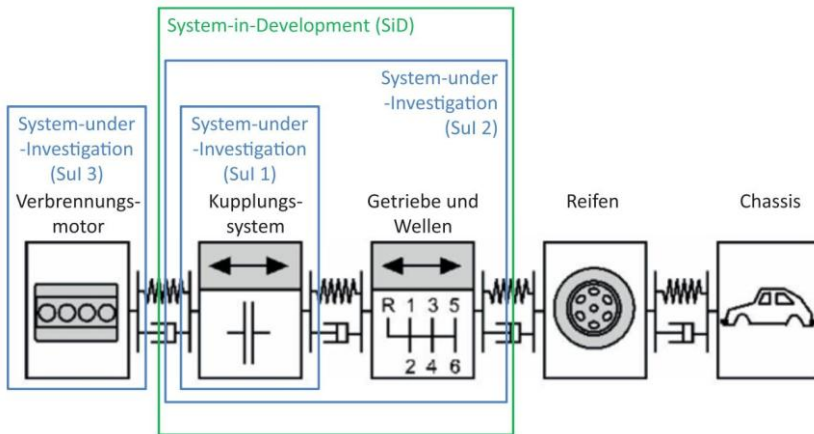


Abbildung 2.7: System-in-Development (SiD) und System-under-Investigation (Sul) (Albers, Behrendt et al., 2016, S. 561). Das Kupplungssystem und das Getriebe inklusive der Wellen sind das SiD. Das Sul ist in allen Ausprägungen dargestellt und kann innerhalb oder außerhalb des SiD liegen.

2.2.3 Manöverbasierte Validierung

Werden unter Verwendung des IPEK-XiL-Ansatzes (Teil-)Systeme validiert, so müssen dafür bestimmte Tests vorgesehen werden. „Ein Test umfasst stets einen Testfall, eine Testumgebung und eine Testinterpretation.“ (Albers, Behrendt et al., 2016, S. 554; Ebel, 2015). Dabei entspricht ein Testfall einem repräsentativen Modell eines Kollektivs von Anwendungsfällen. Darüber hinaus versteht Matros unter einem Testfall den Überbegriff von Fahrmanövern, kurz Manövern, welche nach Albers für spezielle Validierungsziele jeweils eine Referenzanwendung im späteren Betrieb des Systems darstellen (Albers, Behrendt et al., 2016; Matros, Schille, Behrendt & Holzer, 2015).

Ein Manöver ist dann vollständig definiert und unterscheidet sich dadurch nicht von einem Testfall, wenn es den Input-Verlauf des (Teil-)Systems, die Start- und Randbedingungen und das prognostizierte Systemverhalten beinhaltet. In der Fahrzeugentwicklung können hierbei ganze Manöverkataloge unterschiedlicher Fachdisziplinen vorliegen. Beispielsweise verwendet Matros diese für die

Entwicklung von Hybridantrieben, während Köber diese zur Validierung von Schaltqualität nutzt (Köber, 2023; Matros et al., 2015).

Matros et al. beschreiben diese Vorgehensweise als manöverbasiertes Validieren und nutzen diese definierten Manöver, um diese kundenrelevanten Stimuli in unterschiedlichen Ausprägungen von Validierungsumgebungen gleichermaßen zu verwenden (Matros et al., 2015). Abbildung 2.8 zeigt einen beispielhaften Manöver-Katalog.

Technische Funktion	Validierungsthema und -ziel	Manöverbeschreibung	Fahrereingaben	Fahrzeugbedingungen	Umweltbedingungen	Analyse-kriterien (+ Ziele)	Bewertungskriterien (+ Ziele)
Elektrisches Fahren	E-Fahrerlebnis im Charge Sustaining Betrieb (PHEV)	Bestimmung der maximalen elektrischen Beschleunigung	Gaspedal- Tip: In aus dem Stillstand, Pedalwert wird nach jedem Beschleunigungsversuch gesteigert (1%, 2%, 3%, ...)	SOC > 80%	Temperatur = 20 °C	Geschwindigkeit, Beschleunigung (Ziel: bei $v = 0$, $a_{\text{max}} > 3 \text{ m/s}^2$)	Urbanes E-Fahrerlebnis, Dynamik

Abbildung 2.8: Beispielhafter Manöver-Katalog (Albers, Behrendt et al., 2016, S. 556). Inputgrößen sind in Form der Fahrereingaben definiert. Die Start- und Randbedingungen sind hier auf Fahrzeug und Umwelt bezogen. Die Zielerreichung, bzw. das prognostizierte Verhalten wird anhand von Analyse- und Bewertungskriterien eingeschätzt. Innerhalb des Katalogs kann beispielsweise eine Sortierung nach technischer Funktion stattfinden.

2.2.4 Pull-Prinzip der Validierung

In den Abschnitten 2.1.5 und 2.2.2 wurden mit dem iPeM und dem IPEK-XiL-Ansatz Methoden und Vorgehensweisen erläutert, welche die Effizienz, aber auch Transparenz innerhalb des Produktentwicklungsprozess erhöhen. Diese basieren alle auf den in der KaSPro erforschten und entwickelten fünf Hypothesen zur Produktentstehung von Albers (Albers, 2010).

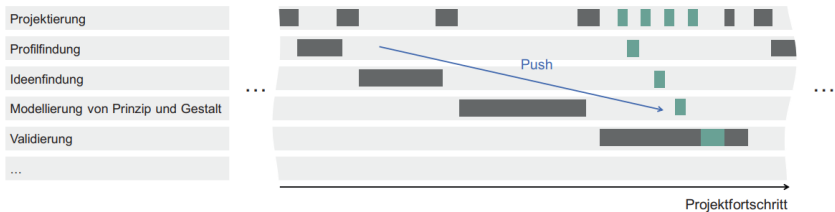
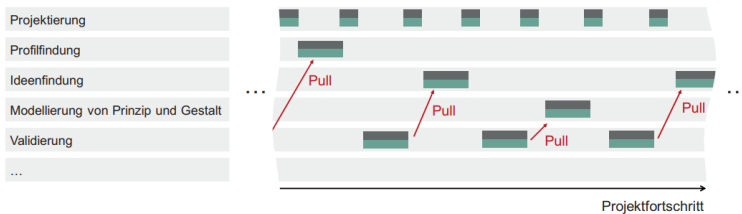
Beide Werkzeuge verbindet der Gedanke der kontinuierlichen Validierung entlang des Produktentwicklungsprozess. Das iPeM liefert hierfür die Voraussetzung, Basis- und Kernaktivitäten innerhalb des Handlungssystems in statische und dynamische Aktivitäten zu unterteilen. Anhand des bereits vorgestellten Phasenmodells ist eine Parallelisierung der Aktivitäten das Ziel dieser Vorgehensweise. Der IPEK-XiL-Ansatz versetzt die Produktentwickler in die Lage, sämtliche (Teil-)Systeme innerhalb vom virtuellen, physischen oder gemischt virtuell-physischen Gesamtsystem unter Berücksichtigungen des aktuellen Reifegrades bis hin zu einzelnen Wirkflächenpaaren untersuchen zu können.

Das Pull-Prinzip nutzt diese Methoden und verbindet sie mit einem Frontloading-Ansatz, der besagt, Validierungsaktivitäten möglichst frühzeitig im Produktentwicklungsprozess an Prüfständen oder mittels Simulationen durchzuführen (Thomke & Fujimoto, 2000).

Albers et al. stellen dabei die Validierung als Wissensquelle heraus, welche es ermöglicht, das durch Validierung gewachsene domänen- und fachspezifisches Wissen direkt in die Entscheidungen hinsichtlich Ziel-, Handlungs- und Objektsysteme einfließen zu lassen (Albers, Matros, Behrendt & Jetzinger, 2015). Durch diese kontinuierliche und prozessbegleitende Aktivität werden Wissenslücken und Unsicherheiten frühzeitig aufgearbeitet und reduziert. Weil dadurch für jeden weiteren Schritt innerhalb des iPeM eine vorausgegangene Validierung als Initiierungs- bzw. Koordinationsfunktion von Syntheseaktivitäten gilt, definieren Albers et al. dies als Pull-Prinzip der Validierung.

Das Pull-Prinzip unterscheidet sich vom Push-Prinzip dadurch, dass nicht zuerst die Modellierung von Prinzip und Gestalt des Produkts abgeschlossen wird (primäre Aktivitäten), um anschließend in die Validierung (sekundäre Aktivitäten) einzusteigen (Abbildung 2.9). Dadurch werden die sekundären Aktivitäten im Sinne des Frontloadings automatisch in frühere Phasen verlegt. Die Modellierung von Validierungsumgebungen startet somit ebenfalls früher und verhindert demzufolge eine kontextfreie Entwicklung von Prototypen oder Simulationsmodellen (Albers, Behrendt et al., 2016).

Albers et al. sprechen hier vor allem auch die Vorteile dieses Vorgehens im Sinne einer Produktgenerationsentwicklung an. Konsequenterweise nach dem Pull-Prinzip entwickelte Produkte weisen einen höheren Anteil von domänen- und fachspezifischem Wissen auf. Alle Nachfolgenerationen dieses Produktes starten also bei einem höheren Initialwissen und zusätzlich können bereits vorliegende Modelle oder Validierungsumgebungen wiederverwendet werden. Dadurch entsteht ein erheblicher zeitlicher und finanzieller Vorteil, welcher sich schlussendlich in einem höheren erreichbaren Produktreifegrad niederschlägt.

Push-Prinzip der Validierung (Beispiel-Phasenmodell)**Pull-Prinzip der Validierung (Beispiel-Phasenmodell)**

- Primäre Aktivitäten** mit direktem Zusammenhang zum Produkt
- Sekundäre Aktivitäten** zur Entwicklung von Validierungsumgebungen
- Parallelisierung** von primären und sekundären Aktivitäten

Abbildung 2.9: Push- und Pull-Prinzip der Validierung (Albers et al., 2015, S. 78). Unterschiede und Vorteile von Pull- gegenüber Push-Prinzip liegen vor allem in der Parallelisierung von primären und sekundären Aktivitäten. Dadurch können Validierungsumgebungen deutlich früher entwickelt werden und liefern somit die Grundlage deutlich früher (Teil-)Systeme zu validieren.

2.3 Validierung von Fahrzeugantriebssystemen

In diesem Abschnitt werden die Methoden und Vorgehensweisen der vorangegangenen Ausführungen auf die Entwicklung von Fahrzeugantriebssystemen übertragen. Gerade in der Fahrzeugentwicklung bieten sich Ansätze zur effizienten Validierung aus der KaSPro besonders an. Die Antriebssysteme haben sich in den vergangenen Jahrzehnten von handgeschalteten konventionell, also mit Verbrennungsmotor, betriebenen Fahrzeugen über automatisierte Getriebe bis hin zu (teil-) elektrifizierten Antriebssträngen weiterentwickelt. Über diese Periode wurde ebenfalls eine Vielzahl von virtuellen Methoden entwickelt, um die Validierung der Produkteigenschaften zu unterstützen (Albers, Stier, Babik & Geier, 2013).

Der IPEK-XiL-Ansatz und das Pull-Prinzip bieten ein ideales Gerüst, um im Sinne einer Produktgenerationsentwicklung einzelne Teilsysteme eines Gesamtsystems auszutauschen. Mittels der bereits vorliegenden Validierungsumgebungen beginnt sowohl die Validierung der Teilsysteme bereits frühzeitig als auch die Anpassungen und Weiterentwicklungen der entsprechenden Validierungsumgebungen selbst.

Abschnitt 2.3.1 leitet in die Begrifflichkeit Road to Rig (R2R) ein. Nachfolgend wird der physische Fahrversuch beschrieben (Abschnitt 2.3.2), um in Abschnitt 2.3.3 über die Beschreibung unterschiedlicher Simulationsansätze einen Überblick über bestimmte Prüfstandstypen zu geben (Abschnitt 2.3.4). Weil in der vorliegenden Arbeit der Fokus auf dem Rollenprüfstand als Gesamtfahrzeugprüfstand liegt, schließt dieser Abschnitt mit einer Übersicht der gängigen Regelarten dieser Validierungsumgebung ab.

2.3.1 Road to Rig

Sciuto et al. stellen das Road to Rig²-Konzept 2001 vor (Sciuto & Hellmund, 2001). Dabei verlagern sie reale Getriebedauerhaltbarkeitstests mit Fahrzeugprototypen auf einen dynamischen Antriebsstrangprüfstand. Ziel der Untersuchungen ist das Frontloading von Validierungsaktivitäten und die Reduzierung des Prototypenbedarfs.

In dieser Form der Verlagerung eines Tests auf einen Antriebsstrangprüfstand ist es notwendig, das restliche Fahrzeug mit einem Ersatzmodell abzubilden. Gleichzeitig sind die Systeme Umwelt und Fahrer durch entsprechende Akteure und Vorrichtungen in der Validierungsumgebung ebenfalls zu ersetzen.

Das Gesamtfahrzeug wird in seinen Eigenschaften von einem Fahrwiderstandsmodell von den Prüfstandsmaschinen reproduziert. Dabei ist es möglich jeden Beladungszustand und verschiedene Fahrzeugkonzepte, hier front- oder heckbetrieben, zu simulieren. Das System Fahrer wird durch unterschiedliche Verläufe von Lastanforderung an die Antriebsmaschine sowie diverse Varianten des Kupplungs- und Bremsverhaltens bis hin zum Lenkverhalten beschrieben. Das

² engl. „Road to Rig“ – von der Straße auf den Prüfstand (R2R)

System Umwelt bildet in der Studie der Autoren unterschiedliche Reibwerte der Straße ab.

Dieses Vorgehen lässt sich mit den von Albers et al. formulierten Methoden in Abschnitt 2.1 und 2.2 einordnen und stellt ein frühes Praxisbeispiel dar.

In einer weiterentwickelten Form spricht Schenk von dem Begriff „Road to Rig to Simulation (R2R2S) und ergänzt hierbei die Simulation in der Definition (Schenk, 2017). In dieser Definition ist der von Albers vorgestellte IPEK-XiL-Ansatz vollständig integriert und stellt ein weiteres Beispiel für den großen Gültigkeitsbereich der KaSPro dar.

2.3.2 Fahrversuch

Der reale Fahrversuch liefert sowohl die Datenbasis, welche für die Modellbildung, Kalibrierung als auch für die Validierung von Fahrzeugmodellen notwendig ist. Nur in ihm sind die Systeme Fahrer, Fahrzeug und Umwelt in ihrer Gesamtheit vorhanden und stellen somit die Basis für eine Bewertung unterschiedlicher Fragestellungen mit objektiven oder subjektiven Bewertungskriterien dar. Natürlich können gewisse Problemstellungen auch ohne physische Wechselwirkung zwischen den drei Systemen stattfinden.

Käppler definiert den Fahrversuch wie folgt:

Fahrversuche...

...verifizieren oder falsifizieren Hypothesen und machen Autos gebrauchsfertig.

...validieren Berechnungs- und Simulationsergebnisse als ganzheitliche Untersuchungen des Gesamtfahrzeugs oder seiner Teilsysteme in definierten Situationen.

...überprüfen Vorstellungen und Erwartungen sowie Ergebnisse, Simulationen und Tests der Vorphasen.

(Käppler, 2015, S. 9)

Käppler beschreibt somit den Fahrversuch als einen notwendigen Schritt, um die Eigenschaftsabsicherung des Produktes durch Verifikation und Validierung sowohl

im Entwicklungsprozess als auch vor dem Kunden sicherzustellen. Er ist somit innerhalb des Produktentwicklungsprozess notwendig, um schließlich aufgestellte Hypothesen zum Fahrverhalten zu verifizieren oder zu falsifizieren (Käppler, 2015).

Mit Fahrversuchen wird grundsätzlich versucht das Kundennutzungsverhalten abzubilden und zeitlich zu raffen. D.h. bestimmte kundenrelevante Manöver werden dann entweder im realen Straßenverkehr oder auf speziell konzipierten Prüfgeländen reproduziert (vgl. Abschnitt 2.2.3). Für diese Manöver existiert eine Vielzahl an messtechnischen Mitteln, um die gefragten physikalischen Größen in der gewünschten und benötigten Genauigkeit aufzuzeichnen. Diese Messergebnisse sind die Basis für objektive Bewertungen. Dabei können Zeitverläufe, Statistiken oder von unterschiedlichen Normen definierte Metriken verwendet werden. Werden bestimmte Manöver durch subjektive Kriterien von Probanden bewertet, so sei an dieser Stelle darauf verwiesen, dass die Erzeugung von Bewertungs-/Fragebögen eine hohe Sensibilität des Erstellers erfordert, um die Probanden und deren Bewertungsfähigkeit nicht zu beeinflussen.

Käppler schlägt folgende Test-Roadmap vor (Käppler, 2015):

1. Formulierung der statistischen Hypothesen und Planung für das Sammeln und Analysieren von Daten
2. Festsetzen der Entscheidungsregeln, nach denen die statistischen Hypothesen getestet werden sollen
3. Gewinnen der Daten nach Versuchsplan
4. Analyse der Daten nach Versuchsplan
5. Entscheidung über Annahme (Verifikation) oder Ablehnung (Falsifikation) der statistischen Hypothese und induktive Ableitung hinsichtlich der Richtigkeit der Arbeitshypothese

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird auf diese Vorgehensweise verwiesen. Die Grundlagen der statistischen Methoden werden in Abschnitt 2.4 vorgestellt.

Fahrversuche können aus regelungstechnischer Sicht in open und closed loop Tests zerlegt werden. Dabei können open-loop Manöver so klassifiziert werden, dass sie das zu untersuchende System mit einem bestimmten Stimulus anregen und dann die Systemreaktion bewertet wird. Bei einem closed-loop Manöver liegt ein geschlossener Regelkreis vor, der wiederum erfordert, dass die Rückführung der Systemantwort auf den Regelmechanismus vorliegt.

Ein Beispiel für ein open loop Manöver wäre eine fahrdynamische Untersuchung mit einem definierten Lenkwinkелеinschlag, während das Durchfahren eines doppelten Fahrspurwechsels einem closed-loop Manöver entspricht (Käppler, 2015, S. 59).

Fahrversuche sind in der Lage unterschiedliche Domänen wie Fahrdynamik, Fahrverhalten, Dauerhaltbarkeit, Sicherheit oder klimatische Grenzbetriebsbedingungen abzubilden.

2.3.3 Simulationsmethoden

Eine Simulation verfolgt das Ziel, das zu betrachtende System mit Hilfe eines mathematischen Modells so nachzubilden, dass sich dieses wie das reale System verhält. Schramm et al. unterscheiden bei der Modellierung von technischen Systemen zwei grundsätzliche Wege (Schramm, Hiller & Bardini, 2010):

1. Theoretische Modellbildung: Physikalische Gesetze sind die Basis für mathematische Modelle
2. Experimentelle Modellbildung: Die Modellstruktur folgt nicht zwangsläufig physikalischen Gesetzen, sondern wird mathematisch formuliert und so parametrisiert, dass sich Ein- und Ausgangssignale verhalten wie beim realen System

Bei der Modellbildung besteht immer der Zielkonflikt, das für die Untersuchung relevante Systemverhalten mit der geforderten Genauigkeit bei akzeptablem und vertretbarem Rechenaufwand zu untersuchen. Eine Steigerung der Komplexität der Modelle erhöht zwar die Genauigkeit, aber gleichzeitig ergeben sich kompliziertere Modellgleichungen mit einer gestiegenen Anzahl von Modellparametern. Dadurch steigt die Rechenzeit. Es ist also für jeden Anwendungsfall zu entscheiden, ob sich die gesteigerte Modelldetaillierung in einem angemessenen Verhältnis zum Untersuchungszweck befindet.

Für die Simulation von Antriebssträngen von Gesamtfahrzeugen definiert Isermann grundsätzlich zwei unterschiedliche Ansätze (Abbildung 2.10), welche sich nach dem Zusammenhang zwischen Ursache und Wirkung charakterisieren lassen (Isermann, 2010). Diese werden in den nachfolgenden Abschnitten vorgestellt.

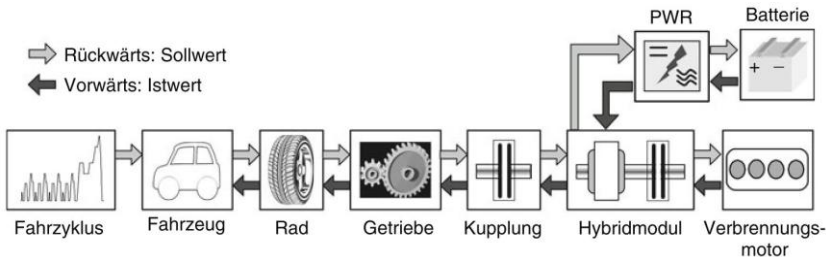


Abbildung 2.10: Vorwärts- und Rückwärtssimulation am Beispiel eines hybriden Antriebsstrangs (D. Kraft, Huber & Sterzing-Oppel, 2012, S. 327). Diese Ansätze werden nach der Richtung des Leistungsflusses bzw. nach Zusammenhang zwischen Ursache und Wirkung innerhalb der Simulation kategorisiert.

2.3.3.1 Vorwärtssimulation

Die vorwärtsgerichtete Modellierung simuliert das physikalische Verhalten jeder Komponente mit Steueranweisungen und erzeugt die Fahrzeugleistung als Output. Es kommt hierbei ein Fahrer als Regler zum Einsatz, der einen Fahrerwunsch, welcher sich aus einem Gaspedal- und Bremspedalverlauf zusammensetzen kann, vorgibt. Aus dem Gaspedalwert, welcher als Inputgröße in das Verbrennungsmotormodell geht, wird ein Motormoment bestimmt, welches dann durch den Antriebsstrang an die Räder geleitet wird und dort eine Zugkraft liefert (Huber, 2010). Der Signalfluss einer Vorwärtssimulation ist in Abbildung 2.10 in dunkelgrau dargestellt.

2.3.3.2 Rückwärtssimulation

Bei der Rückwärtssimulation wird der Zusammenhang zwischen Ursache und Wirkung umgekehrt. Als Vorgabe dienen hier Fahrzeuggeschwindigkeit und -beschleunigung. Diese werden dann rückwärts durch den Triebstrang in die Betriebspunkte, d.h. Drehzahl und -moment, von Verbrennungsmotor und elektrischem Antrieb überführt. Der Vorteil der Rückwärtssimulation ist, dass kein Fahrermodell notwendig ist (siehe Abbildung 2.10, hellgraue Pfeile). Diese sind bei der Vorwärtssimulation sehr aufwändig, um ein menschliches und realistisches Fahrverhalten darzustellen.

2.3.4 Prüfstandstypen

Nachdem in den vorangegangenen Abschnitten sowohl der Road to Rig-Ansatz, der physische Fahrversuch als auch die Möglichkeiten zur Simulation behandelt werden, liegt der Fokus in diesem Abschnitt auf der Darstellung der unterschiedlichen Prüfstandstypen, welche bei der Verwendung des IPEK-XiL-Ansatzes im Rahmen der Fahrzeugentwicklung von Bedeutung sind (Abbildung 2.11). Dabei folgt der Aufbau des Abschnitts methodisch dem C&C²-Ansatz, beginnend bei der Vorstellung von Komponentenprüfständen bis hin zum Gesamtfahrzeugprüfstand. Letzterer ist der zentrale Prüfstand der vorliegenden Forschungsarbeit, weshalb hierauf eine genauere Betrachtung der bekannten Prüfstandsregelarten stattfindet.

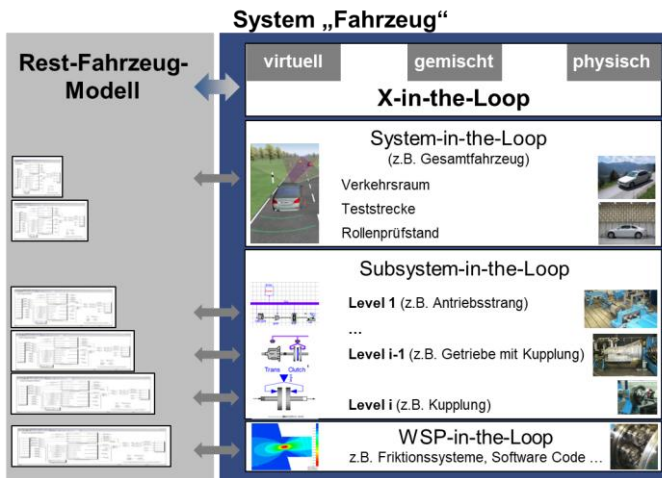


Abbildung 2.11: Unterschiedliche Prüfstandstypen innerhalb des Produktentwicklungsprozesses nach (Albers, Behrendt et al., 2016). Auf jeder Systemebene innerhalb der Fahrzeugentwicklung sind Validierungsumgebungen notwendig. Sie ermöglichen reine Softwaretests bis hin zur Validierung von Funktionen oder Eigenschaften in Gesamtfahrzeugen sowohl in open- als auch closed-loop Ausrichtung. Im vorliegenden Beispiel ergänzt das Rest-Fahrzeug-Modell das jeweilige Teilsystem zu einem Gesamtsystem.

2.3.4.1 Komponentenprüfstand

Paulweber definiert Komponenten im Kontext eines gesamten Fahrzeugantriebsstrangs (Paulweber & Lebert, 2014). Rein historisch betrachtet stellt für ihn der Verbrennungsmotor nach wie vor das wichtigste Antriebsaggregat dar. Unter Berücksichtigung der aktuellen Vielzahl von Antriebskonzepten im Pkw-bereich wird auf diese Abstrahierung verzichtet und der Verbrennungsmotorenprüfstand ebenfalls als Komponentenprüfstand gewertet.

Zu den Komponenten im Antriebsstrang zählen:

- Traktionsmaschine (verbrennungsmotorisch, elektrisch) und deren Komponenten (z.B. Turbolader, Startervorrichtung)
- Getriebe und deren Komponenten (z.B. Kupplungen, Wellen, Längs- und Querdifferential)
- Hochvolt-Batterie
- Inverter/Leistungselektronik
- Brennstoffzelle
- Steuergeräte (siehe Abschnitt 2.3.4.2)

Die Anwendungsgebiete für Komponentenprüfstände sind sehr vielfältig und richten sich hauptsächlich an das Validierungsziel des jeweiligen Tests. Beispiele hierfür sind nach Paulweber (Paulweber & Lebert, 2014):

- Leistungsprüfstand
- Funktionsprüfstand
- Dauerlaufprüfstand
- Kalibrierprüfstand
- Abgaszertifizierungsprüfstand

Häufig können mit demselben Aufbau mehrere dieser Validierungsziele gemessen werden. Eine weitere Möglichkeit ist die Unterscheidung in stationäre und dynamische Prüfstände. Erstere sind vorrangig dafür geeignet, über einen längeren Zeitraum einzelne Betriebspunkte einzuregeln und beispielsweise Kraftstoffverbrauchskennfelder, Leistungskurven oder Effizienzkennfelder zu ermitteln. Mit den dynamischen Prüfständen wird das transiente Verhalten der Komponenten untersucht. Deshalb sind die Anforderungen an Regelung und Messtechnik in diesen Anordnungen höher.

Ein Komponentenprüfstand umfasst dabei mehrere Bestandteile. Diese unterscheiden sich je nach Prüfling, bzw. SiD.

- Belastungsmaschine
- Prüfstandsmechanik
- Konditioniervorrichtung (Betriebsmedien)
- Prüfstandsmesstechnik (z.B. für Drehmoment, Drehzahl, Temperaturen, Drücke, Massenströme, Abgas, etc.)
- Prüfstandsautomatisierung
- Kommunikationsschnittstelle zum Steuergerät mit Kalibriermöglichkeit

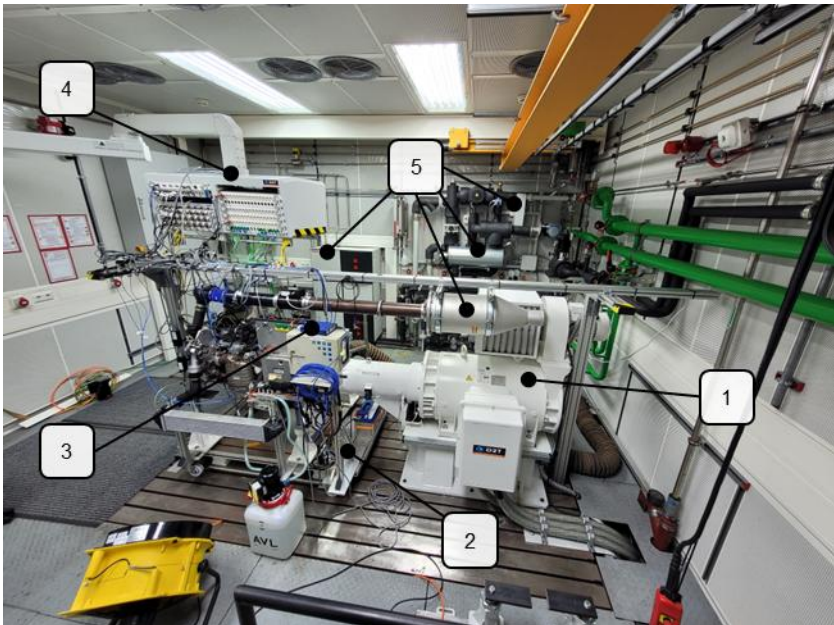


Abbildung 2.12: Dynamischer Motorenprüfstand der THU. Folgende Bestandteile sind auf der Abbildung dargestellt: 1. Belastungsmaschine, 2. Prüfstandsmechanik, 3. Kommunikation zum kalibrierfähigen Steuergerät, 4. Messgalgen mit Messtechnik, 5. Konditioniervorrichtungen (Kraftstoff, Kühlwasser, Ansaugluft)

2.3.4.2 Steuergeräteprüfstand

Dem Steuergerät als Teil des Antriebsstrangs kommt eine besondere Bedeutung zu. Wie in Abschnitt 2.2.2 angedeutet sind die Steuergeräteprüfstände unter dem Begriff Hardware-in-the-Loop (HiL) bekannt. Sie sind ein wichtiger Baustein bei der Validierung von Software und Funktionalität der elektrischen Steuergeräte. Dabei liegt das Steuergerät physisch als ganzes oder virtuell vor, oder einzelne Funktionalitäten des entsprechenden Softwareumfangs. Folgende drei Unterarten werden unterschieden (Isermann, 2006):

- Model-in-the-Loop (MiL)
- Software-in-the-Loop (SiL)
- Hardware-in-the-Loop (HiL)

Die MiL-Umgebung umfasst hierbei die Integration eines einzelnen Simulationsmodells einer Funktionalität innerhalb einer Gesamtsimulation. Eine Funktionalität kann beispielsweise ein Regler sein, während das Restsystemmodell dann die entsprechende Regelstrecke umfasst.

Die SiL-Umgebung beinhaltet in der Regel den vollständigen Softwarecode und wird in einem virtuellen Steuergerät betrieben.

Der HiL-Aufbau unterscheidet sich von den vorher genannten dadurch, dass das reale Steuergerät verwendet wird. Das Restsystemmodell bildet ebenfalls die unterschiedlichen Systeme Fahrer, Fahrzeug und Umwelt ab.

Häufig unterscheiden sich MiL/SiL- von HiL-Prüfständen durch ihre nicht vorhandene Echtzeitleistungsfähigkeit. Reale Steuergeräte müssen in Echtzeit rechnen, während es bei virtuellen Steuergeräten aufgrund der sehr umfangreichen Modelle von beispielsweise Reifen, oftmals nicht möglich ist diese Geschwindigkeiten zu erreichen.

2.3.4.3 Antriebsstrangprüfstand

Auf einem Antriebsstrangprüfstand kann der Antriebsstrang eines Fahrzeuges ohne einen Fahrzeugprototypen getestet werden. Moderne Ausführungen dieser Validierungsumgebung ermöglichen es, sämtliche Antriebsstrangkongfigurationen abzubilden (Abbildung 2.13). Das IPEK besitzt innerhalb der Forschungsgruppe Antriebssystemtechnik mehrere Ausführungen dieser Prüfstandsgattung.

Weil der Antriebsstrangprüfstand, oder auch Powertrain-in-the-Loop³ (Abbildung 2.14), über alle Komponenten des Antriebs inklusive Steuergeräte verfügt, können ebenfalls Softwarefunktionen übergreifend frühzeitig validiert werden.

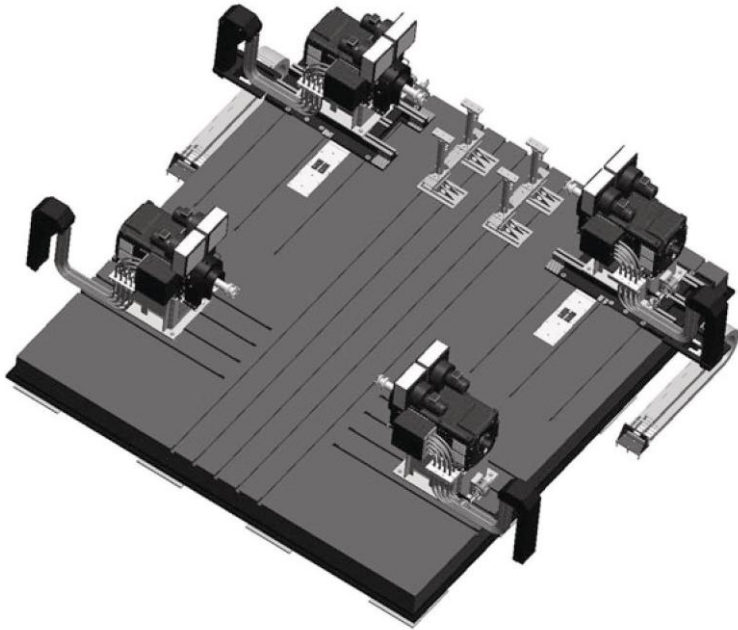


Abbildung 2.13: Allrad-Antriebsstrangprüfstand (Paulweber & Lebert, 2014, S. 67). Das Maschinenbett weist in dieser Ausführung vier elektrische Maschinen auf, welche flexibel auf verschiedene Spurweiten und Achsabstände anpassbar sind. Zwischen diesen Maschinen ist ein Teil der Prüfstandsmechanik zu sehen. Mit diesen Belastungsmaschinen kann jede Antriebsstrangkonfiguration getestet werden.

³ engl. powertrain - Antriebsstrang



Abbildung 2.14: Powertrain-in-the-Loop-Prüfstand (Institut für Produktentwicklung [IPEK], 2025). Dreimotoren-Prüfstand mit hochdynamischer Antriebsmaschine zur physikalischen Untersuchung kompletter Antriebsstränge. Der Prüfstand ermöglicht die Echtzeitsimulation des virtuellen Restsystems zur Nachbildung realer Betriebsbedingungen.

2.3.4.4 Gesamtfahrzeugprüfstand

Der Gesamtfahrzeugprüfstand, auch Rollenprüfstand oder Vehicle-in-the-Loop, bietet die Möglichkeit Fahrzeuge in einem weit fortgeschrittenen Entwicklungsstadium zu testen und somit hinsichtlich ihrer Produkteigenschaften zu validieren. Schlussendlich finden auch die Zertifizierungen auf diesen Prüfständen statt. Dabei sind die Einsatzgebiete für diese Prüfstandsform breit gefächert. Sie reichen von der Messung von Abgasemissionen, elektromagnetischer Verträglichkeit (EMV) bis hin zur Analyse des NVH⁴-Verhaltens. Auch die Kalibrierung von Fahrzeugassistenzsystemen (Albers & Düser, 2010), der

⁴ engl. noise vibration harshness (NVH) – Geräusch, Vibration, Rauigkeit

Untersuchung spezieller Gebiete wie dem Wiederstartkomfort von hybriden Antriebssträngen (Albers et al., 2017), insgesamt Themen des Fachgebietes Fahrbarkeit, Fahrdynamik und Fahrstrategie sind von großem Interesse.

Generell existieren bei Rollenprüfständen unterschiedliche Konzepte, welche sich an den Anwendungsfall und den entsprechenden Prüfling richten. Die folgende Auflistung ist an Paulweber et al. angelehnt (Paulweber & Lebert, 2014, S. 74)

- 1x1-Rolle: Eine Rolle mit einer Achse und einer Belastungsmaschine (z.B. motorisierte Zweiräder)
- 2x1-Rolle: Zwei Rollen auf einer Achse mit einer Belastungsmaschine (z.B. front- oder heckgetriebene Fahrzeuge)
- 2x2-Rolle: Zwei Rollen mit zwei Belastungsmaschinen (z.B. Akustikrollenprüfstände)
- 4x2-Rolle: Vier Rollen, wobei jeweils zwei Rollen auf einer Belastungsmaschine mechanisch verbunden sind (z.B. allradgetriebene Fahrzeuge)
- 4x4-Rolle: Vier Rollen mit vier Belastungsmaschinen (z.B. allradgetriebene Fahrzeuge)

Sind die Räder einer Achse auf einer Rolle mechanisch miteinander verbunden, so ist eine Simulation von Kurvenfahrten nicht möglich. Somit ist von den aufgezählten Konzepten nur die 4x4-Rolle für diesen Zweck geeignet. Im Rahmen dieser Arbeit wird eine 4x2-Rolle verwendet (Abbildung 2.15).

Zusätzlich sind Rollenprüfstände auch nach unterschiedlichen Anwendungen ausgeprägt, wie beispielsweise der Emissionsentwicklung und -zertifizierung, der Verbrauchs- und Leistungsmessung, für Dauerläufe und Dauerfestigkeit oder NVH- und EMV-Analysen. An dieser Stelle sei auf weiterführende Literatur verwiesen.

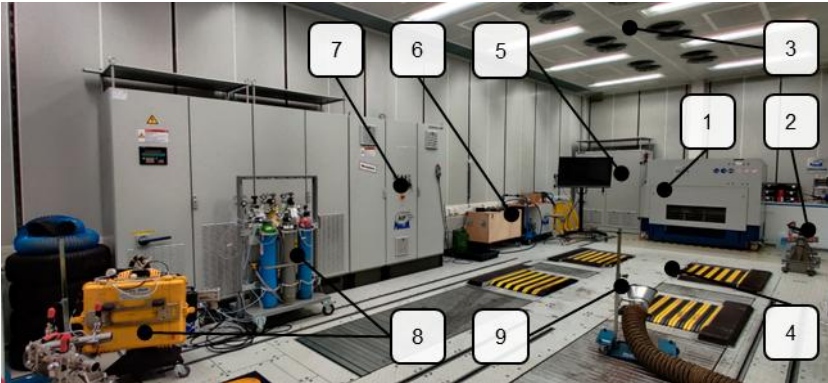


Abbildung 2.15: 4x2-Rollenprüfstand der THU. 1. Fahrtwindgebläse, 2. Fahrzeugfixierung, 3. Raumklimatisierung über Decke, 4. 4x2 Rollen inklusive Abdeckung und Zentriervorrichtung, 5. Hochvoltbatteriesimulator, 6. Fahrroboter, 7. Prüfstandssteuerung, 8. Mobile Abgasmesstechnik mit Kalibriergasen, 9. Absaugvorrichtung für Abgase

2.3.4.5 Prüfstandsregelarten

Das in seiner Gesamtheit vorliegende Fahrzeug kann hierbei von einem menschlichen Fahrer aber auch einem Fahrroboter geregelt werden. Die Regelung des Systems Umwelt obliegt dem Prüfstand selbst. Beispielsweise ist je nach Regelart die Einstellung des Fahrbahnwiderstandes unterschiedlich. Weil so sowohl der Prüfstand als auch das Fahrzeug separat geregelt werden können, existiert eine große Anzahl an möglichen Kombinationen.

Paulweber et al. unterscheiden hierbei prinzipiell die Regelungen der Zugkraft, der Fahrzeuggeschwindigkeit und die Straßenlastsimulation. In der nachfolgenden Tabelle ist eine für diese Arbeit relevante Auswahl aufgeführt. Auf weiterführende Literatur wird an dieser Stelle verwiesen (Paulweber & Lebert, 2014).

Tabelle 2.2: Regelarten auf Rollenprüfständen nach Paulweber (Paulweber & Lebert, 2014)

Name der Regelart	Regelung des Prüfstands	Regelung des Prüflings
Straßenlastsimulation	Straßenlastsimulation	Rollengeschwindigkeit
v- α	Rollengeschwindigkeit	Alpha (Fahrpedal)
n- α	Drehzahl (im Antriebsstrang)	Alpha (Fahrpedal)
F-v	Rollenzugkraft	Rollengeschwindigkeit

Im Folgenden wird auf diese Regelarten näher eingegangen, ebenso auf die Messverfahren für die notwendigen physikalischen Größen innerhalb der Regelung.

Straßenlastsimulation

Um reale Fahrscenarien auf einem Rollenprüfstand zu reproduzieren, ist es notwendig, die bei der realen Fahrt auftretenden Fahrwiderstände $F_{Antrieb}$ identisch zu übertragen. Hierzu gehören der Rollreibungswiderstand F_{Roll} , Luftwiderstand F_{Luft} , Beschleunigungswiderstand F_{Besch} und Steigungswiderstand F_{Steig} :

$$F_{Antrieb} = F_{Roll} + F_{Luft} + F_{Besch} + F_{Steig} \quad 2.1$$

Auf Basis dieser Beziehung berechnet die Prüfstandsautomatisierung die erforderliche Antriebsleistung $P_{Antrieb}$ für jede Geschwindigkeit v des Prüffahrzeugs.

$$P_{Antrieb} = F_{Antrieb} \cdot v \quad 2.2$$

Emissionszyklen, wie der Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) oder der Worldwide Harmonised Light Vehicle Test Procedure (WLTP), die auf Rollenprüfständen gefahren werden, enthalten keinen Steigungswiderstand F_{Steig} . Die übrigen Fahrwiderstände werden durch Ausrollen des Testfahrzeugs ermittelt und anschließend durch mehrere Lastanpassungsverfahren an die Umgebung des Rollenprüfstands adaptiert. Werden reale Testfälle auf einem Rollenprüfstand abgebildet, so ist ein vom Testfall abhängiges Höhenprofil die Basis für den Steigungswiderstand F_{Steig} .

Die Fahrwiderstandsbeiwerte für das Versuchsfahrzeug, einschließlich des Messsystems für realen Fahrbetrieb, werden experimentell auf einer ebenen Fläche über Ausrollkurven ermittelt. Damit ist es möglich, die Last des Rollenprüfstandes für eine Lastsimulation realitätsnah anzupassen.

Die messtechnische Erfassung des Höhenprofils ist sehr komplex. Die Höheninformation kann über den barometrischen Höhendruck oder GPS-Messtechnik ermittelt werden (Cortès et al., 2023). Beide Messverfahren weisen jedoch Signalschwankungen auf. Die barometrische Höhe beinhaltet das Rauschen des Drucksensors und ist zudem anfällig für Messwertänderungen durch die dynamische Strömung am und um das Fahrzeug. Die durch GPS ermittelte Höhe weist signalqualitätsbedingte Störungen bis hin zu abrupten Änderungen durch Signalempfangsstörungen auf. Beide Signale müssen mit großem Aufwand validiert und nachbearbeitet werden, um ein Signal von ausreichender Qualität zu erhalten.

v- α -Regelung

Bei dieser Regelart wird der Rollenprüfstand in Geschwindigkeitsregelung betrieben. Dem Fahrzeug wird ein zeitlicher Verlauf des Fahrpedals aufgeprägt.

Die Prüfstandsgeschwindigkeit wird über einen an der Rolle montierten Drehzahlsensor und dem definierten Rollendurchmesser ermittelt. Am Kontakt Reifen-Rolle entspricht die Prüfstandsgeschwindigkeit idealisiert der Fahrzeuggeschwindigkeit. Der Fahrboter stellt über ein elektronisches Gaspedalmodul die vordefinierte Fahrpedalstellung α am Fahrzeug ein (Abbildung 2.16).

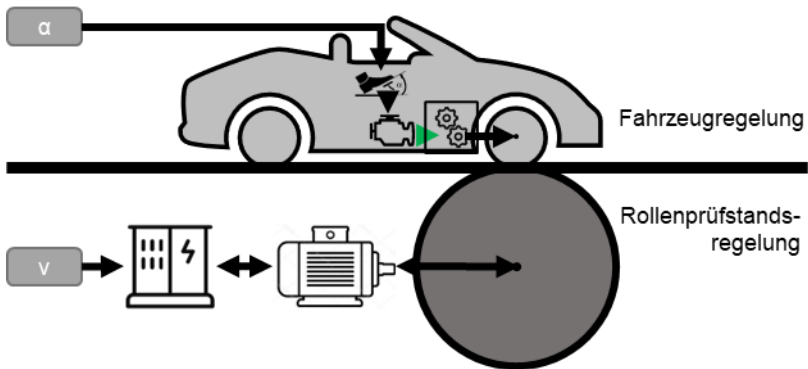


Abbildung 2.16: Prinzip der Regelart v - α nach (Cortès, Albers et al., 2022, S. 353). Das Fahrzeug wird mittels eines Fahrroboters auf das Fahrpedal geregelt. Der Rollenprüfstand regelt auf die Rollengeschwindigkeit im Kontaktpunkt Rolle-Reifen, welche an dieser Stelle der Fahrzeuggeschwindigkeit entspricht.

Durch die Regelung auf eine definierte Fahrzeuggeschwindigkeit und gleichzeitiger Anpassung der Fahrpedalstellung ergibt sich eine definierte Zugkraft am Kontakt Reifen-Rolle, welche über eine Kraftmessdose an den Rollen messtechnisch erfasst wird.

n - α -Regelung

In der Regelart n - α wird das Fahrzeug weiterhin über das Fahrpedal geregelt. Die Regelung der Belastungsmaschinen der Rollen erfolgt hierbei über die Drehzahl der Rolle selbst. Der Prüfstandsautomatisierung muss für diese Regelart eine Soll-drehzahl vorliegen, während die Ist-drehzahl über einen Inkrementalgeber erfasst wird. Analog zu v - α stellt sich auch hier bei gleichzeitiger Regelung des Fahrpedals eine definierte Zugkraft ein. Grundsätzlich ist hier ebenfalls denkbar, auf jede Drehzahl innerhalb des Fahrzeugtriebstranges zu regeln, sofern die rückgeführten Drehzahlen der Regelung vorliegen. Gleichzeitig ist dann zu beachten, dass die Regelstrecke deutlich verlängert und die Regelparameter darauf angepasst werden müssen.

F-v-Regelung

Bei dieser Betriebsart wird die Rolle auf die Zugkraft geregelt. Dabei muss der Sollverlauf der Zugkraft bekannt sein. Gleich wie bei der Geschwindigkeits- und Drehzahlregelung, liegt in dieser Regelart eine vom Prüfling unabhängige Größe vor. Das Fahrzeug wird analog der Straßenlastsimulation durch das Regelglied Fahrpedal auf eine vorgegebene Geschwindigkeit geregelt.

Die Rollenzugkraft F_{Zug} wird mittels geometrischem Hebelverhältnis aus der in einer Kraftmessdose gemessenen Kraft F_{Mess} berechnet. Die Kraftmessdose ist mit einem definierten Hebel mit dem Statorgehäuse der Belastungsmaschine verbunden. Der Stator selbst ist reibungsarm und pendelnd gelagert und stützt somit das vom Fahrzeug übertragene Drehmoment über die Kraftmessdose ab.

2.4 Statistische Methoden zur Datenanalyse

Innerhalb dieser Arbeit wird ein deduktives Forschungsvorgehen verwendet. Hussy unterscheidet dabei zwischen deduktiven und induktiven Vorgehensweisen (Hussy, 2013). Innerhalb der deduktiven Vorgehensweise weist der Wissenschaftler ein bereits gut abgesichertes Wissen zum entsprechenden Themengebiet auf und versucht eine Theorie durch eine Hypothese und deren Beantwortung zu verifizieren oder zu falsifizieren. Sollen Merkmale oder Zusammenhänge exakt gemessen werden, so werden quantitative Forschungsansätze gewählt, die jeweils auch entsprechender Auswertungsmethoden und statistischer Grundlagen bedürfen. Das induktive Vorgehen versucht aus der wiederholten Beobachtung von Einzelfällen auf eine allgemeine Regel schlusszufolgern. In den nachfolgenden Abschnitten werden die für diese Arbeit relevanten Statistikbegriffe eingeführt und erläutert. An dieser Stelle sei auf weiterführende Literatur verwiesen, welche weitere bekannte Forschungsmethoden, -vorgehensweisen und -ansätze beleuchtet (Bortz & Döring, 2006; Fotler, Germann, Gröbe-Boxdorfer, Engeln & Matthiesen, 2021; Hussy, Schreier & Echterhoff, 2013).

2.4.1 Deskriptivstatistische Methoden

Das Ziel der Deskriptivstatistik ist es, die vorhandenen Daten in einer geeigneten Form zu beschreiben und grafisch darzustellen. Diese Komprimierung der Daten dient vor allem dazu, sehr umfangreiche Datenmengen angemessen präsentieren zu können (Fahrmeir, Heumann, Künstler, Pigeot & Tutz, 2016). Außerdem ist es notwendig, die verwendeten Daten zu validieren und entsprechende Fehler frühzeitig zu entdecken sowie deren Auswirkungen zu mitigieren. Die deskriptive

Statistik grenzt sich zur induktiven Statistik dadurch ab, dass sie keine stochastischen Mittel verwendet.

Echterhoff definiert Deskriptivstatistik wie folgt:

„Die **Deskriptivstatistik** beinhaltet Verfahren, mit deren Hilfe quantitative Daten zusammenfassend beschrieben und dargestellt werden. Hierzu zählen:

- die univariate Deskriptivstatistik (Statistik für einzelne Variablen), darunter:
 - a. die Bestimmung von Häufigkeiten des Auftretens von Werten und von Häufigkeitsverteilungen;
 - b. die Berechnung von Kennwerten (Parametern), die zusammenfassende Aussagen über die gesamte Stichprobe erlauben (Maße der zentralen Tendenz und Streuungsmaße);
- die multivariate Deskriptivstatistik (Statistik für Zusammenhänge mehrerer Variablen), darunter Korrelation und Regression;
- Tabellen,
- Diagramme und Grafiken.“

(Hussy et al., 2013, S. 169–170)

2.4.1.1 Univariate Deskriptivstatistik

Univariate Deskriptivstatistik befasst sich mit der Darstellung von Informationen bei der Auswertung vorliegender diskreter oder kontinuierlicher Variablen im Einzelnen. Dabei kann ein erster Überblick durch die Analyse und Veranschaulichung von Häufigkeiten und deren Verteilung innerhalb einer Grundgesamtheit oder einer Stichprobe gewonnen werden. Weiter werden statistische Kennwerte oder Maßzahlen verwendet, die diese Verteilungen und Häufigkeiten weiter charakterisieren können. Dazu gehören Kennwerte, wie die Maße der zentralen Tendenz oder auch die Streuungsmaße (Dispersion).

Die nachfolgenden Definitionen für die von Echterhoff definierten Bereiche werden in Anlehnung an Papula zusammengefasst (Papula, 2016). Auf weiterführende Literatur sei an dieser Stelle verwiesen (Fahrmeir et al., 2016; Weigand, 2019).

Häufigkeiten und Verteilungen

Für die absolute Häufigkeit n_i eines Stichprobenwertes x_i einer Stichprobe mit dem Umfang n , bei der k verschiedene Werte $x_1, x_2, \dots, x_k$ ($k < n$) auftreten, gilt:

$$\sum_{i=1}^k n_i = n_1 + n_2 + \dots + n_k = n \quad 2.3$$

Die relative Häufigkeit h_i berechnet sich aus dem Quotienten aus absoluter Häufigkeit n_i und dem Umfang der Stichprobe n .

$$h_i = \frac{n_i}{n} \quad (i = 1, 2, \dots, k) \quad 2.4$$

Die folgenden Zusammenhänge gelten hierbei:

$$0 < h_i \leq 1 \quad \text{und} \quad \sum_{i=1}^k h_i = h_1 + h_2 + \dots + h_k = 1 \quad 2.5$$

Die Häufigkeitsfunktion $f(x)$ stellt die Häufigkeitsverteilung der einzelnen Stichprobenwerte innerhalb einer Stichprobe dar.

$$f(x) = \begin{cases} h_i & \text{für } x = x_i \quad (i = 1, 2, \dots, k) \\ 0 & \text{alle übrigen } x \end{cases} \quad 2.6$$

Dabei ist zu beachten, dass allen Werten, die nicht dem Stichprobenwert x_i entsprechen, der Wert null zugeordnet wird.

Grafisch werden diese Häufigkeitsverteilungen sowohl in Form von Stabdiagrammen als auch Histogrammen dargestellt. Der Unterschied besteht hier in der Definition von Klassen, bzw. der Klassenbreite. Somit werden Stichprobenwerte gruppiert und die Information eines einzelnen Stichprobenwertes um die definierten Bereiche um die Klassenmitte $\tilde{x}_i$ erweitert.

$$f(x) = \begin{cases} h_i & \text{für } x = \tilde{x}_i \quad (i = 1, 2, \dots, k) \\ 0 & \text{alle übrigen } x \end{cases} \quad 2.7$$

Für die Summenhäufigkeitsfunktion gilt analog:

$$F(x) = \sum_{\tilde{x}_i \leq x}^k f(\tilde{x}_i) \quad 2.8$$

Abbildung 2.17 verdeutlicht diese Zusammenhänge.

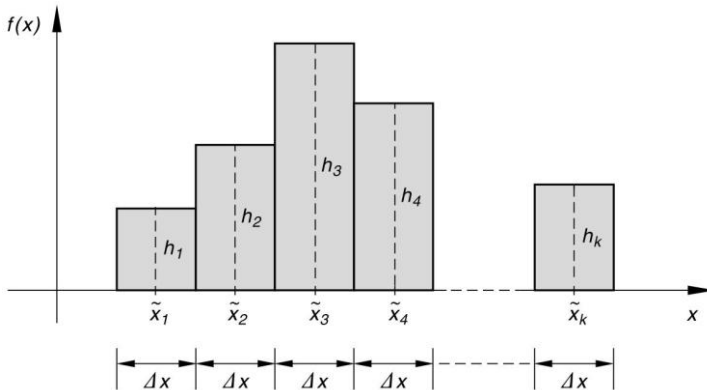


Abbildung 2.17: Histogramm einer gruppierten Stichprobe mit k Klassen (Papula, 2016, S. 482). Die Klassenmitten $\tilde{x}_i$ sind hier mit den jeweiligen Klassenbreiten Δx dargestellt. Innerhalb dieses Klassenintervalls werden die relativen Häufigkeiten h_i dargestellt.

Maße der zentralen Tendenz und Streuungsmaße

Der Mittelwert oder auch das arithmetische Mittel $\bar{x}$ einer Stichprobe $x_1, x_2, \dots, x_n$ mit dem Umfang n ist folgendermaßen definiert.

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad 2.9$$

Mit dem Median wird die Mitte einer geordneten Stichprobe bezeichnet. Er teilt den vorliegenden Datensatz somit in zwei Hälften und ist demzufolge dafür geeignet, den Einfluss von Ausreißern zu verringern.

Der Vollständigkeit halber sei hier noch auf den Modalwert einer Stichprobe verwiesen, der den Stichprobenwert definiert, welcher die höchste Häufigkeit aufweist (Papula, 2016).

Weil die Stichprobenwerte x_i um ihren Mittelwert $\bar{x}$ streuen, ist ein Streuungsmaß erforderlich, welches die Unterschiedlichkeit der Stichprobenwerte einer Verteilung bestimmt. Die Varianz ist die Summe aller nach Gauß ermittelten Abweichungen der Werte x_i von ihrem Mittelwert $\bar{x}$, dividiert durch den Umfang der Stichprobe $n - 1$.

$$s^2 = \frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2}{n - 1} = \frac{1}{n - 1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad 2.10$$

Die Standardabweichung s berechnet sich aus der Quadratwurzel der Varianz. Aufgrund der gleichen Einheiten wie die der Stichprobenwerte, ist diese Größe einfacher zu interpretieren.

$$s = \sqrt{s^2} = \sqrt{\frac{1}{n - 1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad 2.11$$

2.4.1.2 Multivariate Deskriptivstatistik

Multivariate Deskriptivstatistik erweitert die bislang univariate Beobachtung von Merkmalen einer Variablen um die Merkmale weiterer Variablen. Wie stark der Zusammenhang zwischen zwei Zufallsvariablen X und Y ist, wird als Korrelation bezeichnet. Werden zwei Variablen korreliert, so handelt es sich um bivariate Statistik, sind es mehr, entsprechend multivariat.

Die Korrelation zweier Zufallsvariablen, auch der Korrelationskoeffizient r oder Bravais-Pearson-Korrelationskoeffizient r_{xy} genannt, berechnet sich aus der empirischen Kovarianz s_{xy} .

$$s_{xy} = \frac{1}{n - 1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \quad 2.12$$

$$r = r_{xy} = \frac{s_{xy}}{s_x \cdot s_y} \quad 2.13$$

Hierbei entsprechen s_x und s_y den Standardabweichungen der beiden Variablen X und Y , wobei diese definitionsgemäß nicht null sein dürfen.

Der Korrelationskoeffizient nimmt nur Werte zwischen -1 und $+1$ an. Ist der Koeffizient $|r| = 1$, so liegen die Stichproben exakt auf einer Geraden. Das Vorzeichen gibt hierbei Auskunft darüber, ob die Geraden eine positive oder negative Steigung besitzen. Im Extremfall entspricht $r = 0$ weshalb keine Korrelation erkennbar ist. Innerhalb des Bereiches $-1 < r < +1$ kann die Aussage getroffen werden, wie stark die jeweilige Korrelation ist. Dabei ist es von der konkreten Fragestellung abhängig, ab welchem Wert die Korrelationen als aussagekräftig erachtet werden. Eine Indikation liefert Tabelle 2.3.

Tabelle 2.3: Klassierung von Korrelationskoeffizienten nach Cohen (Cohen, 1988; Nachtigall & Wirtz, 2013)

Korrelationskoeffizient r	Cohen	Nachtigall / Wirtz
niedrig	0,1	0,5
moderat	0,3	0,7
hoch	0,5	0,9

Zudem ist darauf zu achten, dass zwischen den beiden Zufallsvariablen ein begründbarer kausaler Zusammenhang bestehen sollte. Ansonsten besteht die Gefahr von Scheinkorrelationen. Hierfür ist ein profundes Fachwissen im entsprechenden Forschungsgebiet notwendig. Dieses deduktive Vorgehen unterscheidet sich von der explorativen Datenanalyse dadurch, dass letztere typischerweise dann eingesetzt wird, wenn das Untersuchungsziel, bzw. die Fragestellung nicht exakt definiert ist. Darauf ist bei der Interpretation im Besonderen zu achten, weshalb zusätzlich zum Korrelationskoeffizienten auch das Bestimmtheitsmaß/ der Determinationskoeffizient R^2 (siehe Formel 2.22) im entsprechenden Streudiagramm zu bewerten ist.

Besteht eine ausreichend hohe Korrelation zweier oder mehrerer Variablen, so kann durch diese eine Vorhersage, zwischen einer Änderung einer unabhängigen Variable X und der davon abhängenden Zielvariable Y getroffen werden. Die Regressionsanalyse untersucht genau diesen Zusammenhang. Dafür werden Regressionsmodelle gesucht, welche einen funktionalen Zusammenhang der beiden Variablen abbilden. Die einfachste Form stellt die lineare Regression dar (Fahrmeir et al., 2016).

$$Y = \alpha + \beta X \quad 2.14$$

Zusätzlich wird ein Fehlerterm ε_i eingeführt, welcher für die durch die Geradenanpassung bedingte Abweichung jedes Wertepaars (x_i, y_i) steht.

$$y_i = \alpha + \beta x_i + \varepsilon_i, \quad i = 1, \dots, n \quad 2.15$$

Die Geradenparameter α für den Achsenabschnitt und β für die Geradensteigung sind nun in dem Regressionsmodell so zu wählen, dass die Summe aller Abweichungen ε_i minimal ist. Dies wird durch die Methode der kleinsten Quadrate erreicht, welche als Ausgangsgröße die Kleinste-Quadrate-Schätzer $\hat{\alpha}$ und $\hat{\beta}$ von α und β für $\hat{y}$ liefert.

$$\hat{y}_i = \hat{\alpha} + \hat{\beta} x_i \quad 2.16$$

$$\text{mit } \hat{\alpha} = \bar{y} - \hat{\beta} \bar{x} \quad 2.17$$

$$\text{und } \hat{\beta} = \frac{s_{xy}}{s_x^2} \quad 2.18$$

Vor allem sei hier darauf verwiesen, dass mit der Formel 2.13 ein proportionaler Zusammenhang zwischen dem Regressionskoeffizienten β und dem Korrelationskoeffizienten r besteht (Formel 2.18).

Als Residuen werden alle Abweichungen zwischen Regressionsmodell und tatsächlich beobachteten y -Werten bezeichnet.

$$\hat{\varepsilon}_i = y_i - \hat{y}_i, \quad i = 1, \dots, n \quad 2.19$$

Die Güte des Regressionsmodells wird mit dem Bestimmtheitsmaß oder Determinationskoeffizienten R^2 beurteilt. Die „sum of squares total“⁵ (SQT) setzen sich additiv aus der „sum of squares explained“⁶ (SQE) und der „sum of squares residuals“⁷ (SQR) zusammen.

$$SQT = SQE + SQR \quad 2.20$$

Liegen alle beobachteten Datenpunkte auf der Regressionsgeraden, so sind die Residuen $\hat{\varepsilon}_i$ null, somit auch die SQR. Die verbleibende Streuung lässt sich dann durch die Varianz von X und der Annahme einer funktionalen Beziehung, in diesem Fall linear, erklären. R^2 ist somit der Quotient aus erklärter- und gesamter Streuung.

$$R^2 = \frac{SQE}{SQT} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad 2.21$$

Es lässt sich nachweisen, dass das Quadrat des Korrelationskoeffizienten r_{xy} dem Bestimmtheitsmaß R^2 entspricht.

$$R^2 = r_{xy}^2 \quad 2.22$$

Je stärker also die beiden Variablen X und Y miteinander korrelieren, desto größer wird das Bestimmtheitsmaß. Bei vollständiger Korrelation, egal ob negativ oder positiv, ist das Bestimmtheitsmaß eins.

⁵ engl. sum of squares total = Gesamtstreuung

⁶ engl. sum of squares explained = erklärte Streuung

⁷ engl. sum of squares residuals = Residualstreuung

2.4.2 Interferenzstatistische Methoden

Interferenzstatistische Methoden erweitern die statistischen Methoden zur Datenanalyse um einen induktiven Ansatz. Es ist also durch die quantitative Auswertung einzelner Stichproben das Ziel, eine mit Unsicherheit behaftete Aussage zur Gesamtheit treffen zu können. Somit unterscheidet sich dieser Ansatz vom deskriptivstatistischen Ansatz, der eine Stichprobe vollständig untersucht.

Echterhoff definiert Interferenzstatistik wie folgt:

„Die **Inferenzstatistik** dient dem Schluss von einer Stichprobe auf eine zugehörige Population. Aussagen der Inferenzstatistik gehen damit über das Beobachtbare hinaus und sind mit Unsicherheit behaftet. Parameter für Populationen werden in der Regel mit griechischen Symbolen bezeichnet, am wichtigsten darunter μ für den Mittelwert, σ für die Standardabweichung und π für die relative Häufigkeit (den Anteil).“

(Hussy et al., 2013, S. 179)

2.4.2.1 Signifikanztest

Innerhalb von Signifikanztests ist es notwendig ein konkretes statistisches Testproblem zu formulieren. Dafür wird die hierfür definierte Hypothese als statistische Alternativhypothese H_1 für den entsprechenden Parameter oder Kennwert formuliert. Die Alternativhypothese muss sich somit gegen die gegenläufig formulierte Nullhypothese H_0 durchsetzen. Dabei ist H_0 folgendermaßen zu formulieren, mit μ_0 als formuliertem hypothetischen Wert:

$$H_0: \mu = \mu_0 \quad 2.23$$

Anschließend ist zu unterscheiden, wie sich die Alternativhypothese H_1 definiert.

$$H_1: \mu \neq \mu_0, \quad 2.24$$

Wobei sich diese aus einer zweiseitigen Nullhypothese

$$H_0: \mu \leq \mu_0, \quad 2.25$$

und

$$H_0: \mu \geq \mu_0, \quad 2.26$$

zusammensetzt.

Handelt es sich um eine einseitige Nullhypothese so gilt beispielsweise:

$$H_0: \mu \geq \mu_0, \quad 2.27$$

und

$$H_1: \mu \leq \mu_0, \quad 2.28$$

bzw. umgekehrt.

Weil die Werte μ_0 einer Varianz unterliegen, ist es notwendig, über Konfidenzintervalle einen Vertrauensbereich festzulegen, welcher angibt, mit welcher Wahrscheinlichkeit der Wert innerhalb dieser Grenzen liegt. Dafür ist ein entsprechendes Konfidenzniveau γ festzulegen.

$$\gamma = 1 - \alpha, \quad 0 < \gamma < 1 \quad 2.29$$

Die Irrtumswahrscheinlichkeit oder auch das Irrtumsniveau α gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit der beobachtete Wert nicht in der entsprechenden Werteverteilung des Konfidenzintervalls liegt. Ein Konfidenzniveau von 95 % und ein Irrtumsniveau von 5 % werden häufig verwendet (Papula, 2016).

An dieser Stelle sei darauf verwiesen, dass das Irrtumsniveau α dem Signifikanzniveau entspricht⁸.

2.4.2.2 Chi-Quadrat-Test

Die in Abschnitt 2.4.2.1 definierte grundsätzliche Herangehensweise bei der Definition von Nullhypothesen H_0 mit einem individuellen Signifikanzniveau eignet sich für verschiedene Arten statistischer Tests. Der Vollständigkeit halber seien hier der Gauß-Test, der t-Test und der Anpassungs- oder Homogenitätstest genannt (Fahrmeir et al., 2016; Weigand, 2019).

Der Chi-Quadrat-Test wird verwendet, um die Unabhängigkeit zweier Variablen X und Y mit einer gewissen Zuverlässigkeit zu testen.

Somit lauten die Null- und Alternativhypothese H_0 und H_1 :

$$H_0: \text{Die Variablen } X \text{ und } Y \text{ sind voneinander unabhängig.} \quad 2.30$$

und

$$H_1: \text{Die Variablen } X \text{ und } Y \text{ sind voneinander abhängig.} \quad 2.31$$

Das Signifikanzniveau sei 5 %.

Für alle Wertepaare (x_i, y_j) mit $1 \leq i \leq r, 1 \leq j \leq s$, gilt nun mathematisch ausgedrückt:

$$P(X = x_i, Y = y_j) = P(X = x_i) \cdot P(Y = y_j) \quad 2.32$$

Um die Unabhängigkeit zu prüfen, wird als Testgröße $T(x, y)$ ein Ähnlichkeitsmaß verwendet, das die gemessenen Stichprobenergebnisse mit den zu erwartenden

⁸ Konfidenz trifft eine Aussage, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Wert in einem bestimmten Intervall vermutet wird. Signifikanz ist die Wahrscheinlichkeit mit welcher eine Nullhypothese H_0 abgelehnt wird Papula (2016).

Werten vergleicht, welche sich bei einer verifizierten Nullhypothese H_0 ergeben müssten (Weigand, 2019).

Dabei werden in einer Kontingenztafel mit r Reihen und s Spalten alle sogenannten Treffer für alle Kombinationen von X und Y aufgetragen. Somit sind die Summen N und die relativen Häufigkeiten p der Werte x_i und y_j bekannt (Abbildung 2.18).

Y	y_1	y_2	$\dots$	y_s	Σ
X					
x_1	$N_{1,1}$	$N_{1,2}$	$\dots$	$N_{1,s}$	$N_{1,\bullet}$
x_2	$N_{2,1}$	$N_{2,2}$	$\dots$	$N_{2,s}$	$N_{2,\bullet}$
$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$
x_r	$N_{r,1}$	$N_{r,2}$	$\dots$	$N_{r,s}$	$N_{r,\bullet}$
Σ	$N_{\bullet,1}$	$N_{\bullet,2}$	$\dots$	$N_{\bullet,s}$	n

Abbildung 2.18: Darstellung der Trefferzahlen $N_{i,j}$ in einer Kontingenztafel (Weigand, 2019, S. 369). Die Zeilen entsprechen den r möglichen Werten von X , die Spalten enthalten s mögliche Werte von Y .

$N_{i,j}$ = Anzahl der Treffer der Wertepaare (x_i, y_j) innerhalb der Stichprobe

$N_{i,\bullet}$ = Anzahl der Treffer für den Wert x_i innerhalb der Stichprobe

$N_{\bullet,j}$ = Anzahl der Treffer für den Wert y_j innerhalb der Stichprobe

Der Freiheitsgrad der Kontingenztafel wird anschließend berechnet.

$$\text{Freiheitsgrade} = (r - 1) \cdot (s - 1) \quad 2.33$$

Die Testschranke oder das $(1 - \alpha)$ -Quantil der Chi-Quadrat-Verteilung χ^2 kann innerhalb der Chi-Quadrat-Tabelle abgelesen werden und ist von den Freiheitsgraden und dem definierten Signifikanzniveau abhängig. Somit gilt für die Testgröße $T(x, y)$ für die Ablehnung der Nullhypothese folgende Bedingung.

$$T(x, y) \geq \chi^2_{(r-1)(s-1); 1-\alpha} \quad 2.34$$

Wird die Nullhypothese H_0 abgelehnt, so sind die beiden Variablen voneinander abhängig.

Die Testgröße $T(x, y)$ wird nun über Formel 2.35 berechnet.

$$T(x, y) = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^s \frac{(N_{i,j} - \frac{1}{n} \cdot N_{i,\bullet} \cdot N_{\bullet,j})^2}{\frac{1}{n} \cdot N_{i,\bullet} \cdot N_{\bullet,j}} \quad 2.35$$

2.5 Six Sigma (6σ)

Six Sigma ist eine Qualitätsmanagementmethode zur Verbesserung von Prozessen innerhalb des PEPs (Melzer, 2019). Die Statistik beschreibt mit σ die Standardabweichung vom Mittelwert bei vorliegender Normalverteilung. Das Six Sigma steht für die 6-fache Standardabweichung (6σ), also den Abstand des Zielwertes (T) von der oberen oder unteren Spezifikationsgrenze (OSG, USG). Übertragen auf die Problemstellung, bzw. einen Prozess, ist σ eine Kennzahl für die Fehlerfreiheit. Wenn zwischen Mittelwert und OSG bzw. USG 6σ liegen, erreicht ein Prozess Six Sigma-Niveau. Dieser Six Sigma-Prozess ist zu 99,99966 % fehlerfrei. Untersuchungen von Brunner et al. zeigen, dass ein zentrierter Prozess in einer langfristigen Perspektive um $\pm 1,5 \sigma$ schwankt (Abbildung 2.19) (Brunner & Wagner, 2016).

Ziel der Six Sigma-Methode ist es, durch die Minimierung von Fehlern, Prozesse zu optimieren und gleichzeitig die Kundenzufriedenheit zu erhöhen (Koch, 2015). Aus Sicht des Unternehmensmanagements steigt die Rentabilität, während in der Fertigung Ausschuss und Fehlteile verringert und in Forschung und Entwicklung Kosten und Zeit gespart werden (Abbildung 2.20).

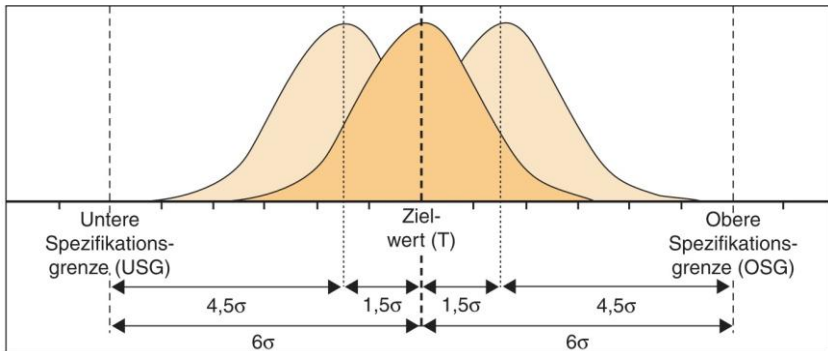


Abbildung 2.19: Six Sigma Kurve mit $1,5\sigma$ Shift (Koch, 2015, S. 170). Der Mittelwert zentrierter Prozesse schwankt um den Zielwert mit $1,5\sigma$.

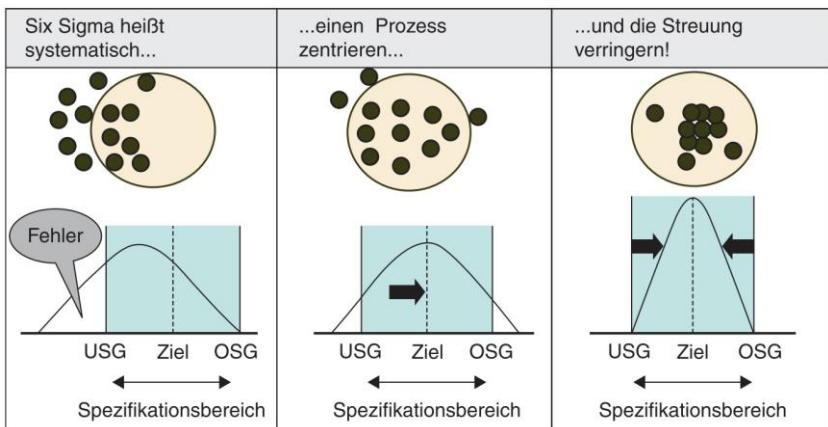


Abbildung 2.20: Definition Six Sigma-Methode (Koch, 2015, S. 169). Prozesse sollen unter Verwendung von Six Sigma so gestaltet und gesteuert werden, dass die Prozessergebnisse nur sehr gering streuen und sich gleichzeitig der Mittelwert verbessert.

Die Six Sigma-Toolbox umfasst eine Vielzahl von Einzelwerkzeugen. Im nachfolgenden Abschnitt werden die verwendeten Bestandteile kurz zusammengefasst. Für einen vollständigen Überblick sei an dieser Stelle auf weiterführende Literatur verwiesen (Brunner & Wagner, 2016; Kaufmann, 2012; Koch, 2015; Melzer, 2019).

2.5.1 DMAIC-Zyklus

Um Prozesse im Sinne der Six Sigma-Methode beherrschen zu können, wird der DMAIC-Zyklus verwendet. Das Akronym setzt sich zusammen aus den Begriffen (Melzer, 2019):

- Define (definieren)
- Measure (messen)
- Analyze (analysieren)
- Improve (verbessern)
- Control (überprüfen)

Die Define-Phase stellt den ersten Schritt innerhalb des DMAIC-Zyklus dar. Oft wird anhand eines Projekt Charters die Aufgabenstellung und der Entwicklungsauftrag, bzw. der zu verbessernde Prozess konkretisiert. Die Measurement-Phase schließt sich dieser direkt an. Ziel dieses Schrittes ist die Ermittlung des aktuellen Ist-Zustandes durch Messen und Aufzeigen der aktuellen Streuung des Qualitätsmerkmals. Die Analyze-Phase zeigt durch statistische Werkzeuge und Methoden auf, wo die Fehler und Abweichungen liegen und quantifiziert deren Einfluss auf das Qualitätsmerkmal. Diese Ergebnisse werden in der Improve-Phase verwendet, um Lösungs- bzw. Verbesserungsmöglichkeiten zu identifizieren und umzusetzen. Beispielsweise kann hier mit einer Kosten-Nutzen-Analyse eine Lösung ausgewählt werden. Mit der Control-Phase schließt der DMAIC-Zyklus ab. Die Auswirkungen der Lösung auf Mittelwert und Streuung des Qualitätsmerkmals werden untersucht, etwaige Annahmen und Schätzungen aus den vorangegangenen Phasen korrigiert und dokumentiert (Kaufmann, 2012).

Der DMAIC-Zyklus entstammt den Six Sigma-Methoden und sei hier an dieser Stelle inhaltlich gleichgesetzt mit Albers' Problemlösungsmethodik SPALTEN der KaSPRo.

2.5.2 Regelkarten

Die Regelkarte, auch Qualitätsregelkarte, wird innerhalb der statistischen Prozessregelung angewandt und dient der Darstellung von Stichproben aus einem laufenden Prozess (Koch, 2015).

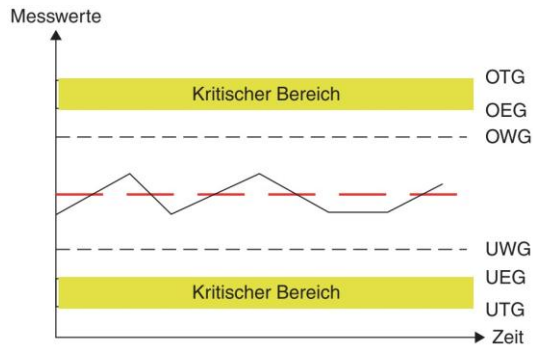


Abbildung 2.21: Regelkarte mit Grenzwerten (Koch, 2015, S. 157). Innerhalb der Warngrenzen erfolgt kein Eingriff. Überschreitet der Messwert die Eingriffsgrenze, so sind Gegenmaßnahmen zu ergreifen, um den Prozess nicht außerhalb der Toleranzgrenzen zu betreiben.

Innerhalb der Regelkarte sind obere und untere Warn-, Eingriffs- und Toleranzgrenzen (OWG/UWG, OEG/UEG, OTG/UTG) definiert, anhand derer die Prozessstabilität gepüft wird und die Auswirkung von Eingriffen beobachtet werden kann. Die Regelkarten kommen vor allem dann zum Einsatz, um rechtzeitig Abweichungen innerhalb des Prozesses zu erkennen.

3 Motivation, Zielsetzung und Forschungsfragen

Das vorherige Kapitel 2 leitet von den Grundlagen und dem beschriebenen Stand der Forschung in dieses Kapitel über. Kapitel 3 beleuchtet vorab die Motivation der Arbeit und formuliert durch die Zielsetzung einen Forschungsbedarf. Abschließend werden dafür die Forschungshypothesen und die zur Verifikation notwendigen Forschungsfragen aufgestellt.

3.1 Motivation und Zielsetzung

Der Fokus der Hersteller und Entwickler von Kraftfahrzeugen richtet sich immer stärker auf die im realen Fahrbetrieb auftretenden Betriebszustände des Fahrzeuges. Die Verordnung (EG) 715/2007 des Europäischen Parlamentes und des Rates der Europäischen Union ordnet eine Überprüfung des Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) an, um Emissionen aus dem praktischen Fahrbetrieb künftig besser abzubilden (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union, 20.06.2007/2007). Seit dem 01. September 2017 wird der WLTP durch die Real Driving Emissions (RDE) Bestimmungen ergänzt und immer weiter ausgebaut (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union, 07.07.2017/2017a, 07.07.2017/2017b, 24.07.2017/2017). Nach der Vorrangigkeit für die Einhaltung von Emissionsgrenzwerten weiter konkretisierten RDE-Gesetzgebung geht die Verordnung (EG) 2018/858 (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union, 2018) noch einen Schritt weiter und löst die bis dahin gültige Richtlinie für die Typgenehmigung 2007/46/EG (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union, 05.09.2007/2007) ab. Bereits zugelassene Fahrzeugtypen müssen in regelmäßigen Abständen stichprobenartig hinsichtlich ihres Emissionsverhaltens überprüft werden. Diese vom Gesetzgeber vorgegebenen Rahmenbedingungen unterstreichen die Notwendigkeit für Automobilhersteller, reale Fahrscenarien in der Fahrzeugentwicklung verstärkt zu berücksichtigen. Durch die Zufälligkeit des Verkehrsgeschehens oder der schwierigen Messbarkeit der Umweltbedingungen, beispielsweise der Steigung oder des aktuellen Reibwertes der Fahrbahn, ist eine Reproduzierbarkeit einer Straßenfahrt zur gezielten Untersuchung von längsdynamischen Fragestellungen, beispielsweise der Applikation von Motor- und Getriebesteuergeräten, nicht trivial möglich. Insbesondere im Hinblick auf kürzere Entwicklungszyklen und steigendem

Kostendruck stellt dies für die Fahrzeugentwicklung eine große Herausforderung dar. Unter dem Begriff „Road to Rig“ lässt sich die Verlagerung von Straßenfahrten auf Prüfstände zusammenfassen (Sciuto & Hellmund, 2001). Hier wird versucht möglichst viele Fragestellungen mit Hilfe von Erprobungen auf einem Prüfstand zu beantworten.

Bestehende Validierungsumgebungen, wie Rollenprüfstände, können durch entsprechende Erweiterungen der Prüfstandsregelarten auf diese sich ändernden Bedingungen angepasst werden. Diese Erweiterungen haben immer eine Auswirkung auf die verwendete Prüfstandshardware und somit auf ein anderes Zusammenspiel aus Aktorik und Sensorik.

In der Literatur lassen sich zum einen Ansätze zur manöverbasierten Validierung finden (Matros et al., 2015), welche die Validierungsaktivitäten auf zeitlich kürzere Abschnitte fokussieren und es dem Entwickler ermöglichen, diese Manöver unter Verwendung unterschiedlicher Kriterien zu sortieren. Zum anderen sind für den Rollenprüfstand als ausgewählte Validierungsumgebung alternative Regelarten bekannt, die jedoch in der Ingenieurspraxis eine bislang untergeordnete Rolle spielen, weil die Rollenprüfstände zum Großteil zur Validierung des Emissionsverhaltens während synthetischer Prüfzyklen wie dem NEFZ oder dem WLTP verwendet werden (Tschöke, 2019).

Außerdem besteht das Aufgabenfeld der Applikateure von Antriebssteuergeräten im Alltag meist darin, im realen Fahrversuch, egal ob auf öffentlicher Straße oder auf Prüf- und Testgeländen, die Funktionsweise der jeweiligen Software- oder Hardwarestände zu validieren. Tauchen Unzulänglichkeiten auf, so ist es nur selten möglich, dieselben Stimuli zu reproduzieren, um den kausalen Zusammenhang zwischen der Änderung von bestimmten Parametern und Fahrzeugverhalten zu bewerten (Cortès et al., 2021).

Zusätzlich drängen zeit- und kostenkritische Entwicklungszyklen und auch der Klimaschutz die Entwickler auch auf den Einsatz von rechnergestützten Simulationen. Auf dieser Grundlage lässt sich feststellen, dass es methodische Vorgehensweisen und auch Validierungsumgebungen für eine Unterstützung der Kalibrierung und Validierung für Fahrzeugantriebssysteme gibt, welche jedoch im Alltag der Applikationsingenieure nicht etabliert sind (Cortès, Albers et al., 2022).

Die Zielstellung dieser Arbeit lässt sich aufgrund der erörterten Motivation ableiten. Diese soll einen Beitrag dazu leisten, Ingenieure zu bestärken, entlang des Produktentwicklungsprozess im Rahmen ihres Aufgabengebietes, der Kalibrierung und Validierung von Fahrzeugantriebssystemen, vermehrt auf ein prüfstands- und simulationsbasiertes Vorgehen zu setzen. Hierfür werden unter Anwendung der

Methoden und Vorgehensweisen der KaSPro, den Rollenprüfstand als Validierungsumgebung zu erweitern, um die Längsdynamiklasten genauer abzubilden.

Durch den Einsatz des IPEK-XiL-Ansatzes wird gezielt das SiD Gegenstand der Untersuchungen. Dadurch beziehen sich die Erkenntnisse auf der Weiterentwicklung des Rollenprüfstands als Validierungsumgebung. Durch die Analyse einer Versuchsreihe werden die Zielgrößen für die Nachbildung von Realfahrten bestimmt.

Auf diesen Ergebnissen aufbauend wird der Rollenprüfstand als Validierungsumgebung erweitert. In einer weiteren Versuchsreihe wird die vorgeschlagene Konfiguration der Validierungsumgebung mit dem bisherigen Status quo verglichen und somit die Anforderungen an die Umgebung verifiziert.

Um die Entwicklungsmethode ganzheitlich zu betrachten, wird das R2R um eine Längsdynamiksimulation erweitert. Somit ist unter dem Begriff „Road to Rig to Simulation“ (R2R2S) eine durchgängige Vorgehensweise zu verstehen, die sowohl Potential in der Kritikalität von Zeit und Kosten für den Anwender aufweisen (Abbildung 3.1) als auch in der Steigerung der Entwicklungsqualität.

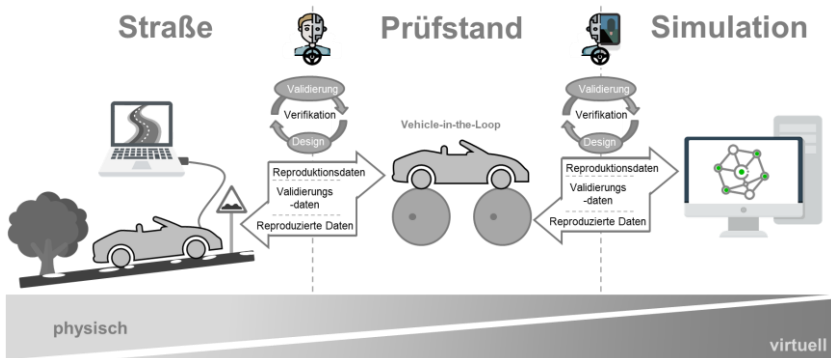


Abbildung 3.1: Rollenprüfstand als zentrale Validierungsumgebung innerhalb eines Road to Rig to Simulation Ansatzes. Auf der Straße (Road) werden die Zielgrößen der Realfahrt aufgezeichnet und auf dem Prüfstand reproduziert. Gleichzeitig dient der Prüfstand (Rig) dazu, das Simulationsmodell zu validieren.

3.2 Forschungsfragen

Auf Basis der in Abschnitt 3.1 dargelegten Motivation und Zielsetzung lassen sich die Forschungshypothese (H) und die entsprechenden Forschungsfragen (FF) aufstellen:

H	Der Rollenprüfstand kann als Validierungsumgebung im Kontext des IPEK-XiL-Ansatzes weiterentwickelt werden, um die Kalibrierung und Validierung von Fahrzeugantriebssystemen zu unterstützen.
----------	---

Im Stand der Forschung wird erläutert, dass die Validierungsumgebungen auf Basis des IPEK-XiL-Ansatzes entwickelt werden können und sich somit grundlegend dafür eignen, diese Aufgabe zu lösen.

Zusätzlich sind die Forschungsfragen als Teilforschungsfragen (TFF) definiert, um die Forschungshypothese zu verifizieren. Durch die Forschungsfragen wird das gesamte Forschungsvorhaben in sinnhafte Abschnitte untergliedert. Die Vorgehensweise wird in Kapitel 4 tiefergehend erläutert.

FF1	Welche Anforderungen muss eine Validierungsumgebung erfüllen, um relevante längsdynamische Einflüsse aus dem Reallastbetrieb des Fahrzeuges abzubilden?
TFF1.1	Wie können die signifikanten Parameter für die Validierungsumgebung ermittelt werden?
TFF1.2	Welche Parameter eignen sich für die Implementierung einer Prüfstandsregelart?

FF2	Wie kann ein (ViL)-Rollenprüfstand genutzt werden, um im Kontext der Kalibrierung und der Verifikation von RDE-relevanten Funktionen valide Ergebnisse zu liefern und somit den realen Fahrversuch zu ergänzen?
TFF2.1	Welche Erweiterungen müssen an der Validierungsumgebung vorgenommen werden, um die längsdynamischen Lastzustände abzubilden?

TFF2.2	Mit welcher Genauigkeit lassen sich die Lastzustände in der erweiterten Validierungsumgebung abbilden?
FF3	Was muss eine Simulationsumgebung beinhalten, um die Reallasten für RDE-relevante Funktionen mittels eines virtuellen Prototyps abzubilden und was sind die Grenzen dieser Vorgehensweise?

4 Beschreibung der Vorgehensweise

Diese Arbeit orientiert sich an der Vorgehensweise von Marxen (Marxen & Albers, 2012; Marxen, 2014). Marxen kombiniert seine Vorgehensweise mit der Design Research Methodology (DRM) von Blessing und Chakrabarti (2009) und den fünf Kategorien des Forschungsdesigns von Cantamessa (2003) mit dem von Albers und Reiss et al. (2016) entwickelten integrierten Produktentwicklungsmodell iPeM (Abschnitt 2.1.5).

Abbildung 4.1 zeigt die von Marxen definierten Aktivitäten welche mit der SPALTEN-Problemlösemethodik (Abschnitt 2.1.4) verknüpft sind.

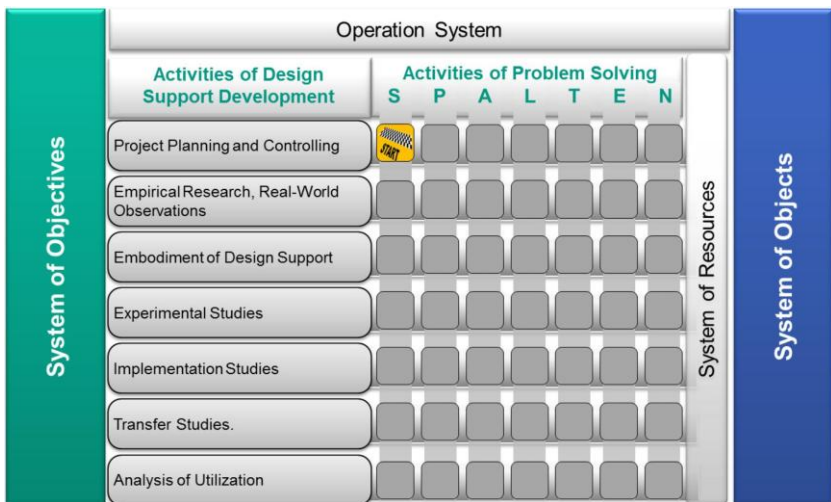


Abbildung 4.1: Das integrierte Design Support Development Modell (iDSDM) nach Marxen (Marxen, 2014, S. 168). Anhand der SPALTEN-Problemlösungsmethodik werden die sieben Phasen des Forschungsdesigns durchlaufen, um das Objektsystem durch das Handlungssystem in das im Vorfeld definierte Zielsystem zu überführen.

Marxen stellt im Umgang mit dem vorgestellten Framework zu beachtende Regeln auf.

“Always start with a situation analysis in project planning and controlling!”

(Marxen, 2014, S. 175)

„Start every single activity of design support development with a situation analysis!“

(Marxen, 2014, S. 175)

Gleichermaßen ist ein sequenzielles Durchlaufen der Aktivitäten im Handlungssystem nicht zielführend. Individuelle Forschungs- und Entwicklungsprojekte leben von Iterationen, thematischen Vorgriffen und Wiederholungen. Deshalb ist eine Darstellung mit Phasenmodellen gebräuchlicher, worauf aber im Kontext dieser Arbeit verzichtet wird.

Auf Basis dieses Frameworks ist das Forschungsvorgehen dieser Dissertation veranschaulicht. Grundsätzlich werden die sieben Phasen des iDSDM im Laufe sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung durchlaufen. Das horizontale Durchlaufen (Abbildung 4.2) bezieht sich auf die Dissertation im Ganzen, während die vertikale Richtung (Abbildung 4.3) Marxens Phasen ebenfalls in den Hauptteilkapiteln enthält.

Kapitel 2 stellt die Grundlagen und den Stand der Forschung für die Klärung des Forschungsgegenstandes vor. Darauf aufbauend zeigt Kapitel 3 die Motivation für die vorliegende Arbeit auf und schließt mit der Formulierung der Zielsetzung und der Forschungsfragen ab. Die übergeordnete Zielsetzung ist es, Entwickeln eine zusätzliche Validierungskonfiguration auf dem Rollenprüfstand zur Kalibrierung und Validierung von Fahrzeugantriebssystemen zur Verfügung zu stellen. Inhaltlich stellt dies die Phase Empirical Research dar. Kapitel 4 beschreibt die Vorgehensweise der Forschungsumfänge selbst und bildet somit die Phase Project Planung und Controlling ab. In ihr wird das methodische Vorgehen definiert. Kapitel 5 stellt den Start des Hauptteiles dar. Durch eine Realfahrtmesskampagne ergänzen die Real-World Observations die Phase Empirical Research und bieten somit die Grundlage, das Embodiment of Design anzuschließen. Durch die Auswahl der relevanten Zielgrößen zur Nachbildung der Längsdynamik auf Basis von Messungen entsteht die Bewertungsgrundlage für Kapitel 6. Innerhalb dieses Kapitels werden die vorangegangenen Erkenntnisse der Literaturrecherche und der Realfahrtmesskampagne mit bekannten Regelarten bewertet, während gleichzeitig eine Erweiterung der Validierungsumgebung eine neue Regelart hervorbringt. Die Entwicklung dieser Regelart, welche innerhalb der Prüfstandsmesskampagne

validiert wird, bildet das Embodiment of Design Support. Die experimentelle Studie leitet nun in Kapitel 7 über. Dort wird die validierte Regelart implementiert, um unter geänderten Randbedingungen ihre Lösungsfähigkeit unter Beweis zu stellen (Implementation Study). In der Simulationskampagne ändert sich der Ursprung des Stimulus für die Regelart. Der Stimulus wird hier auf Datenbasis eines validierten Längsdynamikmodells generisch erzeugt. Das Ergebnis aus dem Vergleich von prognostiziertem Verhalten aus dem Simulationsmodell und dem Realverhalten auf dem Rollenprüfstand, bestätigt die Übertragbarkeit auf andere Aufgabenstellungen. Die Transfer Study findet in Form von Einzelversuchen statt, welche im Rahmen der Forschungskooperation realisiert wurden. Dabei wird dieselbe Regelart verwendet, um unterschiedliche Aufgabenstellungen zu unterstützen. Die Analysis of Utilization wird schließlich durch mehrere Veröffentlichungen, welche sich chronologisch nach dieser Arbeit befinden, bestätigt.

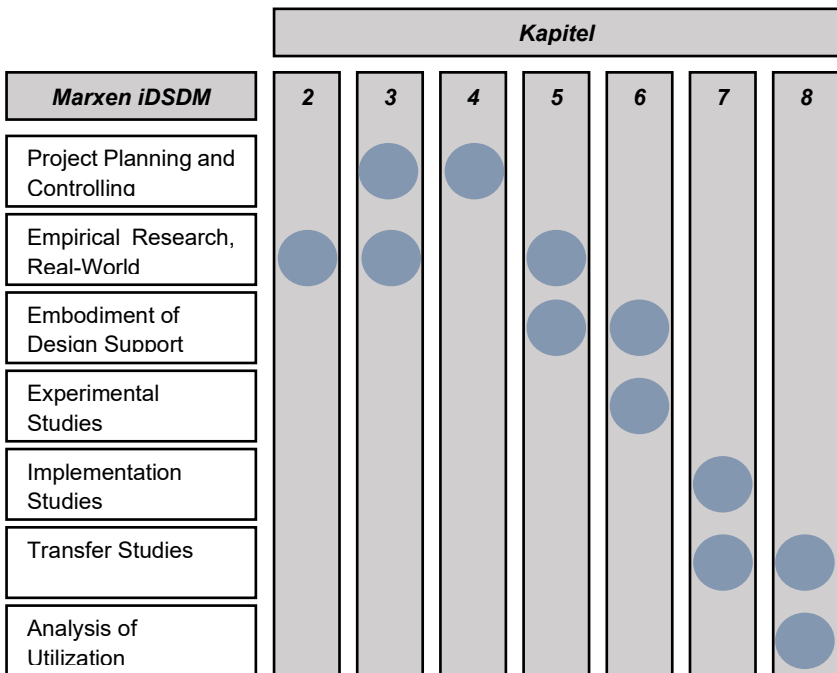


Abbildung 4.2: Forschungsvorgehen nach Marxen für diese Dissertation (horizontal)

Gleichwohl sei an dieser Stelle darauf verwiesen, dass die Kapitelreihenfolge nicht durchgehend der chronologischen Vorgehensweise entspricht. Eine Sortierung nach Forschungsinhalten bietet sich aus Gründen der Übersichtlichkeit an.

Kapitel 2: Grundlagen und Stand der Forschung <i>Empirical Research</i>			
Kapitel 3: Motivation, Zielsetzung und Forschungsfragen Kapitel 4: Beschreibung der Vorgehensweise <i>Project Planning and Controlling</i>			
<i>Embodiment of Design Support</i>	<i>Studies</i>		
	<i>Experimental</i>	<i>Implementation</i>	<i>Transfer</i>
Kapitel 5: Systematische Auswahl von relevanten Zielgrößen aus Realfahrten anhand Mustererkennung (Forschungsfrage 1)			
Kapitel 6: Validierung von reproduzierten Realfahrten auf einem Rollenprüfstand (Forschungsfrage 2)			
Kapitel 7: Synthese von Reallasten mittels Längsdynamiksimulation (Forschungsfrage 3)			
Kapitel 8: Zusammenfassung und Ausblick <i>Analysis of Utilization</i>			

Abbildung 4.3: Forschungsvorgehen nach Marxen für diese Dissertation (vertikal). In Kapitel 2 und 3 werden der Forschungsgegenstand und die entsprechenden Forschungsfragen definiert. Im Hauptteil der Arbeit (Kapitel 5,6 und 7) wird die Schleife aus Synthese einer Lösung und deren Validierung durch unterschiedliche Studien mehrfach durchlaufen. Abschließend werden die Erkenntnisse zusammengefasst und der Anwendungsfall analysiert (Kapitel 8).

Kapitel 5 bis 7 beantworten die Forschungsfragen FF1 bis FF3. Durch eine Versuchsreihe und deren Auswertung mittels induktiver Statistik wird herausgearbeitet, welche konkreten Anforderungen an die Validierungsumgebung gestellt werden, um längsdynamische Einflüsse aus Realfahrten abbilden zu können (Forschungsfrage FF1). Sind diese Zielgrößen bekannt, so beginnt die Beantwortung der Forschungsfrage FF2 damit, eine Lösung für einen Betrieb eines

Rollenprüfstandes zu synthetisieren und anschließend zu validieren. Forschungsfrage FF3 erweitert die Vorgehensweise unter Berücksichtigung der zuvor entwickelten Prüfstandserweiterung dahingehend, dass Reallastverläufe auf Basis einer Längsdynamiksimulation generiert anstatt empirisch im Straßen- oder Erprobungsbetrieb ermittelt werden. Die jeweiligen Kapitel 5, 6 und 7 schließen jeweils mit einem Zwischenfazit, um somit die Transferstudie abzubilden.

Kapitel 8 fasst die vorausgegangenen Kapitel zusammen und ordnet die Verwendbarkeit der entwickelten Vorgehensweise in den Industriealltag ein. Gleichzeitig markiert diese Einordnung einen Ausblick für weiterführende Tätigkeiten in diesem Anwendungsgebiet.

Die vorliegende Dissertation entstand in einer kooperativen Promotion zwischen dem Institut für Fahrzeugsystemtechnik (IFS) an der Technischen Hochschule Ulm (THU) und dem Institut für Produktentwicklung (IPEK) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

Im Rahmen des Projektes "Innovative Hochschule IHS" mit der finanziellen Unterstützung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) orientiert sich der Hochschulverband InnoSÜD an den hochschuleigenen Themenfeldern Energie, Mobilität, Gesundheit & Biotechnologie sowie Transformationsmanagement. Über geeignete Transferformate ist es die Zielsetzung dieses Forschungsprojektes, Innovationen der einzelnen Themenfelder über einen Dialog zwischen Forschung, Wirtschaft und Gesellschaft zugänglich zu machen. Dabei kommen auch neue Transferformate zum Einsatz, welche personenbasierte Formate um digitale oder physische Formate erweitern. Besonders seien hier die beiden für die Dissertation verwendeten Formate Open Lab und Reallabor hervorgehoben.

Open Lab...

... Infrastruktur und Fachexpertise in speziellen Bereichen werden in Open Labs zur Verfügung gestellt, um die Überführung von Wissen oder Technologien in unternehmerisch und gesellschaftlich nutzbare, marktgerechte Lösungen zu ermöglichen. (Joost & Christensen, 2017)

Reallabor...

... In Reallaboren werden dezidierte gesellschaftliche Herausforderungen aufgegriffen, um Lösungsmöglichkeiten unter realen Bedingungen mit verschiedenen Stakeholdern zu erarbeiten. (Schneidewind, 2014; Wagner & Grunwald, 2019)

Diese beiden Transferformate ermöglichen es, die Transferstudien direkt unter Einbeziehung einer Anwendergruppe durchzuführen. Unter diesem Kontext ist eine Forschungsk Kooperation der THU mit den Firmen APS technology GmbH und AIP GmbH & Co. KG, beide zu diesem Zeitpunkt Teil der APL Group aus Landau, abgeschlossen worden. Der Forschungsschwerpunkt der THU liegt hierbei auf der Definition von Anforderungen an eine Validierungsumgebung, während die Kooperationspartner mit entsprechenden Versuchsträgern und Prüfstanderweiterungen unterstützt haben. In diesem Rahmen sind studentische Abschlussarbeiten entstanden, welche vom Autor co-betreut wurden (siehe Literaturverzeichnis).

5 Systematische Auswahl von relevanten Zielgrößen aus Realfahrten

Dieses Kapitel befasst sich mit der Identifikation signifikanter Parameter, welche notwendig sind, um längsdynamische Reallasten nachzubilden. Der Inhalt ist somit zweigeteilt, in die Erzeugung realer Messdaten aus Realfahrten und deren Analyse. Ferner werden die Forschungsfrage FF1 und die Teilforschungsfragen TFF1.1 und TFF1.2 dadurch beantwortet.

FF1	Welche Anforderungen muss eine Validierungsumgebung erfüllen, um relevante längsdynamische Einflüsse aus dem Reallastbetrieb des Fahrzeuges abzubilden?
TFF1.1	Wie können die signifikanten Parameter für die Validierungsumgebung ermittelt werden?
TFF1.2	Welche Parameter eignen sich für die Implementierung einer Prüfstandsregelart?

Nach der Einordnung der Validierungsumgebung in das IPEK-XiL-Framework in Abschnitt 5.1 geht Abschnitt 5.2 auf die Versuchsplanung ein. Innerhalb des Abschnitts werden die definierte Strecke und die Parameter vorgestellt, welche variiert werden. Der Einsatz der Six Sigma-Methode ermöglicht es, den Prozess, valide Versuchsfahrten zu erhalten, zu zentrieren und somit die Messeffizienz zu steigern. Abschließend erfolgt die Darstellung der messtechnischen Ausrüstung des Versuchsfahrzeuges. Abschnitt 5.3 zeigt die Vorgehensweise bei der Versuchsdurchführung auf. Abschnitt 5.4 beinhaltet die Analyse der Messdaten anhand geeigneter statistischer Methoden und einer Peakerkennung, um in Abschnitt 5.5 eine Auswahl von Parametern zur Umsetzung neuer Regelarten für den Rollenprüfstand zu empfehlen. Diese Empfehlung erfolgt anhand der Ergebnisse einer Bachelorarbeit, die im Rahmen der in Kapitel 4 beschriebenen Forschungskoooperation stattgefunden hat. (Leukert, 2020)⁹

⁹ Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

Zentrale Inhalte dieses Kapitels wurden bereits auf dem Fisita 2021 World Congress veröffentlicht. (Cortès et al., 2021)

5.1 Validierungsumgebung

Auf Basis des in Abschnitt 2.2.2 vorgestellten IPEK-XiL-Ansatzes bettet diese Arbeit, passend zu der vorliegenden Validierungsaufgabe, die drei Systeme(-Modelle) Fahrer, Fahrzeug und Umwelt in dieses Framework ein. Diese Einordnung ermöglicht eine Betrachtung des Sul und des SiD innerhalb der aktuellen Konfiguration. In Abbildung 5.1 sind die einzelnen Ausprägungen der System-Modelle der geplanten Realfahrtmesskampagne dargestellt.

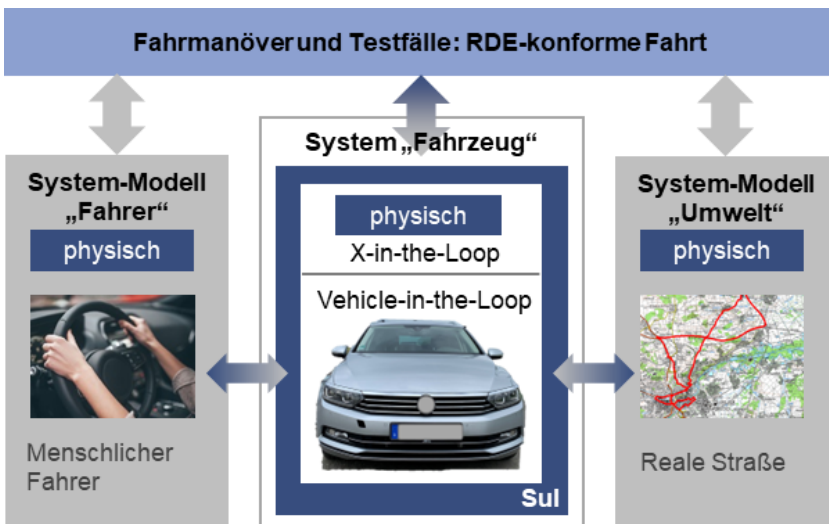


Abbildung 5.1: Konfiguration des IPEK-XiL-Frameworks für die Realfahrtmesskampagne. Das System-Modell „Fahrer“ entspricht einem menschlichen Fahrer. Das System-Modell „Umwelt“ entspricht der realen Straße. Die Fahrstrecke führt durch das Umland der Stadt Ulm. Dabei erfüllt die Strecke die RDE-Anforderungen an das Höhenprofil, die Länge der Strecke und der Zusammensetzung des Geschwindigkeitskollektives. Das Versuchsfahrzeug ist das Sul.

Alle System-Modelle sind in ihrer physischen Ausprägung vorhanden, weshalb keine Ersatzmodelle notwendig sind. Als Fahrmanöver oder Testfall ist hier eine

RDE-konforme Fahrt definiert. Das verwendete Fahrzeug ist das Sul. Die Angabe eines SiD ist nicht zielführend, da die Realfahrtmesskampagne zur Datengewinnung dient.

5.2 Versuchsplanung

Anhand des nachfolgenden Abschnitts wird die Vorgehensweise bei der Planung der Fahrversuche erläutert. In Abschnitt 3.1 wurde die Notwendigkeit verdeutlicht, aufgrund gestiegener Anforderungen bei der Typzulassung von Neufahrzeugen und deren Konformität im realen Betrieb auf RDE-spezifische Richtlinien zurückzugreifen. Im Folgenden werden hierfür die definierte Strecke und die Parameter für den Versuchsplan sowie die messtechnische Ausstattung des Versuchsfahrzeuges beschrieben.

5.2.1 Streckendefinition

Innerhalb der Gesetzgebung der Europäischen Union werden die Randbedingungen für eine RDE-konforme Strecke definiert (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union, 2018). Die für die Strecken relevanten Kriterien sind in Tabelle 5.1 aufgeführt.

Tabelle 5.1: Kriterien zur RDE-Konformität einer Strecke

Temperaturbereich	moderat: erweitert:	3 bis 30 °C -2 bis 3 & 30 bis 35 °C
Höhenbedingung	moderat: erweitert: Höhendifferenz zwischen Anfang und Endpunkt:	bis 700 m ü. NN 700 bis 1300 m ü. NN max. 100 m
Strecke	Stadtteil (0 bis 60 km/h): Landstraße (60 bis 90 km/h): Autobahn (90 bis 140 km/h):	min. 16 km min. 16 km min. 16 km
Gesamtdauer	zwischen 90 und 120 min	
Geschwindigkeit	$v_{max} = 145 \text{ km/h}$ 5 min lang größer 100 km/h $15 < \bar{v}_{Stadt} < 40 \text{ km/h}$	
Haltezeit	zwischen 6 und 30 % der Gesamtdauer im Stadtteil längste Haltezeit 300 s mindestens zwei Haltezeiten mit je mehr als 10 s	

Diese Kriterien werden im Rahmen der Messfahrten überprüft. Aufgrund der Zufälligkeit des Verkehrsgeschehens sind die einzelnen Messfahrten nicht identisch und nicht reproduzierbar. Bei der Auswahl eines Streckenverlaufes ist also darauf zu achten, dass dieser mit einer hohen Wahrscheinlichkeit RDE-konform durchfahren werden kann, auch wenn die Verkehrslage beispielsweise eine längere Haltezeit aufgrund erhöhten Verkehrsaufkommens im Stadtbetrieb bedingen würde.

Unter diesen Gesichtspunkten wurde eine Strecke in der Ulmer Umgebung definiert (Schließer, 2019)¹⁰. Diese ist in Abbildung 5.2 grafisch dargestellt und beispielhaft mit den Daten einer RDE-konformen Fahrt bezeichnet.

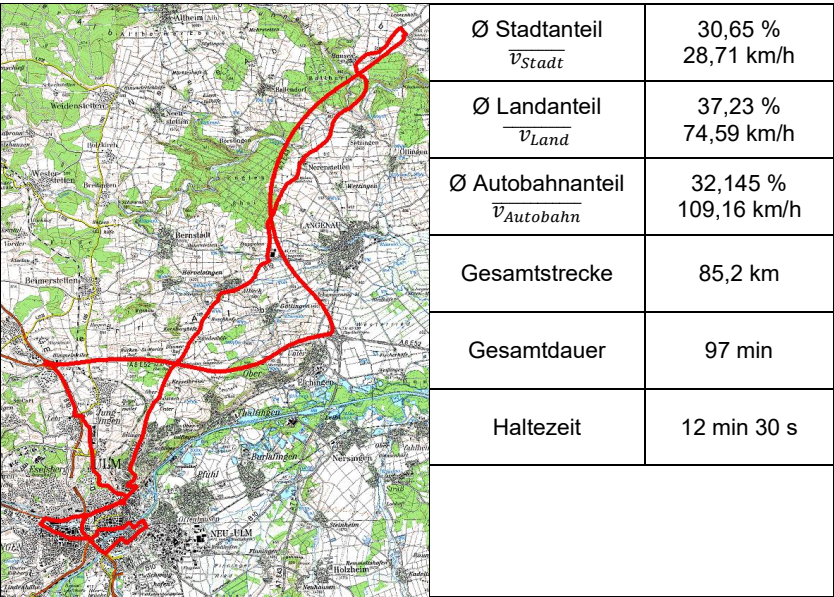


Abbildung 5.2: RDE-konforme Strecke um Ulm (Cortès et al., 2021, S. 3). Die Strecke führt durch das Umland der Stadt Ulm. Dabei erfüllt die Strecke Anforderungen an das Höhenprofil, die Länge der Strecke und der Zusammensetzung des Geschwindigkeitskollektives.

Die Strecke startet an der Technischen Hochschule Ulm und führt anschließend durch die Innenstädte von Ulm und Neu-Ulm. Danach führt die Strecke Überland in

¹⁰ Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

Richtung Herbrechtingen, wo dann die Rückfahrt über die Autobahnen A7 und A8 sowie die Bundesstraße B10 zurück nach Ulm führt.

Weil der Anfangs- und der Endpunkt dieselben sind, wird die Höhenbedingung erfüllt. Das Höhenprofil liegt dauerhaft unterhalb von 600 m ü. NN.

5.2.2 Parameterauswahl

Die genaue Analyse des untersuchten Systems und seines Verhaltens ist zwingend erforderlich, um bei der Parameterauswahl für einen Versuchsplan diejenigen Parameter auszuwählen, die tatsächlich auch kontrollier-/steuerbar sind. Gleichwohl ist es möglich, innerhalb der Entwicklungsarbeit mehrere Werkzeuge zu kombinieren.

Die Six Sigma-Methode ist im Bereich des Qualitätsmanagements etabliert, um stabile Prozesse zu generieren. Im Rahmen dieser Arbeit wurde diese Methode verwendet, um anhand von Vorversuchen die Störgrößen auf das Zielsystem zu ermitteln und entsprechend effiziente und stabile Fahrversuche zu planen (siehe Abschnitt 2.5).

Ein Parameterdiagramm verdeutlicht das Systemverständnis und ist dabei behilflich, beeinflussbare Steuergrößen sowie unkontrollierbare Störgrößen innerhalb des Betriebsbereichs eines Systems zu unterscheiden. Die Eingangsgrößen sind die Variablen, die den Eingang des Systems beschreiben und zu einer gewünschten Änderung der Ausgangsgrößen führen. Vollständigerweise werden die Fehlerzustände und die ungewünschten Ergebnisse gekennzeichnet.

In Abbildung 5.3 ist das Ergebnis der Vorversuche zu der Realfahrtmesskampagne dargestellt. Anhand des Einsatzes von Regelkarten wurde der Prozess, die Durchführung einer RDE-konformen Fahrt so lange zentriert, bis nur noch unkontrollierbare Ereignisse, wie beispielsweise Stau oder Unfall zu einem Abbruch oder Scheitern der RDE-Konformität einer Versuchsfahrt führen können (Abschnitt 2.5.2). Diese Vorgehensweise erscheint indes sinnig, da die Messfahrten sowohl ressourcen- als auch zeiteffizient erfolgen sollen.

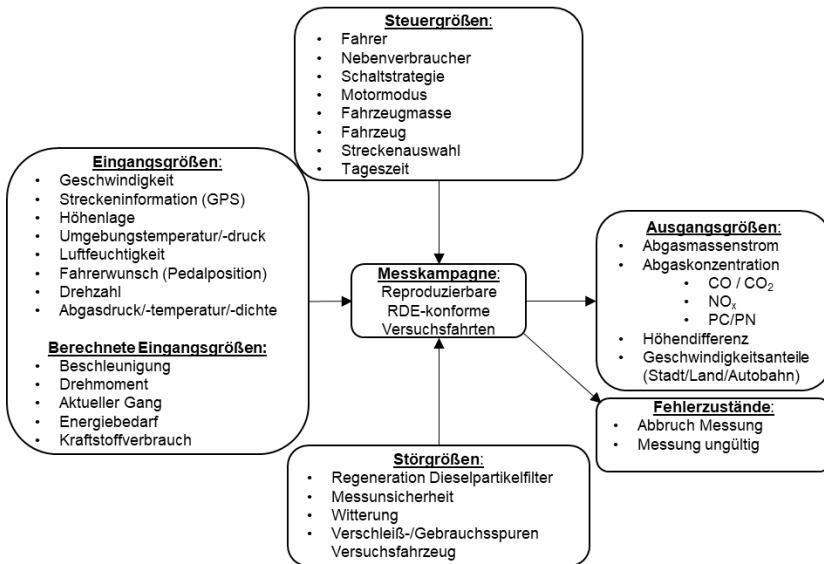


Abbildung 5.3: Parameterdiagramm Fahrversuche nach (Fritzsche, 2006; Siebertz, van Bebber & Hochkirchen, 2017) Die Six-Sigma-Methode unterscheidet die Parameter des betrachteten Systems in Eingangs-/Steuer-/Stör- und gewollten sowie ungewollten (Fehlerzustände) Ausgangsgrößen als Grundlage des Parameterdesigns. Ziel ist eine prozessstabile Auslegung des Versuchsplans durch Kontrolle der Störgrößen und gezielte Variation der Steuergrößen.

Im Anschluss an die Vorversuche wird eine Messkampagne durchgeführt. Als Ergebnis dieser Untersuchung ergeben sich zwei für die Kampagne relevante Faktoren:

- Fahrer (vier Stufen)
- Tageszeit (zwei Stufen)

Dabei werden vier verschiedene Fahrer und zwei unterschiedliche Tageszeiten definiert. Die vier Fahrertypen ermöglichen es, die Varianz unterschiedlicher Fahrertypen abzubilden, ohne durch eine Fahreranweisung ein nicht intuitives Fahrverhalten zu provozieren. Die beiden Tageszeiten dienen dazu, zwei unterschiedliche Verkehrslagen, beruflicher und gewerblicher Verkehr, in die Versuche einfließen zu lassen.

Durch feste Randbedingungen sind die übrigen Steuer- und Störgrößen unter Kontrolle des Versuchsplaners.

5.2.3 Messtechnischer Versuchsaufbau

Das eingesetzte Fahrzeug ist ein Personenkraftwagen mit einem Vierzylinder-Dieselmotor. Die technischen Daten des Versuchsfahrzeuges sind in Tabelle 5.2 aufgeführt.

Tabelle 5.2: Technische Daten Versuchsfahrzeug Realfahrtmesskampagne (Cortès et al., 2021)

Motor	Diesel, 4 Zylinder, 1968 cm ³ , turboaufgeladen
Leistung	110 kW bei 3500 – 4000 min ⁻¹
Drehmoment	340 Nm bei 1750 – 3000 min ⁻¹
Antriebsart	Front
Reifen	Michelin Energy Saver 215/60 R16
Getriebe	7-Gang-Direktschaltgetriebe (DSG)
Fahrzeugmasse	1621 kg / mit Messausstattung: 1717 kg
Abgasnachbehandlung	Dieselpartikelfilter (DPF), SCR-Katalysator
EU Abgasstandard	EU6 (Homologation WLTP und RDE)

Der Versuchsträger ist mit zusätzlicher Messtechnik ausgestattet, um definierte physikalische Größen zu erfassen. Hierzu gehören beispielsweise die Drehzahl des Verbrennungsmotors, die Fahrzeuggeschwindigkeit sowie die Abgaskonzentration und der Abgasmassenstrom.

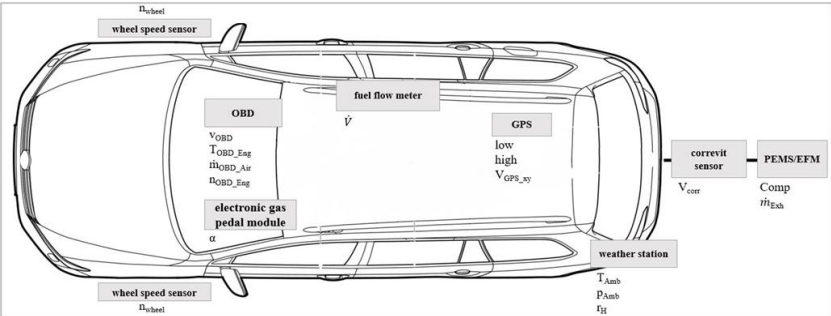


Abbildung 5.4: Messkonfiguration des Versuchsfahrzeugs (Cortès et al., 2021, S. 3). Die Ausstattung umfasst unterschiedliche Systeme zur Erfassung der Fahrzeuggeschwindigkeit. Zusätzlich ermittelt eine Wetterstation die Umweltbedingungen. Mit einer mobilen Abgasmesseinrichtung werden Abgasmassenstrom und die Konzentrationen der gasförmigen Abgasbestandteile sowie die Partikelanzahl gemessen.

Tabelle 5.3: Messtechnik der Realfahrtmesskampagne

Messeinrichtung	Messgröße
PEMS	gasförmige Abgasbestandteile: CO, CO ₂ , NO, NO ₂ festförmige Abgasbestandteile: Partikelanzahl Abgasmassenstrom
Wetterstation	Außentemperatur Luftdruck Luftfeuchtigkeit
VBOX Racelogic	Fahrzeugposition (GPS) Fahrzeuggeschwindigkeit
Kistler Correvit	Fahrzeuggeschwindigkeit (optisch)
Kistler	Raddrehzahl
Deditec	Fahrpedalposition

Die Messung der Konzentrationen von CO, CO₂, NO, NO₂ sowie die Partikelzahl im Abgas und des Abgasmassenstroms erfolgt mit einem Portable Emission Measurement System (PEMS) der AIP GmbH & Co KG, welches am Fahrzeugheck montiert ist. Die Abgasproben werden über beheizte Rohre direkt aus dem Abgasmassenstrom des Fahrzeugs entnommen. Um den Abgasmassenstrom im Fahrbetrieb zu bestimmen, enthält das PEMS ein Exhaust Flow Meter (EFM).

Die Wetterbedingungen (Umgebungstemperatur, Luftdruck und Luftfeuchtigkeit) werden während der realen Fahrten mit einer zum PEMS gehörenden Wetterstation aufgezeichnet. Zur Bestimmung von Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung ist das PEMS mit einem Global Positioning System (GPS)-Empfänger mit einer Abtastrate von 10 Hz auf dem Dach des Fahrzeugs verbunden. Zusätzlich erfasst ein zweiter GPS-Empfänger von Racelogic (VBOX) den Standort des Fahrzeugs mit einer Frequenz von 100 Hz. Die optische Messung der Fahrzeuggeschwindigkeit durch einen Correvit-Sensor der Kistler Instrumente AG erfasst die Geschwindigkeit unabhängig von der Satellitenabdeckung mit einer Frequenz von 500 Hz. Zur Erfassung der Radgeschwindigkeiten ist an dem linken und rechten Rad der angetriebenen Achse des Versuchsfahrzeugs je ein inkrementaler Raddrehgeber der Firma Kistler Instrumente AG installiert. Die Sensoren der Inkrementalgeber messen mit einer Auflösung von 1000 Impulsen/Umdrehung. Die Kühlmitteltemperatur wird über die standardisierte OBDII-Schnittstelle des Fahrzeugs erfasst. Zur Erfassung des gewünschten Fahrerwunsches während der Fahrt wird ein AD-Wandler der DEDITEC GmbH an das Fahrpedalpotentiometer angeschlossen, der den Spannungsverlauf über der Zeit aufzeichnet. Die Abtastrate beträgt dabei 500 Hz. Alle Systeme werden von einer unabhängigen Stromversorgung (225 Ah, 12 V) versorgt.

5.3 Versuchsdurchführung

In diesem Abschnitt werden die verwendeten Werkzeuge bzw. Tools zur Verarbeitung und Aufzeichnung der Daten aufgeführt. Folgende Tools und Softwareprogramme wurden dafür genutzt (Tabelle 5.4):

Tabelle 5.4: Verwendete Software der Realfahrtmesskampagne

CANape Version 18.0 SP2
MATLAB R2021b
PEMS Version 1.45.1.5
VBOX Version V3.1 b31
Kistler Correvit-Sensor Version 1.0.5.21
Kistler Radimpulssensor über Signalconverter AD8/4 Version 1.1.0

Die Messtechnik der Radimpulsgeber, des Correvit und der Racelogic VBOX besitzen jeweils eigene Auswerteeinheiten. Diese wandeln die analogen Signale der Sensoren in digitale Ausgabewerte um. Die digital gewandelten Signale werden dann über eine CAN-Schnittstelle an einen Messrechner weitergeleitet

Aufgrund der in Abbildung 5.3 dargestellten Parameter, sind definierte Randbedingungen einzuhalten (Tabelle 5.5).

Tabelle 5.5: Randbedingungen der Realfahrtmesskampagne

Fahrzeuggewicht	1717 kg (unterschiedliche Fahrergewichte werden vernachlässigt)
Nebenverbraucher	Klimaautomatik an (20 °C)
Tankinhalt	voll
Start-Stopp-Automatik	aus
Partikelfilter Beladungszustand	regeneriert
PEMS	vorkonditioniert und kalibriert

5.4 Versuchsauswertung

In diesem Abschnitt wird die Methode vorgestellt, anhand derer die signifikanten Parameter für die Abbildung von Reallasten aus den Ergebnissen der Realfahrtmesskampagne generiert werden. Diese Parameter sind die Grundlage, um bei der Entwicklung neuer Regelarten für einen Rollenprüfstand berücksichtigt zu werden.

5.4.1 Methoden zur Auswahl signifikanter Parameter

Innerhalb dieses Abschnittes wird unter Verwendung statistischen Methoden (Abschnitt 5.4.1.1), als auch einer Peakerkennung (Abschnitt 5.4.1.2) untersucht, welche Parameter eine statistisch signifikante Abhängigkeit zu den Ausgangsgrößen besitzen.

5.4.1.1 Verwendung statistischer Methoden

Bei der Auswertung der Messungen kommt eine interferenzstatistische Methode zum Einsatz. Weil eine aufgezeichnete Messfahrt bzw. eine Messkampagne nur einer Stichprobe der Gesamtpopulation (alle möglichen Fahrten) entspricht, sind die Aussagen mit einer gewissen Unsicherheit behaftet (siehe Abschnitt 2.4.2.2).

Ziel der Auswertung ist es, diejenigen Parameter zu identifizieren, welche einen signifikanten Einfluss auf die Ausgangsgrößen des Systems aufweisen. In diesem Fall bietet sich die Anwendung des Chi-Quadrat-Tests, einem Unabhängigkeitstest, an.

Die definierte Hypothese wird als statistische Alternativhypothese H_1 formuliert.

H_1 : Die Variablen X und Y sind voneinander abhängig. 5.1

X und Y entsprechen in dieser Hypothese den Eingangs- und Ausgangssignalen.

Demnach lautet die Nullhypothese H_0 :

H_0 : Die Variablen X und Y sind voneinander unabhängig. 5.2

Das Signifikanzniveau entspricht 5 %.

Wie in Abschnitt 2.4.2.2 beschrieben, wird eine Testschranke χ^2 aus der Chi-Quadrat-Tabelle entsprechend den Freiheitsgraden und dem Signifikanzniveau definiert: Die gemessenen Stichprobenergebnisse werden mit den zu erwartenden Werten verglichen, die sich bei einer verifizierten Nullhypothese H_0 ergeben müssen.

Somit gilt für die jeweiligen Testgrößen $T(x, y)$ für die Ablehnung der Nullhypothese H_0 vereinfacht:

$$T(x, y) \geq \chi^2 \quad 5.3$$

Eine beispielhafte Berechnung der Testgröße $T(x, y)$ und der dazugehörigen Testschranke χ^2 ist in Anhang A2 dargestellt.

Diese Vorgehensweise wird für folgende Signale angewendet (Tabelle 5.6.):

Tabelle 5.6: Eingangs- und Ausgangssignale für Chi-Quadrat-Unabhängigkeitstest

Eingangssignale	Ausgangssignale
Fahrerwunsch (Pedalposition)	Abgaskonzentrationen CO, NO, NO ₂ Partikelanzahl
Streckeninformation	
Geschwindigkeit	
Beschleunigung	
Höhenlage	
Umgebungsdruck	
Umgebungstemperatur	
Luftfeuchte	
Drehzahl	
Abgasdruck	
Abgastemperatur	
Abgasdichte	
Drehmoment	
Energiebedarf	
Kraftstoffverbrauch	
Zeit	
Ist-Gang	

5.4.1.2 Peakerkennung

Die Peakerkennung ist ein Algorithmus, welcher die vorliegenden Messdaten nach definierbaren Peaks durchsucht. Ausgehend von den gefundenen Peaks sind dann unterschiedliche Schritte in der Vorgehensweise möglich. Eine große Datenmenge kann über eine festgelegte Logik somit analysiert und aufbereitet werden. Die schematische Vorgehensweise ist in Abbildung 5.5 aufgezeigt.

Im Rahmen der gemeinsamen Untersuchungen mit Leukert wurde im Sinne der Six-Sigma-Methode eine Messsystemanalyse (MSA) durchgeführt, um die Messtechnik hinsichtlich ihrer Prozessfähigkeit und der Wiederhol-/Vergleichspräzision zu beurteilen. Aufgrund dieser Analyse entfallen in der weiteren Auswertung die Darstellungen für die Partikelanzahl. Diese sind aufgrund der Ungenauigkeit des jeweiligen Analysators innerhalb des Messsystems nicht für eine statistische Betrachtung geeignet. Auf die Ergebnisse der Untersuchungen wird im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter eingegangen (Leukert, 2020).

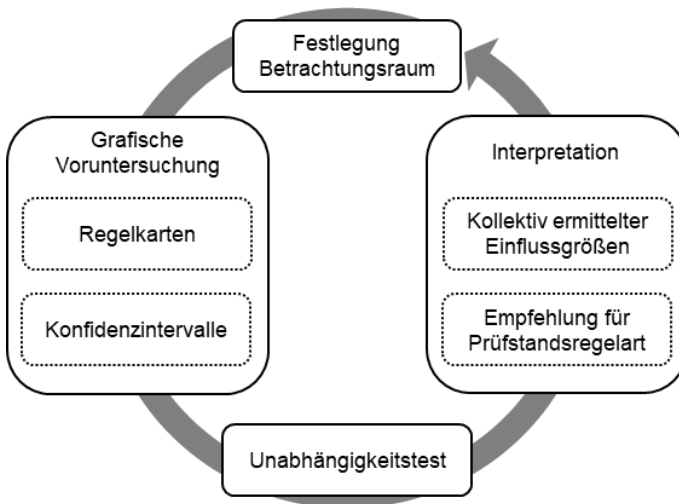


Abbildung 5.5: Vorgehensweise in der Versuchsauswertung. Die Betrachtungszeiträume werden mittels eines automatisierten Peakfinders festgelegt. Anschließend wird der Datensatz durch eine grafische Vorauswertung auf statistische Ausreißer untersucht. Durch den Unabhängigkeitstest werden die Abhängigkeit zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen bewertet. Die Interpretation listet die Ergebnisse auf.

Die Messungen mit der Aufzeichnungssoftware CANape liefern zeitdiskrete Kanäle für alle vorab in der Messkonfiguration definierten Signale. Die Analyse der Messdaten startet mit der Analyse des gesamten Betrachtungszeitraumes, d.h. der gesamten Messdauer, welche durch den in Abschnitt 5.2.1 definierten Streckenverlauf vorgegeben ist. Deshalb erfolgt eine streckenbasierte Darstellung.

Die jeweiligen Rohwerte der Signale werden gesammelt über der gefahrenen Strecke aufgetragen. Diese Ansicht ist der Ausgangspunkt für die anschließende grafische Voruntersuchung, um statistische Ausreißer zu ermitteln, und sicherzustellen, dass die unter Abschnitt 5.2.2 beschriebenen Steuer- und Störgrößen mit den in Abschnitt 5.3 vorgegebenen Randbedingungen übereinstimmen. Diese Voruntersuchung erfolgt mit Hilfe von Regelkarten und Konfidenzintervallen statistischer Größen der entsprechenden Messsignale. Anschließend erfolgt die Prüfung der Abhängigkeit der Ausgangsgröße von den definierten Eingangsgrößen. Überschreiten die Testgrößen $T(x, y)$ die Testschranke χ^2 , so liegt eine signifikante Abhängigkeit der Variablen innerhalb des

entsprechenden Betrachtungszeitraumes vor. Die Ergebnisse werden in Form eines Kollektivs abgespeichert, bevor der nächste Betrachtungszeitraum analysiert wird.

Iterativ erfolgt die schrittweise Reduzierung des Betrachtungszeitraumes nach einem festen Schema anhand eines Peakfinders. Weil der Peakfinder für jedes Signal spezifische Betrachtungszeiträume erzeugt, kann durch diese Vorgehensweise jedes einzelne Ausgangssignal detailliert analysiert werden. Diese Peakerkennung ist am Beispiel der Abgaskonzentration für Stickoxide NO_x im folgenden Abschnitt dargestellt.

Die Peaks werden anhand der Auswertung des Integrals der Abgaskonzentration erkannt. Wächst das Integral um einen bestimmten prozentualen Wert aufgrund eines bestimmten Ereignisses, so wird an dieser Stelle ein Event markiert. Für die Stickoxidemissionen ist hier eine Änderung von 50 % als Grenzwert definiert (Abbildung 5.6 und Abbildung 5.7).

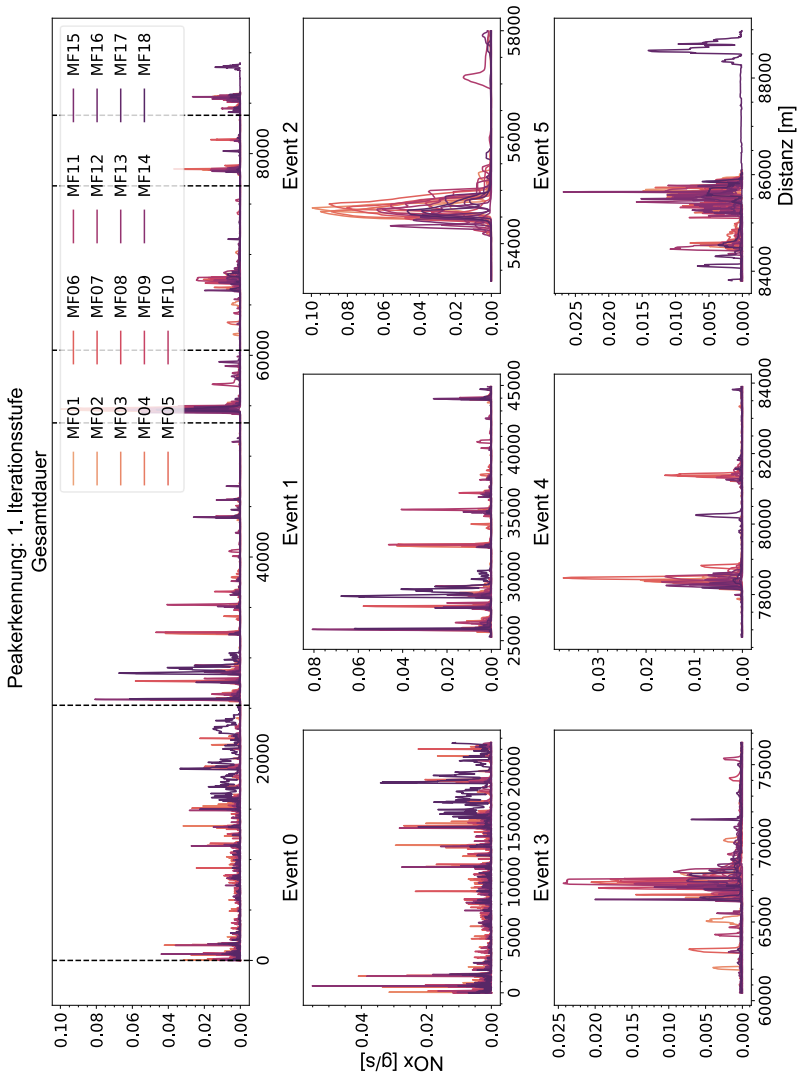


Abbildung 5.6: Peakfinder: Bestimmung der Events. Anhand der Auswertung der momentanen Änderung des Integrals der beobachteten Abgaskonzentration NO_x werden aus den Messdaten sechs signifikante Events extrahiert.

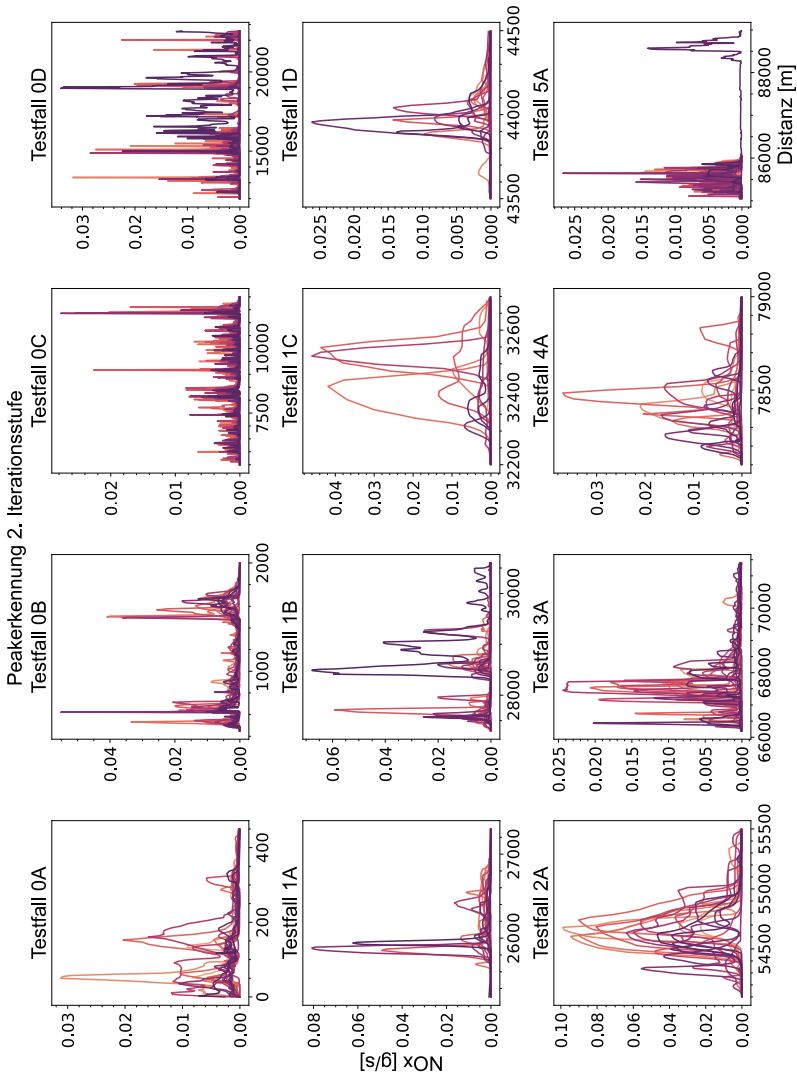


Abbildung 5.7: Peakfinder: Bestimmung der Testfälle. Innerhalb jedes Events werden Testfälle bestimmt. Aus sechs Events werden in diesem Beispiel zwölf Testfälle generiert.

5.4.2 Analyse der Ergebnisse

Für alle von der Peakerkennung definierten Betrachtungsräume erfolgt laut Abbildung 5.5 ebenfalls ein Unabhängigkeitstest. Die Ergebnisse dieser Unabhängigkeitstests sind beispielhaft für den gesamten Betrachtungszeitraum in Tabelle 5.7 aufgeführt. Analog zu Kapitel 5.4.1.2 sind hier aus Gründen der Anschaulichkeit die Ergebnisse auf das Ausgangssignal Abgaskonzentration NO_x reduziert.

Tabelle 5.7: Chi-Quadrat-Unabhängigkeitstest für gesamten Betrachtungszeitraum
(rot = Variablen unabhängig, grün = Variablen abhängig)

Eingangssignale	Ausgangssignal NO_x	
	$T(x, y)$	χ^2
Fahrerwunsch (Pedalposition)	26,2	26,3
Streckeninformation	33,5	26,3
Geschwindigkeit	21,3	26,3
Beschleunigung	31,0	26,3
Höhenlage	28,8	26,3
Umgebungsdruck	29,8	26,3
Umgebungstemperatur	26,5	26,3
Luftfeuchte	30,9	26,3
Drehzahl	16,8	26,3
Abgasdruck	20,9	26,3
Abgastemperatur	32,3	26,3
Abgasdichte	40,4	26,3
Drehmoment	28,5	26,3
Energiebedarf	25,5	26,3
Kraftstoffverbrauch	26,5	26,3
Zeit	20,1	26,3
Ist- Gang	29,2	26,3

Der Unabhängigkeitstest weist bei der Auswertung des gesamten Betrachtungszeitraumes statistische Abhängigkeiten zu mehreren Eingangssignalen auf. Aufgrund der Länge der Messfahrt täuscht diese statistische Aussage über eine reale Abhängigkeit hinweg, weshalb eine Verkleinerung des Betrachtungszeitraumes notwendig ist.

Für das Event $\text{NO}_x 0$, die erste Stufe der Reduzierung des Betrachtungsraumes, ist entsprechend Tabelle 5.8 gefüllt.

Tabelle 5.8: Chi-Quadrat-Unabhängigkeitstest für Event NO_x 0
(rot = Variablen unabhängig, grün = Variablen abhängig)

Eingangssignale	Ausgangssignal NO _x	
	$T(x, y)$	χ^2
Fahrerwunsch (Pedalposition)	33,7	26,3
Streckeninformation	22,3	26,3
Geschwindigkeit	25,8	26,3
Beschleunigung	22,5	26,3
Höhenlage	44,8	26,3
Umgebungsdruck	19,3	26,3
Umgebungstemperatur	23,6	26,3
Luftfeuchte	18,2	26,3
Drehzahl	32,0	26,3
Abgasdruck	23,7	26,3
Abgastemperatur	34,7	26,3
Abgasdichte	16,7	26,3
Drehmoment	23,5	26,3
Energiebedarf	51,2	26,3
Kraftstoffverbrauch	28,8	26,3
Zeit	23,3	26,3
Ist- Gang	28,0	26,3

Hier ist eine statistische Abhängigkeit der Abgastemperatur erkannt worden. Insgesamt ist der Betrachtungsraum noch zu umfangreich, um Abhängigkeiten zwischen Ein- und Ausgangssignalen zu berechnen.

Die aus dem Event NO_x 0 resultierenden Testfälle sind in Tabelle 5.9 auf ihre Abhängigkeit untersucht worden.

Tabelle 5.9: Chi-Quadrat-Unabhängigkeitstest für Testfälle NO_x 0A, 0B, 0C, 0D
 (rot = Variablen unabhängig, grün = Variablen abhängig)

Eingangssignale	Ausgangssignal NO _x				
	0A	0B	0C	0D	
Fahrerwunsch (Pedalposition)					++
Streckeninformation					+
Geschwindigkeit					++
Beschleunigung					+
Höhenlage					+++
Umgebungsdruck					+
Umgebungstemperatur					+
Luftfeuchte					+
Drehzahl					++
Abgasdruck					++
Abgastemperatur					++++
Abgasdichte					+++
Drehmoment					++
Energiebedarf					++
Kraftstoffverbrauch					+++
Zeit					+++
Ist- Gang					++

Mit der weiteren Reduktion auf Ebene der Testfälle sind nun die ersten statistischen Abhängigkeiten erkennbar. In Tabelle 5.9 ist zur Veranschaulichung nur der entsprechende Farbcode aufgetragen.

Ein Eingangssignal mit einer vorwiegend durchgängigen statistischen Abhängigkeit ist der Fahrerwunsch, der sowohl mit der Pedalposition, der Beschleunigung und des Drehmoments des Verbrennungsmotors wechselwirkt. Die Drehzahl des Verbrennungsmotors und der aktuelle Gang weisen die Nullhypothese ebenfalls größtenteils ab, sind also abhängig zu den aktuellen NO_x-Abgasemissionen.

Wenig verwunderlich besteht zwischen Abgasdruck, -temperatur und -dichte eine hohe statistische Abhängigkeit zu NO_x. Auffallend ist, dass der längste Testfall 0D am wenigsten Abhängigkeiten zwischen Eingangssignalen und Ausgangssignal zeigt. Als unabhängige Eingangssignale stellen sich vor allem die Umgebungstemperatur, die Höhenlage und die Streckeninformation, also die geographische Lokalisierung, heraus.

5.5 Interpretation der Ergebnisse

Das Ergebnis aus dem vorherigen Abschnitt 5.4 kann nun entsprechend interpretiert werden. Durch das Parameterdiagramm (Abbildung 5.3) wird das Systemverständnis schon vor der Versuchsplanung unterstützt. Bei der Interpretation der Messergebnisse ist dieses wieder essenziell, um aus einer statistischen Datenanalyse die relevanten Erkenntnisse zu extrahieren.

Anhand der Teilmanöverdefinition mittels der Peakerkennung können aus dem ganzen Betrachtungsraum jeweils signifikante Untereinheiten generiert werden, welche selbst wieder mit derselben Logik unterteilbar sind. Diese Vorgehensweise ist in Abbildung 5.8 angedeutet.

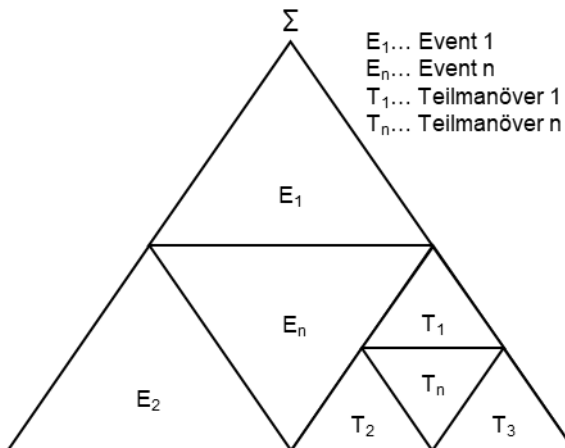


Abbildung 5.8: Darstellung der Teilmanöverdefinition. Mit der Peakerkennung werden ganze Betrachtungszeiträume iterativ in kleinere Segmente unterteilt, bis durch die Ergebnisse eines Unabhängigkeitstests die Abhängigkeit zwischen Ein- und Ausgangssignal signifikant nachgewiesen werden.

Anhand der vorangegangenen beispielhaften Darstellung und Analyse eines Ausgangssignals in Abschnitt 5.4.2, können nun abhängige Eingangssignale herausgefiltert werden.

Das Ergebnis dieser iterativen Annäherung in immer kleinere Segmente ist ein Kollektiv an abhängigen und unabhängigen Variablen.

Das Parameterdiagramm in Abbildung 5.3 betrachtet als zu untersuchendes System die Realfahrtmesskampagne und als Ziel, diese reproduzierbar RDE-konform durchzuführen. Diese Systemgrenze ist für die effiziente Durchführung der Kampagne zielführend. Unter dem Kontext, die signifikanten Parameter für die Nachbildung der Reallasten des Fahrzeuges auf einem Prüfstand abzubilden, müssen die Systemgrenzen angepasst werden, sodass innerhalb der neuen Grenzen diejenigen Parameter liegen, die tatsächlich auch geregelt werden können.

Für die Analyse dieses Entwicklungsprozesses ist das IPEK-XiL-Framework das geeignete methodische Werkzeug. Das Sul ist das Fahrzeug, weshalb hier der Freischnitt, bzw. die Systemgrenze bei der Bewertung der Parameter verläuft. Das SiD wird von der Validierungsumgebung dargestellt, die im Sinne des IPEK-XiL auch das Restfahrzeugmodell beinhaltet, sollte dieses notwendig sein (siehe Kapitel 6).

In der nachfolgenden Tabelle 5.10 sind die in Abschnitt 5.4.2 analysierten abhängigen Größen mit ihrer Zuordnung zum SiD und Sul dargestellt.

Tabelle 5.10: Darstellung der abhängigen Eingangsgrößen mit Zuordnung zum SiD und Sul

SiD		Sul	Empfehlung als Regelart
Umwelt	Fahrer	Fahrzeug	++/+/0/-/--
	Fahrerwunsch (Pedalposition)	Fahrerwunsch (Pedalposition)	++
Beschleunigung		Beschleunigung	0
		Drehzahl VM	++
		Aktueller Gang	0
		Geschwindigkeit	++
		Drehmoment VM	++
		Abgasdruck	--
		Abgastemperatur	--
		Abgasdichte	--

Die Drehzahl des Verbrennungsmotors und der aktuelle Gang haben einen physikalischen Zusammenhang mit der Fahrzeuggeschwindigkeit. Die einzige Schnittstelle zwischen Fahrer und Fahrzeug stellt der Fahrerwunsch dar. Der Fahrerwunsch lässt sich in eine positive und negative Beschleunigung oder gleichförmige Bewegung des Fahrzeuges unterteilen. Die Beschleunigung ist hier ein Ergebnis des Drehmoments der Traktionsmaschine, welches über die Zugkraft am Rad, mit dem entsprechenden Reactio der Umwelt und somit der Summe aller

Fahrwiderstände, erzeugt wird. Die Abgasgrößen liegen innerhalb des Fahrzeuges, weshalb sie über keine triviale Schnittstelle zur Validierungsumgebung verfügen.

Die Eignung als Regelgröße für eine Prüfstandsregelart geht somit über die statistische Abhängigkeit zu entsprechenden Ausgangsgrößen auch mit einer praktischen Umsetzbarkeit einher. Diese Eignung ist in der rechten Spalte qualitativ bewertet.

Diejenigen Größen, die über eine Regelung nicht kontrolliert werden, müssen im Weiteren als Validierungsgrößen verwendet werden. Beispielsweise sollte der aktuelle Gang bei jeder Regelungsform gleichermaßen, wie die Abgasgrößen statistisch beobachtet werden. Bei der Reproduzierbarkeit der Längsdynamik ist hierbei also auf die physikalischen Zusammenhänge des Sul zu achten. Beispielsweise garantiert eine hochgenaue Abbildung der Fahrzeuggeschwindigkeit nicht, dass sowohl aktueller Gang, Drehzahl und Drehmoment des Verbrennungsmotors ebenfalls gut reproduziert werden.

5.6 Zwischenfazit

In dieser Messkampagne wurden anhand von RDE-konformen Fahrten kundenrelevante und reale Längsdynamiklasten messdatentechnisch erfasst. Diese Messdaten wurden anschließend anhand geeigneter statistischer Methoden ausgewertet, um damit die signifikanten Parameter zu bestimmen, welche notwendig sind, um die längsdynamischen Reallasten in einer Validierungsumgebung nachzubilden.

Dabei wurden die Teilforschungsfragen TFF1.1 und 1.2 komplementär beantwortet.

TFF1.1	Wie können die signifikanten Parameter für die Validierungsumgebung ermittelt werden?
---------------	---

Durch Unabhängigkeitstests kann die statistische Abhängigkeit zwischen zwei Variablen mit einem definierten Signifikanzniveau festgestellt werden. Dabei ist entscheidend, sich durch ein entsprechendes Parameterdiagramm das Systemverständnis im Voraus abzusichern. Die Abhängigkeit zwischen den Systemeingängen und -ausgängen ist anschließend der Mittelpunkt der Datenauswertung.

Die lange Messdauer, ebenso die lange Fahrstrecke, einer RDE-konformen Fahrt erfordert es, durch ein standardisiertes Verfahren eine Segmentierung des

gesamten Betrachtungsraumes vorzunehmen. Anhand eines Peakfinders werden spezifisch zum entsprechenden Ausgangssignal diejenigen Abschnitte iterativ bestimmt, die einen signifikanten Einfluss zum Gesamtergebnis haben. Bei jedem Schritt erfolgt die statistische Analyse der Unabhängigkeit zwischen Eingangs- und Ausgangssignalen. Kann eine Abhängigkeit nicht festgestellt werden, so wird die Segmentierung nochmals auf das vorherige Segment angewandt.

Das Ergebnis ist ein Kollektiv von abhängigen Paaren zwischen Eingangs- und Ausgangssignalen, welche für jedes Ausgangssignal wiederholt werden kann.

TFF1.2	Welche Parameter eignen sich für die Implementierung einer Prüfstandsregelart?
---------------	--

Durch die Dekomposition der Messdaten anhand der Methoden aus TFF1.1 wurden signifikante statistische Abhängigkeiten berechnet. Vor dem Hintergrund der Zugänglichkeit und Regelbarkeit der Signale durch Sensoren und Aktoren innerhalb einer Regelstrecke ist eine Empfehlung für eine Implementierung einer Regelart entstanden. Diese ist die Grundlage für die weiteren Arbeiten im Rahmen dieser Dissertation.

FF1	Welche Anforderungen muss eine Validierungsumgebung erfüllen, um relevante längsdynamische Einflüsse aus dem Reallastbetrieb des Fahrzeuges abzubilden?
------------	---

Dieses deduktive Forschungsvorgehen verwendet deskriptiv- und interferenzstatistische Methoden, um die Forschungsfrage FF1 zu beantworten. Die verwendeten Methoden in TFF1.1 und TFF1.2 sind in der Lage, diejenigen Größen zu ermitteln, die durch ihre statistische Abhängigkeit zueinander auf einer Validierungsumgebung reproduziert werden müssen. Zusätzlich zur möglichst genauen Abbildung der längsdynamischen Größen, wie beispielsweise der Längsbeschleunigung, ist auch das exakte Abbilden der Betriebspunkte des Antriebsstranges von gesteigertem Interesse. In der vorliegenden Studie wurde durch Verwendung eines mobilen Abgasmesssystems die Nachbildung physikalischer Größen wie momentaner Abgaskonzentration gasförmiger Komponenten mit betrachtet. Zusätzlich zu den Bewegungsgrößen, muss eine Validierungsumgebung zwingend auch dazu in der Lage sein, den Fahrerwunsch exakt zu reproduzieren. Somit können auch die Betriebspunkte, d.h. die aktuelle Gangstufe, die Verbrennungsmotordrehzahl oder der Abgasmassenstrom, als Maß für die Qualität der reproduzierten Realfahrten auf einer Validierungsumgebung herangezogen werden.

6 Validierung von reproduzierten Realfahrten auf einem Rollenprüfstand

Während das Kapitel 5 sich mit der systematischen Auswahl von relevanten Zielgrößen befasst, handelt dieses Kapitel von der Verwendung eines Rollenprüfstandes als Validierungsumgebung zur Kalibrierung und Validierung von Fahrzeugantriebssystemen. Hierfür werden die Erweiterungen der Validierungsumgebung beschrieben und die Ergebnisse der reproduzierten Lastzustände bewertet. Dadurch können die Forschungsfrage FF2 und die Teilforschungsfragen TFF2.1 und TFF2.2 beantwortet werden.

FF2	Wie kann ein (ViL)/-Rollenprüfstand genutzt werden, um im Kontext der Kalibrierung und der Verifikation von RDE-relevanten Funktionen valide Ergebnisse zu liefern und somit den realen Fahrversuch zu ergänzen?
TFF2.1	Welche Erweiterungen müssen an der Validierungsumgebung vorgenommen werden, um die längsdynamischen Lastzustände abzubilden?
TFF2.2	Mit welcher Genauigkeit lassen sich die Lastzustände in der erweiterten Validierungsumgebung abbilden?

Dieses Kapitel beinhaltet eine Prüfstandsmesskampagne, welche längsdynamische Lastzustände einer Referenzmessung aus dem realen Straßenverkehr mit unterschiedlichen Prüfstandsregelarten reproduziert. Dafür wird die Validierungsumgebung in Abschnitt 6.1 in das IPEX-XiL-Framework eingeordnet. Abschnitt 6.2 zeigt die unter Teilforschungsfrage TFF2.1 angesprochenen Erweiterungen an der Validierungsumgebung hinsichtlich der Prüfstandsinfrastruktur und der Prüfstandsregelarten auf. Die Versuchsplanung in Abschnitt 6.3 erfasst die Erläuterungen zu der Referenzmessung, der Parameterauswahl und dem messtechnischen Aufbau des Versuchsfahrzeuges. Die Vorgehensweise bei der Versuchsdurchführung ist in Abschnitt 6.4 zusammengefasst. Die Ergebnisse der Prüfstandsmesskampagne werden in Abschnitt 6.5 analysiert und anschließend in Abschnitt 6.6 interpretiert.

Zentrale Inhalte dieses Abschnitts wurden bereits auf dem Aalener Kolloquium antriebstechnischer Anwendungen (Cortès et al., 2023) veröffentlicht.

6.1 Validierungsumgebung

Auch in diesem Abschnitt wird die vorliegende Validierungsumgebung in das IPEK-XiL-Framework eingeordnet. Abbildung 5.1 aus Abschnitt 5.1 zeigt die Einordnung einer Realfahrt innerhalb des Frameworks. Die nachfolgende Abbildung 6.1 berücksichtigt die neuen Anforderungen aus diesem Kapitel.

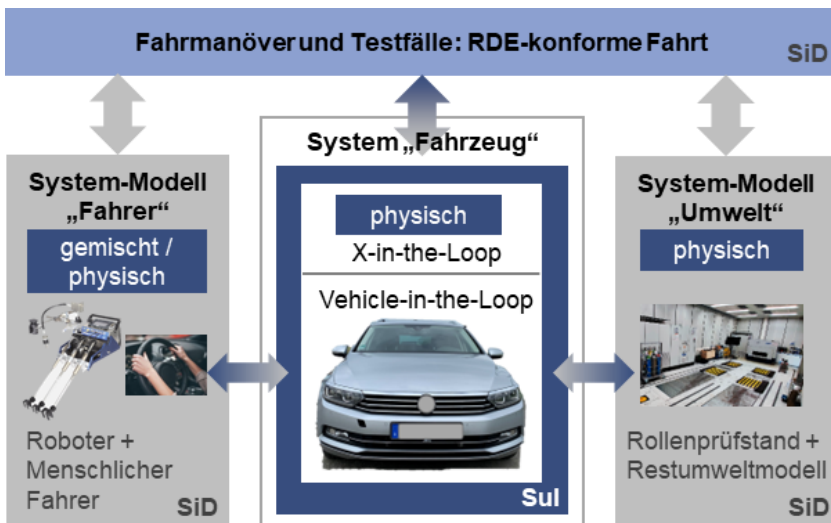


Abbildung 6.1: Konfiguration des IPEK-XiL-Frameworks für die Prüfstandsmesskampagne. Das System-Modell „Fahrer“ entspricht wahlweise einem menschlichen oder automatisierten Fahrer. Das System-Modell „Umwelt“ wird durch den Rollenprüfstand dargestellt. Das Sul liegt in physischer Form vor.

Der aktuelle Versuchsaufbau zeigt ein Sul in physischer Ausführung auf einem Rollenprüfstand, das wahlweise mit einem physischen oder einem gemischt virtuell-physischen Fahrer konfiguriert wird. Dabei sind sowohl der Rollenprüfstand als auch der automatisierte Fahrer, sowie die Fahrmanöver und Testfälle Teil des SiD (Albers, Behrendt et al., 2016).

6.2 Weiterentwicklung Validierungsumgebung

Um die in Kapitel 5 beschriebenen Zielgrößen innerhalb der Validierungsumgebung reproduzieren zu können, erfolgt mit Tabelle 5.10 eine Auflistung der Eingangsgrößen in das betrachtete Zielsystem. Tabelle 6.1 zeigt die Zuordnung dieser Signale zum SiD und Sul.

Tabelle 6.1: Darstellung der abhängigen Eingangsgrößen mit Zuordnung zum SiD und Sul

SiD		Sul
Umwelt	Fahrer	Fahrzeug
Geschwindigkeit	Fahrerwunsch (Pedalposition)	Fahrerwunsch (Pedalposition)
Fahrwiderstand		

In Abschnitt 6.2.1 wird die Prüfstandsinfrastruktur dargestellt. Dabei wird vor allem der Signalfuss der unterschiedlichen Regelkreise je nach Prüfstandsregelart unterschieden. Die Prüfstandsregelarten werden anschließend in Abschnitt 6.2.2 rekapituliert, um mit der Neuentwicklung der Regelart v-Fahrerwunsch (v-FW) abzuschließen.

6.2.1 Prüfstandsinfrastruktur

Die Prüfstandsinfrastruktur der Technischen Hochschule umfasst einen 4x2-Rollenprüfstand (Abbildung 2.15) und einen automatisierten Fahrroboter des Herstellers AIP Automotive GmbH & Co. KG. Diese Architektur ist in Abbildung 6.2 dargestellt.

Die Prüfstandsautomatisierung umfasst dabei die Softwaremodule Driver's Aid und Dyno Server. Der Dyno Server ist die Schnittstelle zu der Rollenregelung und erlaubt es dem Prüfstandspersonal, unterschiedliche Regelarten vorzugeben. Innerhalb des Dyno Servers sind ebenfalls die fahrzeugspezifischen Fahrwiderstandskurven hinterlegt. Diese werden mittels einer Routine für Lastanpassung von Ausrollkurven aus realen Fahrversuchen auf die veränderten Bedingungen am Rollenprüfstand adaptiert. Mittels des Driver's Aid können (gesetzliche) Zyklen in Form von Geschwindigkeit-Zeit-Profilen inklusive Schaltinformation angelegt werden. Mittels einer Visualisierung besteht eine Fahrerleitfunktion, welche es einem menschlichen Fahrer erlaubt, eine Geschwindigkeitssollvorgabe mit der aktuell durch ihn

eingestellten Istgeschwindigkeit abzugleichen und demzufolge beliebigen Profilen zu folgen.

Die in Abbildung 6.2 dargestellten Signale umfassen dabei bereits die Erweiterung der Regelarten um die Neuentwicklung aus Abschnitt 6.2.2.3.

Die Verwendung eines Fahrroboters erlaubt sowohl den Betrieb in Geschwindigkeitsregelung, als auch die direkte Vorgabe von Fahrpedalpositionen α anhand eines E-Gas-Moduls (C.-P. Kraft & Staffen, 2011).

Die Abtastrate des Potentiometers des elektronischen Fahrpedals beträgt 500 Hz auf Seiten des Fahrroboters. Die Messung der Zugkraft, der Fahrzeuggeschwindigkeit und der Rollendrehzahl erfolgt durch die Prüfstandssensorik mit einer Abtastrate von 1 kHz.

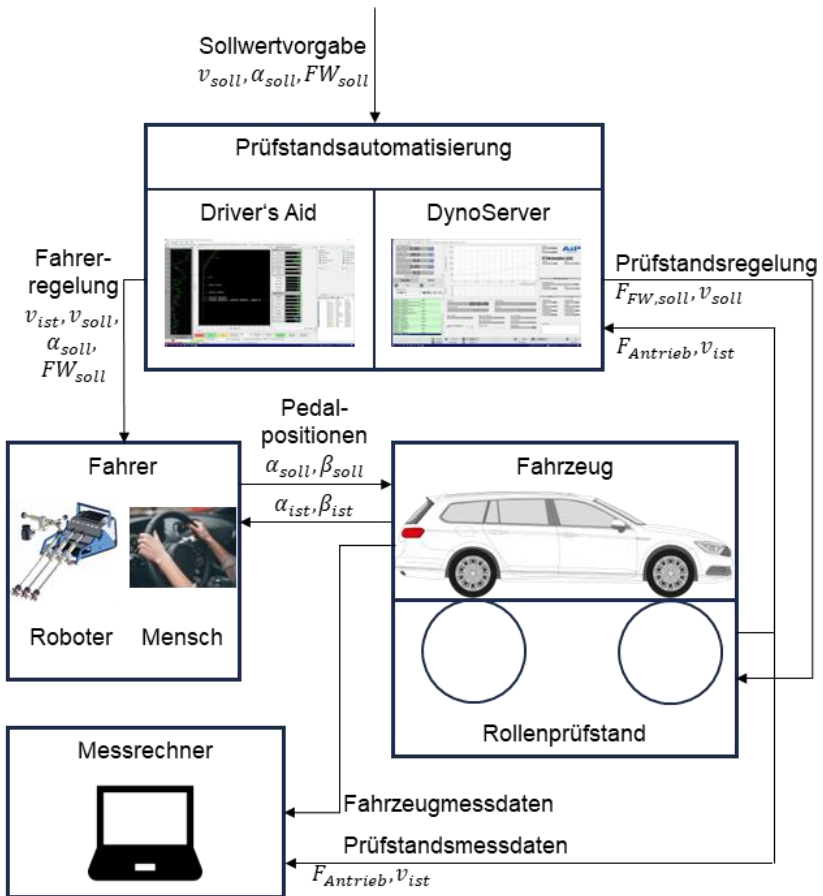


Abbildung 6.2: Prüfstandsinfrastruktur der Validierungsumgebung für die Prüfstandsmesskampagne. Je nach Regelart können die Fahrzeuggeschwindigkeit, eine Fahrpedalposition oder ein Fahrerwunsch als Sollwert vorgegeben werden. Die Prüfstandsautomatisierung verarbeitet die Vorgaben und berechnet daraus beispielsweise eine geschwindigkeitsabhängige Fahrwiderstandskraft für die Rollen und regelt diese entsprechend ein. In diesem Fall befindet sich der Fahrer in Geschwindigkeitsregelung und stellt diese anhand der Pedalpositionen ein. Über eine CAN-Schnittstelle können sowohl Fahrzeug-, als auch Prüfstandsmessdaten aufgezeichnet werden.

6.2.2 Prüfstandsregelarten

In Abschnitt 2.3.4.5 werden die gängigen Regelarten für den Betrieb eines Rollenprüfstandes vorgestellt. Durch gemeinsame Forschung konnten sowohl die bestehenden Prüfstandsregelarten bewertet als auch neue Regelarten für die Rollenprüfstandsautomatisierung entwickelt werden.

Tabelle 6.2 zeigt die erforschten und neu entwickelten Prüfstandsregelarten

Tabelle 6.2: Forschung an Regelarten am Institut für Fahrzeugsystemtechnik der THU

Name der Regelart	Wissenschaftliche Arbeit	Relevanz
Straßenlastsimulation	(Czogalik, 2020) ¹¹	Ja
F-v	(Käser, 2021) ¹²	Bedingt
v- α	(Ulrich, 2020) ¹³	Ja
n- α	(Maier, 2020) ¹⁴	Bedingt
v-Fahrerwunsch (Neuentwicklung)	(Kottmann, 2021) ¹⁵ , (Lorenz, 2021) ¹⁶ , (Cortès, Dettmann, Mayer et al., 2022)	Ja

Die hier als bedingt relevant markierten wissenschaftlichen Arbeiten befassen sich mit den Regelarten F-v und n- α . Diese Regelarten sind auf dem Rollenprüfstand untersucht worden, stellen jedoch die Prüfstandsinfrastruktur vor regelungstechnische Herausforderungen, weshalb die Weiterentwicklung im Rahmen dieser Arbeit nicht verfolgt wird. In den nachfolgenden Abschnitten werden die für diese Arbeit relevanten Regelarten rekapituliert, um zur Neuentwicklung der v-FW-Regelung hinzuleiten.

¹¹ Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

¹² Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

¹³ Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

¹⁴ Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

¹⁵ Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

¹⁶ Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

6.2.2.1 Straßenlastsimulation

In Abschnitt 2.3.4.5 wurden die physikalischen Grundlagen der Regelart Straßenlastsimulation erläutert. Die Fahrwiderstandsgleichung 2.1 wird in der Prüfstandsautomatisierung als ein geschwindigkeitsabhängiges, quadratisches Polynom hinterlegt. Dabei werden die Fahrwiderstände in konstante, lineare und quadratische Bestandteile zerlegt und sortiert. Diese Koeffizienten werden Straßenlastkoeffizienten genannt.

$$F_{FW} = A + B \cdot v + C \cdot v^2 \quad 6.1$$

Dieser Fahrwiderstand wird von der Prüfstandsautomatisierung passend zur aktuellen Istgeschwindigkeit eingeregelt.

Um die Antriebskraft $F_{Antrieb}$ ermitteln zu können, wird eine Kraftmessdose verwendet. Diese filtert den masseabhängigen Anteil der Prüfstandsrollen aus dem Kraftverlauf und ermöglicht somit die Messung der Zugkraft F_{Zug} , also der Antriebskraft $F_{Antrieb}$ an den Rädern.

In der Straßenlastsimulation befindet sich das Fahrzeug in Geschwindigkeitsregelung. Die Regelungsaufgabe kann sowohl von einem menschlichen Fahrer als auch von einem automatisierten Fahrroboter erfüllt werden.

6.2.2.2 v- α

In der Regelart v- α wird der Rollenprüfstand in Geschwindigkeitsregelung betrieben, d.h. die Sollwertvorgabe wird mittels der elektrischen Ansteuerung der Prüfstandsmaschinen umgesetzt. Der Fahrroboter setzt die Fahrpedalpositionsvorgabe α zeitgleich um. Somit agieren gleichzeitig zwei Regelkreise, womit sich ein definierter Lastzustand am Kontakt Reifen-Rolle einstellt.

Die Regelungsaufgabe kann hier von einem menschlichen Fahrer nicht mehr hinreichend genau erfüllt werden, weshalb hier nur der automatisierte Fahrroboter geeignet ist.

6.2.2.3 v-Fahrerwunsch

Die Regelart v-Fahrerwunsch erweitert die Regelart v- α um eine Bremsenregelung. Die Bremsenregelung ist die logische Konsequenz, um den Fahrerwunsch in seiner Gesamtheit durch den Fahrroboter darstellen zu können (Cortès, Albers et al., 2022).

Ist diese nicht enthalten, so wird die Fahrzeugverzögerung durch die geschwindigkeitsgeregelter Rollenregelung allein dargestellt. Cortès et al. weisen darauf hin, dass durch Entfall der Bremspedalbetätigung, sämtliche fahrzeuginternen Fahr-/Betriebsstrategien, welche diese Information benötigen, nicht ausreichend Informationen erhalten. Hierfür sei die Getriebschaltstrategie genannt, welche beispielsweise bei langen Schubphasen mit aktivem Bremspedal, beispielsweise eine Bergabfahrt, eine Fahrt bei hoher Drehzahl in einem niedrigeren Gang wählt. Dadurch erreicht der Triebstrang ein höheres Schleppmoment und schont somit die Betriebsbremse. Gleichmaßen ist bei elektrisch oder hybridisch angetriebenen Fahrzeugen je nach Rekuperationsstrategie die Betätigung des Bremspedals notwendig.

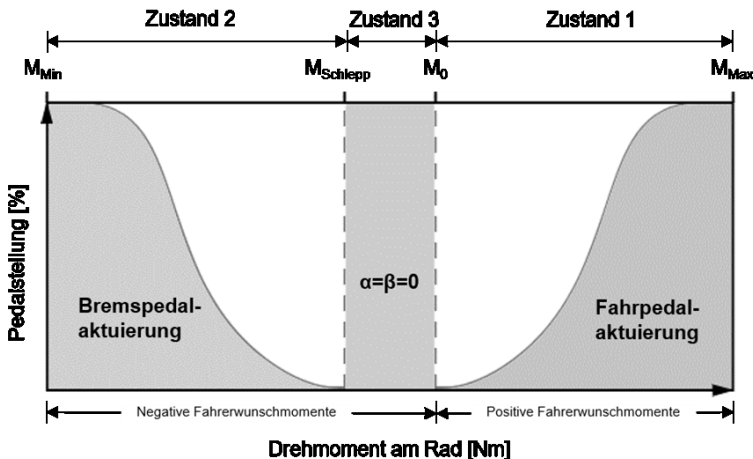


Abbildung 6.3: Schematische Darstellung des Fahrerwunschlages durch Fahr- und Bremspedalaktuierung. nach (Cortès, Dettmann, Mayer et al., 2022) Der Fahrerwunsch wird in ein positives und negatives Fahrerwunschlages aufgeteilt. .

Diese closed-loop-Regelung ist Ergebnis gemeinsamer Forschung (Cortès, Dettmann, Mayer et al., 2022; Kottmann, 2021; Lorenz, 2021) und die validierten Ergebnisse wurden veröffentlicht (Cortès, Dettmann, Mayer et al., 2022).

In der vorliegenden Prüfstandsmesskampagne wird eine fahrzeuginterne Steuergerätegröße verwendet, um das auf das Fahrzeug wirkende Bremsmoment abzubilden.

6.3 Versuchsplanung

Durch die Prüfstandsmesskampagne werden die in Abschnitt 6.2.2 vorgestellten Prüfstandsregelarten hinsichtlich ihrer Fähigkeit untersucht, gewisse Fahraufgaben, die aus der realen Straßenfahrt resultieren, zu erfüllen. Dieser Abschnitt gibt einen Überblick über den Aufbau der Prüfstandsmesskampagne.

6.3.1 Streckendefinition

Die Referenzmessung für die Messkampagne findet im realen Straßenverkehr statt. Die Routenführung entspricht der in Abschnitt 5.2.1 vorgestellten RDE-konformen Strecke. Aufgrund der unterschiedlichen Fahrzeugklassen ergibt sich auf derselben Strecke ein unterschiedliches Geschwindigkeitskollektiv (siehe Abbildung 6.4). Das Höhenprofil ist hier ergänzend dargestellt, da es für die Kampagne eine entscheidende Rolle spielt.

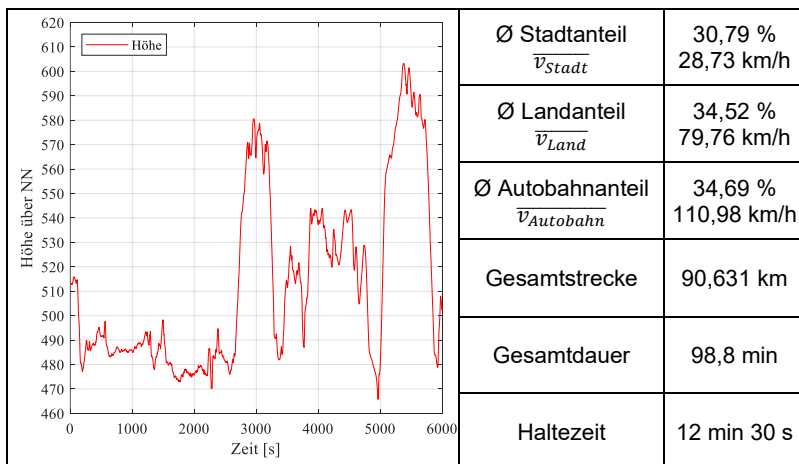


Abbildung 6.4: RDE-konforme Strecke um Ulm (Cortès et al., 2023, S. 67). Die Strecke führt durch das Umland der Stadt Ulm. Dabei erfüllt die Strecke Anforderungen an das Höhenprofil, die Länge der Strecke und der Zusammensetzung des Geschwindigkeitskollektives.

6.3.2 Parameterauswahl

Die Parameterauswahl aus Kapitel 5 beinhaltet sämtliche Parameter, die ebenfalls für diese Messkampagne relevant sind. In Bezug auf Abbildung 6.1 wird hiermit das SiD untersucht. Die Routenführung beinhaltet unterschiedliche Fahrbahnsteigungen und -neigungen. Ebenfalls werden die Fähigkeiten des menschlichen und des automatisierten Fahrers verglichen. Die Regelarten $v-\alpha$ und $v-FW$ sind von der Regelungskomplexität von einem Menschen nicht mehr zu bewältigen.

Der Versuchsplan umfasst hier drei Faktoren (Abbildung 6.5):

- Fahrer (zwei Stufen)
- Regelart (drei Stufen)
- Fahranforderung (zwei Stufen)

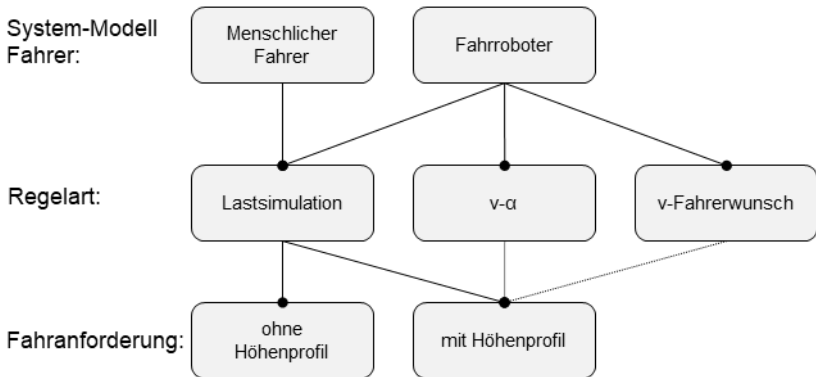


Abbildung 6.5: Versuchsplan mit den Faktoren Fahrer, Regelart und Fahrenanforderung (Cortès et al., 2023, S. 68). Der Faktor Fahrer ist zweistufig in menschlichen Fahrer und Roboter unterteilt. Die Regelarten umfassen Lastsimulation, v- α und v-FW. Die Fahrenanforderung kann sowohl das Höhenprofil berücksichtigen als auch dessen Einfluss ausblenden und ist nur für die Regelart Lastsimulation variabel.

Folgende sechs Kombinationen sind also möglich:

- Menschlicher Fahrer in Lastsimulation mit Höhenprofil
- Menschlicher Fahrer in Lastsimulation ohne Höhenprofil
- Fahrroboter in Lastsimulation mit Höhenprofil
- Fahrroboter in Lastsimulation ohne Höhenprofil
- Fahrroboter in v- α
- Fahrroboter in v-FW

Durch feste Randbedingungen sind die übrigen Steuer- und Störgrößen unter Kontrolle des Versuchsplaners.

6.3.3 Messtechnischer Versuchsaufbau

Das eingesetzte Fahrzeug entspricht der Van-Klasse und besitzt einen Sechszylinder-Dieselmotor. Die technischen Daten des Versuchsfahrzeuges sind in Tabelle 6.3 aufgeführt.

Tabelle 6.3: Technische Daten Versuchsfahrzeug Prüfstandsmesskampagne (Cortès et al., 2023)

Versuchsfahrzeug	
Motor	Diesel, 6 Zylinder, 2987 cm ³ , turboaufgeladen
Leistung	140 kW bei 3800 min ⁻¹
Drehmoment	440 Nm bei 1400 min ⁻¹
Antriebsart	Heck
Getriebe	7G-Tronic-Plus Automatikgetriebe
Fahrzeugmasse	2155 kg / mit Messausstattung: 2251 kg
Abgasnachbehandlung	Dieselfußpartikelfilter (DPF), SCR-Katalysator, Oxidationskatalysator, externe Abgasrückführung
EU Abgasstandard	EU6 (Homologation WLTP und RDE)

Das Versuchsfahrzeug ist mit zusätzlicher Messtechnik ausgestattet, um definierte physikalische Größen zu erfassen. Diese Konfiguration ist in Abbildung 6.6 skizziert.

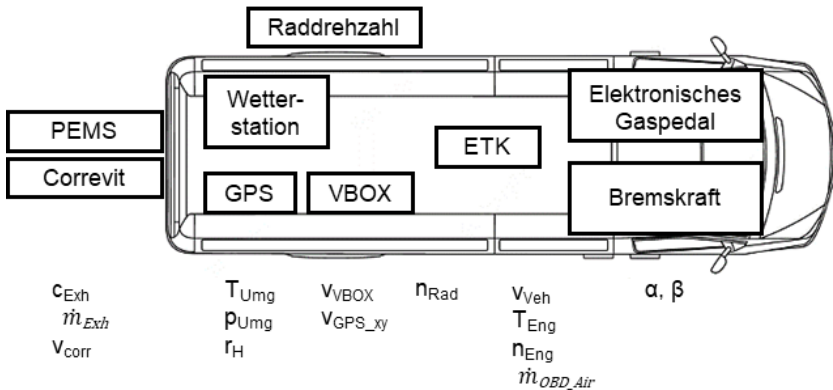


Abbildung 6.6: Messkonfiguration des Versuchsfahrzeugs der Prüfstandsmesskampagne (Cortès et al., 2023). Neben unterschiedlichen Systemen zur Messung der Fahrzeuggeschwindigkeit, ermittelt eine Wetterstation die Umweltbedingungen. Mit einer mobilen Abgasmesseinrichtung werden Abgasmassenstrom und die Konzentrationen der gasförmigen Abgasbestandteile sowie die Partikelanzahl gemessen. Über zusätzliche Messtechnik besteht Zugriff auf die Größen, welche den Fahrerwunsch abbilden.

Zusätzlich zu der in Tabelle 5.3 aufgeführten Messtechnik, werden über eine entsprechende CAN-Schnittstelle Größen aus der Rollenprüfstandsautomatisierung und des Fahrroboters zur Verfügung gestellt (Tabelle 6.4). Die Prüfstandssensorik besitzt eine Abtastrate von 1 kHz, während das Potentiometer des elektronischen Fahrpedals mit 500 Hz auf Seiten des Fahrroboters angegriffen wird.

Tabelle 6.4: Messtechnik der Prüfstandsmesskampagne

Messeinrichtung	Messgröße
PEMS	gasförmige Abgasbestandteile: CO, CO ₂ , NO, NO ₂ festförmige Abgasbestandteile: Partikelanzahl Abgasmassenstrom
Wetterstation	Außentemperatur Luftdruck Luftfeuchtigkeit
VBOX Racelogic	Fahrzeugposition (GPS) Fahrzeuggeschwindigkeit
Kistler Correvit	Fahrzeuggeschwindigkeit (optisch)
Kistler	Raddrehzahl
Deditec	Fahrpedalposition
Rollenprüfstand 4x2-Konfiguration	Zugkraft an Rollenoberfläche
Automatisierter Fahrroboter	Fahrpedalposition Bremskraft

6.4 Versuchsdurchführung

Die zur Messung, Aufzeichnung und Verarbeitung der Daten verwendeten Tools und Softwareprogramme sowie die Firmware der verwendeten Prüfstandskomponenten sind in Tabelle 6.5 dargestellt.

Tabelle 6.5: Verwendete Software der Prüfstandsmesskampagne

CANape Version 18.0 SP2
MATLAB R2021b
PEMS Version 1.45.1.5
V-Box Version V3.1 b31
Kistler Correvit-Sensor Version 1.0.5.21
Kistler Radimpulssensor über Signalconverter AD8/4 Version 1.1.0
Driver's Aid Version 3.6.0.11
DynoServer v.2.06.02.07 HF5
James Version 1.7.0.9

Die digitalen Signale der einzelnen Auswerteeinheiten werden via CAN an den Messrechner weitergeleitet.

Wie im vorherigen Kapitel, sind auch hier bestimmte Randbedingungen im Versuchsablauf einzuhalten. Weil hier das SiD in seiner Gesamtheit vorliegt, ist es sinnvoll, die Randbedingungen von Sul und SiD zu unterscheiden.

Tabelle 6.6: Randbedingungen der Prüfstandsmesskampagne nach Zugehörigkeit zu SiD und Sul

SiD	Sul
Raumtemperatur Rollenprüfstand 20 °C	Motor (Öl und Kühlwasser) und Getriebe (Öl) betriebswarm (90 °C)
Fahrroboter James vor jeder Fahrt adaptiert und neu angelernt	Getriebe in Schaltstellung D
PEMS vorkonditioniert und kalibriert	Klimaautomatik an (20 °C)
	Elektrische Verbraucher aus
	Start-Stopp-Automatik aus

Die in Abschnitt 6.3.2 aufgeführten Kombinationen der Faktoren sind in Tabelle 6.7 mit der Anzahl an Wiederholungen dargestellt.

Tabelle 6.7: Versuchsplan, Anzahl Wiederholung je Testkonfiguration

Versuch	Abkürzung	Wiederholungen
Menschlicher Fahrer in realem Straßenverkehr (Referenz)	Straße	1
Menschlicher Fahrer in Lastsimulation mit Höhenprofil	LS_F_mS	3
Menschlicher Fahrer in Lastsimulation ohne Höhenprofil	LS_F_oS	3
Fahrroboter in Lastsimulation mit Höhenprofil	LS_J_mS	5
Fahrroboter in Lastsimulation ohne Höhenprofil	LS_J_oS	3
Fahrroboter in v- α	v- α J	4
Fahrroboter in v-FW	v-FW J	4

F = menschlicher Fahrer, FW = Fahrerwunsch, J = Fahrroboter, mS = mit Steigung, oS = ohne Steigung

6.5 Versuchsauswertung

Dieser Abschnitt enthält die Auswertung der Ergebnisse der Prüfstandsmesskampagne. Vorab wird in Abschnitt 6.5.1 die Auswertemethode erläutert, bzw. das Daten-Postprocessing dargestellt. Abschnitt 6.5.2 enthält die

Analyse der Ergebnisse sowohl für die längsdynamischen Größen als auch für die gemessenen Emissionswerte. Letztere erlauben es, die Aussagekraft über die Längsdynamik hinaus zu erweitern.

6.5.1 Auswertemethode

Bei der Auswertung der Messdaten kommen unterschiedliche Bewertungsmethoden zum Einsatz, um gewisse Erkenntnisse nicht nur auf einen statistischen Zusammenhang zurückzuführen

- Qualitative und quantitative Analyse des zeitlichen Verlaufes der Abweichungen zwischen Referenz und Reproduktion
- Bestimmtheitsmaß R^2 (Determinationskoeffizient) mittels linearer Regression zwischen Referenz und Reproduktion
- Absolutes Integral von der Differenz von Referenz und Reproduktion

$$\int |Referenz - Reproduktion| \cdot dt \quad 6.2$$

Darstellung der Ergebnisse mittels Boxplots

- Histogramm der Differenz von Referenz und Reproduktion mit arithmetischem Mittelwert und Standardabweichung
- Kreuzkorrelation zwischen Referenz und Reproduktion
- Darstellung der Reproduktion über der Referenz in Form eines Regression-Plots mit Steigung und standardisiertem Achsenabschnitt

6.5.2 Analyse der Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Prüfstandsmesskampagne vorgestellt. Dabei ist der Abschnitt in die Analyse der Ergebnisse für die Längsdynamik (6.5.2.1) und für Emissionswerte (6.5.2.2) aufgeteilt.

6.5.2.1 Längsdynamik

Die Abbildung der längsdynamischen Lastzustände ist die Kernaufgabe eines Rollenprüfstandes. Je nach Regelart, bzw. Regelkonzept, unterscheidet sich die Schwierigkeit der Fahraufgabe.

Innerhalb des Versuchsplanes ist dieser Sachverhalt berücksichtigt. Die nachfolgende Analyse der Ergebnisse umfasst folgende Größen:

- Fahrzeuggeschwindigkeit
- Gaspedalstellung
- Motordrehmoment
- Bremskraft
- Aktueller Gang

Hierbei ist zu betonen, dass diese Größen unterschiedlich wechselwirken. So ist das Motordrehmoment und das mit der Bremskraft verbundene Bremsdrehmoment ein Ergebnis des Fahrerinputs mittels der Pedalerie. Die Fahrzeuggeschwindigkeit ist über der aktuellen Übersetzungsstufe mit der Drehzahl des Motors verbunden.

Die Analyse umfasst eine Betrachtung des zeitlichen Verlaufes der Signale für einen repräsentativen Bereich. Der berechnete kumulierte Fehler nach Formel 6.2 umfasst die gesamte Messdauer und alle Wiederholungen, weshalb hier auch eine statistische Darstellung mittels Boxplots erfolgt. Dabei werden der Median, der maximale und minimale Wert sowie das 25 und 75 %-Perzentil berechnet. Durch diese Betrachtung ist es möglich, aus jeder Testkonfiguration auch abzuleiten, welche für die entsprechende Regelaufgabe geeignet ist.

Die Fahraufgabe bei der Reproduktion von Fahrzyklen auf einem Rollenprüfstand erfordert das Einhalten einer vorgegebenen Sollgeschwindigkeit. In dem vorliegenden Fall stammt diese aus der Referenzfahrt im realen Straßenverkehr. In Abschnitt 6.3.2 wurden die unterschiedlichen Faktorstufen des Versuchsplans eingeführt. Um die Schwierigkeit dieser Aufgabe für den Fahrer herauszuarbeiten, werden sowohl die Ergebnisse des menschlichen Fahrers mit dem des Fahrroboters in derselben Regelart und anschließend mit den Regelarten v- α und v-FW verglichen.

Der Fokus der Betrachtung liegt auf der Schnittstelle zwischen dem System Fahrer und dem System Fahrzeug, hier der Pedalerie des Versuchsfahrzeuges, dem Sul.

In Abbildung 6.7 (oben) sind die zeitlichen Verläufe der Fahrzeuggeschwindigkeit beispielhaft für einen Messausschnitt von 120 Sekunden dargestellt. Gleichzeitig erfolgt die statistische Auswertung des kumulierten Fehlers für jede Testkonfiguration mit allen Wiederholungen. Im qualitativen Vergleich der Zeitschriebe lässt sich grundsätzlich feststellen, dass alle Testkonfigurationen in der Lage sind, der Sollgeschwindigkeit zu folgen. Der kumulierte Fehler gibt Aufschluss

darüber, in welcher Qualität dies passiert. So ist festzustellen, dass die Streuung des Fehlers für die Testkonfiguration Lastsimulation (LS) mit Steigung (mS) sowohl für den menschlichen als auch den automatisierten Fahrer größer ist als die Pendants, welche die Steigung nicht berücksichtigen (oS). Parallel hierzu ist zu konstatieren, dass bei exakt derselben Fahraufgabe die Streuung und der Median des kumulierten Fehlers für den Fahrroboter geringer ist als für den menschlichen Fahrer. Die Regelarten v- α und v-FW liegen von dem Median niedriger als die realistischen Testkonfigurationen mit Steigungsanteilen.

Abbildung 6.8 zeigt die zeitlichen Verläufe der Gaspedalstellungen und kumulierten Fehler in einem repräsentativen Ausschnitt. Hier lässt die qualitative Analyse der Zeitverläufe den Schluss zu, dass jeweils nur die Regelarten v- α und v-FW mit der Referenz vergleichbare Verläufe aufweisen. Die Analyse der kumulierten Fehler unterstützt diese Aussage. Die beiden besagten Regelarten weisen systembedingt einen vielfach geringeren Median und dazugehörige 25 und 75 % Perzentile auf.

Fahrzeugesgeschwindigkeit

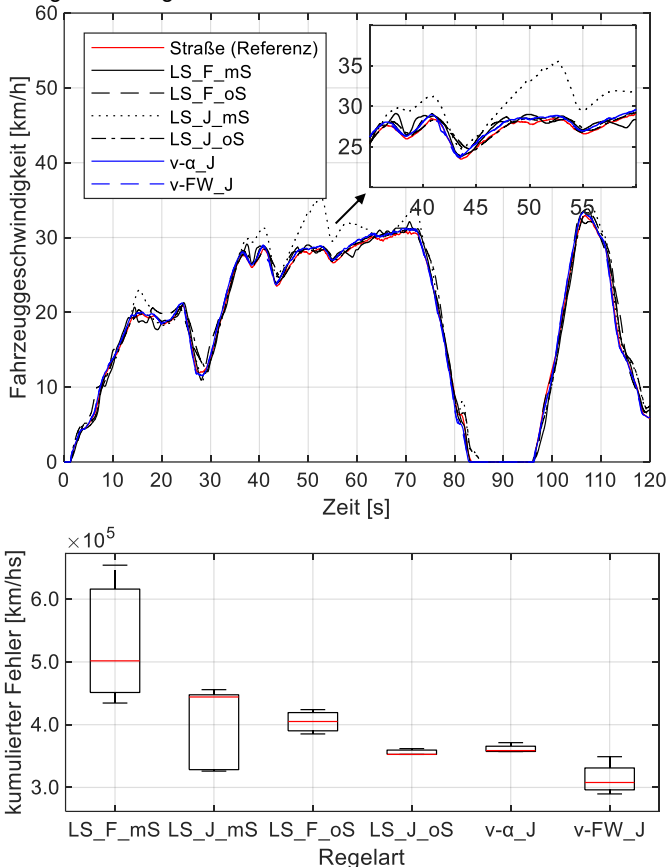


Abbildung 6.7: Zeitlicher Verlauf Fahrzeugesgeschwindigkeit und kumulierter Fehler (Cortès et al., 2023, S. 69). oben: Repräsentativer Ausschnitt für alle Testkonfigurationen. Die in blau dargestellten Verläufe der Regelarten v- α und v-FW liegen qualitativ sehr nahe an der roten Referenzmessung. Die schwarz dargestellten Regelarten weichen mehr ab; unten: kumulierter Fehler für alle Wiederholungen aller Testkonfigurationen. Die Regelart v-FW weist den niedrigsten kumulierten Fehler auf, während alle Lastsimulationen, welche die Fahrbahnsteigung berücksichtigen (mS) deutlich höhere Streuungen aufweisen als ohne deren Berücksichtigung (oS).

Gaspedalstellung

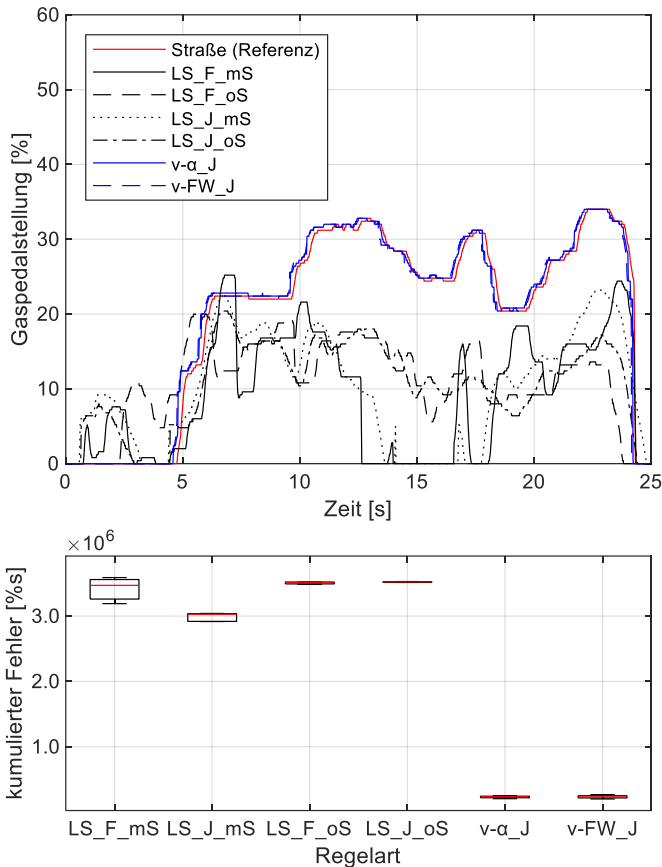


Abbildung 6.8: Zeitlicher Verlauf Gaspedalstellung und kumulierter Fehler (Cortès et al., 2023, S. 70). oben: Repräsentativer Ausschnitt für alle Testkonfigurationen. Die in blau dargestellten Verläufe der Regelarten v- α und v-FW liegen qualitativ sehr nahe an der roten Referenzmessung. Die schwarz dargestellten Regelarten sind qualitativ nicht mit der Referenz vergleichbar; unten: kumulierter Fehler für alle Wiederholungen aller Testkonfigurationen. Die Regelarten v- α und v-FW weisen die geringsten kumulierten Fehler auf.

Die Determinationskoeffizienten für die Signale Gaspedalstellung und Fahrzeuggeschwindigkeit sind in Tabelle 6.8 zusammengefasst. Hierbei sind jeweils die arithmetischen Mittelwerte und die Standardabweichungen gegenübergestellt. Diese Darstellung der Ergebnisse verdeutlicht, dass alle Testkonfigurationen die Fahrzeuggeschwindigkeit einregeln können. Jedoch weist die Regelart Lastsimulation einen deutlich abweichenden R^2 und eine höhere Standardabweichung in der Gaspedalstellung als v- α und v-FW auf.

Tabelle 6.8: Determinationskoeffizienten für Fahrzeuggeschwindigkeit und Gaspedalstellung für alle Testkonfigurationen ausgewertet nach Anhang B1 und B2

Testkonfiguration	R^2 (Fahrzeuggeschwindigkeit)		R^2 (Gaspedalstellung)	
	$\bar{x}$	s^2	$\bar{x}$	s^2
LS F mS	0,9990	0,0006	0,7117	0,0301
LS F oS	0,9996	0,00007	0,7130	0,0012
LS J mS	0,9994	0,00007	0,7702	0,005
LS J oS	0,9997	0,00002	0,7297	0,0010
v- α J	0,9999	0,00001	0,9946	0,0014
v-FW J	0,9999	0,00003	0,9939	0,0013

Nachfolgend werden in Abbildung 6.9 und Abbildung 6.10 die zeitlichen Verläufe der Größen Motordrehmoment und Bremskraft als auch eine Analyse der kumulierten Fehler sowie der Determinationskoeffizienten mit entsprechenden arithmetischen Mittelwerten und Standardabweichungen (Tabelle 6.9) aufgeführt.

Die zeitlichen Verläufe der unterschiedlichen Testkonfigurationen verhalten sich für das Motordrehmoment ähnlich zu den Verläufen der Gaspedalstellung. Dies ist durch die kalibrierte Fahrpedalkennlinie in der elektronischen Motorsteuerung erklärbar. Insofern stellen sich für die Regelarten, welche die Gaspedalstellung als Regelgröße beinhalten, systembedingt qualitativ und quantitativ auch die geringsten momentanen Abweichungen zur Referenz und entsprechend auch die geringsten kumulierten Fehler ein.

Für die Bremskraft ist ein repräsentativer Ausschnitt dargestellt, welcher für alle Testkonfigurationen und Wiederholungen einen realistischen Zustand beschreibt. Den größten kumulierten Fehler weist hierbei die Regelart v- α auf, weil in dieser systembedingt keine Betätigung des Bremspedals erfolgt. Im Gegensatz hierzu ist die Regelart v-FW, bei der ebenfalls eine Regelung der Bremskraft erfolgt, mit dem geringsten Fehler behaftet.

Motordrehmoment

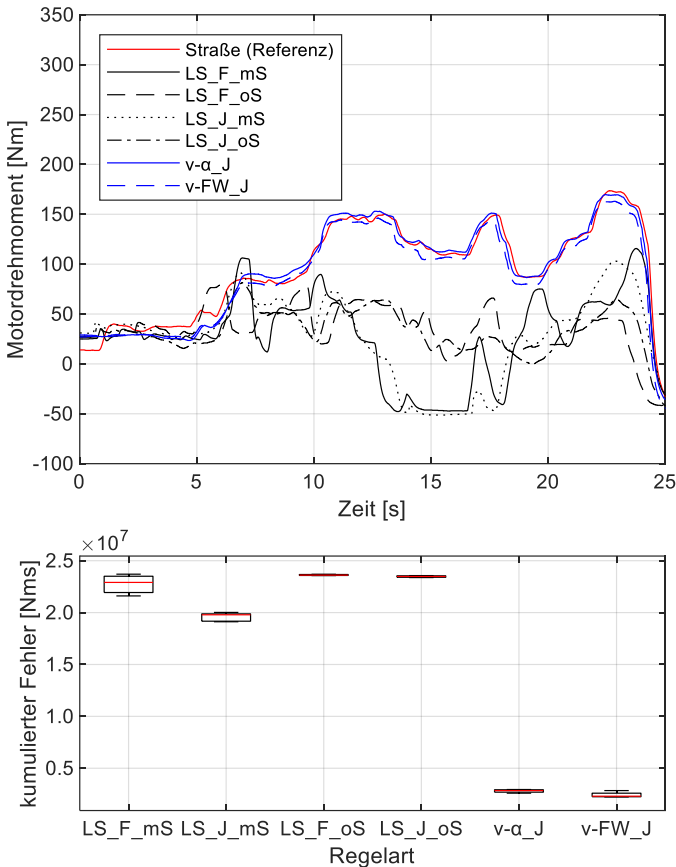


Abbildung 6.9: Zeitlicher Verlauf Motordrehmoment und kumulierter Fehler (Cortès et al., 2023, S. 71). oben: Repräsentativer Ausschnitt für alle Testkonfigurationen. Die in blau dargestellten Verläufe der Regelarten v- α und v-FW liegen qualitativ sehr nahe an der roten Referenzmessung. Die schwarz dargestellten Regelarten sind qualitativ nicht mit der Referenz vergleichbar; unten: kumulierter Fehler für alle Wiederholungen aller Testkonfigurationen. Die Regelarten v- α und v-FW weisen die geringsten kumulierten Fehler auf.

Bremskraft

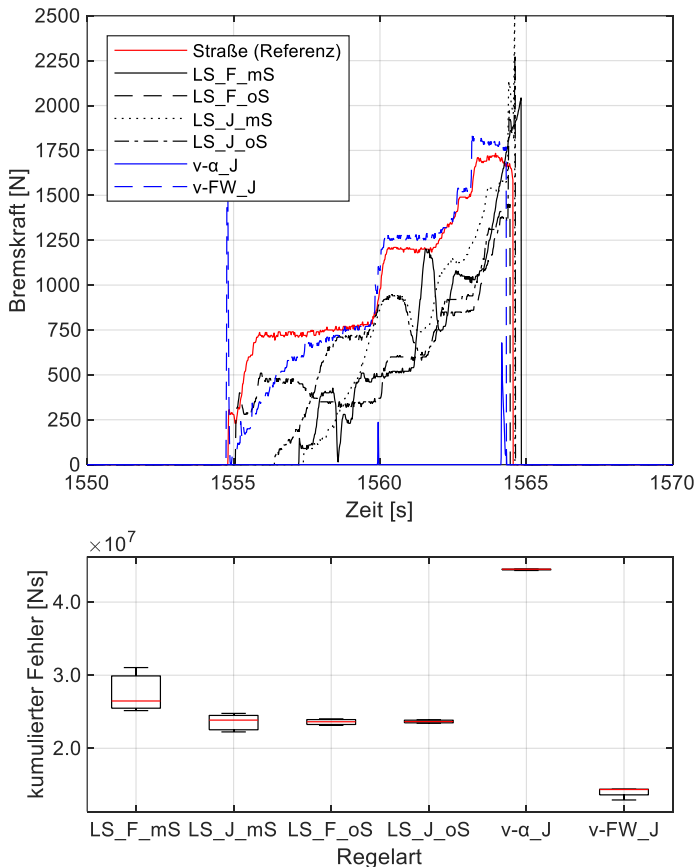


Abbildung 6.10: Zeitlicher Verlauf Bremskraft und kumulierter Fehler (Cortès et al., 2023, S. 71). oben: Repräsentativer Ausschnitt für alle Testkonfigurationen. Der Verlauf der in blau dargestellten Regelart v-FW liegen qualitativ sehr nahe an der roten Referenzmessung. Die fahrzeugseitige Bremskraft für die Regelart v- α ist gleich null, da die Fahrzeugverzögerung vom Prüfstand geregelt wird; unten: kumulierter Fehler für alle Wiederholungen aller Testkonfigurationen. Die Regelart v- α weist systembedingt den höchsten kumulierten Fehler auf, v-FW den geringsten.

Tabelle 6.9: Determinationskoeffizienten für Motordrehmoment und Bremskraft für alle Testkonfigurationen ausgewertet nach Anhang B3 und B4

Testkonfiguration	R^2 (Motordrehmoment)		R^2 (Bremskraft)	
	$\bar{x}$	s^2	$\bar{x}$	s^2
LS F mS	0,6768	0,0279	0,6057	0,0672
LS F oS	0,6435	0,0028	0,6964	0,0176
LS J mS	0,7349	0,0073	0,7065	0,0119
LS J oS	0,6637	0,0004	0,7092	0,0055
v- α J	0,9952	0,00076	0,1340	0,0111
v-FW J	0,9952	0,00082	0,8298	0,0110

Auch die Determinationskoeffizienten zeigen in Tabelle 6.9 auf, dass die Regelart v-FW in der Lage ist mit einem R^2 von 82,98 % einen Korrelationskoeffizienten $> 0,9$ nach Tabelle 2.3 zu reproduzieren und somit eine hohe Korrelation zwischen Realfahrt und Prüfstandsfahrt sicherzustellen.

Neben der Abbildung der korrekten Motordrehmomente und Bremskräfte, ist auch sicherzustellen, dass diese in der korrekten Gangstufe entstanden sind. Hierfür erfolgt eine Auswertung der absoluten Anzahl der Schaltungen in Bezug zur Referenzmessung. Abbildung 6.11 zeigt, dass die Abweichungen zusätzlich noch in ihrem zeitlichen Auftreten zu betrachten sind. Hier sind ebenfalls die Regelarten v- α und v-FW der Lastsimulation aufgrund geringerer Abweichungen überlegen.

Ist-Gang

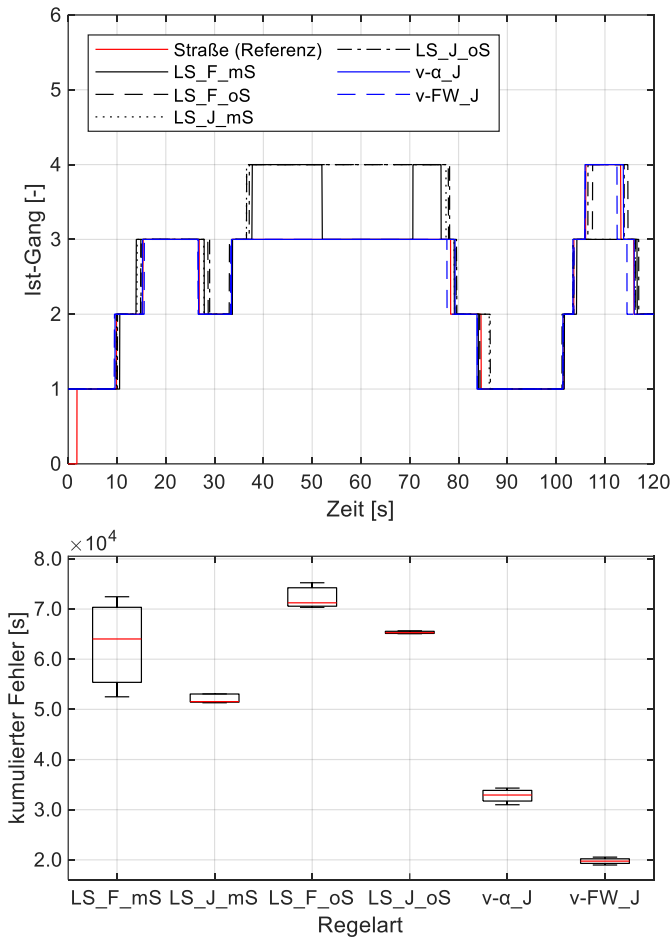


Abbildung 6.11: Zeitlicher Verlauf Ist-Gang

oben: Repräsentativer Ausschnitt für alle Testkonfigurationen. Der Verlauf der in blau dargestellten Regelarten v- α und v-FW liegen qualitativ sehr nahe an der roten Referenzmessung. Die schwarz dargestellten Testkonfigurationen in Lastsimulation weichen deutlich von der Referenz ab. unten: kumulierter Fehler für alle Wiederholungen aller Testkonfigurationen. Regelart v-FW weist den geringsten Wert auf.

In Tabelle 6.10 sind die absoluten Abweichungen und die Determinationskoeffizienten für jede Testkonfiguration und alle Wiederholungen dokumentiert. Bei einer Gesamtanzahl von 338 Schaltungen in der Referenzmessung sind sowohl Hoch- als auch Rückschaltungen enthalten. Findet eine fehlerhafte Schaltung in eine der Richtungen aufgrund eines zu steilen oder flachen Gaspedalverlaufes statt, so hat diese im Laufe der Messaufzeichnung eine doppelte Wertung, weil die Korrektur der fehlerhaften Gangstufe ebenfalls erfolgt.

Die Lastsimulationen können hierbei mit den kombinierten Informationen aus den aufgezeigten Darstellungen nicht mit den Regelarten v- α und v-FW konkurrieren. Während v- α in puncto Schaltanzahl v-FW marginal überlegen ist, zeigt letztere eine deutlich bessere zeitliche Übereinstimmung mit der Referenzmessung.

Tabelle 6.10: Auswertung aktueller Gangdurch Anzahl Schaltungen, Abweichung zu Referenz und Determinationskoeffizient

Test-konfiguration	Anzahl Schaltungen	Abweichung zu Referenz	R^2
Referenz	338	0	1,0000
LS_F_mS	368/378/397	-30/-40/-69	0,9813/0,9737/0,9752
LS_F_oS	337/349/336	1/-11/2	0,9774/0,9749/0,9768
LS_J_mS	350/348/340/340/ 338	-12/-10/-2/-2/0	0,9814/0,9824/0,9828/ 0,9822/0,9827
LS_J_oS	332/325/325	9/13/13	0,9791/0,9792/0,9793
v- α _J	336/336/338/338	2/2/0/0	0,9883/0,9880/0,9892/ 0,9887
v-FW_J	340/340/340/344	-2/-2/-2/-6	0,9929/0,9932/0,9927/ 0,9930

6.5.2.2 Emissionswerte

Durch die Messung von Emissionswerten bei einem verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeug, dem Sul, wird die Bewertung der umgesetzten Regelarten über längsdynamische Größen hinaus erweitert. Somit ist eine Interpretation der Validierungsumgebung auch unter diesen Gesichtspunkten zielführend.

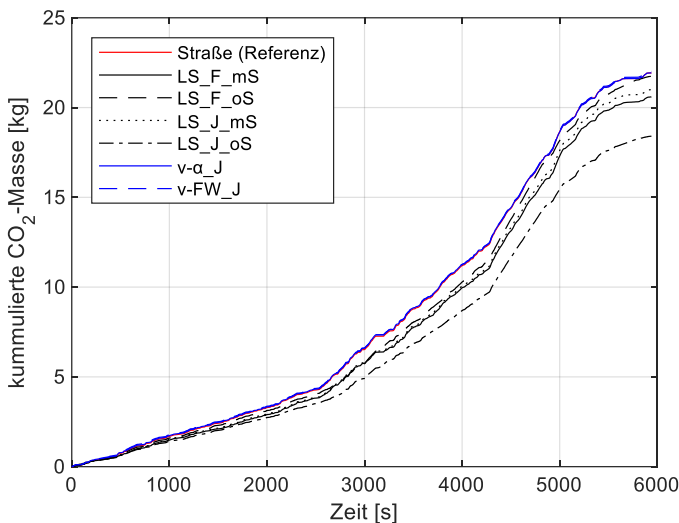
Im vorherigen Abschnitt 6.5.2.1 werden die längsdynamischen Größen bei unterschiedlichen Testkonfigurationen betrachtet. Innerhalb dieses Abschnittes erfolgt die Analyse folgender Größen:

- Kumulierte Masse gasförmige Abgasbestandteile CO, CO₂, NO, NO₂
- Abgasmassenstrom

Die Auswertung umfasst hierbei für alle gasförmigen Abgasbestandteile die kumulierte Masse über der Zeit als auch die Darstellung des Zeitverlaufes des momentanen Abgasmassenstroms, inklusive der Betrachtung des kumulierten Fehlers aller Testkonfigurationen über die gesamte Messdauer und für alle Wiederholungen.

In Abbildung 6.12 sind die zeitlichen Verläufe der kumulierten CO₂-Masse aller Testkonfigurationen in einfacher Ausfertigung dargestellt. Die Messtabelle enthält die jeweiligen Endwerte der einzelnen Wiederholungen pro Testkonfiguration. Die kumulierte CO₂-Masse ist ein Maß für die Übereinstimmung der Lastzustände des Motors mit der Referenz (Cortès et al., 2023).

Bei der Referenzfahrt werden in Summe 21,9258 kg CO₂ emittiert. Die absoluten Werte für die Lastsimulationen ohne Steigung sind hier nicht relevant, da sie durch den Entfall des Steigungswiderstandes nicht den korrekten Gesamtfahrwiderstand abbilden. Analog zu der Analyse der längsdynamischen Größen, bilden die Regelarten v- α und v-FW auch die CO₂-Masse am genauesten ab. Qualitativ sind die zeitlichen Verläufe von der Referenzfahrt nicht zu unterscheiden. Die quantitative Auswertung zeigt durchgehend eine Abweichung < 1 %, während die Testkonfigurationen der Lastsimulation mit Berücksichtigung der Steigung bis zu 14,82 % abweichen. Ebenfalls spricht die Streubreite der Ergebnisse für v- α und v-FW für einen hohen Grad an Reproduzierbarkeit.

Kumulierte CO₂-Masse

Test-konfiguration	kum. CO ₂ -Masse [kg]				
	1	2	3	4	5
Referenz	21,9258				
LS_F_mS	20,5970 -6,07 %	21,4927 -1,98 %	21,6092 -1,44 %		
LS_F_oS	21,7403 -0,85 %	20,3262 -7,30 %	20,2573 -7,61 %		
LS_J_mS	20,9976 -4,23 %	20,7563 -5,33 %	19,0769 -13,00 %	18,7595 -14,44 %	18,6765 -14,82 %
LS_J_oS	18,4057 -16,05 %	18,3129 -16,48 %	18,3037 -16,52 %		
v-α_J	21,9358 +0,05 %	21,7439 -0,83 %	21,7426 -0,84 %	21,8360 -0,41 %	
v-FW_J	21,2819 -0,29 %	21,3129 -0,28 %	21,2584 -0,30 %	22,0135 +0,40 %	

Abbildung 6.12: Zeitlicher Verlauf kumulierte CO₂-Emissionen für jede Testkonfiguration (Cortès et al., 2023, S. 73). Der zeitliche Verlauf der in blau dargestellten Regelarten v-α und v-FW liegt qualitativ auf der roten Referenzmessung. Die Messtabelle zeigt die Endwerte und ihre Abweichung zur Referenz. Die geringsten Abweichungen weisen die Regelarten v-α und v-FW auf.

Nachfolgend zeigt Abbildung 6.13 zwei repräsentative Ausschnitte aus den zeitlichen Verläufen in den Messdaten des Abgasmassenstroms für einen Stadt- und einen Überlandanteil. Der Zeitausschnitt beträgt jeweils 60 s. Abbildung 6.14 stellt die kumulierten Fehler für alle Testkonfigurationen und Wiederholungen dar. Auch hier wird deutlich, dass der rote Verlauf der Referenzmessung sowohl im Stadt- als auch im Überlandteil von den Regelarten $v-\alpha$ und $v-FW$ am besten reproduziert wird. Die Abweichungen im Zeitbereich 0 bis 10 Sekunden sind unter Berücksichtigung von Abbildung 6.7, Abbildung 6.8 und Abbildung 6.9 auf die Gaspedalstellung und dem damit verbundenen Motordrehmoment bei Fahrzeugstillstand zu erklären. Gleichzeitig zeigen die dynamischen Phasen eine hohe Übereinstimmung.

Der kumulierte Fehler des Abgasmassenstroms der Regelarten $v-\alpha$ und $v-FW$ ist um einen Faktor 3 bis 4 geringer als in Lastsimulation. Dieses Ergebnis stützt wiederum die qualitative Auswertung des Zeitverhaltens.

Abgasmassenstrom

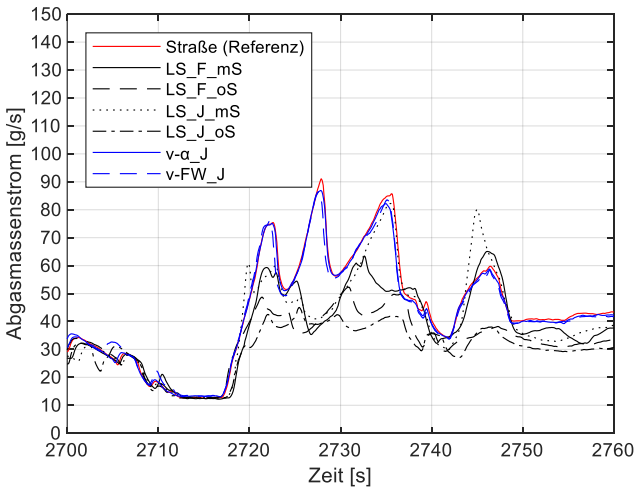
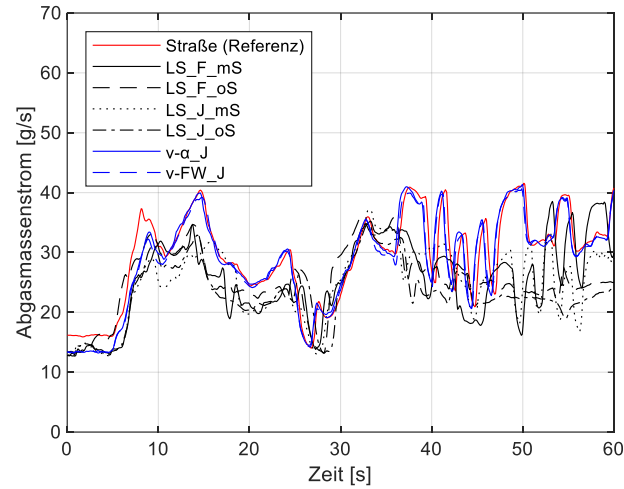


Abbildung 6.13: Zeitlicher Verlauf des Abgasmassenstroms für alle Testkonfigurationen (Cortès et al., 2023, S. 74). Die Regelarten v- α und v-FW bilden den Abgasmassenstrom sowohl im Stadt-, als auch im Überlandteil qualitativ am besten ab. (oben: Stadtanteil / unten: Überlandanteil)

Abgasmassenstrom

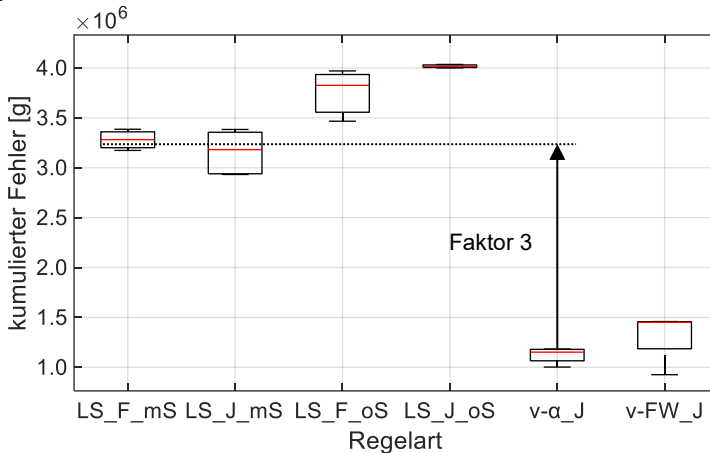


Abbildung 6.14: Kumulierter Fehler des Abgasmassenstroms für alle Testkonfigurationen (Cortès et al., 2023, S. 75). Die Regelarten v-α und v-FW weisen den geringsten kumulierten Fehler auf.

6.6 Interpretation der Ergebnisse

Die Analyse der Ergebnisse in Abschnitt 6.5.2 zeigt die untersuchten Regelansätze für den Betrieb eines Rollenprüfstandes bei der Reproduzierung von Reallasten. Die Versuchsplanung umfasst hierbei ebenfalls den Vergleich zwischen menschlichen und automatisierten Fahrern, um neben der Schwierigkeit und der Herausforderung der Fahraufgabe eine Testkonfiguration zu definieren, welche das Validierungsziel bestmöglich abbildet (vgl. Abbildung 6.5).

Tabelle 6.11 zeigt die Zusammenfassung der Determinationskoeffizienten für alle Testkonfigurationen. Die Zahlenwerte sind zur Visualisierung farbcodiert dargestellt.

Die Regelarten v-α und v-FW übertreffen die Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der längsdynamischen Größen der Regelart Lastsimulation. Besonders deutlich ist dies für die Gaspedalstellung und das Motordrehmoment. Dort liegen die Höchstwerte in der Lastsimulation durchgehend unterhalb von 80 %, während v-α und v-FW mit Werten für $R^2 > 99$ % nahezu ideal reproduzieren.

Zur Betrachtung der Pedalerie zählt die Bremskraft. Regelartbedingt sind die schlechtesten Werte in der Regelart v- α zu finden, weil dort eine Betätigung des Bremspedals nicht stattfindet. Nur die im Rahmen dieser Arbeit weiterentwickelte Regelart v-FW zeigt hier eine Übereinstimmung von größer 80 %.

Tabelle 6.11: Zusammenfassung Determinationskoeffizienten aller Testkonfigurationen in Heatmap (Cortès et al., 2023, S. 77).

Signal Test- konfiguration	Gaspedalstellung	Motordrehmoment	Bremskraft	Fahrzeuggeschwindigkeit	Motordrehzahl	aktuelle Gangstufe	Abgasmassenstrom	kumulierte CO ₂ -Masse	kumulierte CO-Masse	kumulierte NO ₂ -Masse	kumulierte NO-Masse
Referenz	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
LS_F_mS_1	0,7451	0,7067	0,6605	0,9995	0,9480	0,9813	0,8863	0,9992	0,8877	0,9967	0,9819
LS_F_mS_2	0,6866	0,6514	0,5307	0,9984	0,9264	0,9737	0,8604	0,9992	0,7416	0,9506	0,9881
LS_F_mS_3	0,7035	0,6723	0,6258	0,9992	0,9296	0,9752	0,8532	0,9992	0,7363	0,9873	0,9834
LS_F_oS_1	0,7122	0,6402	0,6942	0,9997	0,9425	0,9774	0,8619	0,9985	0,7951	0,9892	0,6287
LS_F_oS_2	0,7142	0,6448	0,6801	0,9996	0,9374	0,9749	0,8591	0,9985	0,2310	0,9606	0,9743
LS_F_oS_3	0,7124	0,6454	0,7150	0,9995	0,9412	0,9768	0,8571	0,9983	0,3180	0,9816	0,9713
LS_J_mS_1	0,7759	0,7438	0,7210	0,9995	0,9535	0,9814	0,8984	0,9989	0,7984	0,9934	0,9708
LS_J_mS_2	0,7751	0,7416	0,7171	0,9995	0,9577	0,9824	0,9048	0,9990	0,7044	0,9883	0,9713
LS_J_mS_3	0,7651	0,7280	0,7029	0,9994	0,9573	0,9828	0,9052	0,9990	0,9198	0,9421	0,9752
LS_J_mS_4	0,7685	0,7317	0,6964	0,9994	0,9563	0,9822	0,9036	0,9988	0,6699	0,9640	0,9795
LS_J_mS_5	0,7666	0,7292	0,6950	0,9994	0,9572	0,9827	0,9005	0,9990	0,7868	0,9849	0,9860
LS_J_oS_1	0,7288	0,6636	0,7134	0,9997	0,9475	0,9791	0,8672	0,9983	0,6303	0,9936	0,9355
LS_J_oS_2	0,7307	0,6641	0,7111	0,9997	0,9481	0,9792	0,8682	0,9983	0,6399	0,9891	0,9281
LS_J_oS_3	0,7295	0,6634	0,7029	0,9997	0,9485	0,9793	0,8702	0,9983	0,5708	0,9882	0,9152
v- α _J_1	0,9966	0,9963	0,1502	0,9999	0,9786	0,9883	0,9836	1,0000	0,9545	0,9873	0,8892
v- α _J_2	0,9941	0,9951	0,1318	0,9999	0,9775	0,9880	0,9827	1,0000	0,8394	0,8758	0,9960
v- α _J_3	0,9942	0,9949	0,1262	0,9999	0,9807	0,9892	0,9862	1,0000	0,8685	0,8817	0,9879
v- α _J_4	0,9935	0,9946	0,1276	0,9999	0,9788	0,9887	0,9831	1,0000	0,9577	0,9774	0,9455
v-FW_J_1	0,9922	0,9951	0,8212	0,9999	0,9857	0,9929	0,9874	1,0000	0,8626	0,9924	0,9344
v-FW_J_2	0,9940	0,9957	0,8240	0,9999	0,9865	0,9932	0,9895	1,0000	0,6193	0,9940	0,9571
v-FW_J_3	0,9954	0,9960	0,8282	0,9999	0,9858	0,9927	0,9877	1,0000	0,6226	0,9938	0,9508
v-FW_J_4	0,9941	0,9941	0,8458	0,9999	0,9868	0,9930	0,9900	1,0000	0,9290	0,9885	0,6662

Die Fahrzeuggeschwindigkeit wird in allen Konfigurationen erwartungsgemäß nahezu ideal reproduziert.

Durch den Einsatz des automatisierten Fahrroboters konnten zusätzlich noch die aktuellen Gangstufen und die damit verbundenen Motordrehzahlen in der Abbildungsgüte gesteigert werden.

Die Emissionsmesswerte unterstützen ebenfalls die Ergebnisse aus der Längsdynamikbetrachtung. Es werden die kumulierten Werte betrachtet, um unterschiedliche Beladungszustände der Abgasnachbehandlungssysteme zum Beginn der Messaufzeichnung zu entgegnen.

6.7 Zwischenfazit

In diesem Kapitel werden anhand einer Prüfstandsmesskampagne längsdynamische Lastzustände einer Referenzmessung aus dem realen Straßenverkehr mit unterschiedlichen Prüfstandsregelarten untersucht. Die Testkonfigurationen zeigen die verschiedenen Ausführungen der Validierungsumgebung auf. Anhand der Ergebnisanalyse findet eine Interpretation des Messergebnisses statt.

Dabei werden die Teilforschungsfragen TFF2.1 und TFF2.2 ergänzend beantwortet.

TFF2.1	Welche Erweiterungen müssen an der Validierungsumgebung vorgenommen werden, um die längsdynamischen Lastzustände abzubilden?
---------------	--

Das SiD dieses Kapitels entspricht der Validierungsumgebung auf Basis eines Rollenprüfstandes. Der angewandte Versuchsplan umfasst drei Faktoren, mit denen unterschiedliche Testkonfigurationen untersucht werden. Hierbei ist ein Vergleich eines menschlichen und automatisierten Fahrers enthalten, als auch ein unterschiedlich hoher Schwierigkeitsgrad der Fahraufgabe durch Berücksichtigung oder Verzicht des realen Steigungswiderstandes. Auf Letzteren kann aus physikalischer Sicht nicht verzichtet werden, um die Lastzustände tatsächlich abzubilden. Gleichzeitig wird deutlich, dass der menschliche Fahrer das Reproduzieren einer vorgegebenen Fahrzeuggeschwindigkeit sehr gut beherrscht, allerdings mit unterschiedlichen Eingangswerten der Fahrzeugpedalerie in den Regelkreis. Der menschliche Fahrer weist durchgehend im direkten Vergleich zum automatisierten Fahrroboter einen höheren kumulierten Fehler in den Größen Gaspedalstellung und Bremskraft auf. Diese Ergebnisse unterliegen hier auch deutlich höheren Streuungen. Die Regelarten v- α und v-FW reproduzieren die Gaspedalposition am besten, während nur die Regelart v-FW die Bremskraft mit einer Bestimmtheit > 80 % nachbildet. Die Größen Fahrzeuggeschwindigkeit,

Gaspedalstellung, Bremskraft, Motordrehmoment, Ist-Gang, Abgasmassenstrom und die kumulierten Massen der gasförmigen Komponenten CO₂, CO, NO₂, NO werden von v-FW am genauesten in Bezug zur Referenz dargestellt.

TFF2.2	Mit welcher Genauigkeit lassen sich die Lastzustände in der erweiterten Validierungsumgebung abbilden?
---------------	--

Die statistische Analyse der Messergebnisse erfolgt durch unterschiedliche Auswertungen. Zusammenhänge können hier durch den multiplen Einsatz von Methoden belastbar hergestellt werden. Die Genauigkeit einer Reproduktion kann mittels der Mittelwerte und Standardabweichungen der Differenzfunktion zwischen Referenz- und Prüfstandsmessung ebenso aufgezeigt werden wie mittels graphischer Darstellung in Histogrammform. Mittels linearer Regression und Feststellung der Kreuzkorrelation derselben Messungen kann eine Aussage zur Genauigkeit ergänzt werden. Die Genauigkeiten der einzelnen Größen sind dem Anhang B zu entnehmen.

FF2	Wie kann ein (ViL)-Rollenprüfstand genutzt werden, um im Kontext der Kalibrierung und der Verifikation von RDE-relevanten Funktionen valide Ergebnisse zu liefern und somit den realen Fahrversuch zu ergänzen?
------------	---

Die Forschungsfrage FF2 lässt sich anhand der Beantwortung der beiden Teilforschungsfragen TFF2.1 und TFF2.2 untermauern. Die in Kapitel 5 definierten Zielgrößen zeigen die besten Ergebnisse hinsichtlich Genauigkeit und Reproduzierbarkeit für die Regelart v-FW. Die Erweiterung eines Rollenprüfstandes umfasst die in Abschnitt 6.2.1 vorgestellten Hardware- und Softwareschnittstellen. Diese Testkonfiguration beinhaltet einen automatisierten Fahrroboter, welcher im Rahmen dieser Arbeit über eine E-Gasschnittstelle verfügt, um die Fahrpedalpositionsvorgabe exakt zu regeln. Die Erweiterung der Roboterautomatisierung um eine Bremsenregelung ermöglicht es, auch Fahrstrategien von Fahrzeugen abzubilden, welche anhand dieses Betätigungsverhaltens auch unterschiedliche Getriebeschaltstrategien aufweisen.

Mit der Regelart v-FW ist auf Seiten der Prüfstandsautomatisierung somit ein Regelansatz vorhanden, der den Fahrerwunsch über die Pedalerie genau genug abbilden kann, um auf einem Rollenprüfstand RDE-relevante längsdynamische Funktionen kalibrieren und validieren zu können.

7 Synthese von Reallastverläufen mittels Längsdynamiksimulation

Dieses Kapitel beinhaltet die Vorgehensweise, Reallastverläufe mittels einer Längsdynamiksimulation zu synthetisieren. Der Rollenprüfstand, das Rig, dient hier sowohl als Hilfsmittel zur Synthese der Lastverläufe als auch zur Validierung der erzeugten Längsdynamikmodelle (Abbildung 7.1). Mit den vorangegangenen Kapiteln wird somit der R2R-Ansatz aufgegriffen, welcher mit der nachfolgenden Vorgehensweise zum R2R2S vervollständigt wird.

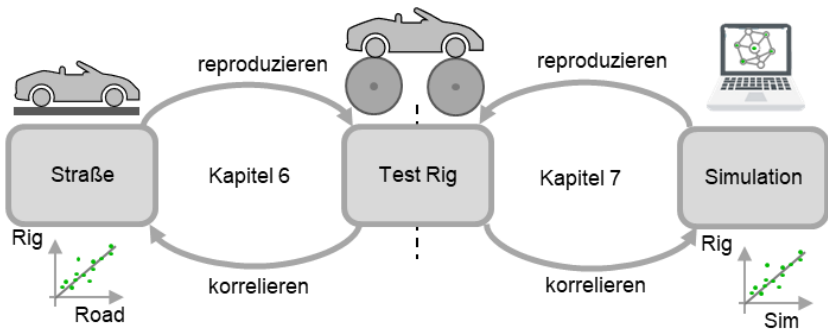


Abbildung 7.1: Synthese von Reallastverläufen mittels Längsdynamiksimulation. Kapitel 6 zeigt hier links den R2R-Ansatz. Die Inhalte von Kapitel 7 ergänzen die Vorgehensweise rechts um eine Simulation, woraus der R2R- zum R2R2S-Ansatz vervollständigt wird.

Die durch die Simulationskampagne erzeugten Reallastverläufe werden auf dem Rollenprüfstand validiert. Somit kann die Forschungsfrage FF3 beantwortet werden.

FF3	Was muss eine Simulationsumgebung beinhalten, um die Reallasten für RDE-relevante Funktionen mittels eines virtuellen Prototyps abzubilden und was sind die Grenzen dieser Vorgehensweise?
------------	--

Dieses Kapitel unterteilt sich in zwei Hauptinhalte: die Erstellung eines Längsdynamikmodells unter Verwendung der in Kapitel 6 betrachteten Regelarten und die Validierung der damit erzeugten Reallastverläufe auf dem Rollenprüfstand. Dieser Entwicklungsschritt ist Bestandteil des R2R2S (siehe Abbildung 3.1). Die Einordnung des Längsdynamikmodells des Sul in das IPEK-XiL-Framework erfolgt in Abschnitt 7.1. Die Bestandteile des Modells werden in Abschnitt 7.2 beschrieben, einschließlich des Aufbaus eines konventionell betriebenen Antriebsstrangs in Vorwärts- und Rückwärtssimulation. Anschließend erfasst Abschnitt 7.3 die Versuchsplanung, um sowohl das Modell als auch dessen erzeugte Reallastverläufe zu validieren. Wie in den vorherigen Kapiteln schließt dann die Versuchsdurchführung, Abschnitt 7.4, an. Die Ergebnisse werden anschließend in Abschnitt 7.5 analysiert und in Abschnitt 7.6 interpretiert.

Zentrale Inhalte dieses Abschnitts wurden bereits auf dem 26. ASIM Symposium Simulationstechnik in Wien (Cortès, Dettmann, Heinzelmann & Haidar, 2022; Cortès, Dettmann, Heib & Millberg, 2022), als auch auf dem 22. Internationalen VDI-Kongress Dritev in Baden-Baden (Cortès, Albers et al., 2022) veröffentlicht.

7.1 Validierungsumgebung

Das Validierungsziel dieses Kapitels liegt darin, unter Nutzung des IPEK-XiL-Loop-Frameworks ein virtuelles Abbild des Systems „Fahrzeug“ mit einem virtuellen Fahrer in einer virtuellen Umgebung so zu betreiben, dass die längsdynamischen Reallasten denjenigen auf der Straße und des Rollenprüfstandes entsprechen.

Deshalb sind hier zwei Ausprägungen der Frameworks vorhanden. Variante 1 entspricht exakt Abschnitt 6.1, in dem das SiD die Prüfstandsumgebung abbildet und das Sul physisch vorliegt.

Variante 2 stellt die Konfiguration in der vollständig virtuellen Umgebung dar. Diese ist in Abbildung 7.2 illustriert. Deshalb entsprechen in dieser Konfiguration alle Teile dem SiD. Das Sul ist in diesem Falle ebenfalls Teil des SiD.

In einer zweistufigen Validierung wird das virtuelle System „Fahrzeug“ mit einem virtuellen Fahrer und in der virtuellen Umgebung, als auch die im Gesamtsystem modellierten Reallasten reziprok auf dem Rollenprüfstand anhand eines physischen Systems „Fahrzeug“ validiert.

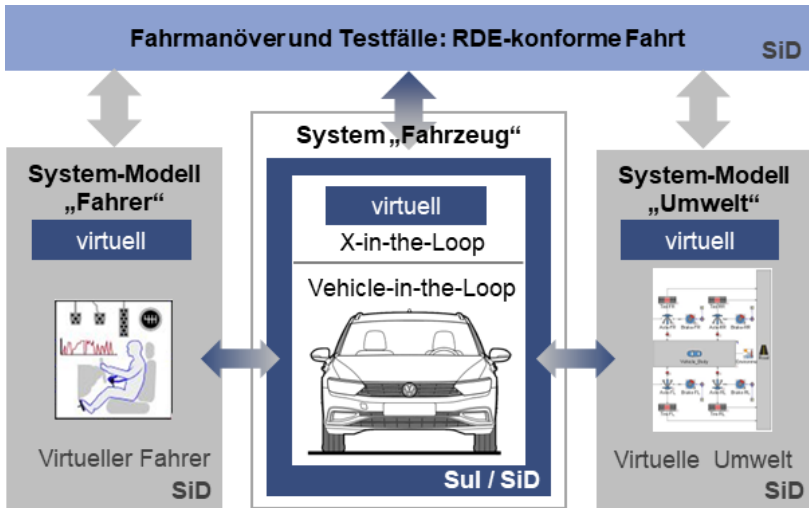


Abbildung 7.2: Konfiguration des IPEK-XiL-Frameworks für die Synthese von Reallastverläufen aus einer Längsdynamiksimulation. Die System-Modelle „Fahrer“, „Fahrzeug“ und „Umwelt“ liegen in dieser Ausprägung virtuell vor. Alle Systeme stellen das SiD dar. Das System „Fahrzeug“ ist zusätzlich noch Sul, weil mit demselben die Validierung des virtuellen Fahrzeugs erfolgt.

7.2 Aufbau Simulationsmodell

In diesem Abschnitt wird die Architektur des Längsdynamikmodells vorgestellt. In gemeinsamer Forschung werden die Modelle in der Software GT-Suite von Gamma Technologies aufgebaut.

Die vom Autor co-betreuten Abschlussarbeiten und die wissenschaftlichen Veröffentlichungen sind in Tabelle 7.1 aufgelistet.

Tabelle 7.1: Forschung an Längsdynamikmodellen am Institut für Fahrzeugsystemtechnik der THU

Längsdynamikmodell	Wissenschaftliche Arbeit	Relevanz
elektrisch	(Dietrich, 2021) ¹⁷	Bedingt
konventionell	(Haidar, 2021) ¹⁸	Ja
elektrisch	(Heib, 2021) ¹⁹	Bedingt
konventionell	(Heinzelmann, 2021) ²⁰	Ja
konventionell/elektrisch	(Klamser, 2021) ²¹ ,	Ja
	(Cortès, Schlick, Mayer, Aydin & Haidar, 2022)	Ja
	(Cortès, Dettmann, Heinzelmann & Haidar, 2022)	Ja
	(Cortès, Dettmann, Heib & Millberg, 2022)	Ja

Abbildung 7.3 zeigt die Architektur des Simulationsmodelles auf Basis des IPEK-XiL-Loop-Frameworks. Jedem System-Modell sind hier beispielhaft Systemanforderungen zugeordnet, welche manöverbasiert validiert werden können. Die Fahrmanöver und Testfälle werden hier von den simulationssoftwarespezifischen Programmen bereitgestellt.

¹⁷ Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

¹⁸ Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

¹⁹ Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

²⁰ Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

²¹ Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

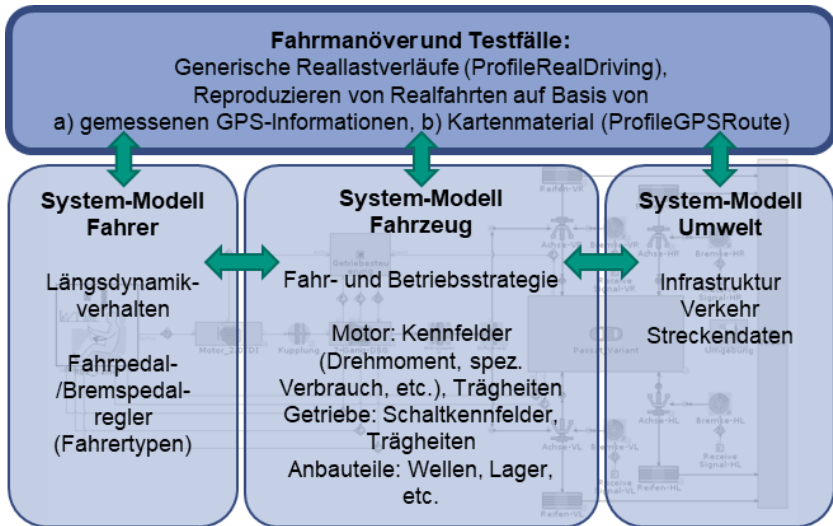


Abbildung 7.3: Aufbau der Längsdynamiksimulation nach dem IPEK-XiL-Framework. Allen System-Modellen sind Systemanforderungen zugeordnet, welche manöverbasiert validiert werden können.

Nach dem Vorbild des erweiterten ZHO-Modells entwickelten Albers et al. eine Darstellung, welche die Entwicklungsaktivitäten Design und Entwicklung direkt gegenüberstellt (Albers, Behrendt et al., 2016). Dieser Form nachempfunden ist Abbildung 7.4, welche den Prozess der Validierung für das vorliegende Längsdynamikmodell zusammenfasst. Auf Basis der Stakeholderanforderungen bildet das Zielsystem auch den Zielzustand des Simulationsmodells ab. Mittels iterativer Verbesserungen jeder n-ten Variante, wird das Modell sowohl verifiziert als auch validiert.

Je nach Systemanforderung unterscheiden sich die Validierungsziele, weshalb hier die Erstellung eines Manöverkataloges zur Überprüfung des Systemverhaltens zielführend ist (siehe Abschnitt 7.3.1).

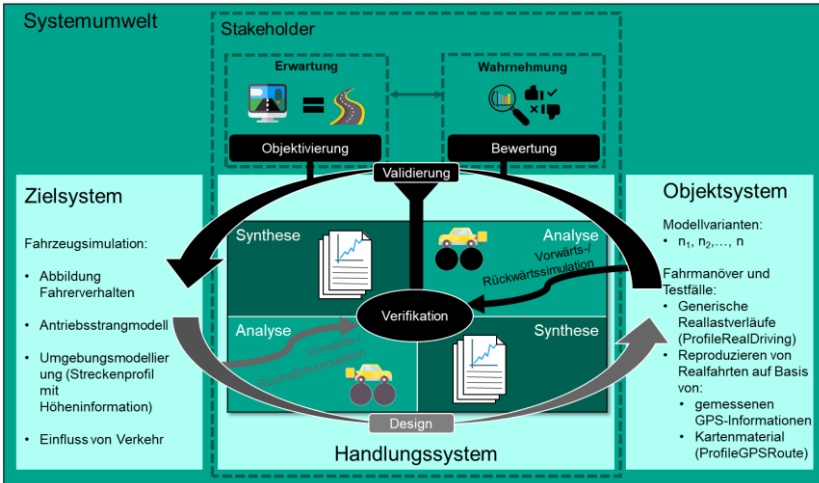


Abbildung 7.4: Validierung und Verifikation des Längsdynamikmodells auf Basis des ZHO-Modells. Das Zielsystem umfasst die Anforderungen an das Simulationsmodell, während das Objektsystem die im Handlungssystem synthetisierte n-te Modellvariante sammelt und zur Validierung bereitstellt. Entspricht das Objekt- dem Zielsystem, so ist die Entwicklung/Synthese abgeschlossen.

Wie in Abschnitt 2.3.3 beschrieben, wird zwischen der Vorwärts- und der Rückwärtssimulation unterschieden. Der Vorteil der Rückwärtssimulation besteht darin, dass über eine Fahrzyklusvorgabe, in der Regel durch eine Fahrzeugsollgeschwindigkeit, ein Leistungsbedarf anhand der modellierten Fahrwiderstände berechnet wird, welcher wiederum die Betriebspunkte der betreffenden Traktionsmaschine festlegt. Somit entsprechen die Soll- und die Ist-Werte der Zyklusvorgabe. Mit dieser Simulationmethode können die Parametrisierungen des Antriebsstrangs, wie beispielsweise der Übersetzungen, überprüft werden (Abbildung 7.5).

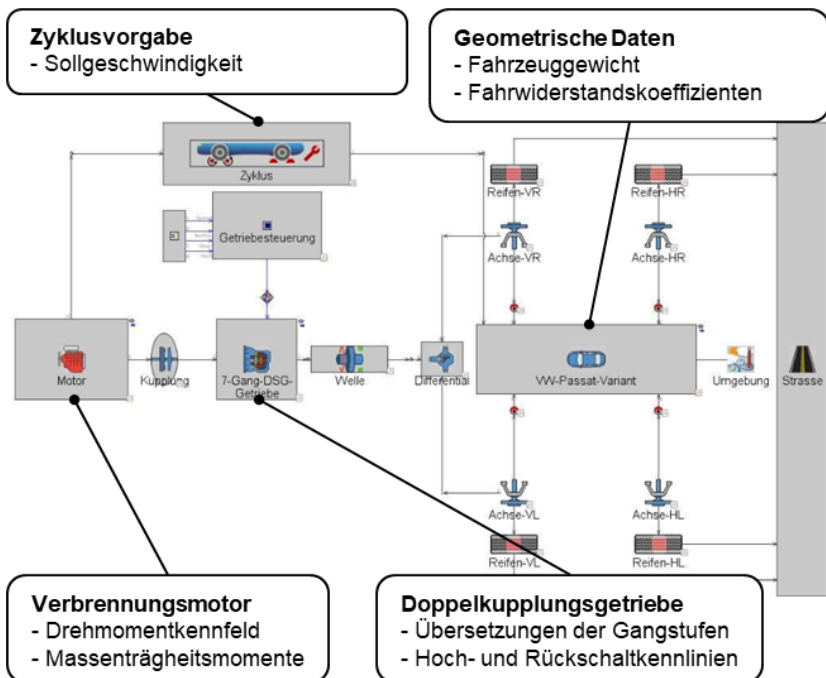


Abbildung 7.5: Topologie des Längsdynamikmodells in Rückwärtssimulation. Das System-Modell Fahrzeug umfasst die Komponenten Verbrennungsmotor, Anfahrkupplung, Doppelkupplungsgetriebe sowie die geometrischen Daten des Fahrzeugs. Das System-Modell Umwelt ist durch die Reifen mit dem Fahrzeug verbunden.

Die Vorwärtssimulation wird anschließend um das Modell eines Fahrers ergänzt. Das bedeutet, dass auf Basis einer Gas- oder Bremspedalvorgabe über die Betriebspunkte der Traktionsmaschine eine bestimmte Radleistung eingestellt wird. Mit der Berücksichtigung der Fahrwiderstände stellt sich eine Ist-Geschwindigkeit ein, welche nun aufgrund des Regelverhaltens eines Fahrers zeitversetzt zur Zyklusvorgabe ist (Abbildung 7.6).

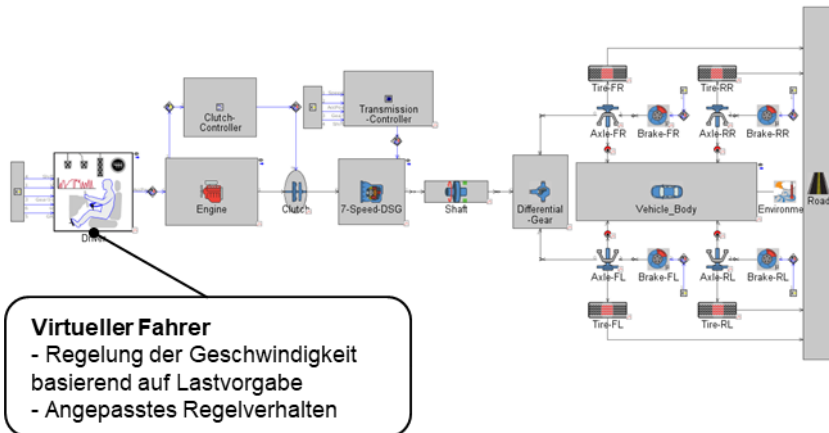


Abbildung 7.6: Topologie des Längsdynamikmodells in Vorwärtssimulation. Das Rückwärtsmodell aus Abbildung 7.5 wird um einen virtuellen Fahrer ergänzt, welcher die Zyklusvorgabe entsprechend der Reglerparametrisierung folgt.

Die verwendeten Parameter für die einzelnen Antriebsstrangkomponenten sind in Anhang C1 aufgeführt. Sie entstammen sowohl aus Ergebnissen gemeinsamer Forschung mit Heinzelmann²² (Heinzelmann, 2021) und Haidar²³ (Haidar, 2021) als auch der Konformitätsbescheinigung des Fahrzeugherstellers. Für die experimentelle Ermittlung einzelner Werte sei auf diese Arbeiten verwiesen.

²² Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

²³ Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

7.3 Versuchsplanung

Durch die Versuche innerhalb dieses Kapitels werden das Längsdynamikmodell und das virtuell erzeugte Reallastprofil validiert. Die nachfolgenden Abschnitte 7.3.1 und 7.3.2 beschreiben die Validierung des Simulationsmodells auf Basis eines Manöverkatalogs und die Synthese des Reallastprofils mittels GT-Suite.

7.3.1 Manöverbasierte Validierung des Simulationsmodells

In Abschnitt 2.2.3 wird die manöverbasierte Validierung unter Verwendung des IPEK-XiL-Frameworks erläutert. Im Zuge der Validierung des Simulationsmodells eignet sich diese Methode im Besonderen, um die technischen Funktionen (TF) der einzelnen Komponenten zu validieren. Hierbei wird auf Basis einer generischen Manöverbeschreibung (Tabelle 7.2) ein Manöverkatalog für jede TF definiert.

Tabelle 7.2: Generischer Manöverkatalog zur Validierung der Längsdynamiksimulation nach (Matros et al., 2015)

Technische Funktion	Technische Funktion TF n
Validierungsthema und -ziel	Zugehörige Funktionalität TF n.m
Manöverbeschreibung	Definition ausgewähltes Manöver
Fahreingaben	Input-Stimulus
Analysekriterien	Quantitative Bewertungskriterien
Bewertungskriterien	Definition Bewertungskriterien
Fahrzeugbedingungen	Dokumentation der Fahrzeugbedingungen
Umweltbedingungen	Dokumentation der Umweltbedingungen

Im Rahmen dieser Arbeit sind die TF aufgegliedert in:

- Getriebe
- Verbrennungsmotorischer Betrieb

Tabelle 7.3 zeigt die Unterteilung in die beiden Validierungsziele „Übersetzung des Getriebes“ und „Hoch- und Rückschaltkennlinie“. Diese beiden Validierungsziele werden anhand der Inputstimuli des Fahrers auf das zu validierende System

geprägt. Über das Einhalten der Analysekriterien werden sowohl objektive als auch subjektive Bewertungskriterien eingehalten.

Tabelle 7.3: Manöverkatalog zur Validierung der TF Getriebe

Technische Funktion	TF 1 Getriebe		
Validierungsthema und -ziel	TF 1.1 Übersetzung des Getriebes	TF 1.2 Hoch- und Rückschaltkennlinien	
Manöverbeschreibung	Beschreibung der Übersetzungen aufgrund der Drehzahlverhältnisse	Schaltpunkte für Hoch- und Rückschaltungen bei konstantem Fahrpedal	
Fahrereingaben	$n = \text{konst bei fester Gangstufe}$	$\alpha(t)$ und $v(t)$ aus NEFZ-Zyklus	$v(t)$ aus NEFZ-Zyklus
Analysekriterien	$\Delta n_{Mot} \pm 30 \frac{1}{min}$	Zeitl. Differenz zwischen Schaltvorgang Simulation und Rollenprüfstand $\Delta t_{schalt} \pm 3 \text{ s}$	Anzahl Fehlschaltungen $n_{fehl} < 5$
Bewertungskriterien	Umsetzung Fahrerwunsch	Abbildung Schaltstrategie	
Fahrzeugbedingungen	Motoröl, Kühlwasser, Getriebeöl auf Betriebstemperatur		
Umweltbedingungen	Umgebungstemperatur Rollenprüfstand $T_{amb} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$		

Am Beispiel der unterschiedlichen Übersetzungen des Getriebes sei hier der Ablauf eines Manövers detaillierter beschrieben. Für tiefergehende Erklärungen sei auf die Veröffentlichung von Cortès et al (Cortès, Dettmann, Heinzelmann & Haidar, 2022) und die Abschlussarbeiten von Haidar²⁴ (Haidar, 2021) und Heinzelmann²⁵ (Heinzelmann, 2021) verwiesen.

²⁴ Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

²⁵ Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

Für die Ermittlung der Getriebeübersetzung, welche hier die Achsdifferentiale enthalten, werden die Verhältnisse von Ein- und Ausgangsdrehzahl $n_{Eingang}$ und $n_{Ausgang}$ gemessen und aus deren Quotienten die Übersetzung berechnet. Im vorliegenden Fall entspricht $n_{Eingang} = n_{Mot}$ und entsprechend $n_{Ausgang} = n_{Rad}$. Die Übersetzung i_n des n-ten Ganges entspricht:

$$i_n = \frac{n_E}{n_A} = \frac{n_{Mot}}{n_{Rad}} \quad 7.1$$

Tabelle 7.4: Manöverkatalog zur Validierung der TF Verbrennungsmotorischer Fahrbetrieb TF 2.1 und TF 2.2

Technische Funktion	TF 2 Verbrennungsmotorischer Fahrbetrieb	
Validierungsthema und -ziel	TF 2.1 Fahwiderstandskoeffizienten	TF 2.2 Leerlaufregelung
Manöverbeschreibung	Bestimmung der Fahwiderstände bei einem Beschleunigungsvorgang und Konstantfahrt	Verzögerung bis zum Stillstand, Motor läuft
Fahreingaben	$v = 50 \frac{km}{h}$ und $v_{bes} = 0 - 50 \frac{km}{h}$	$v = 0 \frac{km}{h}$ und $\alpha = 0 \%$
Analysekriterien	$\Delta F_{Zug} \pm 50 N$	Leerlaufdrehzahl $n_{Mot} = 750 \pm 5 \frac{1}{min}$
Bewertungskriterien	Abbildung der Fahwiderstandsberechnung	Abbildung des Leerlaufreglers
Fahrzeugbedingungen	Motoröl, Kühlwasser, Getriebeöl auf Betriebstemperatur	
Umweltbedingungen	Umgebungstemperatur Rollenprüfstand $T_{amb} = 20 \text{ } ^\circ C$	

Die Validierung des Modells für die TF Verbrennungsmotorischer Fahrbetrieb ist in vier Funktionalitäten unterteilt (Tabelle 7.4 & Tabelle 7.5). Diese reichen von dem implizit korrekten Fahwiderstandskoeffizienten bei derselben Geschwindigkeit bis hin zur Abbildung des Drehmomentkennfeldes im transienten Betrieb innerhalb eines Fahrzyklus. Die zu validierenden Parameter sind in Anhang C1 aufgelistet.

Tabelle 7.5: Manöverkatalog zur Validierung der TF Verbrennungsmotorischer Fahrbetrieb TF 2.3 und TF 2.4

Technische Funktion	TF 2 Verbrennungsmotorischer Fahrbetrieb	
Validierungsthema und -ziel	TF 2.3 Schubbetrieb	TF 2.4 Drehmomentkennfeld
Manöverbeschreibung	Lastwegnahme bei geschlossenem Antriebsstrang	Anfahren verschiedener Lastanforderungen zur Bestimmung Motorbetriebspunkte
Fahrereingaben	$v = 50 \frac{km}{h}$ und $v_{bes} = 0 - 50 \frac{km}{h}$	$v(t)$ des inner- und außerstädtischen NEFZ-Zyklus
Analysekriterien	$\alpha = 0 \%$ $M < 0 Nm$	$\alpha \pm 5\%$
Bewertungskriterien	Umsetzung eines Schubbetriebes	Umsetzung einer Lastanforderung
Fahrzeugbedingungen	Motoröl, Kühlwasser, Getriebeöl auf Betriebstemperatur	
Umweltbedingungen	Umgebungstemperatur Rollenprüfstand $T_{amb} = 20 \text{ } ^\circ C$	

7.3.2 Generische Erzeugung von Reallastverläufen

Die Simulationssoftware GT-Suite umfasst das Modul GT-RealDrive, welches aus einem definierten Start- und Endpunkt auf Basis der GPS-Position und den aktuellen Metadaten von Kartenanbietern ein Fahrprofil erzeugt. Alternativ können auch aus einer vorliegenden Datenbank, Geschwindigkeitskollektive nach externen Vorgaben zusammengestellt werden.

Aus diesem Fahrprofil entstehen die Lastverläufe unter Verwendung des validierten Längsdynamikmodells. Die Erstellung des Fahrprofils orientiert sich bei dieser Untersuchung an den Kriterien von RDE-Paket 4 (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union, 2018).

Tabelle 7.6: Vorgaben GT-RealDrive Streckenzusammensetzung

Strecke	$s = 30 \text{ km}$
Maximalgeschwindigkeit	$v_{max} = 150 \frac{\text{km}}{\text{h}}$
Streckenanteil	Innerstädtisch: 34 % Überland: 33 % Autobahn: 33 %

Die Strecke wurde auf 30 km verkürzt, um die Gesamtdauer ebenfalls zu verkürzen.

Das Ergebnis dieses Geschwindigkeitsverlaufes ist in Abbildung 7.7 aufgetragen.

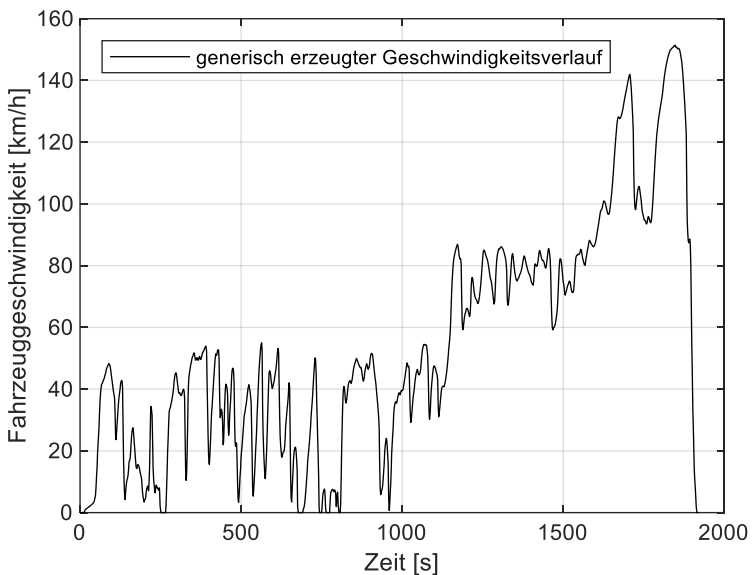


Abbildung 7.7: Geschwindigkeitsverlauf der generischen RDE-Strecke. Der Geschwindigkeitsverlauf wird auf Grundlage der Voreinstellungen aus generischen Geschwindigkeitsclustern von GT-RealDrive erstellt.

Der erzeugte Geschwindigkeitsverlauf ist die Sollvorgabe für den virtuellen Fahrer. Abhängig von dessen Parametrisierung, können unterschiedliche Fahrertypen charakterisiert werden. Die nachfolgenden Parameter wurden für die Fahrten auf einem Rollenprüfstand ermittelt.

Tabelle 7.7: Vorgaben GT-RealDrive PI-Regler virtueller Fahrer

Vorausschaufaktor	0,05
P-Anteil	0,8
I-Anteil	0,05
Max. Pedalwertänderung pro Inkrement	13

Der daraus abgeleitete zeitliche Verlauf der Gaspedalstellung ist in Abbildung 7.8 aufgetragen.

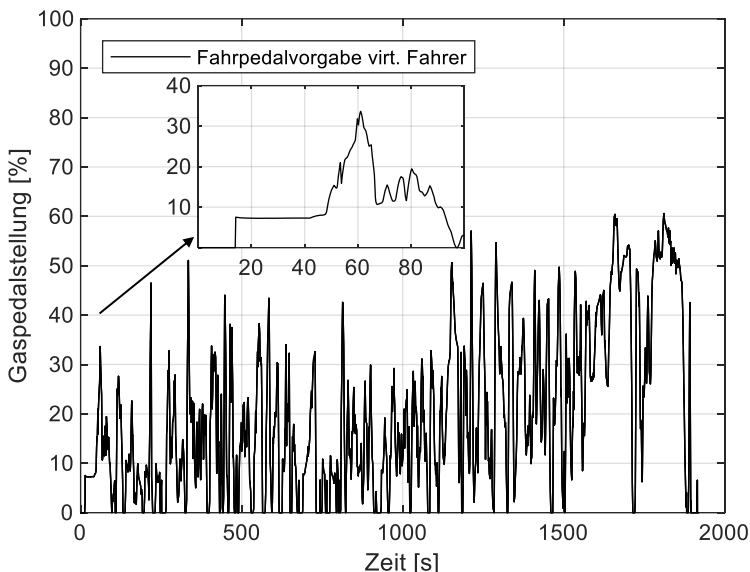


Abbildung 7.8: Fahrpedalvorgabe des virtuellen Fahrers für die generische RDE-Strecke. Die Fahrpedalvorgabe wird auf Basis der PI-Reglereinstellungen vom virtuellen Fahrer innerhalb der Längsdynamiksimulation berechnet.

7.3.3 Messtechnischer Versuchsaufbau

Der messtechnische Aufbau entspricht Abbildung 5.4 aus Abschnitt 5.2.3.

7.4 Versuchsdurchführung

Dieser Abschnitt zeigt die verwendeten Werkzeuge und Tools zur Aufzeichnung und Verarbeitung der Messdaten (Tabelle 7.8).

Tabelle 7.8: Verwendete Software der Simulationskampagne

CANape Version 18.0 SP2
MATLAB R2021b
PEMS Version 1.45.1.5
V-Box Version V3.1 b31
Kistler Correvit-Sensor Version 1.0.5.21
Kistler Radimpulssensor über Signalconverter AD8/4 Version 1.1.0
Driver's Aid Version 3.6.0.11
DynoServer v.2.06.02.07 HF5
James Version 1.7.0.9

Tabelle 7.9 fasst die einzuhaltenden Randbedingungen zusammen, welche für die Simulationskampagne beim Versuchsfahrzeug einzuhalten sind.

Tabelle 7.9: Randbedingungen der Simulationskampagne

Fahrzeuggewicht	1717 kg (unterschiedliche Fahrergewichte werden vernachlässigt)
Nebenverbraucher	Klimaautomatik an (20 °C)
Tankinhalt	voll
Start-Stopp-Automatik	aus
Partikelfilter Beladungszustand	regeneriert
Antriebsstrang	betriebswarm
PEMS	vorkonditioniert und kalibriert

Die Messfahrten werden jeweils drei Mal wiederholt.

7.5 Versuchsauswertung

Dieser Abschnitt zeigt die Auswertung der Ergebnisse der Simulationskampagne. Die dazu verwendeten Auswertemethoden sind in Abschnitt 7.5.1 aufgeführt. Anschließend werden die Ergebnisse der reproduzierten Reallasten auf dem Rollenprüfstand analysiert (Abschnitt 7.5.2)

7.5.1 Auswertemethode

Zur Auswertung der Messdaten der Simulationskampagne kommen unterschiedliche Bewertungsmethoden zum Einsatz. Sie orientieren sich an den Auswertemethoden der vorherigen Kapitel.

- Qualitative und quantitative Analyse des zeitlichen Verlaufes der Abweichungen zwischen Simulation und Reproduktion
- Bestimmtheitsmaß R^2 (Determinationskoeffizient) mittels linearer Regression zwischen Simulation und Reproduktion
- Histogramm der Differenz von Simulation und Reproduktion mit arithmetischem Mittelwert und Standardabweichung
- Kreuzkorrelation zwischen Simulation und Reproduktion
- Darstellung der Reproduktion über der Referenz in Form eines Regression-Plots mit Steigung und standardisiertem Achsenabschnitt

7.5.2 Analyse der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Simulationskampagne werden in diesem Abschnitt präsentiert. Aufgrund der vorgestellten Versuchsplanung werden folgende Größen für die Abbildung der Betriebspunkte des Antriebsstrangs analysiert:

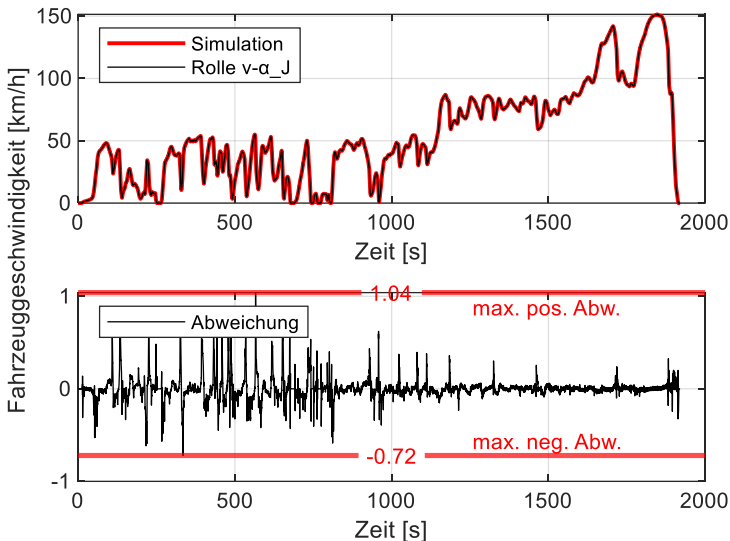
- Fahrzeuggeschwindigkeit
- Gaspedalstellung
- Motordrehzahl
- Aktueller Gang

Für die Nachbildung der Reallasten wird zusätzlich die Zugkraft am Rad bewertet.

Die Input-Daten für den Betrieb auf dem Rollenprüfstand stammen aus der Längsdynamiksimulation. Die Qualität der Nachbildung von Fahrten, welche aus einer realen Straßenfahrt stammen, wurde bereits in Kapitel 6 eruiert.

Die nachfolgenden Ergebnisse resultieren aus den Messdaten und den zeitlichen Sollvorgaben der Simulation für Fahrzeuggeschwindigkeit und Gaspedalstellung (Abbildung 7.9 und Abbildung 7.10). Die Analyse der Zugkraft am Rad stellt im besonderen Maße einen Wissensgewinn dar, weil sie im realen Fahrbetrieb am Kontakt Reifen-Straße nicht direkt ermittelbar ist.

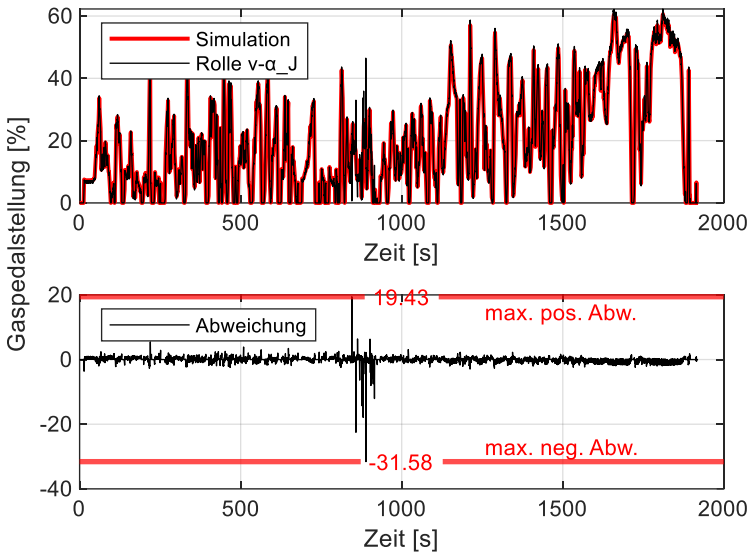
Fahrzeuggeschwindigkeit



Test-konfiguration	Regressionsgerade			Differenzfunktion	
	R^2	Steigung	stand. Achsenabschnitt	$\bar{x}$ [km/h]	s [km/h]
v-α J 1	0,99999	0,99998	-0,00003	0,0023	0,1138
v-α J 2	0,99999	0,99998	-0,00003	0,0023	0,1206
v-α J 3	0,99999	0,99998	-0,00003	0,0023	0,1216

Abbildung 7.9: Zeitlicher Verlauf Fahrzeuggeschwindigkeit und Differenzfunktion (Cortès, Albers et al., 2022, S. 360). oben: In rot und schwarz sind die Zeitverläufe aus der Simulation und der Fahrt auf dem Rollenprüfstand dargestellt. Sowohl qualitativ als auch quantitativ liegen die Ergebnisse eng beieinander. Die maximale positive Abweichung beträgt 1,04 km/h, die maximal negative -0,72 km/h; unten: Für alle Wiederholungen liegt das Bestimmtheitsmaß bei > 99,99 %. Die Regression ergibt eine nahezu ideale Nachbildung der Geschwindigkeit. Der Mittelwert der Differenzfunktion beträgt 0,0023 km/h, die Standardabweichung 0,1138 bis 0,1216 km/h.

Gaspedalstellung



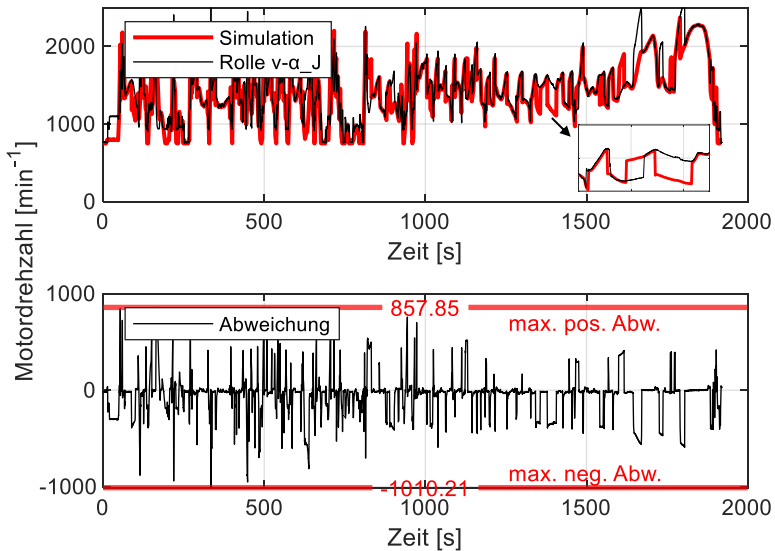
Test- konfiguration	Regressionsgerade			Differenzfunktion	
	R^2	Steigung	stand. Achsenabschnitt	$\bar{x}$ [%]	s [%]
v- α J 1	0,99854	1,0293	-0,0095	-0,2174	0,7918
v- α J 2	0,99854	1,0295	-0,0099	-0,2041	0,6851
v- α J 3	0,99913	1,0296	-0,0099	-0,205	0,6984

Abbildung 7.10: Zeitlicher Verlauf Gaspedalstellung und Differenzfunktion (Cortès, Albers et al., 2022, S. 359). oben: In rot und schwarz sind Zeitverläufe aus der Simulation und der Fahrt auf dem Rollenprüfstand dargestellt. Sowohl qualitativ als auch quantitativ liegen die Ergebnisse eng beieinander. Die maximale positive Abweichung beträgt 19,43 %, die maximal negative -31,58 %; unten: Für alle Wiederholungen liegt das Bestimmtheitsmaß bei > 99,98 %. Die Regression ergibt eine nahezu ideale Nachbildung der Geschwindigkeit. Der Mittelwert der Differenzfunktion beträgt -0,2 %, die Standardabweichungen 0,68 bis 0,79 %.

Weil der Prüfstand in der Regelart v- α betrieben wird, ist die Nachbildung dieser beiden Größen nahezu ideal. Die qualitative und quantitative Betrachtung zeigt nur wenige und geringfügige Differenzen, und sämtliche statistischen Größen stützen

diese Erkenntnis. Sowohl die Regression als Maß für die Nachbildung der simulativ ermittelten Führungsgrößen, als auch die Mittelwerte und Standardabweichungen der Differenzfunktion weisen geringe Abweichungen auf. Ergänzend sei auf Anhang C2 und C3 verwiesen. Abbildung 7.11 bildet die Ergebnisse der Motordrehzahl ab.

Motordrehzahl

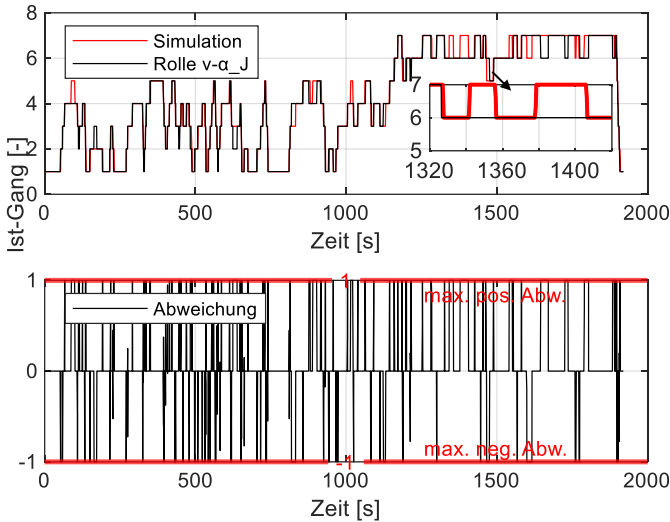


Test-konfiguration	Regressionsgerade			Differenzfunktion	
	R^2	Steigung	stand. Achsenabschnitt	$\bar{x}$ [min ⁻¹]	s [min ⁻¹]
v-α J 1	0,72200	0,8317	287,25	-52,93	198,32
v-α J 2	0,72314	0,8333	280,39	-48,37	197,98
v-α J 3	0,72394	0,8339	284,39	-53,17	197,68

Abbildung 7.11: Zeitlicher Verlauf Motordrehzahl und Differenzfunktion. oben: In rot und schwarz sind Zeitverläufe aus der Simulation und der Fahrt auf dem Rollenprüfstand dargestellt. Die Motordrehzahl auf dem Rollenprüfstand weicht von der Simulation hauptsächlich dann ab, wenn auch der Ist-Gang nicht mit der Simulation korreliert. Außerdem ist in Phasen sehr niedriger Geschwindigkeit eine Abweichung erkennbar (vgl. Abbildung 7.9). unten: Das Bestimmtheitsmaß R^2 liegt bei > 72 %. Die Differenzfunktion zeigt eine mittlere Abweichung von -48,37 bis -53,17 min⁻¹ mit einer Standardabweichung < 200 min⁻¹.

Die Abweichungen von der Drehzahl aus der Längssimulation erscheinen dann, wenn die jeweiligen Gangstufen nicht übereinstimmen. Außerdem sind Abweichungen im ersten Gang auffällig, was auf einen nicht ideal abgestimmten Anfahrregler deutet.

Ist-Gang



Test-konfiguration	Regressionsgerade			Differenzfunktion	
	R^2	Steigung	stand. Achsenabschnitt	$\bar{x}$ [-]	s [-]
v-α J 1	0,96105	0,9551	0,1215	0,0723	0,4176
v-α J 2	0,96110	0,9622	0,1060	0,0574	0,4172
v-α J 3	0,96126	0,9552	0,1223	0,0711	0,4165

Abbildung 7.12: Zeitlicher Verlauf Ist-Gang und Differenzfunktion (Cortès, Albers et al., 2022, S. 360). oben: In rot und schwarz sind Zeitverläufe aus der Simulation und der Fahrt auf dem Rollenprüfstand dargestellt. Bis auf einzelne Abweichungen bildet die Simulation die Schaltstrategie des Realfahrzeuges ab. Die Abweichungen in der Differenzfunktion sind auf nicht exakt zeitsynchrone Schaltzeitpunkte zurückzuführen. unten: Die Differenzfunktion weist eine mittlere Abweichung über alle Wiederholungen von $< 0,07$ Gängen auf. Ergänzend zur Standardabweichung, entspricht dieser Wert einer hohen Übereinstimmung zwischen Simulation und Prüfstandsfahrt. Die Werte der Regressionsrechnung bestätigten diesen Zusammenhang.

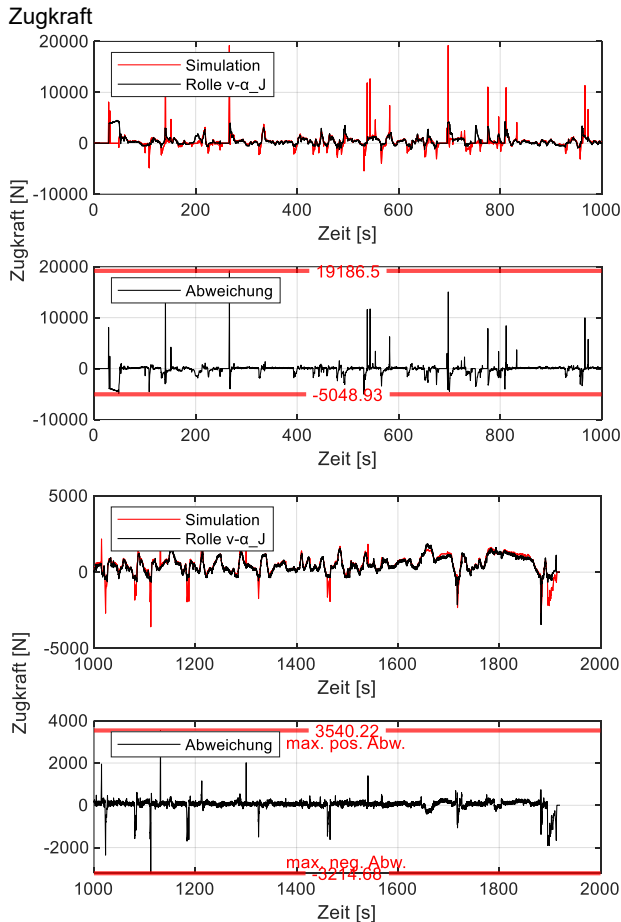


Abbildung 7.13: Zeitlicher Verlauf Zugkraft und Differenzfunktion (Cortès, Albers et al., 2022, S. 360). oben: Die Ausschnitte sind zur verbesserten Sichtbarkeit zu je 1000 Sekunden reduziert. Qualitativ bestätigen die Messungen auf dem Rollenprüfstand die Simulationsvorgabe. Abweichungen bei niedriger Geschwindigkeit (0-1000 s) sind höher als bei hoher Geschwindigkeit (1000-2000 s). siehe Tabelle 7.10: die statistischen Werte der Differenzfunktion unterstützen diesen Zusammenhang, während die Regression die Abweichungen deutlich stärker gewichtet, und demzufolge eine ungenaue Nachbildung der Last suggeriert.

Tabelle 7.10: Wertetabelle zu Abbildung 7.13

Test- konfiguration	Regressionsgerade			Differenzfunktion	
	R^2	Steigung	stand. Achsenabschnitt	$\bar{x}$	s
v- α J 1	0,2849	0,4572	-4,6909	-65,89	789,53
v- α J 2	0,2831	0,4600	-4,6165	-64,22	782,60
v- α J 3	0,2876	0,4553	-4,7550	-67,53	783,17

Abbildung 7.13 und Tabelle 7.10 verweisen auf die Ergebnisse der Zugkraft, welche aus Gründen der besseren Darstellung in zwei Zeitabschnitte aufgeteilt sind. Cortès et al. weisen darauf hin, dass in der Regelart v- α die negativen Zugkraftbereiche nur bis zu dem Wertebereich valide sind, welche nicht durch eine Fahrzeugverzögerung mittels Fahrzeugbremse hervorgerufen werden. Verzögerungen, welche zusätzlich zum Schleppmoment des Antriebsstrangs ein Bremsmoment benötigen, werden in dieser Regelart durch die Rollenregelung des Prüfstandes erzeugt und sind somit über die Kraftmessdose nicht messbar (Cortès, Albers et al., 2022). Während dieser Sachverhalt in die Werte der Regression stärker einfließt, zeigen sowohl der Mittelwert als auch die Standardabweichung der Differenzfunktion ein sehr hochwertiges Reproduzieren der Zugkraft. Auch die Kreuzkorrelation (siehe Anhang C4) verdeutlicht, dass die aktuelle Testkonfiguration nur 0,4 % vom maximal erreichbaren Ergebnis abweicht.

7.6 Interpretation der Ergebnisse

Im vorhergehenden Abschnitt 7.5.2 sind die Ergebnisse für die Nachbildung von generisch erzeugten Reallasten mittels einer Längsdynamiksimulation mit der in Kapitel 6 vorgestellten Regelart v- α dargestellt. Aufgrund der Messkonfiguration dieses Versuches ist ein Betrieb in der Regelart v-FW nicht möglich, weil ein Zugriff auf Steuergerätegrößen nicht gewährleistet ist. Diese wären notwendig, um auf eine Größe zugreifen zu können, welche die Bremskraft, bzw. das Bremsmoment abbildet.

Das Längsdynamikmodell, welches hier die Referenzdaten liefert, gegen welches die Testkonfiguration auf dem Rollenprüfstand antritt, bildet das reale Fahrzeugverhalten in großen Bereichen der Fahrt ausreichend genau ab. Der Ansatz, das Modell sehr einfach und auch die Parametrierung nur über empirisch ermittelbare Größen vorzunehmen, weist hier seine Grenzen auf. Im Speziellen sind hier die Anfahrvorgänge zu nennen, welche ein profunderes Wissen über die Regelung des Anfahelementes voraussetzen würden. Dieses liegt den

Zielanwenden in der Automobilentwicklung jedoch vor, weshalb im Rahmen dieser Arbeit keine weiteren Iterationsschleifen vonnöten sind. Ebenfalls ist die retrospektive Ermittlung einer Schaltstrategie nur in begrenztem Maße möglich. Wie Köber beispielsweise aufzeigt, umfassen heutige Applikationen hier sowohl Ausprägungen der Schaltkennlinien für sportliche und komfortable Fahrweisen als auch Anpassungen aufgrund der Topologie der aktuellen Straßenbedingungen (Köber, 2023).

Die betrachteten Größen Fahrzeuggeschwindigkeit, Gaspedalstellung, Motordrehzahl, aktueller Gang von Simulation und Rollenprüfstandsmessung zeigen zusätzlich in den Werten der Kreuzkorrelationsuntersuchungen nur noch ein geringes Potential zur Verbesserung auf.

Unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus Tabelle 6.11 von Kapitel 6 ist durch eine mögliche Erweiterung, um eine Bremsregelung zur vollständigen Abbildung des Fahrerwunsches noch weiteres Verbesserungspotential zu erwarten.

7.7 Zwischenfazit

Dieses Kapitel erweitert den R2R-Ansatz um eine Längsdynamiksimulation zu einem R2R2S. Das Fahrzeugmodell wird manöverbasiert validiert, um die technischen Funktionen des Sul mit einem gewissen Genauigkeitsgrad abzubilden. Die synthetisierten Reallastverläufe werden auf dem Rollenprüfstand reproduziert und dessen Ergebnisse analysiert und interpretiert.

Die Forschungsfrage FF3 wird damit beantwortet.

FF3	Was muss eine Simulationsumgebung beinhalten, um die Reallasten für RDE-relevante Funktionen mittels eines virtuellen Prototyps abzubilden und was sind die Grenzen dieser Vorgehensweise?
------------	--

Die Forschungsfrage FF3 umfasst hier die Sichtweise, ein Längsdynamikmodell bzw. den virtuellen Prototyp so abzubilden, dass die Reallasten einer Straßenfahrt bzw. einer Prüfstandsfahrt abgebildet werden. Durch die bereits erfolgte Betrachtung von Regelarten und Testkonfigurationen für einen Rollenprüfstand, welche die Straßenlasten schlussendlich am besten abbilden können, besteht durch ein valides Längsdynamikmodell die Möglichkeit, eine Vielzahl von Fahrten virtuell zu erzeugen. Dadurch können ressourcenaufwändige Straßenfahrten reduziert werden.

In der Zielsetzung dieser Arbeit wird auf die Notwendigkeit dieser Methode im Kontext der Fahrzeugentwicklung verwiesen. Innerhalb dieser liegen deutlich profunderes Wissen, als auch Zugänge zu fahrzeuginternen Mess- und Regelgrößen vor, um die Simulation noch näher an die Realität zu bringen. Trotz und gerade, weil diese Möglichkeiten in der Simulationskampagne nicht durchgehend verfügbar waren, sind die Ergebnisse unter Berücksichtigung dieser Grenzen einzuordnen. Der Rollenprüfstand als physische Simulationsumgebung ist in der hier verwendeten Testkonfiguration mit automatisiertem Fahrroboter bereits eine hervorragende Validierungsumgebung, um RDE-relevante Funktionen abzubilden.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die hier vorliegende Arbeit leistet einen Beitrag zur Kalibrierung und Validierung von Fahrzeugantriebssystemen. Hierfür wurden unter Verwendung des IPEK-XiL-Ansatzes drei unterschiedliche Kampagnen durchgeführt. In einer Messkampagne, welche unter RDE-konformen Bedingungen erfolgte, entstand die messtechnische Datenbasis, um längsdynamische Reallasten zu untersuchen. Durch Unabhängigkeitstests konnten die signifikanten Parameter identifiziert werden, anhand derer eine Regelung eines Rollenprüfstandes erfolgen kann. Im weiteren Verlauf findet eine Prüfstandskampagne statt, welche unterschiedliche Testkonfigurationen untereinander vergleicht. Die zu Beginn der Arbeit erwähnte Zufälligkeit des Verkehrsgeschehens und auch die Änderung der Straßenverhältnisse erschwert das Reproduzieren der Antriebsstranglasten in einem solchen Maße, dass menschliche Fahrer dazu nur eingeschränkt in der Lage sind. Der Einsatz eines automatisierten Fahrroboters und die Verwendung der neu entwickelten Regelart v-FW, welche den Fahrerwunsch vollständig abbilden kann, ermöglichen eine deutliche Steigerung der Reproduzierbarkeit von realen Straßenlasten. Um nicht nur auf zeit- und kostenintensive Straßenmessungen angewiesen zu sein, wurde eine vereinfachte Längsdynamiksimulation genutzt, um synthetische Reallastverläufe zu generieren. Die manöverbasierte Validierung der technischen Funktionen des Fahrzeugmodells findet auf dem Rollenprüfstand statt. Die Simulationskampagne umfasst den Nachweis, dass generisch erzeugte Messdaten hinsichtlich der Abbildung von Reallasten geeignet sind.

Der Forschungsansatz von Marxen (Marxen & Albers, 2012; Marxen, 2014) umfasst eine experimentelle, eine Umsetzungs- und eine Transferstudie des ausgestalteten Lösungsansatzes. Schlussendlich soll in einer Nutzeranalyse auch festgestellt werden, ob ein tatsächlicher Mehrwert für den Kunden im Sinne der Validierung besteht. Die hier angewandten und entwickelten Methoden konnten sowohl auf forschungsnahe Themen als auch für industriennahe Entwicklung übertragen werden. Die Validierungsumgebung Rollenprüfstand inklusive eines Fahrroboters in Regelart v-FW, welche sowohl durch Straßen- als auch Simulationsdaten valide Ergebnisse liefert, ist beispielsweise die Grundlage der Untersuchung von unterschiedlichen Fahrzeugkonzepten, der Dimensionierung von einzelnen Antriebsstrangkomponenten und der Auswirkung auf die elektrische Reichweite von handwerklich bewegten leichten Nutzfahrzeugen (Cortès, Schlick et al., 2022).

Die Regelart v-FW ist ebenfalls für die zuvor definierte Zielgruppe der Fahrzeugentwickler von Relevanz. Durch eine Vielzahl an Versuchen mit unterschiedlichen Anforderungen und deren erfolgreicher Durchführung ist ebenfalls die Sinnhaftigkeit des beschriebenen Lösungsansatzes ersichtlich. Beispielsweise konnten real gefahrene Worst-Case-Szenarien in einer Stadtfahrt in Paris dank der Regelart v-FW in der Art reproduziert werden, dass die Kalibriertätigkeit der Ingenieure deutlich unterstützt wird. Ebenfalls sind Beanstandungen von Diagnosefunktionen mittels dieser Regelart untersucht, reproduziert und korrigiert worden.

Der Transfer von einem konventionell angetriebenen Fahrzeug auf ein elektrisches Konzept ist mit mehreren Studien erfolgt, womit das Ergebnis dieser Arbeit bestätigt werden kann (Dietrich, 2021; Heib, 2021; Kottmann, 2021; Lorenz, 2021).

Ausblickend wäre der nächste konsequente Schritt der KaSPro, den IPEK-X-in-the-Loop weiter zu verfolgen und die Ergebnisse auf sogenannten R2R-Prüfständen zu übertragen, um auch querdynamische Effekte erfassen zu können. Auf Seiten der Simulation ist die Weiterentwicklung des digitalen Modells des Fahrzeugs zum digitalen Zwilling eine anzustrebende Verbesserung. Dadurch könnten die Durchlauf- und Entwicklungszeiten deutlich verkürzt werden.

Literaturverzeichnis

- Albers, A. (2010). Five Hypotheses about Engineering Processes and their Consequences. In I. Horváth, F. Mandorli & Z. Rusak (Hrsg.), *Tools and Methods of Competitive Engineering. April, 12-16 2010, Ancona, Italy* (S. 343–356). Delft: Faculty of Industrial Design of Engineering, University of Technology.
- Albers, A., Behrendt, M., Klingler, S. & Matros, K. (2016). Verifikation und Validierung im Produktentstehungsprozess. In U. Lindemann (Hrsg.), *Handbuch Produktentwicklung* (Hanser eLibrary, S. 541–569). München: Hanser. <https://doi.org/10.3139/9783446445819.019>
- Albers, A. & Braun, A. (2011). A generalised framework to compass and to support complex product engineering processes. *International Journal of Product Development*, 15(1/2/3), 6. <https://doi.org/10.1504/IJPD.2011.043659>
- Albers, A., Braun, A., Heimicke, J. & Richter, T. (2020). Der Prozess der Produktentstehung. In F. Henning & E. Moeller (Hrsg.), *Handbuch Leichtbau. Methoden, Werkstoffe, Fertigung* (2., überarbeitete und erweiterte Auflage, S. 5–35). München: Hanser.
- Albers, A., Burkhardt, N., Meboldt, M. & Saak, M. (2005). SPALTEN Problem Solving Methodology in the Product Development. In A. Samuel & W. Lewis (eds.), *Engineering design and the global economy. 15th International Conference on Engineering Design : ICED '05 Melbourne, 15-18 August 2005, the Grand Hyatt, Melbourne, Australia : globally effective engineering design*. Barton ACT: Engineers Australia.
- Albers, A. & Düser, T. (2010). Implementation of a Vehicle-in-the-Loop Development and Validation Platform. In *Proceedings of the 33rd FISITA World Automotive Congress* (S. 1–10).
- Albers, A., Lohmeyer, Q. & Ebel, B. (2011). Dimensions of objectives in interdisciplinary product development projects. In S. Culley, B. Hicks, T. McAlloone, T. Howard, Reich & Yoram (Eds.), *Proceedings of the 18th*

International Conference on Engineering Design (ICED11) (DS / Design Society, vol. 68, S. 256–265). Glasgow: The Design Society.

Albers, A., Matros, K., Behrendt, M. & Jetzinger, H. (2015). Das Pull-Prinzip der Validierung – Ein Referenzmodell zur effizienten Integration von Validierungsaktivitäten in den Produktentstehungsprozess. *VDI Konstruktion*, 67(06), 74–81.

Albers, A., Muschik, S. & Braun, A. (2010). Ein Beitrag zum Verständnis des Aktivitätsbegriffs im System der Produktentstehung. In M. Maurer & S.-O. Schulze (Hrsg.), *Tag des Systems-Engineering. München, Freising, 10. - 12. November 2010*. München: Hanser.

Albers, A., Reiß, N., Bursac, N. & Breitschuh, J. (2016). 15 Years of SPALTEN Problem Solving Methodology in Product Development. In C. Boks (ed.), *Proceedings of NordDesign 2016. August 10-12, 2016, Trondheim, Norway* (S. 411–420). Bristol, United Kingdom: The Design Society.

Albers, A., Reiss, N., Bursac, N. & Richter, T. (2016). iPeM – Integrated Product Engineering Model in Context of Product Generation Engineering. *Procedia CIRP*, 50, 100–105. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.168>

Albers, A., Stier, C., Babik, A. & Geier, M. (2013). Validierung von Fahrzeug-Antriebssystemen mit hochdynamischen Prüfständen. In A. Laschet & U. Brill (eds.), *Systemanalyse in der Kfz-Antriebstechnik VII. Dynamisches Gesamtsystemverhalten von Fahrzeugantrieben; [9 Fachtagung Dynamisches Gesamtsystemverhalten von Fahrzeugantrieben am 19. März 2013 im Hotel Vierjahreszeiten in Starnberg]* (Haus der Technik Fachbuch, Bd. 129, S. 132). Renningen: Expert-Verl.

Blessing, L. T. & Chakrabarti, A. (2009). *DRM, a design research methodology*. Dordrecht, London: Springer.

Bortz, J. & Döring, N. (2006). *Forschungsmethoden und Evaluation. für Human- und Sozialwissenschaftler* (5. Aufl.). Berlin: Springer-Verlag. Verfügbar unter: http://deposit.d-nb.de/cgi-bin/dokserv?id=2841557&prov=M&dok_var=1&dok_ext=htm

Brunner, F. J. & Wagner, K. W. (2016). *Qualitätsmanagement*. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG. <https://doi.org/10.3139/9783446448407>

Cantamessa, M. (2003). An empirical perspective upon design research. *Journal of Engineering Design*, 14(1), 1–15.

Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2. ed.). Hillsdale, NJ: Erlbaum. Retrieved from <http://www.loc.gov/catdir/enhancements/fy0731/88012110-d.html>

DIN EN ISO 9000 (11.2015). *Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

Ebel, B. (2015). Modellierung von Zielsystemen in der interdisziplinären Produktentstehung. In A. Albers (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung. Systeme, Methoden, Prozesse* (Bd. 85). ISSN: 1615-8113. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000048334>

Ehrlenspiel, K. & Meerkamm, H. (2013). *Integrierte Produktentwicklung. Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit* (5., überarb. und erw. Aufl.). München: Hanser.

Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union. (2007). RICHTLINIE 2007/46/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTES UND DES RATES vom 05. September 2007 zur Schaffung eines Rahmens für die Genehmigung von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern sowie von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für diese Fahrzeuge. *Amtsblatt der Europäischen Union*, (L263), 1–160. Verfügbar unter: <http://data.europa.eu/eli/dir/2007/46/oj>

Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union. (2007). VERORDNUNG (EG) Nr. 715/2007 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTES UND DES RATES vom 20. Juni 2007 über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen (Euro 5 und Euro 6). *Amtsblatt der Europäischen Union*, (L171), 1–16. Verfügbar unter: <http://data.europa.eu/eli/reg/2007/715/oj>

Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union. (2017a). VERORDNUNG (EU) 2017/1151 DER KOMMISSION vom 1. Juni 2017 zur Ergänzung der Verordnung (EG) Nr. 715/2007 des Europäischen Parlaments und des Rates über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen (Euro 5 und Euro 6) und über den Zugang zu Fahrzeugreparatur- und -

wartungsinformationen, zur Änderung der Richtlinie 2007/46/EG des Europäischen Parlaments und des Rates, der Verordnung (EG) Nr. 692/2008 der Kommission sowie der Verordnung (EU) Nr. 1230/2012 der Kommission und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 692/2008 der Kommission. WLTP Einführung / RDE I und II. *American Educational Research Journal*, (L175), 1–643. Verfügbar unter: <http://data.europa.eu/eli/reg/2017/1151/oj>

Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union. (2017b).

VERORDNUNG (EU) 2017/1154 DER KOMMISSION vom 7. Juni 2017 zur Änderung der Verordnung (EU) 2017/1151 der Kommission zur Ergänzung der Verordnung (EG) Nr. 715/2007 des Europäischen Parlaments und des Rates über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen (Euro 5 und Euro 6) und über den Zugang zu Reparatur- und Wartungsinformationen für Fahrzeuge, zur Änderung der Richtlinie 2007/46/EG des Europäischen Parlaments und des Rates, der Verordnung (EG) Nr. 692/2008 der Kommission und der Verordnung (EU) Nr. 1230/2012 der Kommission sowie zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 692/2008 und der Richtlinie 2007/46/EG des Europäischen Parlaments und des Rates in Bezug auf Emissionen leichter Personenkraftwagen und Nutzfahrzeuge im praktischen Fahrbetrieb (Euro 6). Ergänzung RDE III. *Amtsblatt der Europäischen Union*, (L175), 708–732. Verfügbar unter: <http://data.europa.eu/eli/reg/2017/1154/oj>

Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union. (2017).

VERORDNUNG (EU) 2017/1347 DER KOMMISSION vom 13. Juli 2017 zur Berichtigung der Richtlinie 2007/46/EG des Europäischen Parlaments und des Rates, der Verordnung (EU) Nr. 582/2011 der Kommission und der Verordnung (EU) 2017/1151 der Kommission zur Ergänzung der Verordnung (EG) Nr. 715/2007 des Europäischen Parlaments und des Rates über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen (Euro 5 und Euro 6) und über den Zugang zu Reparatur- und Wartungsinformationen für Fahrzeuge, zur Änderung der Richtlinie 2007/46/EG des Europäischen Parlaments und des Rates, der Verordnung (EG) Nr. 692/2008 der Kommission sowie der Verordnung (EU) Nr. 1230/2012 der Kommission und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 692/2008. Ergänzung RDE III. *Amtsblatt der Europäischen Union*, (L192), 1–136. Verfügbar unter: <http://data.europa.eu/eli/reg/2017/1347/oj>

Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union. (2018).

VERORDNUNG (EU) 2018/858 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND

DES RATES vom 30. Mai 2018 über die Genehmigung und die Marktüberwachung von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern sowie von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für diese Fahrzeuge, zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 715/2007 und (EG) Nr. 595/2009 und zur Aufhebung der Richtlinie 2007/46/EG. *Amtsblatt der Europäischen Union*, 1–218. Verfügbar unter: <http://data.europa.eu/eli/reg/2018/858/oj>

Fahrmeir, L., Heumann, C., Künstler, R., Pigeot, I. & Tutz, G. (2016). *Statistik. Der Weg zur Datenanalyse* (Springer-Lehrbuch, 8., überarbeitete und ergänzte Auflage). Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum.

Fotler, D., Germann, R., Gröbe-Boxdorfer, B., Engeln, W. & Matthiesen, S. (2021). *Leitfaden zur Anwendung empirischer Forschungsmethoden in der nutzerzentrierten Produktentwicklung: Forschung mit und an Menschen in den Ingenieurwissenschaften. Forschung mit und an Menschen in den Ingenieurwissenschaften* (Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Hrsg.). Karlsruhe: Institut für Produktentwicklung (IPEK). <https://doi.org/10.5445/IR/1000132655>

Fritzsche, R. (2006). Erstellung von Parameter-Diagrammen in der Automobilindustrie. *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, 108(6), 492–497. <https://doi.org/10.1007/BF03221798>

Huber, T. (2010). Modellgestützte Hybrid Systementwicklung - Modellierung und Optimierung. In R. Isermann (Hrsg.), *Elektronisches Management motorischer Fahrzeugantriebe. Elektronik, Modellbildung, Regelung und Diagnose für Verbrennungsmotoren, Getriebe und Elektroantriebe; mit 24 Tabellen* (1. Aufl., S. 328–340). Wiesbaden: Vieweg + Teubner.

Hussy, W. (2013). Psychologie als eine empirische Wissenschaft. In W. Hussy, M. Schreier & G. Echterhoff (Hrsg.), *Forschungsmethoden in Psychologie und Sozialwissenschaften für Bachelor* (S. 1–49). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-34362-9_1

Hussy, W., Schreier, M. & Echterhoff, G. (Hrsg.). (2013). *Forschungsmethoden in Psychologie und Sozialwissenschaften für Bachelor*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-34362-9>

Institut für Produktentwicklung (IPEK, Institut für Produktentwicklung, Kaiserstraße 10, 76131 Karlsruhe, Hrsg.). (2025, 3. September). *PLP Powertrain-in-the-Loop-Prüfstand*. Verfügbar unter: <https://www.ipek.kit.edu/177.php>

Isermann, R. (Hrsg.). (2006). *Fahrdynamik-Regelung. Modellbildung, Fahrerassistenzsysteme, Mechatronik* (SpringerLink Bücher). Wiesbaden: Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-8348-9049-8>

Isermann, R. (Hrsg.). (2010). *Elektronisches Management motorischer Fahrzeugantriebe. Elektronik, Modellbildung, Regelung und Diagnose für Verbrennungsmotoren, Getriebe und Elektroantriebe; mit 24 Tabellen* (1. Aufl.). Wiesbaden: Vieweg + Teubner.

Joost, G. & Christensen, M. (2017). *OpenLabs - Machbarkeitsstudie zur Entwicklung einer OpenLab-Infrastruktur für Innovationen im Themenfeld "Mensch-Technik-Interaktion": Abschlussbericht : Bewilligungszeitraum: 01.06.2016-31.05.2017*. [Berlin]: [DFKI GmbH - Interaktive Textilien]. Verfügbar unter: <https://www.tib.eu/de/suchen/id/TIBKAT%3A1009169262>

Käppler, W. D. (2015). *Smart Vehicle Handling - Test und Evaluation in der Fahrzeugtechnik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Kaufmann, U. H. (2012). *Praxisbuch Lean Six Sigma. Werkzeuge und Beispiele*. München: Hanser Verlag.

Köber, J. (2023). Ein Beitrag zur effizienteren Validierung der Applikation von Doppelkupplungsgetrieben im Kontext des IPEK-X-in-the-Loop-Ansatzes. In A. Albers & S. Matthiesen (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung. Systeme, Methoden, Prozesse* (Bd. 170). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000164267>

Koch, S. (2015). *Einführung in das Management von Geschäftsprozessen*. Springer Berlin Heidelberg.

Kraft, C.-P. & Staffen, M. (2011). FAHRROBOTER OHNE ANLERNPHASE FÜR DEN ROLLENPRÜFSTAND. *ATZextra*, 16(5), 42–46.

Kraft, D., Huber, T. & Sterzing-Oppel, S. (2012). Simulation und Auslegung. In K. Reif, K. E. Noreikat & K. Borgeest (Hrsg.), *Kraftfahrzeug-Hybridantriebe*.

Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen ; mit 44 Tabellen
(ATZ/MTZ-Fachbuch, S. 325–340). Wiesbaden: Springer Vieweg.

- Lohmeyer, Q. (2013). Menschzentrierte Modellierung von Produktentstehungssystemen unter besonderer Berücksichtigung der Synthese und Analyse dynamischer Zielsysteme. In A. Albers (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung. Systeme, Methoden, Prozesse* (Bd. 59). ISSN: 1615-8113. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000035102>
- Marxen, L. (2014). A Framework for Design Support Development based on the integrated Product Engineering Model iPeM. In A. Albers (Ed.), *Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung. Systeme, Methoden, Prozesse* (vol. 74). ISSN: 1615-8113. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000045823>
- Marxen, L. & Albers, A. (2012). Supporting validation in the development of design methods. In D. Marjanović, M. Štorga, N. Pavković & N. Bojčetić (Eds.), *DESIGN 2012. Proceedings of the 12th International Design Conference, May 21 - 24, 2012, Dubrovnik, Croatia* (DS, vol. 3, S. 1009–1018). Zagreb: Fac. of Mechanical Engineering and Naval Architecture.
- Matros, K., Schille, F., Behrendt, M. & Holzer, H. (2015). Manöverbasierte Validierung von Hybridantrieben. *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, 117(02/2015), 64–71.
- Matthiesen, S. (2002). Ein Beitrag zur Basisdefinition des Elementmodells "Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen" zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer Systeme. In A. Albers (Hrsg.), *Forschungsberichte des Instituts für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau* (Bd. 6). ISSN 1615-8113. Karlsruhe: Universität Karlsruhe (TH). <https://doi.org/10.5445/IR/12092002>
- Meboldt, M. (2009). Mentale und formale Modellbildung in der Produktentstehung - als Beitrag zum integrierten Produktentstehungs-Modell (iPeM). In A. Albers (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung. Systeme, Methoden, Prozesse* (Bd. 29). ISSN 1615-8113. Karlsruhe: Universität Karlsruhe (TH). <https://doi.org/10.5445/IR/1000028850>
- Meboldt, M., Matthiesen, S. & Lohmeyer, Q. (2012). The Dilemma of Managing Iterations in Time-to-market Development Processes. In The Design Society

(Ed.), *Proceedings of the 2nd International Conference on Modelling and Management Engineering Processes* (S. 127–140). Cambridge, UK: Univ.

Melzer, A. (2019). *Six Sigma – kompakt und praxisnah. Prozessverbesserung effizient und erfolgreich implementieren* (2., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-23755-4>

Nachtigall, C. & Wirtz, M. A. (2013). *Wahrscheinlichkeitsrechnung und Inferenzstatistik* (Statistische Methoden für Psychologen / Markus Wirtz Christof Nachtigall, Teil 2, 6. Auflage). Weinheim: Beltz Juventa.

Papula, L. (2016). *Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler. Mit 550 Abbildungen, zahlreichen Beispielen aus Naturwissenschaft und Technik sowie 295 Übungsaufgaben mit ausführlichen Lösungen* (Lehrbuch, 7., überarbeitete und erweiterte Auflage). Wiesbaden: Springer Vieweg.

Paulweber, H. M. & Lebert, K. (2014). *Mess- und Prüfstandstechnik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-04453-4>

Ropohl, G. (Hrsg.). (1975). *Systemtechnik, Grundlagen und Anwendung. Mit 5 Tabellen*. München: Hanser.

Schenk, M. (2017). Adaptives Prüfstandsverhalten in der PKW-Antriebsstrangerprobung. In B. Bertsche (Hrsg.), *Berichte aus dem Institut für Maschinenelemente. Antriebs-, Dichtungs-, Schienenfahrzeug- und Zuverlässigkeitstechnik* (Bd. 169, S. 1–148). Karlsruhe.
<https://doi.org/10.18419/opus-9113>

Schneidewind, U. (2014). Urbane Reallabore: ein Blick in die aktuelle Forschungswerkstatt. *Planung neu denken online*, (3).

Schramm, D., Hiller, M. & Bardini, R. (2010). *Modellbildung und Simulation der Dynamik von Kraftfahrzeugen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Sciuto, M. & Hellmund, R. (2001). "Road to Rig" — Simulationskonzept an Powertrain-Prüfständen in der Getriebeerprobung. *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, 103(4), 298–307. <https://doi.org/10.1007/BF03224372>

- Siebertz, K., van Bebber, D. & Hochkirchen, T. (2017). *Statistische Versuchsplanung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Thomke, S. & Fujimoto, T. (2000). The Effect of "Front-Loading" Problem-Solving on Product Development Performance. *Journal of Product Innovation Management*, 17(2), 128–142.
- Tschöke, H. (Hrsg.). (2019). *Real Drive Emissions (RDE). Gesetzgebung, Vorgehensweise, Messtechnik Motorische Massnahmen, Abgasnachbehandlung Auswirkungen* (ATZ/MTZ-Fachbuch). Wiesbaden, Germany: Springer Vieweg.
- VDI-Richtlinie 2206 Blatt 1 (11.2021). *Entwicklung cyber-physischer mechatronischer Systeme (CPMS)*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- Wagner, F. & Grunwald, A. (2019). Reallabore zwischen Beliebtheit und Beliebtheit: Eine Bestandsaufnahme des transformativen Formats. *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society*, 28(3), 260–264. <https://doi.org/10.14512/gaia.28.3.5>
- Weigand, C. (2019). *Statistik mit und ohne Zufall. Eine anwendungsorientierte Einführung* (3. Auflage). Berlin, Germany: Springer Spektrum.

**Studentische Abschlussarbeiten, die im Kontext dieser
Dissertation am IPEK – Institut für Produktentwicklung am
Karlsruher Institut für Technologie (KIT) vom Autor co-
betreut wurden:**

Czogalik, D. (2020, 30. September). *Rollenprüfstand als Validierungsumgebung*.
Bachelorthesis. Technische Hochschule Ulm, Ulm.

Dietrich, D. (2021, 30. September). *Abstimmung und Simulation einer
bestehenden Fahrzeugmodellierung in einer Vorwärtssimulation*.
Bachelorthesis. Technische Hochschule Ulm, Ulm.

Haidar, O. (2021, 26. März). *Synthese generischer RDE-Streckenverläufe auf
Basis einer Längsdynamiksimulation*. Bachelorthesis. Technische Hochschule
Ulm, Ulm.

Heib, J. (2021, 30. September). *Simulation von RDE-Fahrten mit einem
elektrischen Antriebsstrangmodell*. Bachelorthesis. Technische Hochschule
Ulm, Ulm.

Heinzelmann, L. (2021, 31. März). *Übertrag generischer RDE-Zyklen auf den
Rollenprüfstand*. Bachelorthesis. Technische Hochschule Ulm, Ulm.

Käser, A. (2021, 26. März). *Inbetriebnahme und Bewertung eines F-v-Betriebs auf
einem Rollenprüfstand für RDE-Fahrten*. Bachelorthesis. Technische
Hochschule Ulm, Ulm.

Klamser, C. (2021, 26. März). *Synthese von Realfahrt und
Längsdynamiksimulation unter Berücksichtigung der RDE-Konformität*.
Bachelorthesis. Technische Hochschule Ulm, Ulm.

Kottmann, C. (2021, 30. September). *Konzeptionierung einer closed-loop
Fahrzeugbremsregelung auf einem Rollenprüfstand*. Bachelorthesis.
Technische Hochschule Ulm, Ulm.

Leukert, L. (2020, 27. August). *Statistische Bewertung von RDE-Fahrten in Bezug
auf deren Reproduzierbarkeit*. Bachelorthesis. Hochschule Konstanz - Technik,
Wirtschaft und Gestaltung, Konstanz.

- Lorenz, A. (2021, 30. September). *Validierung einer closed-loop Fahrzeugbremsregelung auf einem Rollenprüfstand*. Bachelorthesis. Technische Hochschule Ulm, Ulm.
- Maier, S. (2020, 16. Oktober). *Erweiterung des v - α -Betriebs zum n - α -Betrieb eines Rollenprüfstandes*. Bachelorthesis. Technische Hochschule Ulm, Ulm.
- Schließer, T. (2019, 12. Juli). *Definition RDE-konformer Strecken in Hochschulumgebung*. Bachelorthesis. Technische Hochschule Ulm, Ulm.
- Ulrich, J. (2020, 16. Oktober). *Analyse des v - α -Betriebs auf einem Rollenprüfstand*. Bachelorthesis. Technische Hochschule Ulm, Ulm.

Publikationsliste

- Albers, A., Schille, F., Wysocki, T. von, Behrendt, M., Birkhold, J.-M. & Cortès, S. (2017). Methode zur Kalibrierung des Kupplungssystems und Objektivierung des Wiederstartkomforts hybrider Antriebsstränge auf dem Akustikrollenprüfstand. In *VDI-Fachtagung Kupplungen und Kupplungssysteme in Antrieben* (VDI-Berichte, Bd. 2309, S. 399–419). Düsseldorf: VDI Verlag GmbH. Verfügbar unter: <https://elibrary.vdi-verlag.de/10.51202/9783181023099/kupplungen-und-kupplungssysteme-in-antrieben-2017?page=1>
- Cortès, S., Albers, A., Dettmann, C. & Boche, P. (2022). Rollenprüfstände - Eine Entwicklungsumgebung für die Kalibrierung und Validierung von Fahrzeugantrieben im Kontext der RDE-Gesetzgebung. In VDI Wissenforum GmbH (Hrsg.), *22nd International VDI Congress Dritev. Baden-Baden, July 06-07, 2022* (VDI-Berichte, Bd. 2401, S. 347–363). Düsseldorf: VDI Verlag.
- Cortès, S., Albers, A., Dettmann, C. & Boche, P. (2023). Studie zur Bewertung des Einflusses einer alternativen Regelart in Bezug auf die Abbildung von Realfahrten auf Rollenprüfständen. In M. Gretzschel (Hrsg.), *Beiträge zum 5. Aalener Kolloquium antriebstechnische Anwendungen* (Berichte aus dem Maschinenbau, 2. korrigierte Auflage, S. 60–78). Düren: Shaker.
- Cortès, S., Dettmann, C., Boche, P., Schneider, N. & Heubuch, A. (September 2021). Impact of control types of a chassis dynamometer on the reproduction of real world driving scenarios. In *FISITA World Congress 2021 - Technical Programme*. FISITA.
- Cortès, S., Dettmann, C., Heib, J. & Millberg, F. (2022, 25. Juli). Robustheitsanalyse einer Längsdynamiksimulation auf Basis verschiedener Qualitätskriterien. In F. Breitenecker, C. Deatcu, U. Durak, A. Körner & T. Pawletta (Hrsg.), *ASIM SST 2022 Proceedings Langbeiträge* (S. 129–137). ARGESIM Publisher Vienna.
- Cortès, S., Dettmann, C., Heinzelmann, L. & Haidar, O. (2022, 25. Juli). Manöverbasierte Validierung einer Längsdynamiksimulation anhand generisch erzeugter Reallastverläufe. In F. Breitenecker, C. Deatcu, U. Durak, A. Körner

& T. Pawletta (Hrsg.), *ASIM SST 2022 Proceedings Langbeiträge* (S. 119–127). ARGESIM Publisher Vienna.

Cortès, S., Dettmann, C., Mayer, T., Junginger, N., Lorenz, A. & Siegel, R. (2022). *Entwicklung einer closed-loop Fahrzeugbremsregelung auf einem Rollenprüfstand*. Technische Hochschule Ulm. Verfügbar unter: <https://oparu.uni-ulm.de/items/6ad08662-fc53-4adc-a6ee-515e03de6ef9>

Cortès, S., Schlick, M., Mayer, T., Aydin, M. & Haidar, O. (2022). *Impact of variable driving terms and additional consumers on the driving range and energy consumption of light commercial electric vehicles*. <https://doi.org/10.26226/m.628e4d5240b9604ad9d7a065>

Heilmann, O., Bocho, B., Frieß, A., Cortès, S., Schrade, U., Casal Kulzer, A. et al. (2024). Driving Profiles of Light Commercial Vehicles of Craftsmen and the Potential of Battery Electric Vehicles When Charging on Company Premises. *World Electric Vehicle Journal*, 15(5), 211. <https://doi.org/10.3390/wevj15050211>

Heilmann, O., Müller, J., Heinrich, M., Cortès, S., Schlick, M. & Kulzer, A. C. 2025, 2. July. *Impact of the Distribution of Charging and Hydrogen Refueling Stations on their Reachability for Craft Vehicles with a Defined Usage Profile* (SAE Technical Paper). SAE International. Retrieved from <https://saemobilus.sae.org/papers/impact-distribution-charging-hydrogen-refueling-stations-reachability-craft-vehicles-a-defined-usage-profile-2025-01-0310> <https://doi.org/10.4271/2025-01-0310>

Anhang A

A1 Chi-Quadrat-Verteilung

Diese Tabelle zeigt die Quantile der χ^2 -Verteilung in Abhängigkeit der Freiheitsgrade f und der Wahrscheinlichkeit $p = 1 - \alpha$.

f	p									
	0,005	0,01	0,025	0,05	0,10	0,90	0,95	0,975	0,99	0,995
1	0,000	0,000	0,001	0,004	0,016	2,71	3,84	5,02	6,63	7,88
2	0,01	0,020	0,051	0,103	0,211	4,61	5,99	7,38	9,21	10,60
3	0,07	0,115	0,216	0,352	0,584	6,25	7,81	9,35	11,35	12,84
4	0,21	0,297	0,484	0,711	1,064	7,78	9,49	11,14	13,28	14,86
5	0,41	0,554	0,831	1,15	1,16	9,24	11,07	12,83	15,09	16,75
6	0,68	0,872	1,24	1,64	2,20	10,64	12,59	14,45	16,81	18,55
7	0,99	1,24	1,69	2,17	2,83	12,02	14,06	16,01	18,48	20,28
8	1,34	1,65	2,18	2,73	3,49	13,36	15,51	17,53	20,09	21,96
9	1,73	2,09	2,70	3,33	4,17	14,68	16,92	19,02	21,67	23,59
10	2,16	2,56	3,25	3,94	4,87	15,99	18,31	20,48	23,21	25,19
11	2,60	3,05	3,82	4,57	5,58	17,28	19,67	21,92	24,73	26,76
12	3,07	3,57	4,40	5,23	6,30	18,55	21,03	23,34	26,22	28,30
13	3,57	4,11	5,01	5,89	7,04	19,81	22,36	24,74	27,69	29,82
14	4,07	4,66	5,63	6,57	7,79	21,06	23,68	26,12	29,14	31,32
15	4,60	5,23	6,26	7,26	8,55	22,31	25,00	27,49	30,58	32,80
16	5,14	5,81	6,91	7,96	9,31	23,54	26,30	28,85	32,00	34,27
17	5,70	6,41	7,56	8,67	10,09	24,77	27,59	30,19	33,41	35,72
18	6,26	7,01	8,23	9,39	10,86	25,99	28,87	31,53	34,81	37,16
19	6,84	7,63	8,91	10,12	11,65	27,20	30,14	32,85	36,19	38,58
20	7,43	8,26	9,59	10,85	12,44	28,41	31,41	34,17	37,57	40,00
22	8,6	9,5	11,0	12,3	14,0	30,8	33,9	36,8	40,3	42,8
24	9,9	10,9	12,4	13,8	15,7	33,2	36,4	39,4	43,0	45,6
26	11,2	12,2	13,8	15,4	17,3	35,6	38,9	41,9	45,6	48,3
28	12,5	13,6	15,3	16,9	18,9	37,9	41,3	44,5	48,3	51,0
30	13,8	15,0	16,8	18,5	20,6	40,3	43,8	47,0	50,9	53,7
40	20,7	22,2	24,4	26,5	29,1	51,8	55,8	59,3	63,7	66,8
50	28,0	29,7	32,4	34,8	37,7	63,2	67,5	71,4	76,2	79,5
60	35,5	37,5	40,5	43,2	46,5	74,4	79,1	83,3	88,4	92,0
70	43,3	45,4	48,8	51,7	55,3	85,5	90,5	95,0	100,4	104,2
80	51,2	53,5	57,2	60,4	64,3	96,6	101,9	106,6	112,3	116,3
90	59,2	61,8	65,6	69,1	73,3	107,6	113,1	118,1	124,1	128,3
100	67,3	70,1	74,2	77,9	82,4	118,5	124,3	129,6	135,8	140,2

(Papula, 2016, S. 743)

A2 Beispiel Ermittlung Testgröße $T(x,y)$

Beispielhaftes Vorgehen bei der Ermittlung der Testschranke χ^2 und der Berechnung der Testgröße $T(x,y)$ für ein Eingang- und Ausgangssignal (x und y) zur Überprüfung der Nullhypothese H_0 (siehe Formel 5.2), hier Fahrerwunsch in Form der Pedalposition und NOx.

Hierfür wird ein einseitiger Chi-Quadrat-Test durchgeführt. Die Nullhypothese H_0 wird abgelehnt, wenn:

$$T(x,y) \geq \chi_{(r-1)(s-1);1-\alpha}^2$$

Im Umkehrschluss wird somit die Alternativhypothese H_1 (siehe Formel 5.1) angenommen und die Variablen x und y sind voneinander abhängig.

Prämissen:

1. Signifikanzniveau $\alpha = 5 \%$
2. Kontingenztabelle besteht aus einer (5×5) -Matrix, d.h. je fünf Klassen für Eingangs- und Ausgangswert
3. Stichprobenumfang $n = 38$

Ermittlung der Freiheitsgrade:

$$\text{Freiheitsgrade} = (r - 1) \cdot (s - 1) = (5 - 1) \cdot (5 - 1) = 16$$

Testschranke $\chi^2 = 26,3$

f	p						
	0,005	0,01	0,025	0,05	0,10	0,90	0,95
1	0,000	0,000	0,001	0,004	0,016	2,71	3,84
2	0,01	0,020	0,051	0,103	0,211	4,61	5,99
3	0,07	0,115	0,216	0,352	0,584	6,25	7,81
4	0,21	0,297	0,484	0,711	1,064	7,78	9,48
5	0,41	0,554	0,831	1,15	1,16	9,24	11,07
6	0,68	0,872	1,24	1,64	2,20	10,64	12,59
7	0,99	1,24	1,69	2,17	2,83	12,02	14,06
8	1,34	1,65	2,18	2,73	3,49	13,36	15,51
9	1,73	2,09	2,70	3,33	4,17	14,68	16,92
10	2,16	2,56	3,25	3,94	4,87	15,99	18,31
11	2,60	3,05	3,82	4,57	5,58	17,28	19,67
12	3,07	3,57	4,40	5,23	6,30	18,55	21,03
13	3,57	4,11	5,01	5,89	7,04	19,81	22,36
14	4,07	4,66	5,63	6,57	7,79	21,06	23,68
15	4,60	5,23	6,26	7,26	8,55	22,31	25,00
16	5,14	5,81	6,91	7,96	9,31	23,54	26,30
17	5,70	6,41	7,56	8,67	10,09	24,77	27,59
18	6,26	7,01	8,23	9,39	10,86	25,99	28,87
19	6,84	7,63	8,91	10,12	11,65	27,20	30,14
20	7,43	8,26	9,59	10,85	12,44	28,41	31,41

Jeder Treffer der Stichprobe n wird nun in einer Kontingenztabelle gezählt.

Tabelle A.1: Kontingenztabelle Pedalposition/NOx

NOx Drehzahl	0,000124- 0,000381	0,000381- 0,000639	0,000639- 0,000897	0,000897- 0,00115	0,00115- 0,00141	Σ
1182,28- 1242,66	6	3	0	0	0	8
1242,66- 1303,03	4	4	0	0	0	8
1303,03- 1363,41	4	8	2	0	2	14
1363,41- 1423,78	0	0	2	0	0	2
1423,78- 1484,16	0	0	3	0	0	3
Σ	14	15	7	0	2	38

Für jeden Treffer $N_{i,j}$ in der Kontingenztabelle wird nun die geschätzte Wahrscheinlichkeit berechnet. Für alle Treffer berechnet sich dann die Testgröße aus den Einzelwahrscheinlichkeiten.

$$T(x, y) = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^s \frac{(N_{i,j} - \frac{1}{n} \cdot N_{i,\bullet} \cdot N_{\bullet,j})^2}{\frac{1}{n} \cdot N_{i,\bullet} \cdot N_{\bullet,j}}$$

Die vorliegende Kontingenztabelle entspricht einer (5x5)-Matrix, womit 25 Einzelwahrscheinlichkeiten zu berechnen sind.

Für das Element (1,1) berechnet sich die Einzelwahrscheinlichkeit:

$$T(x, y) = \frac{\left(6 - \frac{1}{38} \cdot 8 \cdot 14\right)^2}{\frac{1}{38} \cdot 8 \cdot 14} = 2,17$$

Analog nur für das Element (2,1):

$$T(x, y) = \frac{\left(3 - \frac{1}{38} \cdot 8 \cdot 15\right)^2}{\frac{1}{38} \cdot 8 \cdot 15} = 0,09$$

Für alle Elemente der Matrix aufsummiert:

$$\begin{aligned}
 T(x, y) = & 2,17 + 0,09 + 1,66 + 0 + 0,47 + 0,38 + 0,22 + 1,47 + 0 + 0,42 + 0,61 \\
 & + 0,45 + 0,30 + 0 + 1,59 + 0,74 + 0,79 + 7,23 + 0 + 0,11 + 1,11 \\
 & + 1,18 + 10,84 + 0 + 0,16 = \underline{31,98}
 \end{aligned}$$

Die ermittelten Werte $T(x, y)$ und χ^2 werden in einer Gesamtübersicht dargestellt. Die Vorgehensweise wiederholt sich für alle Eingangsgrößen. Somit erhält jeder Betrachtungszeitraum für alle Eingangs- und Ausgangsgrößen eine Ergebnismatrix. Das Ergebnis des Chi-Quadrat-Tests wird zudem farblich hervorgehoben. Grün entspricht der Ablehnung der Nullhypothese, rot der Bestätigung.

Anhang B

Dieser Abschnitt beinhaltet die statistischen Auswertungen für die in Kapitel 6 definierten Auswertemethoden aus Abschnitt 6.5.1.

Die nachfolgenden Kapitel zeigen die ermittelten statistischen Kennwerte und grafischen Darstellungen für folgende Messgrößen:

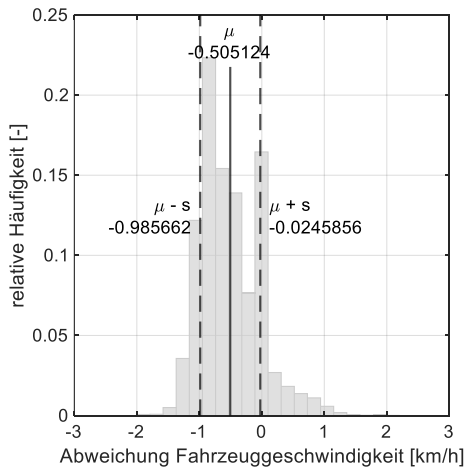
- B1: Fahrzeuggeschwindigkeit
- B2: Gaspedalstellung
- B3: Motordrehmoment
- B4: Bremskraft
- B5: Aktueller Gang
- B6: Kumulierte Masse gasförmiger Abgasbestandteile CO, CO₂, NO, NO₂
- B7: Abgasmassenstrom

Der Inhalt gliedert sich in:

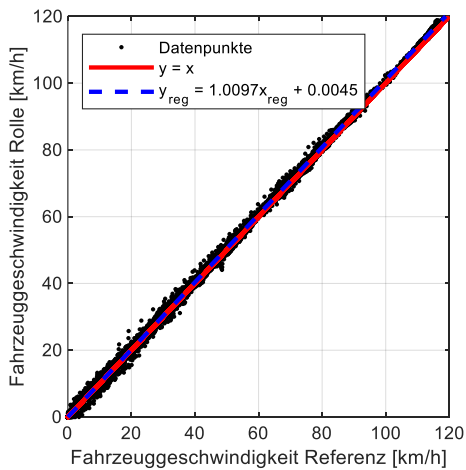
- Grafische Darstellungen (einfach am Beispiel v-FW):
 - Histogramm der Differenzfunktion
 - Regressionsplot
- Tabelle mit Ergebnissen (für alle Testkonfigurationen und Wiederholungen):
 - Bestimmtheitsmaß R^2 (Determinationskoeffizient) mittels linearer Regression zwischen Referenz und Reproduktion
 - Mittelwert und Standardabweichung der Differenz von Referenz und Reproduktion
 - Absolutes Integral zwischen der Differenz von Referenz und Reproduktion
 - Steigung und standardisierter Achsenabschnitt der Regressionsplots
 - Kreuzkorrelationswerte zwischen Referenz Reproduktion (maximaler und erreichter Wert, Lag)

B1 Statistische Auswertung Fahrzeuggeschwindigkeit

Histogramm Fahrzeuggeschwindigkeit in v-FW



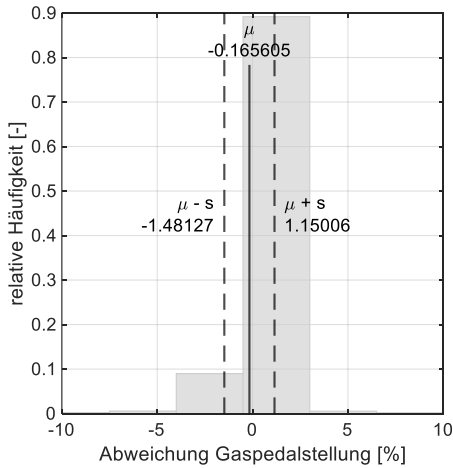
Regressionsplot Fahrzeuggeschwindigkeit in v-FW



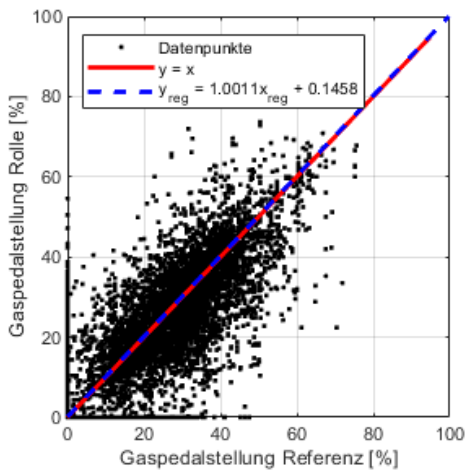
Statistische Auswertergebnisse Fahrzeuggeschwindigkeit									
Signal	R ²	Diff_Mean	Diff_Std	Integralabs	Steigung	Y _{stand}	KK _{max}	Lag _{KKmax}	KK _{lag0}
LS_F_mS_1	0,9995	-0,48	0,87	434485,52	1,0077	0,0022	0,9999	-28	0,99992
LS_F_mS_2	0,9984	-0,52	1,49	654122,21	1,0076	0,0036	0,9999	-74	0,99974
LS_F_mS_3	0,9992	-0,46	1,07	501706,16	1,0077	0,0018	0,9999	-29	0,99987
LS_F_oS_1	0,9997	-0,48	0,70	385269,83	1,0074	0,0027	0,9999	4	0,99995
LS_F_oS_2	0,9996	-0,47	0,76	405066,06	1,0077	0,0020	1,0000	24	0,99994
LS_F_oS_3	0,9995	-0,47	0,82	423998,69	1,0075	0,0024	1,0000	31	0,99993
LS_J_mS_1	0,9995	-0,32	0,81	326022,56	1,0023	0,0057	0,9999	-19	0,99992
LS_J_mS_2	0,9995	-0,33	0,81	329118,95	1,0024	0,0057	0,9999	-21	0,99992
LS_J_mS_3	0,9994	-0,59	0,90	444891,39	1,0060	0,0077	0,9999	-26	0,99990
LS_J_mS_4	0,9994	-0,60	0,93	444127,77	1,0056	0,0087	0,9999	-24	0,99989
LS_J_mS_5	0,9994	-0,61	0,95	455795,08	1,0058	0,0087	0,9999	-27	0,99989
LS_J_oS_1	0,9997	-0,50	0,64	352717,21	1,0066	0,0043	1,0000	-22	0,99996
LS_J_oS_2	0,9997	-0,50	0,64	352618,62	1,0066	0,0044	1,0000	-22	0,99995
LS_J_oS_3	0,9997	-0,50	0,67	361815,29	1,0065	0,0046	1,0000	-25	0,99995
v-α_J_1	0,9999	-0,53	0,48	357193,31	1,0098	0,0006	1,0000	17	0,99999
v-α_J_2	0,9999	-0,52	0,50	360017,06	1,0099	0,0003	1,0000	18	0,99999
v-α_J_3	0,9999	-0,52	0,49	357453,97	1,0099	0,0003	1,0000	17	0,99999
v-α_J_4	0,9999	-0,53	0,52	371360,56	1,0100	0,0005	1,0000	20	0,99998
v-FW_J_1	0,9999	-0,39	0,51	313109,06	1,0077	-0,0002	1,0000	24	0,99998
v-FW_J_2	0,9999	-0,39	0,48	302681,85	1,0077	-0,0002	1,0000	21	0,99998
v-FW_J_3	0,9999	-0,39	0,43	289677,93	1,0077	-0,0002	1,0000	17	0,99999
v-FW_J_4	0,9999	-0,51	0,48	348998,81	1,0097	0,0001	1,0000	17	0,99999

B2 Statistische Auswertung Gaspedalstellung

Histogramm Gaspedalstellung in v-FW



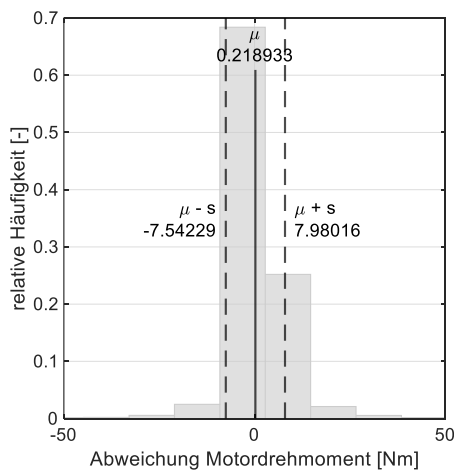
Regressionsplot Gaspedalstellung in v-FW



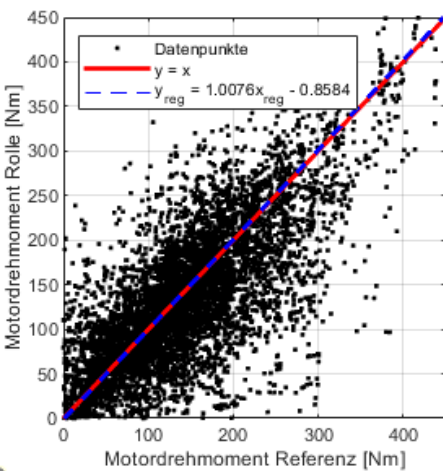
Statistische Auswerteergebnisse Gaspedalstellung									
Signal	R ²	Diff_Mean	Diff_Std	Integral _{abs}	Steigung	Y _{stand}	KK _{max}	Lag _{KKmax}	KK _{lag0}
LS_F_mS_1	0,7451	0,21	8,78	3190017,63	0,8365	0,1680	0,9428	-41	0,93803
LS_F_mS_2	0,6866	0,18	9,83	3588984,75	0,8056	0,2039	0,9305	-68	0,92234
LS_F_mS_3	0,7035	0,17	9,54	3470092,51	0,8162	0,1930	0,9279	-26	0,92691
LS_F_oS_1	0,7122	-0,27	9,16	3516869,91	0,7505	0,3040	0,9317	2	0,93169
LS_F_oS_2	0,7142	0,02	9,10	3484059,35	0,7364	0,3045	0,9331	19	0,93222
LS_F_oS_3	0,7124	0,07	9,14	3520891,13	0,7367	0,3011	0,9332	25	0,93174
LS_J_mS_1	0,7759	0,22	8,17	2915962,67	0,8467	0,1570	0,9525	-58	0,94621
LS_J_mS_2	0,7751	0,36	8,18	2919388,63	0,8445	0,1511	0,9525	-60	0,94586
LS_J_mS_3	0,7651	1,84	8,27	3035899,32	0,8014	0,1127	0,9504	-67	0,94211
LS_J_mS_4	0,7685	1,97	8,21	3027545,67	0,8007	0,1051	0,9502	-62	0,94283
LS_J_mS_5	0,7666	2,02	8,24	3040301,02	0,7975	0,1059	0,9503	-65	0,94230
LS_J_oS_1	0,7288	1,89	8,87	3514441,10	0,7061	0,2270	0,9411	-52	0,93525
LS_J_oS_2	0,7307	1,99	8,84	3522616,86	0,7033	0,2246	0,9415	-52	0,93572
LS_J_oS_3	0,7295	1,99	8,86	3528594,03	0,7048	0,2226	0,9416	-54	0,93537
v-α_J_1	0,9966	-0,16	1,00	204806,37	1,0018	0,0077	0,9995	4	0,99921
v-α_J_2	0,9941	-0,17	1,31	235646,25	1,0007	0,0090	0,9988	4	0,99866
v-α_J_3	0,9942	-0,16	1,30	233092,17	1,0006	0,0089	0,9988	3	0,99867
v-α_J_4	0,9935	-0,17	1,38	249889,23	1,0004	0,0093	0,9988	5	0,99850
v-FW_J_1	0,9922	-0,13	1,50	266756,78	0,9978	0,0103	0,9991	8	0,99822
v-FW_J_2	0,9940	-0,12	1,32	232632,53	0,9975	0,0095	0,9991	6	0,99862
v-FW_J_3	0,9954	-0,12	1,15	200522,59	0,9981	0,0089	0,9990	2	0,99895
v-FW_J_4	0,9941	-0,17	1,32	231783,58	1,0011	0,0086	0,9986	1	0,99864

B3 Statistische Auswertung Motordrehmoment

Histogramm Motordrehmoment in v-FW



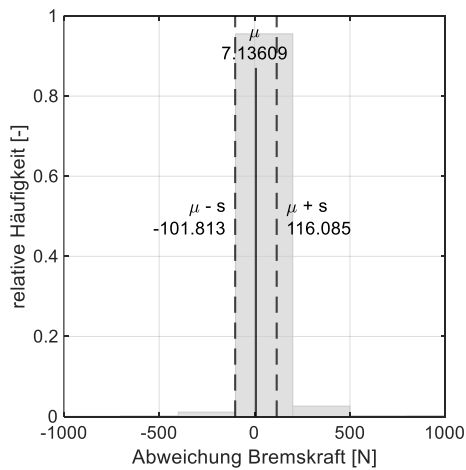
Regressionsplot Motordrehmoment in v-FW



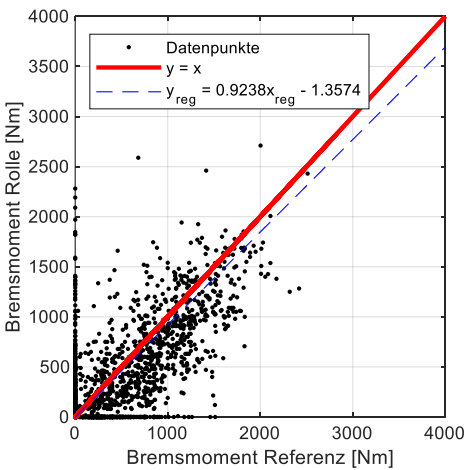
Statistische Auswerteergebnisse Motordrehmoment										
Signal	R ²	Diff_Mean	Diff_Std	Integral _{abs}	Steigung	Y _{stand}	KK _{max}	Lag _{KKmax}	KK _{lag0}	
LS_F_mS_1	0,7067	2,93	55,43	21607946,32	0,8076	0,1347	0,9138	-43	0,90665	
LS_F_mS_2	0,6514	2,99	60,56	23702771,88	0,7617	0,1749	0,9002	-74	0,88775	
LS_F_mS_3	0,6723	3,20	58,49	22908967,06	0,7727	0,1632	0,8973	-32	0,89519	
LS_F_oS_1	0,6402	-1,22	60,09	23690627,01	0,6741	0,3090	0,8880	0	0,88803	
LS_F_oS_2	0,6448	0,61	59,59	23565921,61	0,6606	0,3044	0,8907	18	0,88958	
LS_F_oS_3	0,6454	2,02	59,53	23611457,79	0,6589	0,2908	0,8918	25	0,88966	
LS_J_mS_1	0,7438	1,86	51,23	19117251,79	0,8145	0,1409	0,9301	-61	0,92032	
LS_J_mS_2	0,7416	3,04	51,45	19187353,96	0,8120	0,1310	0,9296	-63	0,91921	
LS_J_mS_3	0,7280	12,47	52,30	19830349,70	0,7657	0,0755	0,9248	-70	0,91169	
LS_J_mS_4	0,7317	13,20	51,94	19788320,29	0,7690	0,0647	0,9239	-65	0,91241	
LS_J_mS_5	0,7292	13,85	52,18	20016781,60	0,7665	0,0601	0,9238	-69	0,91116	
LS_J_oS_1	0,6636	13,42	58,11	23375618,97	0,6292	0,1973	0,9032	-54	0,89423	
LS_J_oS_2	0,6641	14,09	58,07	23480414,42	0,6297	0,1894	0,9031	-54	0,89413	
LS_J_oS_3	0,6634	14,18	58,11	23566487,42	0,6306	0,1872	0,9034	-55	0,89377	
v-α_J_1	0,9963	0,40	6,24	2598425,48	1,0115	-0,0136	0,9989	2	0,99887	
v-α_J_2	0,9951	-0,27	7,13	2791773,69	1,0104	-0,0060	0,9986	0	0,99856	
v-α_J_3	0,9949	0,35	7,39	2951023,93	1,0147	-0,0157	0,9984	0	0,99844	
v-α_J_4	0,9946	-0,33	7,45	2903213,74	1,0064	-0,0021	0,9985	2	0,99840	
v-FW_J_1	0,9951	0,11	7,00	2344247,47	0,9978	0,0008	0,9989	6	0,99856	
v-FW_J_2	0,9957	0,60	6,55	2272366,25	0,9956	-0,0023	0,9988	3	0,99873	
v-FW_J_3	0,9960	0,75	6,30	2234216,41	0,9957	-0,0039	0,9988	0	0,99882	
v-FW_J_4	0,9941	0,22	7,76	2847994,02	1,0076	-0,0085	0,9983	-2	0,99825	

B4 Statistische Auswertung Bremskraft

Histogramm Bremskraft in v-FW



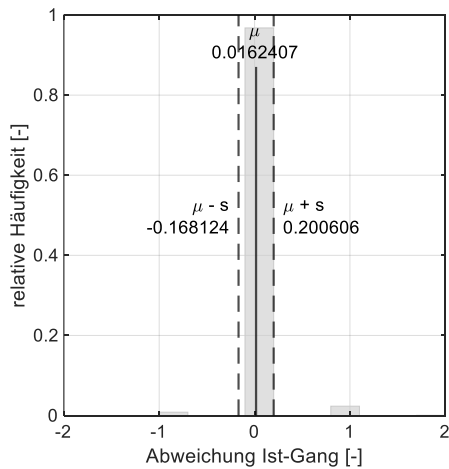
Regressionsplot Bremskraft in v-FW



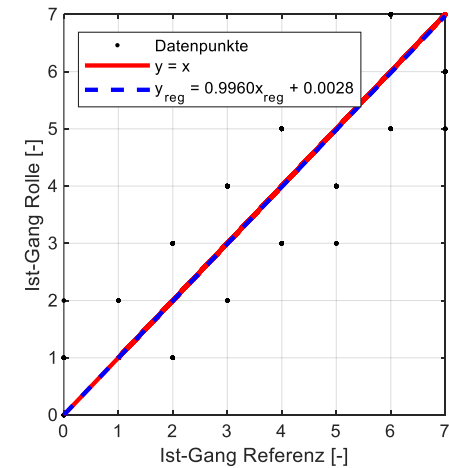
Statistische Auswerteergebnisse Bremskraft										
Signal	R ²	Diff_Mean	Diff_Std	Integral _{labs}	Steigung	Y _{stand}	KK _{max}	Lag _{KKmax}	KK _{lag0}	
LS_F_mS_1	0,6605	13,15	159,71	25159015,52	0,7301	0,0284	0,8599	-43	0,82510	
LS_F_mS_2	0,5307	16,38	195,66	31045756,92	0,6957	0,0253	0,8175	-73	0,74406	
LS_F_mS_3	0,6258	17,31	169,73	26474178,35	0,7306	0,0120	0,8273	-39	0,80316	
LS_F_oS_1	0,6942	22,82	150,19	24029318,30	0,6688	0,0094	0,8476	-14	0,84334	
LS_F_oS_2	0,6801	23,74	153,52	23135523,51	0,6596	0,0085	0,8356	6	0,83516	
LS_F_oS_3	0,7150	26,36	147,29	23632271,78	0,6302	0,0071	0,8577	12	0,85506	
LS_J_mS_1	0,7210	11,26	145,37	22243753,80	0,7989	0,0152	0,8726	-14	0,85885	
LS_J_mS_2	0,7171	8,36	148,37	22633523,93	0,8258	0,0181	0,8717	-16	0,85680	
LS_J_mS_3	0,7029	1,24	155,00	23858490,00	0,8471	0,0380	0,8657	-19	0,84980	
LS_J_mS_4	0,6964	0,50	158,42	24406117,52	0,8583	0,0373	0,8593	-16	0,84609	
LS_J_mS_5	0,6950	-0,34	159,89	24777546,99	0,8673	0,0376	0,8623	-19	0,84535	
LS_J_oS_1	0,7134	16,23	145,21	23427376,86	0,7255	0,0182	0,8715	-17	0,85483	
LS_J_oS_2	0,7111	15,91	145,85	23660186,96	0,7283	0,0186	0,8695	-17	0,85356	
LS_J_oS_3	0,7029	15,85	148,01	23913001,41	0,7270	0,0191	0,8689	-19	0,84894	
v-α_J_1	0,1502	72,51	260,39	44325238,73	0,0460	-0,0006	0,4014	13	0,39918	
v-α_J_2	0,1318	72,98	262,06	44487398,74	0,0387	-0,0002	0,3762	11	0,37469	
v-α_J_3	0,1262	73,04	262,49	44523032,26	0,0369	0,0002	0,3688	11	0,36739	
v-α_J_4	0,1276	73,13	262,53	44505367,92	0,0366	-0,0001	0,3711	14	0,36893	
v-FW_J_1	0,8212	11,29	116,08	14418710,11	0,8812	-0,0085	0,9151	12	0,91171	
v-FW_J_2	0,8240	11,26	115,15	14394071,09	0,8838	-0,0091	0,9153	9	0,91317	
v-FW_J_3	0,8282	10,86	113,88	14332634,70	0,8899	-0,0093	0,9162	5	0,91537	
v-FW_J_4	0,8458	7,14	108,95	12933299,81	0,9238	-0,0050	0,9281	11	0,92466	

B5 Statistische Auswertung Ist-Gang

Histogramm Ist-Gang in v-FW



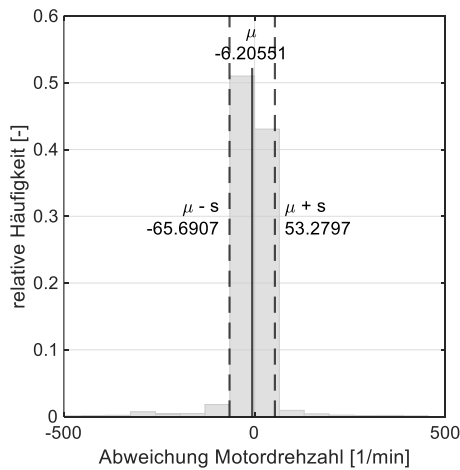
Regressionsplot Ist-Gang in v-FW



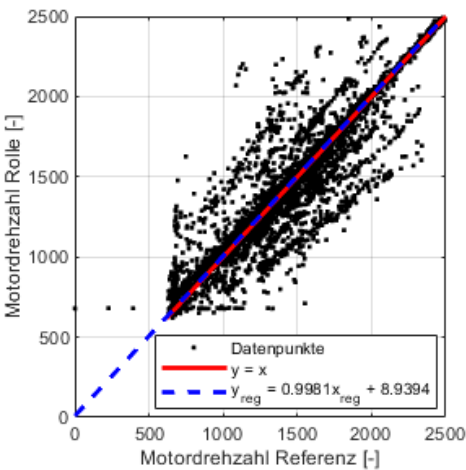
Statistische Auswerteergebnisse Ist-Gang										
Signal	R ²	Diff_Mean	Diff_Std	Integral _{abs}	Steigung	Y _{stand}	KK _{max}	Lag _{KKmax}	KK _{lag0}	
LS_F_mS_1	0,9813	-0,02	0,30	52505,50	0,9882	0,0342	0,9984	-27	0,99834	
LS_F_mS_2	0,9737	-0,02	0,36	72454,50	0,9884	0,0348	0,9980	-73	0,99767	
LS_F_mS_3	0,9752	-0,01	0,35	64034,50	0,9818	0,0425	0,9978	-25	0,99780	
LS_F_oS_1	0,9774	-0,09	0,33	70340,50	0,9890	0,0651	0,9980	6	0,99800	
LS_F_oS_2	0,9749	-0,08	0,35	75240,00	0,9825	0,0762	0,9978	29	0,99777	
LS_F_oS_3	0,9768	-0,09	0,34	71241,50	0,9865	0,0688	0,9980	32	0,99794	
LS_J_mS_1	0,9814	-0,04	0,30	53081,50	0,9874	0,0463	0,9984	-10	0,99836	
LS_J_mS_2	0,9824	-0,04	0,29	51315,50	0,9876	0,0461	0,9985	-10	0,99844	
LS_J_mS_3	0,9828	-0,05	0,29	51471,50	0,9892	0,0480	0,9985	-12	0,99848	
LS_J_mS_4	0,9822	-0,05	0,29	53057,50	0,9889	0,0475	0,9984	-9	0,99842	
LS_J_mS_5	0,9827	-0,05	0,29	51546,50	0,9888	0,0489	0,9985	-12	0,99847	
LS_J_oS_1	0,9791	-0,10	0,32	65659,50	0,9870	0,0713	0,9982	-7	0,99815	
LS_J_oS_2	0,9792	-0,09	0,32	65085,50	0,9871	0,0689	0,9982	-7	0,99815	
LS_J_oS_3	0,9793	-0,10	0,32	65287,50	0,9873	0,0713	0,9982	-9	0,99816	
v-α_J_1	0,9883	-0,01	0,24	33388,50	0,9996	0,0067	0,9990	14	0,99896	
v-α_J_2	0,9880	-0,01	0,24	34304,50	0,9992	0,0077	0,9990	18	0,99894	
v-α_J_3	0,9892	-0,02	0,23	30987,50	0,9999	0,0086	0,9991	16	0,99904	
v-α_J_4	0,9887	-0,01	0,24	32458,50	0,9998	0,0069	0,9990	19	0,99899	
v-FW_J_1	0,9929	0,00	0,19	19870,50	0,9952	0,0092	0,9995	22	0,99937	
v-FW_J_2	0,9932	0,01	0,18	18969,50	0,9960	0,0061	0,9995	21	0,99940	
v-FW_J_3	0,9927	0,01	0,19	20543,50	0,9962	0,0034	0,9994	17	0,99935	
v-FW_J_4	0,9930	0,02	0,18	19612,50	0,9960	0,0013	0,9995	21	0,99938	

B6 Statistische Auswertung Motordrehzahl

Histogramm Motordrehzahl in v-FW



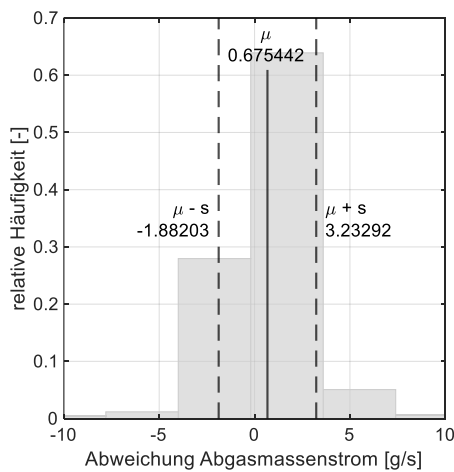
Regressionsplot Motordrehzahl in v-FW



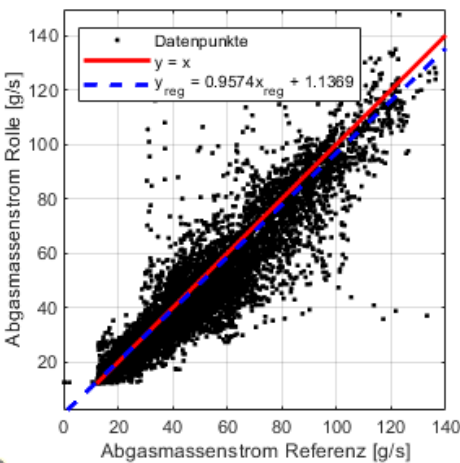
Statistische Auswerteergebnisse Motordrehzahl										
Signal	R ²	Diff_Mean	Diff_Std	Integral _{labs}	Steigung	Y _{stand}	KK _{max}	Lag _{KKmax}	KK _{lag0}	
LS_F_mS_1	0,9480	1,49	118,33	29354638,99	0,9754	0,0664	0,9971	-28	0,99704	
LS_F_mS_2	0,9264	1,23	142,13	39299137,63	0,9752	0,0670	0,9962	-66	0,99573	
LS_F_mS_3	0,9296	-0,10	139,13	35564911,04	0,9787	0,0596	0,9960	-24	0,99592	
LS_F_oS_1	0,9425	25,18	124,85	33667276,90	0,9771	0,0154	0,9966	7	0,99663	
LS_F_oS_2	0,9374	23,07	130,32	35131516,47	0,9748	0,0259	0,9965	31	0,99634	
LS_F_oS_3	0,9412	24,46	126,07	34387269,77	0,9746	0,0239	0,9967	33	0,99657	
LS_J_mS_1	0,9535	5,96	112,16	28262349,61	0,9838	0,0338	0,9974	-15	0,99733	
LS_J_mS_2	0,9577	6,46	106,61	27378073,18	0,9820	0,0379	0,9976	-15	0,99759	
LS_J_mS_3	0,9573	10,52	107,00	28127256,98	0,9794	0,0375	0,9976	-19	0,99756	
LS_J_mS_4	0,9563	9,71	108,27	28378395,70	0,9779	0,0433	0,9976	-18	0,99750	
LS_J_mS_5	0,9572	10,22	107,17	28057462,02	0,9790	0,0393	0,9976	-19	0,99755	
LS_J_oS_1	0,9475	26,28	119,26	31377570,29	0,9812	0,0019	0,9969	-12	0,99691	
LS_J_oS_2	0,9481	24,86	118,39	31091544,30	0,9782	0,0130	0,9970	-13	0,99697	
LS_J_oS_3	0,9485	27,25	117,92	31291599,60	0,9783	0,0082	0,9970	-16	0,99698	
v-α_J_1	0,9786	-0,93	75,98	15981010,27	0,9989	0,0049	0,9988	11	0,99878	
v-α_J_2	0,9775	-0,53	77,94	16399261,05	0,9978	0,0073	0,9988	14	0,99872	
v-α_J_3	0,9807	1,95	72,13	15126687,93	0,9987	-0,0002	0,9990	13	0,99890	
v-α_J_4	0,9788	-0,81	75,73	16179119,30	0,9981	0,0069	0,9989	15	0,99879	
v-FW_J_1	0,9857	-7,01	62,23	13698446,89	1,0030	0,0052	0,9993	17	0,99919	
v-FW_J_2	0,9865	-7,55	60,37	13075980,90	1,0023	0,0082	0,9993	14	0,99924	
v-FW_J_3	0,9858	-9,36	61,98	13158479,29	1,0024	0,0113	0,9992	11	0,99920	
v-FW_J_4	0,9868	-6,21	59,49	11998253,89	0,9981	0,0173	0,9993	10	0,99926	

B7 Statistische Auswertung Abgasmassenstrom

Histogramm Abgasmassenstrom in v-FW



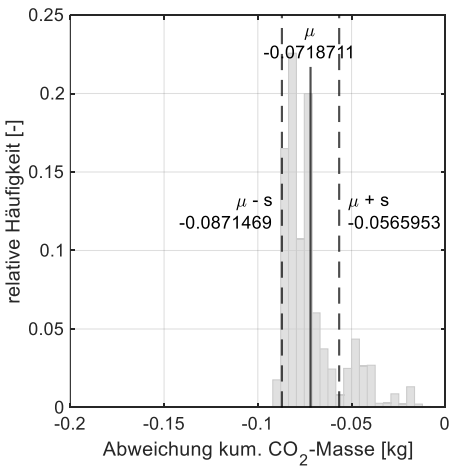
Regressionsplot Abgasmassenstrom in v-FW



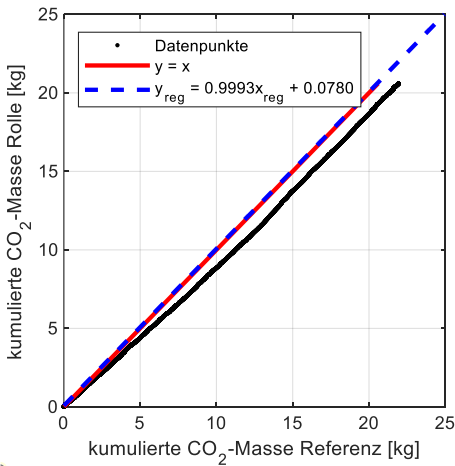
Statistische Auswerteergebnisse Abgasmassenstrom										
Signal	R ²	Diff_Mean	Diff_Std	Integral _{abs}	Steigung	Y _{stand}	KK _{max}	Lag _{KKmax}	KK _{lag0}	
LS_F_mS_1	0.8863	2,85	8,22	3174158,83	0,9041	0,0513	0,9857	-46	0,98514	
LS_F_mS_2	0.8604	1,13	9,33	3386293,18	0,9398	0,0583	0,9829	-82	0,98142	
LS_F_mS_3	0.8532	1,03	9,60	3282395,39	0,9386	0,0644	0,9808	-45	0,98042	
LS_F_oS_1	0.8619	2,20	9,19	3466928,88	0,9221	0,0457	0,9815	-1	0,98148	
LS_F_oS_2	0.8591	4,36	9,14	3826541,00	0,8542	0,0783	0,9816	13	0,98151	
LS_F_oS_3	0.8571	4,96	9,24	3970879,45	0,8268	0,1036	0,9816	21	0,98150	
LS_J_mS_1	0.8984	2,63	7,79	2932867,50	0,9229	0,0271	0,9874	-50	0,98662	
LS_J_mS_2	0.9048	2,89	7,51	2942065,84	0,9114	0,0368	0,9884	-52	0,98763	
LS_J_mS_3	0.9052	3,81	7,55	3182282,94	0,8716	0,0702	0,9889	-59	0,98793	
LS_J_mS_4	0.9036	4,21	7,63	3347062,93	0,8633	0,0687	0,9886	-55	0,98772	
LS_J_mS_5	0.9005	4,26	7,73	3384156,99	0,8652	0,0628	0,9882	-57	0,98725	
LS_J_oS_1	0.8672	5,44	8,95	4016039,23	0,8221	0,0919	0,9834	-43	0,98285	
LS_J_oS_2	0.8682	5,34	8,93	4001066,21	0,8193	0,1016	0,9836	-44	0,98307	
LS_J_oS_3	0.8702	5,54	8,92	4035937,70	0,8086	0,1131	0,9840	-46	0,98345	
v-α_J_1	0.9836	0,79	3,17	1002728,95	0,9599	0,0381	0,9980	10	0,99797	
v-α_J_2	0.9827	0,93	3,41	1184337,44	0,9349	0,0779	0,9978	9	0,99779	
v-α_J_3	0.9862	1,01	3,15	1128424,84	0,9330	0,0780	0,9982	8	0,99820	
v-α_J_4	0.9831	0,94	3,38	1176297,14	0,9343	0,0782	0,9979	12	0,99784	
v-FW_J_1	0.9874	1,82	3,01	1445924,62	0,9359	0,0383	0,9985	11	0,99843	
v-FW_J_2	0.9895	2,06	2,81	1458894,11	0,9362	0,0276	0,9988	9	0,99870	
v-FW_J_3	0.9877	1,84	3,02	1456819,65	0,9326	0,0432	0,9985	6	0,99847	
v-FW_J_4	0.9900	0,68	2,56	926292,86	0,9574	0,0476	0,9988	5	0,99874	

B8 Statistische Auswertung kumulierte CO₂-Masse

Histogramm kumulierte CO₂-Masse in v-FW



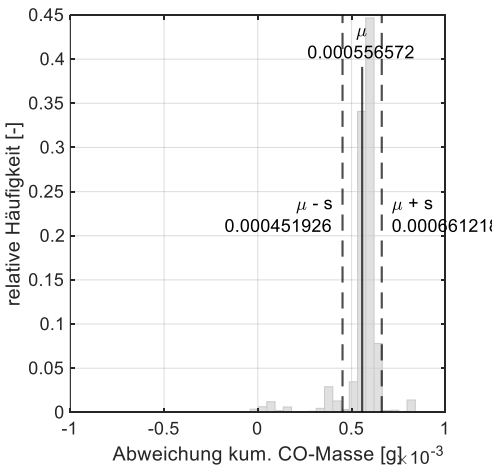
Regressionsplot kumulierte CO₂-Masse in v-FW



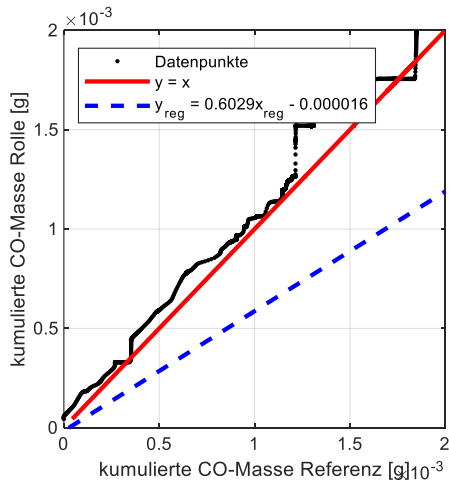
Statistische Auswerteergebnisse kumulierte CO ₂ -Masse										
Signal	R ²	Diff_Mean	Diff_Std	Integral _{abs}	Steigung	Y _{stand}	KK _{max}	Lag _{KKmax}	KK _{lag0}	
LS_F_mS_1	0,9992	0,76	0,49	451239,93	0,9367	-0,0320	0,9997	0	0,99974	
LS_F_mS_2	0,9992	0,45	0,25	267915,77	0,9790	-0,0387	0,9997	0	0,99969	
LS_F_mS_3	0,9992	0,40	0,23	235751,70	0,9834	-0,0363	0,9997	0	0,99971	
LS_F_oS_1	0,9985	0,38	0,30	229974,90	0,9819	-0,0328	0,9996	0	0,99959	
LS_F_oS_2	0,9985	0,90	0,65	534594,01	0,9155	-0,0262	0,9996	0	0,99963	
LS_F_oS_3	0,9983	0,93	0,67	552241,24	0,9126	-0,0269	0,9996	0	0,99957	
LS_J_mS_1	0,9989	0,64	0,39	379140,51	0,9538	-0,0353	0,9997	0	0,99966	
LS_J_mS_2	0,9990	0,73	0,45	431415,38	0,9438	-0,0358	0,9997	0	0,99967	
LS_J_mS_3	0,9990	1,33	0,96	789405,35	0,8668	-0,0290	0,9997	0	0,99970	
LS_J_mS_4	0,9988	1,48	1,07	879899,24	0,8523	-0,0335	0,9996	0	0,99964	
LS_J_mS_5	0,9990	1,49	1,08	885005,42	0,8497	-0,0315	0,9997	0	0,99968	
LS_J_oS_1	0,9983	1,59	1,23	946271,74	0,8297	-0,0214	0,9996	0	0,99960	
LS_J_oS_2	0,9983	1,63	1,26	966145,36	0,8255	-0,0211	0,9996	0	0,99960	
LS_J_oS_3	0,9983	1,63	1,26	970728,73	0,8260	-0,0229	0,9996	0	0,99959	
v-α_J_1	1,0000	-0,04	0,03	23375,49	0,9979	0,0076	1,0000	0	0,99999	
v-α_J_2	1,0000	0,03	0,09	36119,27	0,9888	0,0094	1,0000	0	0,99999	
v-α_J_3	1,0000	-0,00	0,10	48933,35	0,9870	0,0160	1,0000	0	0,99997	
v-α_J_4	1,0000	-0,01	0,06	30613,49	0,9931	0,0094	1,0000	0	0,99999	
v-FW_J_1	1,0000	0,24	0,23	142354,87	0,9679	0,0051	1,0000	0	1,00000	
v-FW_J_2	1,0000	0,26	0,25	157566,65	0,9647	0,0054	1,0000	0	1,00000	
v-FW_J_3	1,0000	0,24	0,24	146244,53	0,9666	0,0058	1,0000	0	1,00000	
v-FW_J_4	1,0000	-0,07	0,02	42691,39	0,9993	0,0110	1,0000	0	0,99999	

B9 Statistische Auswertung kumulierte CO-Masse

Histogramm kumulierte CO-Masse in v-FW



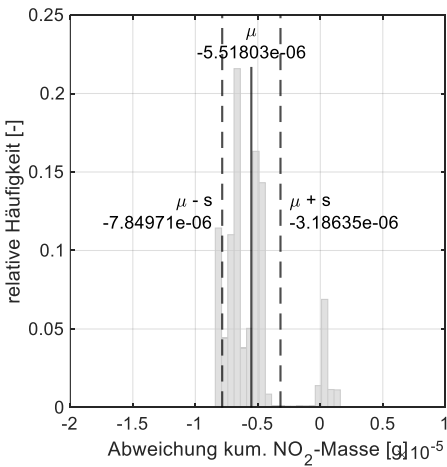
Regressionsplot kumulierte CO-Masse in v-FW



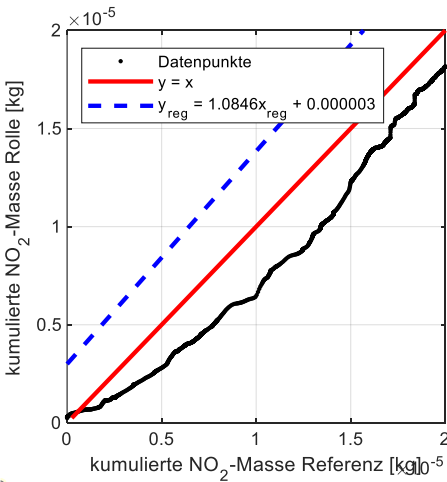
Statistische Auswerteergebnisse kumulierte CO-Masse										
Signal	R ²	Diff_Mean	Diff_Std	Integral _{abs}	Steigung	Y _{stand}	KK _{max}	Lag _{KKmax}	KK _{lag0}	
LS_F_mS_1	0,8877	-0,00	0,00	144,12	1,2217	-0,1934	0,9979	0	0,99789	
LS_F_mS_2	0,7416	0,00	0,00	574,98	0,6396	-0,9026	0,9576	0	0,95762	
LS_F_mS_3	0,7363	0,00	0,00	468,46	0,9570	-1,5505	0,9542	0	0,95417	
LS_F_oS_1	0,7951	0,00	0,00	615,60	0,3582	-0,2966	0,9878	0	0,98780	
LS_F_oS_2	0,2310	0,00	0,00	762,84	0,0982	-0,0863	0,8710	0	0,87070	
LS_F_oS_3	0,3180	0,00	0,00	747,34	0,1354	-0,1254	0,9041	0	0,90406	
LS_J_mS_1	0,7984	0,00	0,00	374,80	0,8319	-1,0231	0,9868	0	0,98677	
LS_J_mS_2	0,7044	0,00	0,00	510,24	0,6670	-0,8417	0,9717	0	0,97167	
LS_J_mS_3	0,9198	-0,00	0,00	506,01	2,0573	-0,9957	0,9969	0	0,99686	
LS_J_mS_4	0,6699	0,00	0,00	550,93	0,8589	-1,3975	0,9212	0	0,92122	
LS_J_mS_5	0,7868	0,00	0,00	288,35	1,0777	-1,6270	0,9826	0	0,98262	
LS_J_oS_1	0,6303	0,00	0,00	483,26	0,6527	-0,7357	0,9725	0	0,97255	
LS_J_oS_2	0,6399	0,00	0,00	573,03	0,6746	-0,9809	0,9388	0	0,93883	
LS_J_oS_3	0,5708	0,00	0,00	566,16	0,7449	-1,1346	0,9158	0	0,91583	
v-α_J_1	0,9545	-0,00	0,00	73,29	0,9851	0,5531	0,9993	0	0,99926	
v-α_J_2	0,8394	0,00	0,00	566,79	0,3989	-0,2664	0,9932	0	0,99324	
v-α_J_3	0,8685	0,00	0,00	566,29	0,3207	-0,0575	0,9973	0	0,99726	
v-α_J_4	0,9577	0,00	0,00	236,53	0,6669	0,1927	0,9993	0	0,99934	
v-FW_J_1	0,8626	0,00	0,00	604,69	0,2819	-0,0762	0,9967	0	0,99674	
v-FW_J_2	0,6193	0,00	0,00	728,43	0,1354	-0,0788	0,9809	0	0,98095	
v-FW_J_3	0,6226	0,00	0,00	730,51	0,1479	-0,1105	0,9752	0	0,97516	
v-FW_J_4	0,9290	0,00	0,00	330,63	0,6029	-0,0475	0,9988	0	0,99877	

B10 Statistische Auswertung kumulierte NO₂-Masse

Histogramm kumulierte NO₂-Masse in v-FW



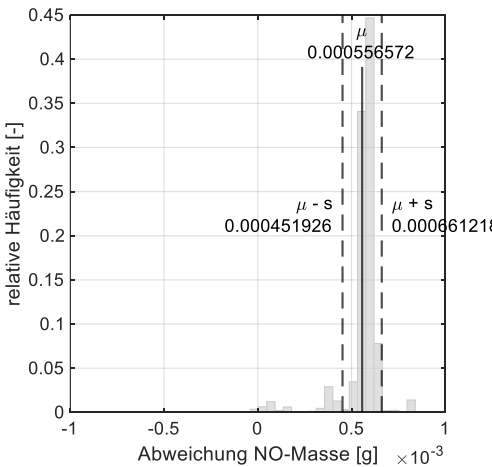
Regressionsplot kumulierte NO₂-Masse in v-FW



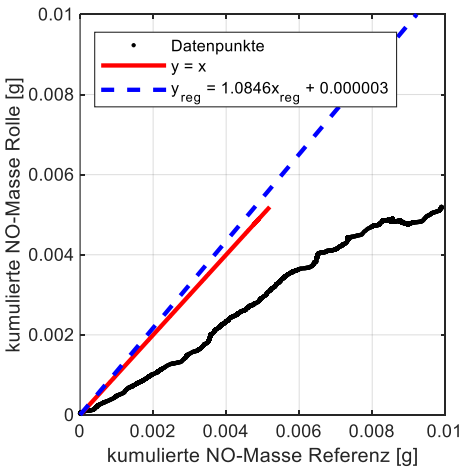
Statistische Auswerteergebnisse kumulierte NO ₂ -Masse										
Signal	R ²	Diff_Mean	Diff_Std	Integral _{abs}	Steigung	Y _{stand}	KK _{max}	Lag _{KKmax}	KK _{lag0}	
LS_F_mS_1	0,9967	0,00	0,00	2,34	0,9204	-0,0886	0,9994	0	0,99945	
LS_F_mS_2	0,9506	-0,00	0,00	27,23	2,6552	-0,2058	0,9930	0	0,99300	
LS_F_mS_3	0,9873	-0,00	0,00	12,50	1,3412	0,4604	0,9959	0	0,99595	
LS_F_oS_1	0,9892	0,00	0,00	2,58	0,8685	-0,0038	0,9989	0	0,99889	
LS_F_oS_2	0,9606	-0,00	0,00	5,27	1,4904	-0,5659	0,9862	0	0,98617	
LS_F_oS_3	0,9816	0,00	0,00	7,23	0,8265	-0,4112	0,9894	0	0,98938	
LS_J_mS_1	0,9934	0,00	0,00	4,96	0,8389	-0,2049	0,9978	0	0,99781	
LS_J_mS_2	0,9883	0,00	0,00	8,06	0,7491	-0,3486	0,9919	0	0,99190	
LS_J_mS_3	0,9421	-0,00	0,00	18,25	1,6258	0,3844	0,9931	0	0,99305	
LS_J_mS_4	0,9640	-0,00	0,00	6,69	1,6560	-0,6895	0,9822	0	0,98221	
LS_J_mS_5	0,9849	-0,00	0,00	2,64	1,2546	-0,3493	0,9953	0	0,99527	
LS_J_oS_1	0,9936	0,00	0,00	3,95	0,9985	-0,3994	0,9942	0	0,99420	
LS_J_oS_2	0,9891	0,00	0,00	6,26	0,9054	-0,4598	0,9898	0	0,98980	
LS_J_oS_3	0,9882	0,00	0,00	6,74	0,8819	-0,4633	0,9889	0	0,98893	
v-α_J_1	0,9873	0,00	0,00	3,67	0,6551	0,3856	0,9955	0	0,99546	
v-α_J_2	0,8758	-0,00	0,00	66,60	3,2786	0,5587	0,9852	0	0,98516	
v-α_J_3	0,8817	-0,00	0,00	34,97	2,1218	0,5559	0,9862	0	0,98622	
v-α_J_4	0,9774	-0,00	0,00	13,58	1,3910	0,4522	0,9953	0	0,99529	
v-FW_J_1	0,9924	0,00	0,00	1,90	1,0507	-0,2894	0,9969	0	0,99691	
v-FW_J_2	0,9940	0,00	0,00	4,08	0,9573	-0,3393	0,9957	0	0,99567	
v-FW_J_3	0,9938	0,00	0,00	2,97	0,9679	-0,2456	0,9976	0	0,99759	
v-FW_J_4	0,9885	-0,00	0,00	3,33	1,0846	0,1636	0,9985	0	0,99850	

B11 Statistische Auswertung kumulierte NO-Masse

Histogramm kumulierte NO-Masse in v-FW



Regressionsplot kumulierte NO-Masse in v-FW



Statistische Auswerteergebnisse kumulierte NO-Masse										
Signal	R ²	Diff_Mean	Diff_Std	Integral _{abs}	Steigung	Y _{stand}	KK _{max}	Lag _{KKmax}	KK _{lag0}	
LS_F_mS_1	0,9819	0,00	0,00	1659,68	0,5620	0,0350	0,9990	0	0,99896	
LS_F_mS_2	0,9881	0,00	0,00	1533,25	0,7251	-0,3185	0,9972	0	0,99724	
LS_F_mS_3	0,9834	0,00	0,00	1950,12	0,5983	-0,2530	0,9968	0	0,99684	
LS_F_oS_1	0,6287	0,00	0,00	2258,73	0,2674	0,3897	0,9786	0	0,97856	
LS_F_oS_2	0,9743	0,00	0,00	1983,50	0,5397	-0,1249	0,9978	0	0,99776	
LS_F_oS_3	0,9713	0,00	0,00	2263,67	0,5143	-0,2317	0,9952	0	0,99520	
LS_J_mS_1	0,9708	0,00	0,00	803,52	0,7824	0,0343	0,9983	0	0,99832	
LS_J_mS_2	0,9713	0,00	0,00	961,17	0,7741	-0,0592	0,9982	0	0,99820	
LS_J_mS_3	0,9752	-0,00	0,00	821,24	1,3493	-0,3647	0,9973	0	0,99730	
LS_J_mS_4	0,9795	-0,00	0,00	664,26	1,4234	-0,7863	0,9931	0	0,99309	
LS_J_mS_5	0,9860	-0,00	0,00	654,01	1,3537	-0,5309	0,9969	0	0,99686	
LS_J_oS_1	0,9355	0,00	0,00	301,78	1,0233	-0,1022	0,9957	0	0,99574	
LS_J_oS_2	0,9281	0,00	0,00	372,82	0,9861	-0,1420	0,9950	0	0,99502	
LS_J_oS_3	0,9152	0,00	0,00	484,13	0,9455	-0,1411	0,9941	0	0,99406	
v-α_J_1	0,8892	0,00	0,00	931,97	0,5241	0,7760	0,9911	0	0,99108	
v-α_J_2	0,9960	0,00	0,00	709,10	0,7704	0,1438	0,9996	0	0,99962	
v-α_J_3	0,9879	0,00	0,00	880,75	0,6956	0,2385	0,9989	0	0,99889	
v-α_J_4	0,9455	0,00	0,00	970,48	0,5702	0,5705	0,9949	0	0,99490	
v-FW_J_1	0,9344	0,00	0,00	1540,35	0,4645	0,4091	0,9947	0	0,99466	
v-FW_J_2	0,9571	0,00	0,00	1775,89	0,4440	0,2803	0,9964	0	0,99643	
v-FW_J_3	0,9508	0,00	0,00	1745,78	0,4506	0,2847	0,9962	0	0,99617	
v-FW_J_4	0,6662	0,00	0,00	1337,01	0,3497	0,9624	0,9792	0	0,97918	

Anhang C

Dieser Abschnitt beinhaltet die statistischen Auswertungen für die in Kapitel 7 definierten Auswertemethoden aus Abschnitt 7.5.1.

Die nachfolgenden Kapitel zeigen die ermittelten statistischen Kennwerte und grafischen Darstellungen für folgende Messgrößen:

- C1: Fahrzeuggeschwindigkeit
- C2: Gaspedalstellung
- C3: Zugkraft
- C4: Motordrehzahl
- C5: Aktueller Gang

Der Inhalt gliedert sich in:

- Grafische Darstellungen (einfach am Beispiel $v-\alpha$):
 - Histogramm der Differenzfunktion
 - Regressionsplot
- Tabelle mit Ergebnissen (für alle Testkonfigurationen und Wiederholungen):
 - Bestimmtheitsmaß R^2 (Determinationskoeffizient) mittels linearer Regression zwischen Referenz und Reproduktion
 - Mittelwert und Standardabweichung der Differenz von Referenz und Reproduktion
 - Absolutes Integral zwischen der Differenz von Referenz und Reproduktion
 - Steigung und standardisierter Achsenabschnitt der Regressionsplots
 - Kreuzkorrelationswerte zwischen Referenz Reproduktion (maximaler und erreichter Wert, Lag)

C1 Modellparameter

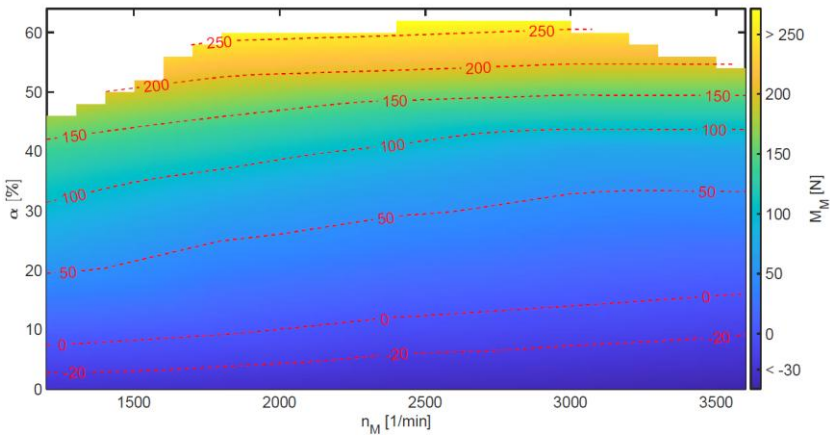
Geometrische Daten Gesamtfahrzeug:

Parameter	Zahlenwert	Quelle
Fahrzeugmasse (inklusive Messtechnik)	$m_{Fzg} = 1718 \text{ kg}$	Gemessen
Fahwiderstandskoeffizienten	$A = 160,9 \text{ N}$ $B = -0,5549 \frac{\text{N} \cdot \text{h}}{\text{km}}$ $C = 0,04628 \frac{\text{N} \cdot \text{h}^2}{\text{km}^2}$	(Czagalik, 2020)
Radstand	$l_R = 2786 \text{ mm}$	ECE-Dokumentation
Schwerpunkt in x-Richtung	$x_S = 1500 \text{ mm}$	geschätzt
Schwerpunkt in y-Richtung	$y_S = 600 \text{ mm}$	geschätzt
Dynamischer Radhalbmesser	$r_{dyn} = 325,8 \text{ mm}$	(Czagalik, 2020)
Massenträgheitsmoment pro Rad	$J_{Rad} = 1,3218 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	(Heinzelmann, 2021)

Motorparameter:

Parameter	Zahlenwert	Quelle
Hubraum	$V_H = 1968 \text{ cm}^3$	ECE-Dokumentation
Untere Drehzahlgrenze	$n_{min} = 750 \frac{1}{\text{min}}$	Gemessen
Massenträgheit Motor	$J_{Mot} = 0,2728 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	(Heinzelmann, 2021)
Drehzahl bei Simulationsbeginn	$n_{start} = 750 \frac{1}{\text{min}}$	(Haidar, 2021)

Drehmomentkennfeld (Heinzelmann, 2021)



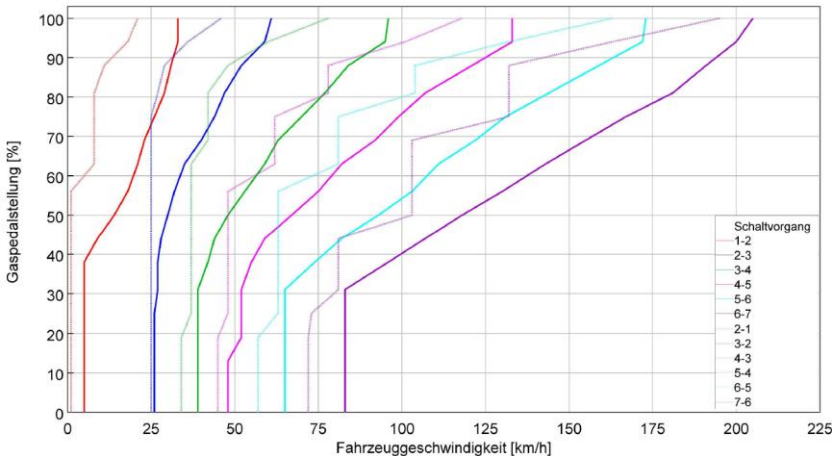
Motorschleppmomentkennlinie (Heinzelmann, 2021)

n [1/min]	M [Nm]
1200	-37,84
1800	-39,22
2400	-40,38
3000	-42,34
3600	-43,46

Getriebeparameter:

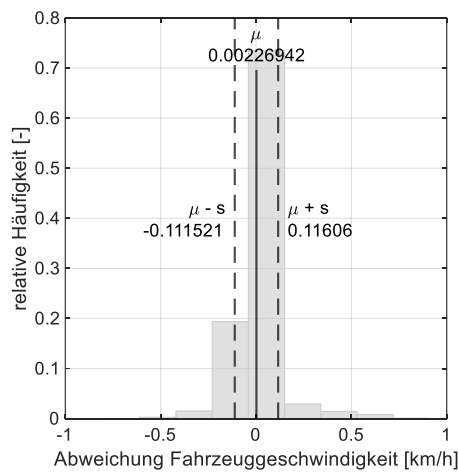
Parameter	Zahlenwert	Quelle
Übersetzung Einzelgang inklusive Achsdifferential	1. Gang: $i_1 = 16,02$ 2. Gang: $i_2 = 9,00$ 3. Gang: $i_3 = 5,20$ 4. Gang: $i_4 = 3,95$ 5. Gang: $i_5 = 3,01$ 6. Gang: $i_6 = 2,37$ 7. Gang: $i_7 = 1,84$	(Heinzelmann, 2021)
Massenträgheitsmoment Getriebe inklusive Achsdifferential und Wellen	$0,8829 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	(Heinzelmann, 2021)
Schaltzeit	$t_{\text{Schalt}} = 60 \text{ ms}$	geschätzt
Getriebewirkungsgrad	$\eta_G = 0,996$	geschätzt

Hoch- und Rückschaltkennlinien (Czogalik, 2020)

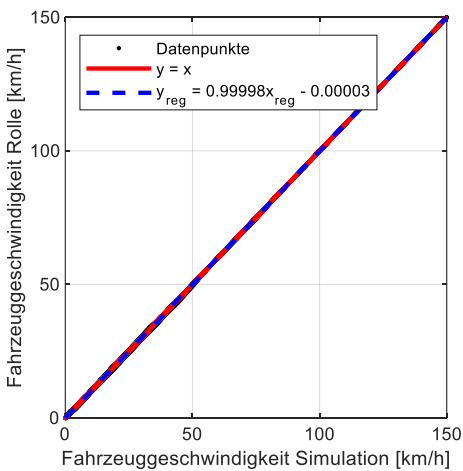


C2 Statistische Auswertung Fahrzeuggeschwindigkeit

Histogramm Fahrzeuggeschwindigkeit in v- α



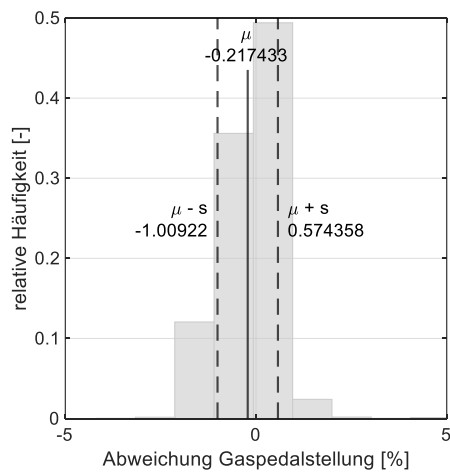
Regressionsplot Fahrzeuggeschwindigkeit in v- α



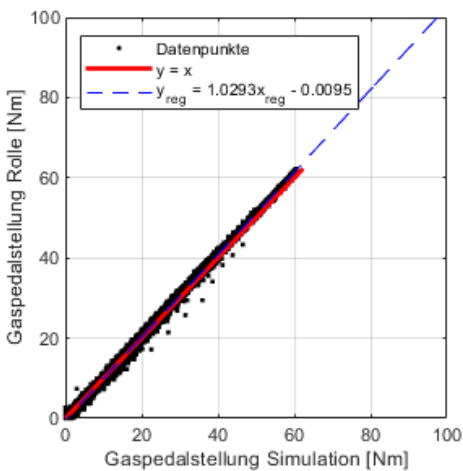
Statistische Auswerteergebnisse Fahrzeuggeschwindigkeit									
Signal	R ²	Diff_Mean	Diff_Std	Integral _{abs}	Steigung	Y _{stand}	KK _{max}	Lag _{KKmax}	KK _{lag0}
v-α_J_1	0,99999	0,0023	0,1138	11498,18	0,99998	-0,00003	1	-5	1
v-α_J_2	0,99999	0,0023	0,1206	12336,41	0,99998	-0,00003	1	-6	1
v-α_J_3	0,99999	0,0023	0,1216	12458,64	0,99998	-0,00003	1	-6	1

C3 Statistische Auswertung Gaspedalstellung

Histogramm Gaspedalstellung in v- α



Regressionsplot Gaspedalstellung in v- α

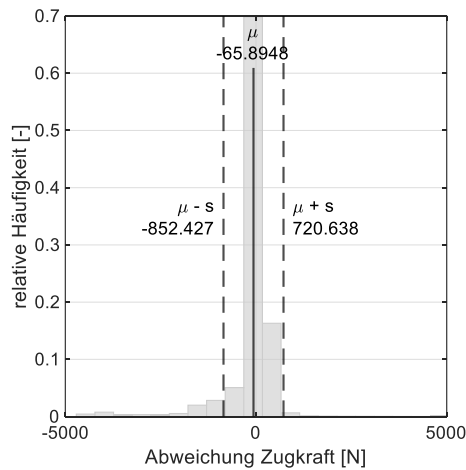


└

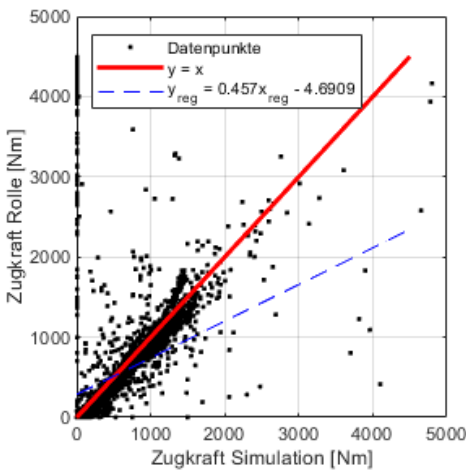
Statistische Auswerteergebnisse Gaspedalstellung									
Signal	R ²	Diff_Mean	Diff_Std	Integral _{abs}	Steigung	Y _{stand}	KK _{max}	Lag _{KKmax}	KK _{lag0}
v-α_J_1	0,99854	-0,2174	0,7918	103975,38	1,0293	-0,0095	0,9997	-7	0,99966
v-α_J_2	0,99854	-0,2041	0,6851	101829,21	1,0295	-0,0099	0,9999	-8	0,99978
v-α_J_3	0,99913	-0,205	0,6984	103812,06	1,0296	-0,0099	0,9999	-8	0,99976

C4 Statistische Auswertung Zugkraft

Histogramm Zugkraft in v-α



Regressionsplot Zugkraft in v-α

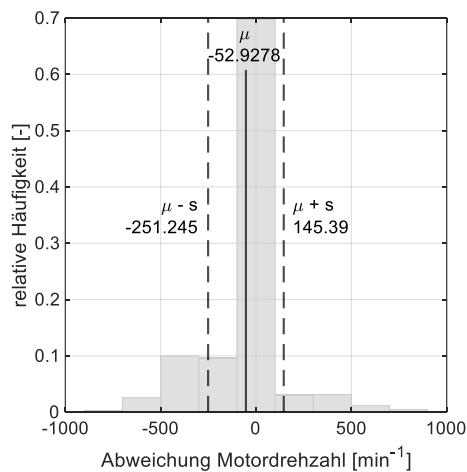


==

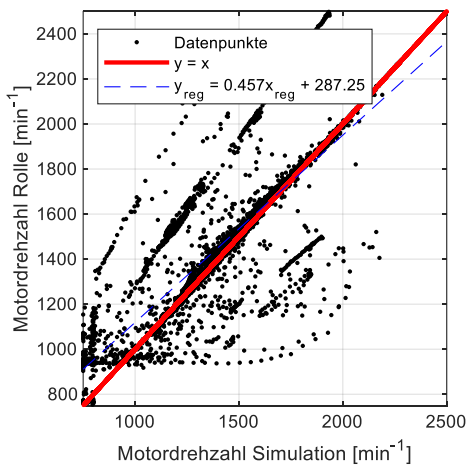
Statistische Auswerteergebnisse Zugkraft									
Signal	R ²	Diff_Mean	Diff_Std	Integral _{abs}	Steigung	Y _{stand}	KK _{max}	Lag _{KKmax}	KK _{lag0}
v-α_J_1	0,28493	-65,8948	789,5324	59056067,43	0,4572	-4,6909	0,6360	34	0,6337
v-α_J_2	0,28312	-64,2174	782,5968	58806770,83	0,4600	-4,6165	0,6392	35	0,6369
v-α_J_3	0,28762	-67,5277	783,1656	58882893,17	0,4553	-4,7550	0,6382	35	0,6355

C5 Statistische Auswertung Motordrehzahl

Histogramm Motordrehzahl in v- α



Regressionsplot Motordrehzahl in v- α

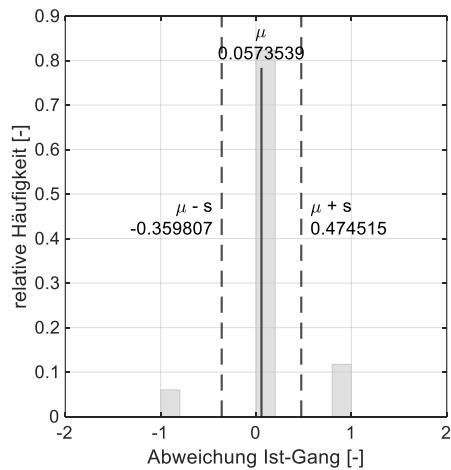




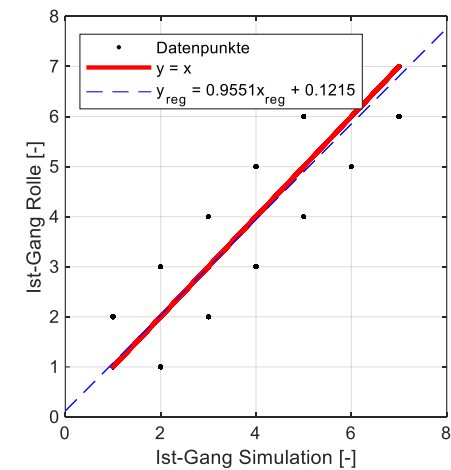
Statistische Auswerteergebnisse Motordrehzahl									
Signal	R ²	Diff_Mean	Diff_Std	Integral _{abs}	Steigung	Y _{stand}	KK _{max}	Lag _{KKmax}	KK _{lag0}
v-α_J_1	0,72200	-52,9278	198,3177	22312675,68	0,8317	287,2477	0,9907	0	0,9907
v-α_J_2	0,72314	-48,3726	197,9762	22283742,77	0,8333	280,3911	0,9908	0	0,9908
v-α_J_3	0,72394	-53,1646	197,6796	22352998,29	0,8339	284,3879	0,9908	0	0,9908

C6 Statistische Auswertung Ist-Gang

Histogramm Ist-Gang in v- α



Regressionsplot Ist-Gang in v- α



Statistische Auswerteergebnisse Ist-Gang									
Signal	R ²	Diff_Mean	Diff_Std	Integral _{abs}	Steigung	Y _{stand}	KK _{max}	Lag _{KKmax}	KK _{lag0}
v-α_J_1	0,96105	0,0723	0,4176	34493	0,9551	0,121497799	0,9963	25	0,99631
v-α_J_2	0,96110	0,0574	0,4172	34044	0,9622	0,106011968	0,9964	25	0,99631
v-α_J_3	0,96126	0,0711	0,4165	34277	0,9552	0,122339298	0,9964	23	0,99633

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: **Sven Nikolaus Charles Cortès**

Geburtsdatum: **03.08.1988**

Staatsangehörigkeit: **Deutsch**

Familienstand: **verheiratet**

Bildungsgang

2019-2025	Karlsruhe Institut für Technologie Institut für Produktentwicklung Doktorand bei Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers
2013-2015	Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften Braunschweig/Wolfenbüttel Alternative Antriebe in der Fahrzeugtechnik Master of Engineering
2007-2010	Duale Hochschule Baden-Württemberg Maschinenbau Fahrzeug-System-Engineering mit Vertiefung Antrieb und Fahrwerk Bachelor of Engineering
1998-2007	Kreisgymnasium Riedlingen Allgemeine Hochschulreife

Berufstätigkeit

10/2022 – jetzt	Rolls-Royce Power Systems AG Friedrichshafen Chief Validation Engineer
10/2018-09/2022	Technische Hochschule Ulm Institut für Fahrzeugsystemtechnik Wissenschaftlicher Mitarbeiter
04/2011-09/2018	Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG Entwicklungszentrum Weissach, Antriebsentwicklung Entwicklungsingenieur
09/2007-10/2010	Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG Entwicklungszentrum Weissach, Antriebsentwicklung Dualer Student