

John Köber

**Ein Beitrag zur effizienteren Validierung der
Applikation von Doppelkupplungsgetrieben im
Kontext des IPEK-X-in-the-Loop-Ansatzes**

A contribution to a more efficient validation of the
application of dual clutch transmissions in the
context of the IPEK-X-in-the-Loop approach

Band 170

Systeme ■ Methoden ■ Prozesse

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

John Köber

**Ein Beitrag zur effizienteren Validierung der Applikation
von Doppelkupplungsgetrieben im Kontext des IPEK-X-
in-the-Loop-Ansatzes**

A contribution to a more efficient validation of the application
of dual clutch transmissions in the context of the IPEK-X-in-
the-Loop approach

Band 170

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

Copyright IPEK – Institut für Produktentwicklung, 2023
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Die Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft
Alle Rechte vorbehalten

Druck Stolzenberger Druck und Werbung GmbH & Co. KG, Leimen
06224-7697915

ISSN 1615-8113

Ein Beitrag zur effizienteren Validierung der Applikation von Doppelkupplungsgetrieben im Kontext 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

Dipl.-Ing. John Köber

Tag der mündlichen Prüfung:	27.06.2023
Hauptreferent:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Hans-Christian Reuss

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 170

Die moderne Antriebstechnik für Fahrzeuge hat in den letzten 20 Jahren eine große Vielfalt an Antriebsarchitekturen hervorgebracht. Begründet wird dies durch verschiedene Trends. Im Antriebsstrang mit einem konventionellen Verbrennungsmotor ist einer dieser zentralen Megatrends die Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs und damit auch die Reduzierung der Treibhausgas-Emissionen, insbesondere des CO₂. Aber auch andere Trends haben hier eine Rolle gespielt. Über die Jahre ist ein steigender Anspruch bezüglich des Komforts der Fahrzeuge zu beobachten. Gleichzeitig gibt es den Trend hin zu eher größeren Fahrzeugen, auch mit einer speziellen Gestalt-Ausprägung, den sogenannten SUVs. Der steigende Komfortanspruch mit dem gleichzeitig größer werden der Fahrzeuge führt dann natürlich auch zu höheren Gewichten, womit für eine entsprechende Fahrleistung höhere Motorisierungen und gleichzeitig Antriebsstränge mit großer Spreizung notwendig sind. Alle diese Trends zusammengefasst haben dazu geführt, dass die reinen manuell geschalteten Antriebsstränge mehr und mehr an Bedeutung verlieren und eher im Segment der kleineren und kostengünstigeren Fahrzeuge noch eine hohe Verbreitung haben. In den anderen Segmenten ist die Automatisierung der Getriebefunktion, das heißt, eine automatisierte Schaltung, der klare Trend im Bereich konventioneller Antriebsstränge. Eine Automatisierung ist dann natürlich auch verbunden mit einer automatisierten Anfahrt aus dem Stand. Hierzu sind zwei grundsätzliche Konzepte anwendbar. Das eine Konzept ist die Verwendung eines Drehmoment-Wandlers für die Anfahrfunktion und von Kupplungen und Bremsen im Getriebe für die Automatisierung der Schaltungen ohne Zugkraftunterbrechung. Die Vermeidung einer Zugkraftunterbrechung – das heißt, beim Gangwechsel ist permanent eine Drehmoment führende Verbindung zwischen Antriebsmotor und Abtrieb an den Rädern vorhanden – ist für die Komfortausprägung von großer Bedeutung. Die zweite Architektur verwendet ein sogenanntes Doppelkupplungskonzept. Hierbei wird der Wandler ersetzt durch ein Kupplungssystem mit zwei getrennt voneinander schaltbaren Strängen. Hierbei können dann die Getriebe deutlich vereinfacht werden, da sie durch konventionelle Synchronisationen schaltbar werden und da bei Doppelkupplungsgetrieben zwei Leistungsstränge im Getriebe realisiert sind. Die Anfahrt erfolgt über eine der beiden Kupplungen, die man dann auch als Anfahrkupplung bezeichnet. Der Schaltvorgang erfolgt durch Überschneidungsschaltung in den beiden Kupplungen, wobei im aufnehmenden Getriebestrang vor der Zuschaltung des Drehmomentes bereits ein Gang eingelegt wird. Ein Schaltvorgang in einem solchen System ist durchaus komplex. Das ganze System ist als mechatronisches System gestaltet. Die Ansteuerungen, sowohl der Kupplungen als auch der Gangwechsel erfolgt mechatronisch. Die Abstimmung dieser Prozesse durch die entsprechende Steuerungssoftware ist ein komplexer Prozess, der insbesondere eine umfangreiche Validierung der Applikation erfordert. Hierbei werden durch Feinabstimmungen die Parametrisierungen und Prozesse aufeinander abgestimmt. Dies erfolgt heute oft auch noch im Fahrversuch. Um den Prozess effizienter zu machen, ist das Ziel, die Steuerung zumindest in großen Teilen bereits auf Prüfständen zu validieren. Hierzu kann der sogenannte *IPEK-X-in-the-Loop-Ansatz* eingesetzt werden, bei dem auf entsprechend geeigneten Prüfständen sowohl die Antriebsmaschine – typischerweise ein Verbrennungsmotor – als auch die Abtriebe durch Elektromotoren repräsentiert werden, die dann jeweils mit entsprechenden Simulationsmodellen für Fahrzeug, Straße und

Motor angesteuert werden. Die dem Straßenversuch am nächsten kommende Konfiguration ist dabei der Betrieb eines Fahrzeugs auf einem Rollen- oder Fahrzeugprüfstand mit E-Maschinen an den Rädern. So ist es möglich, die Applikation des Doppelkupplungsgetriebes bereits auf dem Prüfstand zu validieren. Um dies effizient und strukturiert tun zu können, hat Herr Dr.-Ing. John Köber in seiner Arbeit eine systematische Vorgehensweise und entsprechende Methodik erarbeitet und verifiziert. Die Arbeit leistet einen wichtigen Beitrag zur weiteren Entwicklung des IPEK-X-in-the-Loop Ansatzes und kann auch unmittelbar in der Unternehmenspraxis eingesetzt werden.

Juni, 2023

Albert Albers

Kurzfassung

Die Komplexität in der Fahrzeugentwicklung hat in den vergangenen Jahren signifikant zugenommen, wohingegen die Entwicklungszeiten neuer Produktgenerationen stetig reduziert werden. Dies hat zur Folge, dass im automobilen Umfeld eine vollumfängliche Validierung mittels physischer Fahrversuche kaum mehr oder lediglich mit sehr hohem Kosten- und Zeitaufwand möglich ist. Besonders deutlich wird dies am Beispiel der Getriebeapplikation, deren Funktionsumfang in der jüngeren Vergangenheit deutlich zugenommen hat. Durch eine zunehmende Anzahl an Produktlinien und -derivaten mit einer Vielzahl an Motor-Getriebe Varianten erhöht sich der Applikations- und somit auch der Validierungsaufwand entsprechend. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass die Getriebeapplikation maßgeblichen Einfluss auf das Fahrverhalten und somit auf die gesamtheitliche Produktwahrnehmung des Kunden hat, ist deren Validierung besonders relevant für den Erfolg des Produktes am Markt. Um dem Anspruch einer vollständigen Produktvalidierung mit reduziertem Kosten- und Zeitaufwand gerecht zu werden, soll diese Arbeit einen Beitrag zur effizienteren Validierung der Getriebeapplikation am Beispiel eines Doppelkupplungsgetriebes leisten. Dabei werden sowohl der Schaltablauf als auch die Schaltstrategie, welche die primären Handlungsfelder der Getriebeapplikation darstellen, berücksichtigt. Ausgehend von einem bestehenden produktlinienübergreifenden Manöverkatalog zur Validierung des Schaltablaufs wird zunächst untersucht, ob mittels Simulationen eine automatisierte Vorauswahl der zu validierenden Manöver in Abhängigkeit des jeweiligen Fahrzeuges erfolgen kann. Mit diesem Wissen wird im nächsten Schritt analysiert, inwieweit die resultierenden Manöver des Manöverkatalogs zur Validierung des Schaltablaufs auf Gesamtfahrzeugprüfstände übertragen werden können. Dafür werden, basierend auf einer initialen Machbarkeitsstudie, Ursachen für die potenziellen Abweichungen zum Fahrversuch identifiziert. Die Erkenntnisse werden genutzt, um ein Modell aufzubauen, welches, im Vergleich zu bisher am Prüfstand verwendeten Modellen, die Fahrzeugeigenschaften wesentlich exakter abbilden kann. Abschließend werden die Ergebnisse mit denen des Fahrversuches abgeglichen und Grenzen der Methode daraus abgeleitet. Im Kontext der Schaltstrategie beschäftigt sich die vorliegende Arbeit mit der Fragestellung, inwieweit bestehende Simulationsmodelle für die Schaltstrategie genutzt werden können, um eine Prognose zur subjektiven Wahrnehmung der Applikationsdatenstände zu treffen. Dazu wird, ausgehend von angepassten Datenständen der Getriebeapplikation, zunächst eine Probandenstudie zur Quantifizierung der subjektiven Wahrnehmung durchgeführt. Zusätzlich werden diese Datenstände simuliert, um objektive und vergleichbare Messdaten zu generieren. Die Ergebnisse der Probandenstudie und der Simulation werden im nächsten Schritt für die Modellbildung mittels maschinellen Lernens herangezogen. Abschließend werden zur Validierung der Modellgüte unabhängige Probandenstudien durchgeführt und die Ergebnisse der Modellprognose mit denen der Studie abgeglichen, so dass eine Aussage zu den Grenzen der Methode getroffen werden kann.

Abstract

The complexity of vehicle development has increased significantly in recent years, while the development times of new product generations are constantly being reduced. As a result, a complete validation by means of physical driving tests is no longer feasible in the automotive environment or is only possible at very high cost and time expenditure. This is particularly evident in the example of transmission applications, whose range of functions has increased significantly in the recent years. Due to an increasing number of product lines and derivatives with a multitude of engine-transmission variants, the application and thus also the validation effort increases accordingly. Considering the fact that the transmission application has a significant influence on the driving behavior and thus on the overall product perception of the customer, its validation has a particularly high relevance for the success of the product on the market. In order to meet the requirement of a complete product validation with reduced time expenditure, this thesis shall contribute to a more efficient validation of the transmission application using the example of a dual clutch transmission. Both the shifting sequence and the shifting strategy, which are the primary fields of the transmission application, are taken into account. Based on an existing maneuver catalog for the validation of the shifting sequence, which covers all product lines, it is first investigated whether an automated preselection of the maneuvers to be validated can be made by means of simulations depending on the respective vehicle. With this knowledge, the next step is to analyze to what extent the resulting maneuvers of the maneuver catalog can be transferred to full-vehicle test benches. For this purpose, based on an initial feasibility study, causes for the resulting deviations from the road test will be identified. The findings are used to build a model which, compared to conventional models, can reproduce the vehicle characteristics on the test bench much more accurately. Finally, the results are compared with those of the road test and the limitations of the method are derived. In the context of the shift strategy, this thesis deals with the question to what extent existing simulation models for the shift strategy can be used to make a prognosis regarding the subjective perception of the respective application data sets. For this purpose, starting from adapted data sets of the transmission application, first a test person study is conducted to quantify the subjective perception. In addition, these data sets are simulated in order to generate objective and comparable measurement data. In the next step, the results of the test person study and the simulation are used for model building by means of machine learning. Finally, independent test person studies are conducted to validate the model quality by comparing the results of the model prediction with those of the study. Thus, a statement on the limitations of the method can be made.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Zuge eines kooperativen Forschungsprojektes während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am IPEK – Institut für Produktentwicklung des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) und als Entwicklungsingenieur der Getriebeapplikation bei der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG im Entwicklungszentrum in Weissach. An dieser Stelle möchte all denjenigen einen Dank aussprechen, die mich in unterschiedlichster Form unterstützt und begleitet haben.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers, für die Betreuung meiner Arbeit und dem damit verbundenen Vertrauen, die Forschung am IPEK mitgestalten zu dürfen. Die wertvollen wissenschaftlichen Gespräche und Denkipulse haben entscheidend zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Für die Übernahme des Korreferats sowie den anregenden Austausch zu den Inhalten meiner Arbeit danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans-Christian Reuss sehr. Ebenso bedanke ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Martin Cichon für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Außerordentlich danken möchte ich Herrn Thomas Breiting, der mir das Vertrauen schenkte, dieses herausfordernde Thema in seinem Team bearbeiten zu dürfen. Darüber hinaus haben seine wertvollen Impulse und seine konsequente Beharrlichkeit entscheidend zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Meinen Kollegen der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG sowie der Forschungsgruppe NVH/Systemvalidierung danke ich für die unentwegte Unterstützung und den zielführenden Austausch sowohl innerhalb als auch außerhalb der Wissenschaft. Besonders hervorheben möchte ich dabei die Herren Philipp Hauenstein und Michael Gärtner sowie die Doktoranden der AG-B, welche mir in allen Belangen stets eine wertvolle Stütze waren. Einen großen Dank möchte ich zudem an alle Abschlussarbeitenden richten, die ich im Rahmen meiner Promotion betreuen durfte: Lukas Pflüger, Paula Marta Jacobs, Ercan Karakus, Daniel Felipe Quiroga Mayorga.

Mein abschließend größter Dank gilt den zweifellos wichtigsten Menschen in meinem Leben: meiner Familie und meiner Freundin Fenja. Meinen Eltern Beate und Jörg, meinem Bruder Robin und meinen Großeltern Waltraud und Christian danke ich dafür, dass sie mich in all den herausfordernden Jahren bedingungslos unterstützt und mir durch ihre Liebe und Aufopferungsbereitschaft meine persönliche Entwicklung bis zum heutigen Tag ermöglicht haben. Fenja, dir danke ich ganz besonders dafür, dass du mir durch deine unermüdliche Unterstützung und Motivation sowie deinem nicht selbstverständlichen Zuspruch und Verständnis stets einen unverzichtbaren Rückhalt gegeben hast. Danke, dass du trotz der anfänglichen Entfernung immer für mich da warst.

*„Wenn man nicht hin und wieder scheitert,
dann hat man sich nicht selbst gefordert.“*

Ferry Porsche, 1989

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	i
Abstract	iii
Abbildungsverzeichnis	xiii
Tabellenverzeichnis	xix
Abkürzungsverzeichnis	xix
Formelzeichen	xxiii
1 Einleitung	1
2 Grundlagen und Stand der Forschung	3
2.1 Methodische Grundlagen der Validierung.....	3
2.1.1 Erweitertes ZHO-Modell.....	4
2.1.2 IPEK-X-in-the-Loop-Ansatz.....	5
2.1.3 Manöverbasierte Validierung.....	7
2.1.4 Pull-Prinzip der Validierung.....	8
2.2 Applikation von Getrieben.....	10
2.2.1 Primäre Handlungsfelder der Getriebeapplikation.....	11
2.2.2 Subjektive Wahrnehmung und Fahrbarkeit.....	17
2.3 Ansätze zur Effizienzsteigerung der Applikation.....	21
2.3.1 Alternative Validierungsumgebungen.....	21
2.3.2 Objektivierung der Getriebe-Applikation.....	33
2.4 Prognose der subjektiven Wahrnehmung.....	38
2.4.1 Fahrspaß im Kontext motivationspsychologischer Modelle.....	38
2.4.2 Mathematische Werkzeuge.....	41
3 Motivation, Zielsetzung und Forschungsfragen	53
3.1 Motivation und Forschungslücken.....	53
3.2 Zielsetzung.....	54
3.3 Forschungshypothese und -fragen.....	55
4 Systematische Vorauswahl zu validierender Manöver der Schaltqualität	57
4.1 Analyse des Manöverkatalogs und Identifikation von Potenzialen zur Validierung der Schaltqualität.....	57
4.2 Generierung synthetischer Testfälle für eine simulationsbasierte Vorauswahl.....	62
4.3 Automatisierte Ergebnisanalyse.....	67
4.4 Zwischenfazit.....	70

5	Automatisierte Validierung der Schaltqualität auf Gesamtfahrzeugprüfständen	73
5.1	Manöverplan und Ansteuerung des Fahrzeuges	74
5.1.1	Umsetzung eines Manöverplans als Voraussetzung für die automatisierte Validierung der Schaltqualität	74
5.1.2	Generierung eines zeitoptimierten Manöverplans	81
5.1.3	Entwicklung eines geeigneten Ansatzes zur Ansteuerung des Fahrzeuges auf Gesamtfahrzeugprüfständen	87
5.2	Abbildung der Schaltqualität auf Gesamtfahrzeugprüfständen	93
5.2.1	Machbarkeitsstudie zur Identifikation der Schaltqualität auf Gesamtfahrzeugprüfständen	94
5.2.2	Entwicklung eines geeigneten Modells zur exakteren Berechnung der Längsbeschleunigung in instationären Zuständen	98
5.3	Validierung und Identifikation von Grenzen	102
5.4	Zwischenfazit.....	108
6	Modellbasierte Prognose der subjektiv wahrgenommenen Schaltstrategie 111	
6.1	Probandenstudie	111
6.1.1	Entwicklung der Datenstände zur Analyse der subjektiven Wahrnehmung.....	112
6.1.2	Festlegung der Rahmenbedingungen und Entwicklung eines geeigneten Fragebogens für die Probandenstudie	117
6.1.3	Statistische Auswertung der Probandenstudie	122
6.2	Modellentwicklung zur Prognose der subjektiven Wahrnehmung	126
6.2.1	Identifikation der Fahrweise und deren Einfluss auf die subjektive Bewertung	126
6.2.2	Ableitung singulärer Kennwerte aus zeitabhängigen Simulationsergebnissen	132
6.2.3	Modellbildung zur Prognose der subjektiven Wahrnehmung ...	134
6.3	Validierung und Identifikation von Grenzen	139
6.3.1	Erhebung von Validierungsdaten.....	139
6.3.2	Analyse der Prognosegüte und Identifikation der Grenzen	141
6.4	Zwischenfazit.....	145
7	Zusammenfassung und Ausblick	147
	Literaturverzeichnis.....	I
	Glossar.....	XV
	Anhang.....	XVII
A	Manöverpläne.....	XVII

B	Streudiagramme der Schaltqualitätsbewertung	XX
C	Gewichtete Bewertung potenzieller Fragebogenmodelle	XXIII
D	Fragebögen	XXIV
	D.1 Identifikation geeigneter Items	XXIV
	D.2 Gewichtung der Items	XXVI
	D.3 Probandenstudie	XXVIII
E	Liste aller berücksichtigten Signale zur Modellbildung	XXXI

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Das erweiterte ZHO-Modell nach Albers, Behrendt, Schroeter, Ott und Klingler (2013).....	4
Abbildung 2.2:	IPEK-X-in-the-Loop-Framework anhand der Fahrzeugentwicklung nach Albers et al. (2016)	6
Abbildung 2.3:	Auszug eines beispielhaften Manöverkatalogs nach Albers et al. (2015).....	8
Abbildung 2.4:	Pull-Prinzip der Validierung nach Albers et al. (2015).....	9
Abbildung 2.5:	Zug-Hochschaltung mit Momenteneingriff des Motors [M_1 - Motormoment; M_2 - Getriebe-Ausgangsmoment; M_{K_1/K_2} - Moment an Kupplungen K_1/K_2 ; n_{k_1}/n_{K_2} - Drehzahl an Kupplung K_1/K_2 ; n_1 - Motordrehzahl] (Fischer et al., 2016).....	13
Abbildung 2.6:	Schaltkennfeld eines beispielhaften 6-Gang Automatikgetriebes [H - Hochschaltung, R - Rückschaltung].....	15
Abbildung 2.7:	Schaltpunktverschiebung in Abhängigkeit der Fahrweise (Basis, Sport), der Steigung (Bergab, Eben, Bergauf) und des gewählten Fahrmodi (Normal, Sport, Sport+) [<i>Interpolation rot markiert</i>]	16
Abbildung 2.8:	ATZ-Bewertungsskala in Anlehnung an (Aigner, 1982; Dylla, 2006, 2010).....	19
Abbildung 2.9:	Iterativer Applikationsprozess nach Hasel, Albers und Behrendt (2015).....	20
Abbildung 2.10:	Auszug eines Manöverkatalogs zur Validierung der Schaltqualität von ZHS in Normal und D [<i>Angaben in Prozent entsprechen den Fahrpedalwerten; Einzutragen sind die subjektiven Bewertungen der einzelnen Schaltungen beispielsweise anhand der ATZ-Skala</i>]	23
Abbildung 2.11:	Versuchsaufbau zur ViL-Kalibriermethode mittels emulierter Längsbeschleunigung am IPEK-Akustikrollenprüfstand (Hasel et al., 2015)	25
Abbildung 2.12:	Drehzahlregelung jedes Dynos mit der Winkelgeschwindigkeit des Radmodells als Referenzwert (Bauer, 2011).....	26

Abbildung 2.13:	Abweichung der berechneten Längsbeschleunigung am ViL-Prüfstand im Vergleich zum Fahrversuch in transienten Zuständen (Bauer et al., 2017).....	28
Abbildung 2.14:	Anregung des Fahrzeuges mittels Linearaktuatoren (rot markiert) (in Anlehnung an Bauer et al., 2017)	29
Abbildung 2.15:	Resultierende Längsbeschleunigung in transienten Zuständen am ViL-Prüfstand in Folge der Anregung des Fahrzeuges mittels Linearaktuatoren im Vergleich zum Fahrversuch (Bauer et al., 2017).....	30
Abbildung 2.16:	Güte der Simulationsergebnisse von SimEnv im Kontext der Schaltstrategie im Vergleich zum realen Fahrversuch.....	32
Abbildung 2.17:	Joy and Convenience Modell (Engeln, Engelbrecht & Kieninger, 2008).....	40
Abbildung 2.18:	Struktur eines Decision Trees für Regressionen (Jo, 2021)	48
Abbildung 4.1:	Beispielhafte Vorgaben des Manöverkatalogs zur Bewertung der Schaltqualität anhand der ATZ-Noten für Zug-Hochschaltungen in D (links) und M (rechts)	58
Abbildung 4.2:	Beispielhafte Vorgaben des Manöverkatalogs zur Bewertung der Schaltqualität anhand der ATZ-Noten für Zug-Rückschaltungen in D (links) und M (rechts).....	59
Abbildung 4.3:	Beispielhafte Vorgaben des Manöverkatalogs zur Bewertung der Schaltqualität anhand der ATZ-Noten für Schub-Hochschaltungen in M	60
Abbildung 4.4:	Beispielhafte Vorgaben des Manöverkatalogs zur Bewertung der Schaltqualität anhand der ATZ-Noten für Schub-Rückschaltungen für Schaltungen sowohl in D als auch in M .	61
Abbildung 4.5:	Notwendige Input-Daten zur Vorgabe eines synthetischen Testfalles [<i>grau: obligatorisch, blau: fakultativ</i>] (Köber, Pflüger et al., 2021).....	63
Abbildung 4.6:	Berücksichtigung eines Time-out anhand einer Zug-Hochschaltung zur Identifikation von nicht-fahrbaren Schaltungen und zur Verhinderung von Endlosschleifen im Rahmen der Simulation	65
Abbildung 4.7:	Zug-Hochschaltung in M als synthetischer Testfall und konstantem Fahrpedalwert (Köber, Pflüger et al., 2021)	67
Abbildung 4.8:	Finaler Manöverkatalog für Zug-Hochschaltungen in Normal in M bei 80% Fahrpedal [<i>Gräu: nicht fahrbare Schaltungen eines beispielhaften Fahrzeuges</i>] (Köber, Pflüger et al., 2021).....	69

Abbildung 4.9:	Finaler Manöverkatalog für Zug-Rückschaltungen in Normal in D bei einem Fahrpedalsprung von 0% auf 100% [<i>Werte in Spalten entsprechen den erwarteten Zielgängen des jeweiligen Manövers</i>].....	70
Abbildung 5.1:	Definition der zentralen Schnittstelle zur manöverbasierten, automatisieren Validierung der Schaltqualität auf ViL-Prüfständen.....	75
Abbildung 5.2:	Struktur und Chronologie eines Manöverplans zur Validierung der Schaltqualität (Köber, Gärtner et al., 2021).....	76
Abbildung 5.3:	Resultierender Ablauf der Zug-Rückschaltung am ViL-Prüfstand gemäß des definierten Manöverablaufs [<i>1: Abbremsen für Schaltung; 2: Beschleunigung auf Offset-Drehzahl; 3: Warten auf Zieldrehzahl; 4: Zug-Rückschaltung mit 80% Fahrpedal; 5: Warten bis Schaltungsende</i>].....	80
Abbildung 5.4:	Bestimmung des virtuellen Weges im Rahmen der Nearest-Neighbor-Heuristik zur Lösung des Traveling-Salesman-Problems.....	85
Abbildung 5.5:	Geschwindigkeit- und Temperaturverläufe einer optimierten Testkampagne zur Validierung der Schaltqualität (Köber, Gärtner et al., 2021).....	87
Abbildung 5.6:	Grundlegender Aufbau der Signalmanipulation innerhalb einer gegebenen FlexRay-Architektur mittels einer FlexDevice-L der Firma StarCooperation als synthetisches Gateway (Köber, Gärtner et al., 2021).....	89
Abbildung 5.7:	Kabel zur Auftrennung der FlexRay-Banches am Gateway mittels SUB-D Steckverbindern im geschlossenen Zustand	93
Abbildung 5.8:	Resultierender Schaltablauf eines realen Fahrversuches bei einer 3-4 Zug-Hochschaltung in D mit 50% Fahrpedal infolge einer verlängerten Haltezeit am Ende der Überschneidung der Basiskupplung [<i>vertikale, gestrichelte Linie markiert Beschleunigungseinbruch</i>].....	95
Abbildung 5.9:	Vergleich der Zug-Hochschaltung in D mit Fahrpedal 50% und einer ungenügenden Applikation der 3-4 Schaltung.....	96
Abbildung 5.10:	Vergleich der Längsbeschleunigungen in Abhängigkeit der Zeit (oben) und Frequenz (unten) infolge einer negativ applizierten 3-4 Zug-Hochschaltung in D (in Anlehnung an Albers et al., 2021).....	97
Abbildung 5.11:	Antriebsstrang eines Porsche Panamera (Porsche AG, 2016)	99

Abbildung 5.12:	Modell eines Drei-Massenschwingers zur Abbildung des Übertragungsverhaltens antriebsstranginduzierter Schwingungen auf die Karosserie [<i>Anregung F_x ergibt sich aus der berechneten Längskraft des Reifenmodells</i>] (Albers et al., 2021).....	100
Abbildung 5.13:	Verlauf der berechneten Längsbeschleunigung infolge einer negativen 3-4 Zug-Hochschaltung in D basierend auf dem Modell eines Drei-Massenschwingers im Vergleich zum Verlauf des konventionellen Modells sowie des Fahrversuchs (Albers et al., 2021).....	102
Abbildung 5.14:	Vergleich der Schaltqualitätsbewertungen diverser Zug-Hochschaltungen in D mittels AVL-Drive inkl. deren Standardabweichung von fünf Messreihen (in Anlehnung an Albers et al., 2021).....	104
Abbildung 5.15:	Streudiagramm der Schaltqualitätsbewertungen diverser Zug-Hochschaltungen in D am Prüfstand und Fahrversuch.....	106
Abbildung 6.1:	Anpassung der Übertragungsfunktion zur Berechnung der finalen Sportlichkeit im Kontext der angestrebten Anhebung des Drehzahlniveaus (in Anlehnung an Köber et al., 2020).....	113
Abbildung 6.2:	Transfer der Schaltkennfelder der Bremsrückschaltungen für eine Anhebung der Rückschaltpunkte (Köber et al., 2020)....	114
Abbildung 6.3:	Zug-Hochschaltung mit unterschiedlichen Motormomenteneingriffen [<i>M_1 - Motormoment; M_{K1} - Moment der abschaltenden Kupplung; M_{K2} - Moment der zuschaltenden Kupplung; n_1 - Motordrehzahl; n_{K1} - Drehzahl der abschaltenden Kupplung; n_{K2} - Drehzahl der zuschaltenden Kupplung</i>] (in Anlehnung an Fischer et al., 2016; Köber et al., 2020).....	115
Abbildung 6.4:	Anpassung der Kennlinie zur Schaltpunktverschiebung bei Steigungen.....	117
Abbildung 6.5:	Ausgewähltes Streckenprofil für die Probandenstudie [<i>rot: Innerorts, gelb: Überland, grün: Steigung, blau: Streckenprofil</i>] (© Google LLC).....	119
Abbildung 6.6:	Auszug des finalen Fragebogens für die Items leistungsstark und dynamisch (Jacobs, 2019).....	122
Abbildung 6.7:	Subjektive Wahrnehmung des Fahrspaß in Abhängigkeit unterschiedlicher Datenstände von insgesamt 21 Probanden [<i>Seriendatenstand entspricht 4,0</i>] (Köber et al., 2020).....	123

Abbildung 6.8:	Einfluss der Fahrweise auf den gesamtheitlich wahrgenommenen Fahrspaß in Abhängigkeit unterschiedlicher Datenstände [<i>Skala von 1 bis 7; gestrichelte Linie bei 4 entspricht keine Änderung wahrgenommen</i>] (Köber et al., 2020)	125
Abbildung 6.9:	Plausibilisierung der berechneten, getriebebasierten Gesamtfahrweise <i>FWGes</i> mittels AVL SPA (Quiroga Mayorga, 2021) ⁵	127
Abbildung 6.10:	Häufigkeitsverteilung der subjektiv klassifizierten Fahrweise in Abhängigkeit der normierten Gesamtfahrweise <i>FWGesn</i> (Quiroga Mayorga, 2021).....	129
Abbildung 6.11:	Gewichtete Ergebnisse der Probandenstudie in Abhängigkeit der Fahrweise [<i>Skala von -3 bis +3; 0 entspricht keine Änderung wahrgenommen</i>].....	131
Abbildung 6.12:	Simulationsergebnisse zum Vergleich der Drehzahlverläufe unterschiedlicher Datenstände	132
Abbildung 6.13:	Vergleich der singulären Kennzahlen in Abhängigkeit unterschiedlicher Datenstände in Bezug auf den Seriidatenstand	134
Abbildung 6.14:	Korrelation nach Spearman und Pearson zwischen der wahrgenommenen Sportlichkeit und der Motordrehzahl (in Anlehnung an Quiroga Mayorga, 2021).....	136
Abbildung 6.15:	Modelltraining mittels multipler Regression für Komfort und Sportlichkeit [<i>RMSE_{Komfort}=0,21; RMSE_{Sportlichkeit}=0,23</i>] (in Anlehnung an Quiroga Mayorga, 2021).....	138
Abbildung 6.16:	Modelltraining mittels Boosted Decision Trees für Komfort und Sportlichkeit [<i>RMSE_{Komfort}=0,19; RMSE_{Sportlichkeit}=0,175</i>] (in Anlehnung an Quiroga Mayorga, 2021).....	139
Abbildung 6.17:	Vergleich der Modellprognosen für Sportlichkeit und Komfort mit den gewichteten Ergebnissen der Validierungsstudie mit einem Porsche 911 Carrera GTS [<i>RMSE_{Komfort} = 0,19; RMSE_{Sport} = 0,19</i>] (in Anlehnung an Quiroga Mayorga, 2021)	143
Abbildung 6.18:	Vergleich der Modellprognosen für Sportlichkeit und Komfort mit den gewichteten Ergebnissen der Validierungsstudie mit einem Porsche Cayenne Turbo [<i>RMSE_{Komfort} = 0,41; RMSE_{Sport} = 0,36</i>] (in Anlehnung an Quiroga Mayorga, 2021)	144
Abbildung B.1:	Streudiagramm der Schaltqualitätsbewertungen diverser Zug-Rückschaltungen auf ViL und Fahrversuch	XX

Abbildung B.2:	Streudiagramm der Schaltqualitätsbewertungen diverser Schub-Hochschaltungen auf ViL und Fahrversuch.....	XXI
Abbildung B.3:	Streudiagramm der Schaltqualitätsbewertungen diverser Schub-Rückschaltungen auf ViL und Fahrversuch	XXII

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Interpretationsrichtlinien für das Cronbachs Alpha zur Bestimmung der Reliabilität eines Messverfahrens (Wirtz, 2021)44
Tabelle 5.1:	Übersicht aller relevanten Vorgaben und Fortschaltkriterien zur Validierung der Schaltqualität auf Prüfständen77
Tabelle 5.2:	Boolesche Abfragen der Fortschaltkriterien78
Tabelle 5.3:	Auszug eines Manöverablaufs einer beispielhaften 6-2 ZRS mit 80% Fahrpedal bei 1000 1/min in D [<i>SM-ID = Sub-Manöver ID, FSK-ID = Fortschaltkriterium-ID</i>] (Köber, Gärtner et al., 2021) 79
Tabelle 5.4:	Übersicht der Fehler (RMSE) aller Hauptschaltarten der Prüfstandsmessungen im Vergleich zum Fahrversuch sowie die Standardabweichung (SD) des Fahrversuches107
Tabelle 6.1:	Ergebnisse der Reliabilitätsanalyse zur Identifikation der finalen Items [<i>durchgestrichene Items wurden vernachlässigt</i>] (in Anlehnung an Jacobs, 2019) 120
Tabelle 6.2:	Übersicht der finalen Items zum Messen der Konstrukte Sportlichkeit und Komfort sowie deren Gewichtungsfaktor (Karakus, 2020) (Köber et al., 2020) 121
Tabelle 6.3:	Subjektive Wahrnehmung der unterschiedlichen Datenstände im Vergleich zu einem Seriidatenstand [<i>Skala von 1 bis 7; 4 entspricht keine Änderung wahrgenommen</i>] (Köber et al., 2020) 124
Tabelle 6.4:	Berechnung der Gewichtungsfaktoren in Abhängigkeit der Fahrweise und der zu messenden Konstrukte [<i>GF = Gewichtungsfaktor; FWKn= normierte Fahrweise Komfort; FWSn= normierte Fahrweise Sport</i>]..... 130
Tabelle 6.5:	Gewichtete subjektive Wahrnehmung der Validierungsstudie [<i>Skala von 1 bis 7; 4 entspricht keine Änderung wahrgenommen</i>] (in Anlehnung an Quiroga Mayorga, 2021) 142
Tabelle A.1:	Auszug eines Manöverablaufs einer beispielhaften 4-5 ZHS mit 50% Fahrpedal in D [<i>SM-ID = Sub-Manöver ID, FSK-ID = Fortschaltkriterium-ID</i>].....XVII

Tabelle A.2:	Auszug eines Manöverablaufs einer beispielhaften 4-5 ZHS mit 50% Fahrpedal bei 5000 1/min in M [SM-ID = Sub-Manöver ID, FSK-ID = Fortschaltkriterium-ID]	XVIII
Tabelle A.3:	Auszug eines Manöverablaufs einer beispielhaften 6-5 ZRS mit 40% Fahrpedal bei 4000 1/min in M [SM-ID = Sub-Manöver ID, FSK-ID = Fortschaltkriterium-ID]	XVIII
Tabelle A.4:	Auszug eines Manöverablaufs einer beispielhaften 3-4 SHS bei 4000 1/min in M [SM-ID = Sub-Manöver ID, FSK-ID = Fortschaltkriterium-ID]	XIX
Tabelle A.5:	Auszug eines Manöverablaufs einer beispielhaften 8-1 SRS leicht gebremst in D oder M [SM-ID = Sub-Manöver ID, FSK-ID = Fortschaltkriterium-ID]	XIX
Tabelle C.1:	Gewichtete Bewertung potenzieller Fragebogenmodelle [Wertung: 1 – nicht erfüllt; 5 – voll erfüllt]	XXIII

Abkürzungsverzeichnis

ARP	Akustikrollenprüfstand
ATZ	Automobiltechnische Zeitschrift
CAN	Controller Area Network
D	Drive Mode
DIN	Deutsches Institut für Normung
E-Fuels	synthetische Kraftstoffe
ETK	Emulator Tastkopf
FSK	Fortschaltkriterium
FW _{Ges}	gesamte Fahrweise, gesamte Fahrweise
FW _{Ges_n}	normierte Gesamtsportlichkeit
FW _{K_n}	normierte Fahrweise - Komfort
FW _{Max}	maximale Sportlichkeit
FW _{S_n}	normierte Fahrweise - Sport
GF	Gewichtungsfaktor
IPEK-XiL	IPEK-X-in-the-Loop-Ansatz
M	Manueller Modus
MAE	Mean absolute Error
MMAS	MAX-MIN-Ant-System
MSE	Mean square Error
MST	Minimal Spanning Tree
NNH	Nearest-Neighbor-Heuristik
OEM	Original Equipment Manufacturer

ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
PBI	Porsche Bewertungsindex
PC	Principal Components
PCA	Principal Component Analysis
PEP	Produktentstehungsprozess
PiL	Powertrain-in-the-Loop
PKW	Personenkraftwagen
R2R	Road to Rig
RMS	Root Mean Square
RMSE	Root mean square Error
SHS	Schub-Hochschaltung
SiD	System-in-Development
SimEnv	porscheinterne Simulationsumgebung
SRS	Schub-Rückschaltung
Sul	System-under-Investigation
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VIF	Varianzinflationsfaktor
ViL	Vehicle-in-the-Loop
ZHO	Ziel-, Handlungs- und Objektsystem
ZHS	Zug-Hochschaltung
ZRS	Zug-Rückschaltung
ZWS	Zwischenschaltung

Formelzeichen

J_{Mo}	Massenträgheit des Motors
$\dot{\omega}_1$	Winkelgeschwindigkeit des Motors
M_1	Motormoment
M_2	Getriebe-Ausgangsmoment
$M_{K1/K2}$	Momente an den Kupplungen K_1/K_2
$n_{K1/K2}$	Drehzahl an den Kupplungen K_1/K_2
n_1	Motordrehzahl
J_R	Massenträgheit des Rades
M_{SW}	Moment der Seitenwellen
M_{Fx}	Moment auf Basis der transferten Längskraft am Rad
M_{Reib}	Moment der Reibverluste
F_x	Längskraft
m	Fahrzeugmasse
v	Fahrzeuggeschwindigkeit
t	Zeit
g	Erdbeschleunigung
γ	Steigung
c_w	Strömungswiderstandskoeffizient
A	Stirnfläche
ρ	Dichte
\bar{x}	Arithmetischer Mittelwert
x_{median}	Median
s_x^2	Varianz
s_x	Standardabweichung

z_α	Quantil der Standardabweichung
r_{xy}	Korrelationskoeffizient
s_{xy}	Empirische Kovarianz
$Rel(x)$	Reliabilität
α	Cronbachs Alpha
$r_{it(i)}$	Korrigierte Trennschärfe
r_{it}	Unkorrigierte Item-Testwert-Korrelation
β	Regressionskoeffizient
$\hat{\beta}$	Schätzwert des tatsächlichen Regressionskoeffizienten
R^2	Bestimmtheitsmaß
MAE	Mittlerer absoluter Fehler
RMSE	Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme
MSE	Mittlerer quadratischer Fehler
VIF	Varianzinflationsfaktor
r_{dyn}	Dynamischer Radhalbmesser
i_{Gx}	Übersetzung der einzelnen Gänge
i_A	Achsgetriebeübersetzung
v_{start}	Fahrzeuggeschwindigkeit zu Beginn der Schaltung
v_{end}	Fahrzeuggeschwindigkeit nach Ende der Schaltung
$\varepsilon_{Zug/Schub}$	Verhältnis der End- zur Startgeschwindigkeit
s_{virt}	Virtueller, zu optimierender Weg
$G_{start_{n+1}}$	Startgang des folgenden Manövers
G_{ziel_n}	Zielganges des aktuellen Manövers
θ_t	Wählbare Zeitkonstante
FW_{Ges}	Gesamte Fahrweise eines Streckenabschnittes
FW_{Max}	Maximal mögliche Fahrweise eines Streckenabschnittes
FW_{Ges_n}	Normierte Gesamtfahrweise eines Streckenabschnittes

FW_{S/K_n}

Normierte, klassenabhängige Fahrweise (Komfort/Sport)

GF

Gewichtungsfaktor in Abhängigkeit der Fahrweise

1 Einleitung

Gemäß einer Veröffentlichung des Umweltbundesamtes (2020) hat sich der weltweite Bestand an Personenkraftfahrzeugen (PKW) in den letzten 40 Jahren mehr als vervierfacht. Waren 1978 noch 275 Millionen Fahrzeuge zugelassen, sind es 2020 bereits 1,2 Milliarden mit weiter steigender Tendenz. Shell veröffentlichte 2014 eine Studie, welche prognostiziert, dass bis 2050 weltweit mindestens 2 bis nahezu 3 Mrd. Fahrzeuge zugelassen sein könnten (Adolf, Balzer, Joedicke, Schabla & Wilbrand, 2014). Insbesondere in den sog. neuen Verbraucherländern wie Brasilien, Indien und China wächst der Bedarf an individueller Mobilität mit hoher Dynamik, wohingegen das Wachstum in den Industrieländern stagniert. Trotz zunehmender Fokussierung auf rein elektrische Antriebe sind konventionelle und hybride Antriebskonzepte weiterhin marktführend. So erreichen Fahrzeuge mit rein-elektrischen Antrieben laut Kraftfahrt-Bundesamt in Deutschland im Jahr 2020 lediglich einen Anteil an Fahrzeugneuzulassungen von 6,7 %, wengleich deren prozentualer Anteil im Vergleich zum Vorjahr um 206 % gestiegen ist (Kraftfahrt-Bundesamt, 2020). Dieser große Zuwachs ist vornehmlich auf die notwendige Reduktion von Emissionen zurückzuführen, wobei auch andere alternative Antriebskonzepte, neben den elektrischen Antrieben, immer weiter in den Fokus rücken. Die aktuell beschlossenen Klimaziele bedeuten für den Verkehrssektor, auch ohne weitere Verschärfungen des „European Green Deal“, dass bis 2030 40-42 % der gegenwärtig benötigten Menge an fossilen Kraftstoffen vermieden werden müssen (Verband der Automobilindustrie e.V. [VDA], 2020). Um die gleichzeitig steigendenden Mobilitätsbedürfnisse der Gesellschaft gerecht zu werden, müssen neben der Elektromobilität neue Mobilitätskonzepte in den Markt gebracht werden. Dies wird durch die Nationale Plattform Zukunft der Mobilität (2019) gestützt, welche prognostiziert, dass selbst bei einem ambitionierten Ziel von 10 Mio. E-Fahrzeugen und einer optimalen Verlagerung des Verkehrs auf Schienen und den öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) noch ein signifikanter Bedarf an CO₂ Reduktion besteht. Aus diesem Grund kommt synthetischen Kraftstoffen (sog. E-Fuels) eine zentrale Rolle bei der Erfüllung der beschlossenen Klimaziele zu. E-Fuels können vollständig aus erneuerbaren Rohstoffen wie Wasser, Strom und CO₂ gewonnen werden und ermöglichen den klimaneutralen Betrieb von verbrennungsmotorischen Fahrzeugen. Dies gilt sowohl für Bestandsfahrzeuge im Markt als auch für nachfolgende Produktgenerationen. Unter Berücksichtigung von E-Fuels besteht somit das Potenzial, auch über 2030 hinaus hoch-effiziente Verbrennungsmotoren zu entwickeln und auf den Märkten zuzulassen. Unter diesem Aspekt werden auch schaltbare Getriebe weiterhin eine zentrale Rolle

in der Fahrzeugentwicklung einnehmen, da deren Aufgabe im Antriebsverbund darin besteht, den prinzipiellen Nachteilen von Verbrennungsmotoren durch eine Drehzahl- und Drehmomentenwandlung zu begegnen. Dies macht den Einsatz von Getrieben sowohl bei hybridisch als auch konventionell verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeugen unabdingbar. Neben manuellen Schaltgetrieben gibt es eine Vielzahl an automatischen und automatisierten Getriebekonzepten, die diese Aufgabe erfüllen. Lag der Anteil an neuzugelassenen Fahrzeugen mit Automatikgetrieben im Jahr 2000 noch bei unter 20% in Deutschland, waren es im Jahr 2018 bereits knapp 47,5% mit steigender Tendenz (Heise Medien GmbH & Co. KG, 2019). In den USA liegt der Anteil sogar bei 95% und in Japan bei 90% (Grundhoff, 2020). Dieser signifikante Zuwachs ist vornehmlich auf die gesteigerte Kundenakzeptanz von Automatikgetrieben zurückzuführen. Nach Wurm (2015) hat, neben der Wirkungsgradoptimierung, insbesondere die Weiterentwicklung in der Getriebemechatronik zu einer Verbesserung der Fahreigenschaften und somit zu einer gesteigerten Kundenakzeptanz geführt. Dies wird durch Gruhle (2010) bestätigt, da seiner Ansicht nach moderne Automatikgetriebe, neben den konstruktiven Maßnahmen, insbesondere aufgrund der regelungstechnischen Maßnahmen, den manuellen Getrieben in Bezug auf Komfort und Wirtschaftlichkeit überlegen sind. Da die Steuerung und Regelung der Getriebesteuerung die Merkmale und Fahreigenschaften des Produktes maßgeblich beeinflussen, gilt es diesen Aspekten eine besondere Aufmerksamkeit zukommen zu lassen. Im Rahmen des zugehörigen Entwicklungsprozesses wird vornehmlich auf die komfort- und verbrauchsrelevanten Faktoren eingegangen, wobei die kundenrelevanten Anwendungsfälle priorisiert zu validieren sind. Um den immer kürzer werdenden Entwicklungszeiten und der stetig steigenden Produktkomplexität konsequent Rechnung zu tragen, bedarf es neuer Ansätze zur effizienteren Validierung der kundenrelevanten Anwendungsfälle der Getriebesteuerung. Die vorliegende Arbeit soll am Beispiel von Doppelkupplungsgetrieben in diesem Kontext einen Beitrag zur effizienteren Validierung der Applikation leisten.

2 Grundlagen und Stand der Forschung

In diesem Kapitel werden die Grundlagen und der Stand der Forschung zu den Themenfeldern dieser Arbeit zusammengetragen. Zunächst werden methodische Grundlagen der Validierung im Rahmen der *KaSPro - Karlsruher Schule für Produktentwicklung* vorgestellt, die als Grundpfeiler der vorliegenden Arbeit dienen sollen. Im nächsten Schritt werden wesentliche Grundlagen zur Applikation von Doppelkupplungsgetrieben vermittelt und darauf aufbauend erste Ansätze zur Effizienzsteigerung des Applikationsprozesses vorgestellt. Abschließend werden motivationspsychologische Modelle und mathematische Werkzeuge zur Prognose der subjektiven Wahrnehmung zusammengetragen.

2.1 Methodische Grundlagen der Validierung

Im Kontext der Produktentwicklung werden die Begriffe der Validierung und Verifikation nicht einheitlich verwendet (Albers, Behrendt, Klingler & Matros, 2016). Sowohl VDI 2206 als auch DIN EN ISO 9000 haben jedoch vergleichbare Spezifikationen der Begrifflichkeiten angeführt (VDI-Richtlinie 2206:2021-11; DIN EN ISO 9000:2015-11). Albers et al. (2016) fassen diese so zusammen, dass Verifikation mit der Frage beschrieben werden kann, ob „...ein Produkt korrekt entwickelt“ wird. Validierung hingegen beantwortet nach Albers et al. (2016) die Frage, ob „...das richtige Produkt entwickelt“ wird. Als eine grundlegende Hypothese seiner Forschung an Produktentstehungsprozessen (PEP) formuliert Albers (2010), dass die Validierung die zentrale Aktivität im Entwicklungsprozess ist. Der Grundgedanke dabei ist, dass eine kontinuierliche Validierung im PEP einen steten Abgleich zwischen den Zielen und Zwecken des Produktes sowie dem erreichten Entwicklungsstand ermöglicht (Albers, Behrendt & Ott, 2010). Mit diesem Verständnis prägt die Validierung den gesamten PEP und trägt maßgeblich zur kreativen Lösungsfindung bei (Albers, 2010). Folglich kommt der Validierung eine zentrale Bedeutung für die weitere Optimierung des PEP zu. Neben dem erheblichen Wissensgewinn, welcher infolge der Validierung ermöglicht wird, muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Validierung auch als die aufwendigste und herausforderndste Aktivität im gesamten PEP zu verstehen ist (Albers, Behrendt, Klingler, Reiß & Bursac, 2017). Aufgrund der zeitlichen und kostenbedingten Beschränkungen eines jeden PEP kann die Validierung nicht beliebig umfangreich erfolgen. Somit muss das Ziel sein, möglichst effektiv und effizient zu validieren (Albers et al., 2016). Um dazu einen Beitrag zu leisten, bietet die *KaSPro – Karlsruher Schule für Produktentwicklung*

eine Vielzahl an methodischen Bausteinen, welche im Folgenden dargestellt werden sollen.

2.1.1 Erweitertes ZHO-Modell

Aufbauend auf dem Modell von Ropohl (1975) beschreibt Albers et al. (2016) die Produktentwicklung mittels des erweiterten ZHO-Modells. Demnach kann jede Produktentwicklung mittels eines Ziel-, Objekt- und Handlungssystems beschrieben werden. Das Zielsystem enthält alle geplanten Eigenschaften und Randbedingungen eines zu entwickelnden Produktes. Somit wird im Zielsystem nicht die Lösung, sondern der gewünschte Soll- bzw. Zielzustand des Produktes beschrieben. Zu Beginn der Produktentwicklung wird das Zielsystem als initiales Zielsystem definiert und im Laufe der Entwicklung durchgehend weiterentwickelt und angepasst. Das Objektsystem enthält alle relevanten Dokumente und Artefakte als Teillösung des Produktentstehungsprozesses sowie das endgültige Produkt. Das Handlungssystem versteht sich als ein „sozio-technisches System“, welches der Erstellung beider genannten Systeme dient (Albers et al., 2016, S. 543). Es enthält dazu alle relevanten Ressourcen, Aktivitäten, Methoden und Prozesse. (Albers et al., 2016)

Das erweiterte ZHO-Modell nach Albers et al. (2016) beschreibt als Erweiterung zum Modell von Ropohl (1975) den kontinuierlichen Wechsel zwischen Gestaltung und Validierung als geschlossenen Kreislauf (siehe Abbildung 2.1).

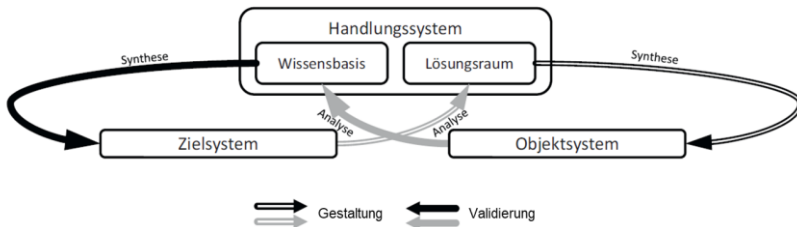


Abbildung 2.1: Das erweiterte ZHO-Modell nach Albers, Behrendt, Schroeter, Ott und Klingler (2013)

Validierung ist dabei als Analyse des Objektsystems zu verstehen, was wiederum zu einer Erweiterung der Wissensbasis führt. Mit dem derartig generierten Wissen kann eine Synthese des angepassten Zielsystems erfolgen. Nach Albers, Matros, Behrendt und Jetzinger (2015) umfasst die Validierung die drei grundlegenden Aktivitäten der Bewertung, der Objektivierung und der Verifikation. Die Bewertung wird

dabei verstanden als die „Aktivität zur Untersuchung von Elementen des Objektsystems aus Stakeholder-Sicht“ und erfolgt überwiegend subjektiv (Albers et al., 2015, S. 77). Im Rahmen der Objektivierung wird überprüft, inwieweit „Elemente des Zielsystems die Erwartung der Stakeholder objektiv wiedergeben“ können und ob es grundsätzlich Potenziale gibt, Bewertungskriterien des Zielsystems weiter zu objektivieren (Albers et al., 2015, S. 77). Als Stakeholder werden in diesem Kontext alle diejenigen zusammengefasst, die ein Interesse am Ergebnis der Produktentwicklung haben. Stakeholder können somit beispielsweise Unternehmen, Kunden oder Gesetzgeber sein. Als verbleibende Aktivität gleicht die Verifikation die Elemente des Objektsystems mit den Elementen des Zielsystems ab und beantwortet somit die Frage, ob das Produkt korrekt entwickelt wurde. (Albers et al., 2016)

2.1.2 IPEK-X-in-the-Loop-Ansatz

Um der bereits angesprochenen, kontinuierlichen Validierung Rechenschaft zu tragen, greifen Albers und Düser (2010) den „in-the-loop“ Ansatz im Rahmen der Entwicklung eines eingebetteten Systems¹ auf, integrieren deren Vorteile und erweitern diese um die Belange der Mechanik und Mechatronik. Im Fokus des IPEK-X-in-the-Loop-Ansatz (IPEK-XiL-Ansatz) steht somit die Validierung eines (Teil-)Systems, welches in das Gesamtsystem, die Umwelt und weitere interagierende Systeme eingebunden wird (Albers et al., 2016). Ein interagierendes System kann dabei im Kontext der Fahrzeugentwicklung beispielsweise der Fahrer sein. Nach Albers et al. (2016, S. 560) ist das „X“ definiert als „...das physische und/oder virtuelle (Teil-)System, welches im Fokus einer spezifischen Validierungsaktivität ist und über welches dabei Erkenntnisse gewonnen werden sollen“. Der Ansatz, das zu untersuchende System lediglich in eine virtuelle Umgebung einzubinden, wird demnach im Rahmen des IPEK-XiL-Ansatz aufgehoben. So können die interagierenden Systeme² ebenso wie das zu untersuchende System rein virtuell, rein physisch oder gemischt physisch-virtuell vorliegen. Im Sinne der Validierungsaktivitäten existieren zwei unterschiedliche Sichten auf das zu untersuchende System (Albers et al., 2016). Vornehmlich wird das „X“ als ein sich in der Entwicklung befindliches (Teil-)System verstanden. In diesem Zusammenhang wird von einem System-in-Development (SiD) gesprochen, wobei der primäre Fokus auf der Eigenschafts- bzw. Funktionserfüllung liegt. In einer weiteren Sicht steht der Wissenszuwachs über ein (Teil-)System im Rahmen der weiteren Verwendung im Entwicklungsprozess im Fokus. Die damit verbundene Validierungsaktivität erfolgt demnach vornehmlich aus Gründen der Analyse und wird als System-under-Investigation (Sul) beschrieben. Darüber

¹ engl. Embedded System

² engl. Connected Systems

hinaus kann das zu untersuchende System in verschiedenen Systemebenen betrachtet werden. So kann das zu untersuchende System beispielsweise als Gesamtfahrzeug (Vehicle-in-the-Loop) bis hin zu Wirkflächenpaaren gemäß des C&C²-Ansatzes vorliegen (Albers & Wintergerst, 2014). In vorliegender Arbeit liegt das kleinste Wirkflächenpaar als Software vor, wenngleich die unterschiedlichen Ebenen des XiL-Ansatzes aus Gründen der besseren Nachvollziehbarkeit als Hardware dargestellt sind (siehe Abbildung 2.2).

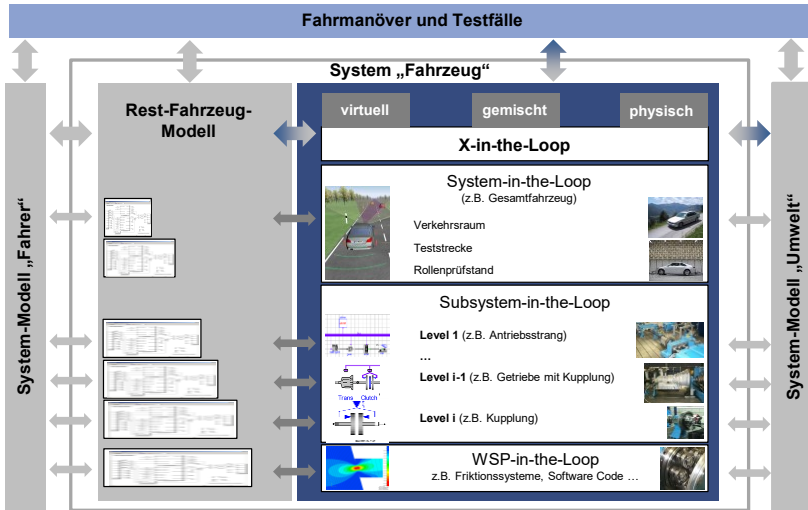


Abbildung 2.2: IPEK-X-in-the-Loop-Framework anhand der Fahrzeugentwicklung nach Albers et al. (2016)

Folglich liefert der IPEK-XiL-Ansatz die methodische Basis für eine durchgängige und prozessbegleitende Validierung (Albers, Düser & Ott, 2008). Das daraus resultierende Framework ist in Abbildung 2.2 dargestellt. Alle genannten Aspekte werden darin integriert und bilden die methodische Grundlage für die Entwicklung von Validierungsumgebungen (Matros, 2016). Als eine Validierungsumgebung wird dabei eine „konkrete Ausprägung eines Handlungssystems für die Validierung im Sinne von Methoden und des Ressourcensystems für mindestens eine Kombination aus Produkt und einem Validierungsziel zu einem bestimmten Zeitpunkt im Produktlebenszyklus“ verstanden (Albers, Mandel, Yan & Behrendt, 2018, S. 2803). Das Validierungsziel beschreibt dabei den „spezifischen Zweck, das spezifische Ziel eines Tests“ oder Manövers (Klingler, 2017, S. 83).

Eine zentrale Forderung im Kontext des IPEK-XiL-Ansatzes ist es, ein hohes Maß an Durchgängigkeit der Validierungsumgebungen zu ermöglichen. Dazu sollen die Validierungsumgebungen auf Basis durchgängiger Modelle aufgebaut und die Testfälle bzw. Fahrmanöver umgebungsübergreifend definiert werden (Matros, 2016). Das gewährleistet eine flexible Auswahl und Entwicklung von Validierungsumgebungen in Abhängigkeit der vorliegenden Fragestellung zum jeweiligen Zeitpunkt im PEP.

2.1.3 Manöverbasierte Validierung

Matros (2016) verwendet im Rahmen seiner wissenschaftlichen Arbeiten vornehmlich den Begriff Fahrmanöver (oder kurz Manöver), wengleich im Kontext des IPEK-XiL-Ansatzes Fahrmanöver und Testfälle gleich genannt werden (siehe Abbildung 2.2). Er begründet dies darin, dass Fahrmanöver in engerem Bezug zur Fahrzeugentwicklung stehen und der Begriff „Testfall“ übergeordnet zu verstehen ist (Matros, 2016). Darüber hinaus finden Testfälle auch in anderen Industriebereichen Anwendung. Diese Interpretation deckt sich mit der Definition eines Testfalles nach Albers et al. (2016, S. 554), wonach ein Testfall ein „repräsentatives Modell eines Kollektivs von Anwendungsfällen“ ist und im Bereich der Automobil-Entwicklung oftmals Manöver definiert werden als „Hilfsmittel zur Testfalldefinition“. Dieser Definition folgt die vorliegende Arbeit, so dass Testfälle als übergeordnete, repräsentative Modelle eines oder mehrerer Manöver beschrieben werden und Manöver genutzt werden können, um spezifische Testfälle zu definieren. So werden Manöver entwickelt, um für „spezielle Validierungsziele jeweils eine Referenzanwendung im späteren Betrieb des Systems“ darzustellen (Albers et al., 2016, S. 556). Matros, Schille, Behrendt und Holzer (2015, S. 65) beschreiben diese Vorgehensweise als „manöverbasierte Validierung“. Nach Matros et al. (2015) ist ein Manöver erst dann vollständig definiert, wenn die Fahrereingaben als auch die Fahrzeug- und Umweltbedingungen festgelegt sind. Darüber hinaus werden für jedes Manöver objektive Analyse- und subjektive Bewertungskriterien festgelegt, wobei letzteres der kundenrelevanten Bewertungsgröße entspricht. Um für verschiedene Validierungsziele geeignete Manöver strukturiert abzulegen, können Manöverkataloge als Hilfsmittel verwendet werden (Albers et al., 2016; Matros et al., 2015). Ein Auszug eines beispielhaften Manöverkatalogs ist in Abbildung 2.3 dargestellt.

Technische Funktion	Validierungsthema und -ziel	Manöverbeschreibung	Fahrereingaben	Fahrzeugbedingungen	Umweltbedingungen	Analyse-kriterien (+ Ziele)	Bewertungs-kriterien (+ Ziele)	Objektivierung
...
Elektrisches Fahren	Elektrisches Fahrerlebnis im Hybridfahrzeug in der Stadt	Bestimmung der maximalen elektrischen Beschleunigung	Gaspedal-Sprung aus dem Stillstand, Pedalwert wird nach jedem Beschleunigungsversuch gesteigert (1%, 2%, 3%, ...)	Batterieladestand >80%	Temperatur = 20°C	Geschwindigkeit, Beschleunigung (Ziel: bei $v = 0, a > 3 \text{ m/s}^2$)	Urbanes E-Fahrerlebnis, Dynamik	
...

Abbildung 2.3: Auszug eines beispielhaften Manöverkatalogs nach Albers et al. (2015)

Da Manöver oftmals komplexer sind als eine stationäre Fahrereingabe, werden durch Matros et al. (2015) zusätzliche Manöverabläufe eingeführt. In diesen wird ein Manöver in einzelne Schritte zerlegt (beispielsweise mittels eines Flow-Charts), welche explizit mit ihren Fahrereingaben und zu erreichenden Zielwerten beschrieben werden. Diese einzelnen Schritte werden durch Matros et al. (2015) nicht explizit benannt, können nach Köber, Gärtner und Albers (2021) jedoch am ehesten als Sub-Manöver beschrieben werden. Da die Manöverabläufe beispielsweise als global nutzbare Matlab/Simulink-Modelle umgesetzt werden können, kann eine Validierung unabhängig von der Validierungsumgebung erfolgen. Folglich leistet dieser Ansatz einen wesentlichen Beitrag, um dem Anspruch der im vorigen Kapitel beschriebenen, umgebungsübergreifenden Fahrmanöverdefinition gerecht zu werden. Da der Manöverkatalog die zu validierenden Manöver listet und der Manöverablauf explizit vorgibt, wie ein individuelles Manöver zu validieren ist, muss jedoch konstatiert werden, dass diese Formate keine Aussage darüber treffen, in welcher Reihenfolge die Manöver zu validieren sind. Darüber hinaus listet der Manöverkatalog lediglich die Gesamtheit aller zu validierender Manöver, wobei eine Differenzierung der zu validierenden Manöver in Abhängigkeit des SiD bzw. Sul nicht erfolgt. So wird auf Basis des gesamten Manöverkatalogs beispielsweise nicht unterschieden, ob die gelisteten Manöver lediglich für Fahrzeuge mit hybridischem Antrieb im Rahmen der Validierung relevant sind oder nicht.

2.1.4 Pull-Prinzip der Validierung

Basierend auf dem Anspruch einer kontinuierlichen Validierung im PEP stellen Albers et al. (2015) das Pull-Prinzip der Validierung vor. Konventionelle, phasenorientierte Modelle wie beispielsweise das V-Modell verstehen die Validierung als sekundäre Aktivität (VDI-Richtlinie 2206:2021-11). Im Rahmen derer erfolgt die

Validierung erst, nachdem erste Produktprofile entwickelt und Teilsysteme inklusive Gestalt und Prinzip ausgearbeitet (sog. primäre Aktivitäten) wurden. Dafür werden nachgelagert erst geeignete Validierungsumgebungen und Testfälle entwickelt bzw. ausgewählt (sog. sekundäre Aktivitäten). Dieses Vorgehen birgt das Risiko, dass der Validierungsaufwand infolge der Vielzahl an „nicht-validen Profilen, Ideen und Modellen/Produkten“ kaum zu beherrschen ist und potenzielle Änderungen in aufwendigen Iterationsschleifen resultieren (Albers et al., 2015, S. 78). Diese nachteilige, postprozessuale Validierung³ wird im Rahmen des Ansatzes von Albers et al. (2015) und Matros (2016) in eine prozessbegleitende, durch Folgeaktivitäten initiierte Validierung⁴ überführt. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 2.4 beispielhaft dargestellt.

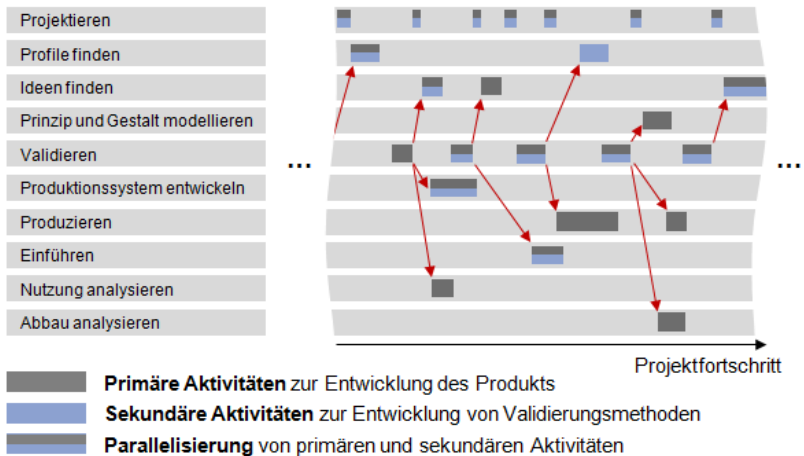


Abbildung 2.4: Pull-Prinzip der Validierung nach Albers et al. (2015)

Im Verständnis dessen wird das Push-Prinzip umgekehrt und die Validierung als treibende Kraft interpretiert. Die Validierung soll demnach erfolgen, wenn aufgrund von Entscheidungen große Unsicherheiten bzw. Wissenslücken im PEP zu erwarten sind. Daraus kann eine Reduktion von Wissenslücken erzielt werden und die Validierung wird von einer nachgelagerten in eine kontinuierliche, prozessbegleitende Aktivität im PEP überführt. (Matros, 2016)

³ sog. Push-Prinzip

⁴ sog. Pull-Prinzip

2.2 Applikation von Getrieben

Neben wesentlichen Vorteilen des Verbrennungsmotors (z.B. niedriges Leistungsgewicht) ist dieser jedoch auch durch drei wesentliche Nachteile geprägt (Naunheimer, Bertsche, Ryborz, Novak & Fietkau, 2019):

- Beim Anfahren kann kein Drehmoment entwickelt werden
- Maximale Leistung ist nur in einem kleinen, vorgegebenen Drehzahlbereich verfügbar
- Kraftstoffverbrauch ist stark abhängig vom aktuellen Motor-Betriebspunkt

Um diesen Nachteilen zu begegnen, werden Getriebe verwendet, welche nach Gruhle (2010, S. 288) als „integraler Bestandteil des Fahrzeug-Antriebsstranges“ bezeichnet werden können. Nach Naunheimer et al. (2019, S. 43) haben Getriebe in Verbindung mit konventionellen Verbrennungsmotoren folgende Hauptfunktionen:

- Anfahren ermöglichen
- Leistungsanpassung vornehmen (z.B. Moment und Drehzahl wandeln)
- Permanente Leistungsübertragung ermöglichen (Motorleistung form- und kraftschlüssig sowie verlustarm übertragen)
- Leistungsanpassung steuern (manuell oder automatisch)

Zur Realisierung dieser Funktionen (und weiteren Nebenfunktionen) werden zunehmend Automatikgetriebe eingesetzt, welche einen stetig steigenden Marktanteil einnehmen. Automatikgetriebe haben dabei entscheidenden Einfluss auf die Merkmale des Produktes, was neben der konstruktiven Gestaltung vornehmlich auf die Steuerung und Regelung des Getriebes zurückzuführen ist (Gruhle, 2010). Die dafür notwendige Tätigkeit der Parametrierung und Kalibrierung wird als Applikation bezeichnet. Nach Kopp und Schaller (2016, S. 1) ist Applikation allgemein zu verstehen als die „Integration einer Komponente oder eines Subsystems in ein übergeordnetes System“. Zwar wird die Applikation teilweise auch als Anpassung von Hardwarekomponenten zur Integration verstanden, im Kontext der Antriebsentwicklung wird jedoch die Bedatung bzw. Parametrierung und Abstimmung bzw. Kalibrierung von Funktionen innerhalb der Steuergeräte vornehmlich als Applikation bezeichnet (Kopp & Schaller, 2016). Die vorliegende Arbeit stellt dabei die Getriebeapplikation in den Fokus. Naunheimer et al. (2019, S. 687) definieren die Getriebeapplikation als „die Anpassung der Getriebeeigenschaften an die Dynamik und das Verhalten des Gesamtfahrzeuges durch Bedatung der Software“. Als Software wird in diesem Zusammenhang die „Gesamtheit aller Softwarekomponenten,

inkl. aller Daten“ bezeichnet, welche auf dem elektronischen Getriebesteuergerät⁵ läuft (Naunheimer et al., 2019, S. 680). Somit enthält die Software der elektronischen Getriebesteuerung alle erforderlichen Funktionen zur Steuerung und Regelung des Getriebesystems, der Kupplungen, der Motorführung und der Schaltstrategie. Grundsätzlich kann die Software im Rahmen der Antriebsapplikation (inkl. Getriebeapplikation) in Programm- und Datenstand unterteilt werden. Der Programmstand enthält die Gesamtheit der Algorithmen in Form von Steuerungs- und Regelungsfunktionen, wohingegen der Datenstand die Parametersätze gemäß des Zielsystems enthält. Folglich kann die Entwicklung und Anpassung der Datenstände als Applikation bezeichnet werden. (Naunheimer et al., 2019)

Typischerweise erfolgt die Getriebeapplikation im Umfeld der Fahrzeughersteller⁶ oder Entwicklungsdienstleister, da ein bestimmter Getriebetyp oftmals in unterschiedlichen Fahrzeugen diverser OEMs verbaut wird und die Applikation gemäß der jeweiligen Hersteller- und Kundenanforderungen erfolgt, um beispielsweise markttypische Eigenschaften abzubilden (Naunheimer et al., 2019; Wurm, 2015). In diesem Kapitel sollen zunächst die primären Handlungsfelder der Getriebeapplikation (Schaltstrategie und Schaltablauf) näher beleuchtet werden und abschließend soll dargestellt werden, wie der Applikationsprozess im Kontext der Fahrbarkeit gegenwärtig erfolgt. Dabei wird dargestellt, dass insbesondere der Mensch als Messinstrument eine zentrale Rolle im Rahmen der Applikation einnimmt.

2.2.1 Primäre Handlungsfelder der Getriebeapplikation

Im Rahmen der Getriebeapplikation gibt es zwei primäre Handlungsfelder (Schaltstrategie und Schaltablauf), welche im Folgenden näher erläutert werden sollen. Nach Naunheimer et al. (2019, S. 687) erfolgt die Applikation von Schaltstrategie und Schaltablauf vornehmlich im Hinblick auf folgende Aspekte:

- Fahrkomfort: Schaltqualität, Schwingungen, Lastwechselverhalten
- Fahrverhalten: Spontanität, Verbrauch/Emission
- Fahrsicherheit: Funktionssicherheit, Dauerhaltbarkeit des Getriebes

2.2.1.1 Schaltablauf

Die Steuerung und Regelung des Anfahrens und des Gangwechsels zählen neben der Schaltstrategie zu den wesentlichen Funktionen der Getriebesteuerung. Diese

⁵ engl. Transmission Control Unit – TCU

⁶ engl. Original Equipment Manufacturer – OEM

werden vom Fahrer bewusst wahrgenommen, weshalb das Sicherstellen der optimalen Anfahr- und Schaltqualität in allen Betriebspunkten die primäre Aufgabe der Ablaufsteuerung ist. (Gruhle, 2010)

Grundsätzlich werden Schaltungen in Abhängigkeit der Orientierung des Momentenflusses am Rad bzw. Triebstrang in Zug- bzw. Schub-Schaltungen unterteilt (Fischer, Küçükay, Jürgens & Pollak, 2016). Liegt ein positives Moment an, so werden diese Schaltungen als Zug-Schaltungen bezeichnet. Bei einem negativen Moment wird von einer Schub-Schaltung gesprochen. Zusätzlich wird unterschieden, ob es sich um eine Hoch- bzw. Rückschaltung handelt, also ob der Zielgang sich erhöht oder verringert. Somit ergeben sich folgende vier Hauptschaltarten:

- Zug-Hochschaltung (ZHS)
- Zug-Rückschaltung (ZRS)
- Schub-Hochschaltung (SHS)
- Schub-Rückschaltung (SRS)

In Abhängigkeit der Hauptschaltarten werden durch die Getriebesteuerung individuelle Schaltabläufe ausgeführt. Hinzu kommen Schaltungen, in denen sich während des Schaltablaufs der Fahrerwunsch ändert (sog. Change-of-Mind oder Abbruch-Schaltungen) (Fischer et al., 2016). Wird durch die Getriebesteuerung ein derartiger Wechsel des Fahrerwunschs detektiert, muss die Getriebesteuerung entsprechend reagieren und die Ablaufsteuerung gegebenenfalls anpassen. In Abhängigkeit des jeweiligen Getriebekonzeptes (z.B. Wandlerautomatik oder Doppelkupplungsgetriebe) unterscheiden sich die Schaltabläufe substanziell. Da sich die vorliegende Arbeit mit der effizienteren Validierung von Doppelkupplungsgetrieben befasst, soll im weiteren Verlauf jedoch lediglich auf den Schaltablauf dieses Getriebekonzeptes näher eingegangen werden. Anhand einer ZHS soll dieser beispielhaft erläutert werden. Grundsätzlich ist der Schaltablauf in vier individuelle Phasen unterteilt, was in Abbildung 2.5 mittels zeitlicher Markierungen hervorgehoben ist. In Phase 1 ist Kupplung K_1 zunächst geschlossen. Die Kupplung K_2 ist zu diesem Zeitpunkt geöffnet, wobei mit Beginn der Schaltung der hydraulische Zylinder zur Betätigung der K_2 mit einer schnellen Druckerhöhung befüllt und anschließend konstant gehalten wird, um den Anlegepunkt (auch engl. Touch Point) zu lokalisieren (Kahlbau, 2013). An diesem Punkt berühren sich die Kupplungslamellen gerade, ohne jedoch relevante Momente zu übertragen. Die Kupplung geht in diesem Moment vom offenen in den schlupfenden Zustand über (Kahlbau, 2013). Das übertragende Kupplungsmoment M_{K1} ist zu diesem Zeitpunkt, gemäß des d'Alembertschen Prinzips, um $J_{Mo} \cdot \dot{\omega}_1$ kleiner als das Motormoment M_1 . Dieses Moment $J_{Mo} \cdot \dot{\omega}_1$ setzt sich aus der Massenträgheit J_{Mo} und der Winkelbeschleunigung $\dot{\omega}_1$ des Motors zusammen. (Fischer et al., 2016)

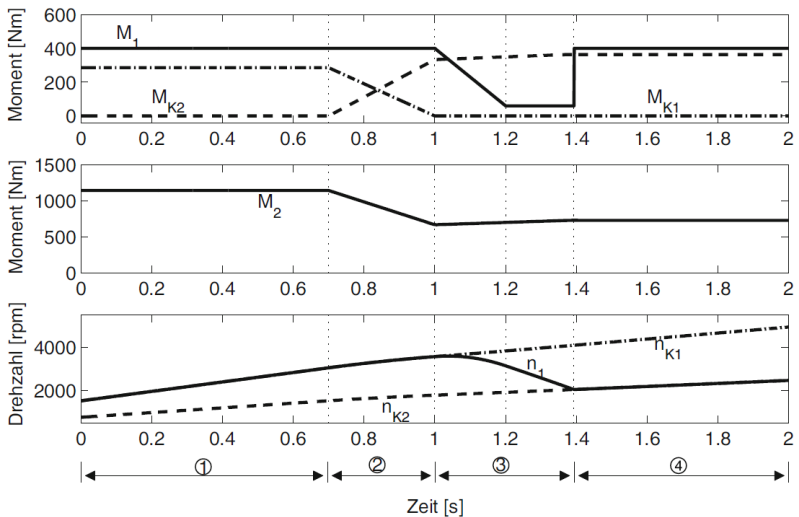


Abbildung 2.5: Zug-Hochschaltung mit Momenteneingriff des Motors [M_1 - Motormoment; M_2 - Getriebe-Ausgangsmoment; M_{K_1/K_2} - Moment an Kupplungen K_1/K_2 ; n_{K_1}/n_{K_2} - Drehzahl an Kupplung K_1/K_2 ; n_1 - Motordrehzahl] (Fischer et al., 2016)

In Phase 2 (sog. Überschneidungsphase) wird die K_2 kontinuierlich geschlossen und beginnt folglich Momente M_{K_2} zu übertragen. Gleichzeitig wird die K_1 geöffnet, weshalb sich das Kupplungsmoment M_{K_1} reduziert. Infolge der neuen Gangübersetzung reduziert sich in dieser Phase ebenfalls das Getriebe-Ausgangsmoment M_2 . Am Ende der Phase 2 wird das Moment vollständig durch die Kupplung K_2 übertragen. In der sich anschließenden Synchronisationsphase (Phase 3), wird die Motordrehzahl n_1 an die Zieldrehzahl der zweiten Getriebewelle n_{K_2} angeglichen. Typischerweise erfolgt dieser Angleich, wie in dem Beispiel dargestellt, mittels Eingriff des Motors, indem das Motormoment M_1 kurzfristig reduziert wird. Dieser Momenteneingriff erfolgt vornehmlich aus Gründen des Komforts. Andernfalls würde das Moment an der K_2 über das Motormoment hinaus erhöht werden, was in einem kurzen Anstieg des Getriebe-Ausgangsmomentes M_2 und nach Erreichen des Synchronpunktes in einem entsprechenden Abfall resultiert. Diese plötzliche Änderung wird einerseits als unharmonisch wahrgenommen und führt andererseits dazu, dass an der schlupfenden Kupplung Leistung dissipiert, was aus Verbrauchsgründen ebenfalls zu vermeiden ist (Fischer et al., 2016). Typischerweise werden derartige Überhö-

hungsschaltungen mit angepasstem Motoreingriff lediglich in sehr Performance-orientierten, durch den Fahrer aktiv ausgewählten, OEM-spezifischen Fahrmodi wie Race oder Sport+ umgesetzt. In allen anderen Modi (z.B. Normal) wird die Synchronisationsphase üblicherweise mit Motormomenteneingriff appliziert. Nachdem die Motordrehzahl n_1 an die Zieldrehzahl n_{K2} angeglichen wurde, wird in Phase 4 das Motormoment M_1 auf das ursprüngliche Niveau angehoben, d.h. der Motormomenteneingriff wird zurückgenommen. Auch hier ist, wie vor der Schaltung, das übertragende Kupplungsmoment M_{K2} um $J_{Mo} \cdot \dot{\omega}_1$ kleiner als das Motormoment M_1 . Es muss an dieser Stelle angemerkt werden, dass der beschriebene Schaltablauf einem idealen Verlauf entspricht. Jegliche Abweichungen der Systemreaktionen von Getriebe und Motor können die resultierende, durch den Fahrer wahrnehmbare Schaltqualität signifikant beeinflussen. Beispielsweise führen unstetige Verläufe beim Öffnen bzw. Schließen der Kupplungen (z.B. Flares oder Verspannungen) zu Störungen in den Momentenverläufen im Antriebsstrang bzw. an den Rädern, was als unkomfortabel wahrgenommen wird. (Fischer et al., 2016)

2.2.1.2 Schaltstrategie

Neben dem, im vorigen Kapitel beschriebenen Schaltablauf ist die Schaltstrategie die zweite zentrale Funktion der Getriebesteuerung. Jedes moderne, automatisch schaltende Getriebe verwendet eine Schaltstrategie zur Schaltpunktsteuerung. Während in älteren Automatikgetrieben eine rein hydraulische Ansteuerung erfolgte, werden heutzutage elektronische Steuergeräte mit komplexen Softwarefunktionen zur Berechnung des geeignetsten Ganges eingesetzt (Fischer et al., 2016). Die primäre Aufgabe der Schaltstrategie liegt darin, alle Umgebungsbedingungen so zu interpretieren, dass in jeder Fahrsituation der optimale Gang eingelegt wird (Fischer et al., 2016). Die Darstellung des Optimums erfolgt dabei stets im Spannungsfeld zwischen Kraftstoffverbrauch, Emissionen und Fahrleistung (Naunheimer et al., 2019). Darüber hinaus muss die Schaltstrategie den Erwartungen des Fahrers und seiner Fahrweise gerecht werden, was neben der Berücksichtigung von physikalischen Gegebenheiten noch zu einer Integration von empirischen Aspekten führt (Naunheimer et al., 2019). Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, sind Schaltstrategien typischerweise hierarchisch aufgebaut. Zunächst werden alle relevanten Eingangsgrößen wie Fahrpedal, Längsbeschleunigung oder Fahrzeuggeschwindigkeit aufbereitet und der internen Funktionsarchitektur zur Verfügung gestellt. Im nächsten Schritt wird mittels Grundschaltschaltkennfeldern ein initialer Gang gebildet, welcher abschließend noch durch gangbeeinflussende Sonderfunktionen variiert werden kann (Gruhle, 2010). Diese Sonderfunktionen werden typischerweise in Abhängigkeit von speziell identifizierten Fahrsituationen aktiviert bzw. deaktiviert. Grundsätzlich ist ein Schaltkennfeld als Funktion von Fahrpedalwert und Geschwindigkeit definiert, was in Abbildung 2.6 beispielhaft für ein 6-Gang Automatikgetriebe dargestellt ist (Gruhle, 2010). Es ist zu erkennen, dass die Schaltpunkte

für Hoch- und Rückschaltungen als Hysterese parametrisiert sind. Damit werden beispielsweise ungewollte Pendelschaltungen unterbunden (Förster, 1991).

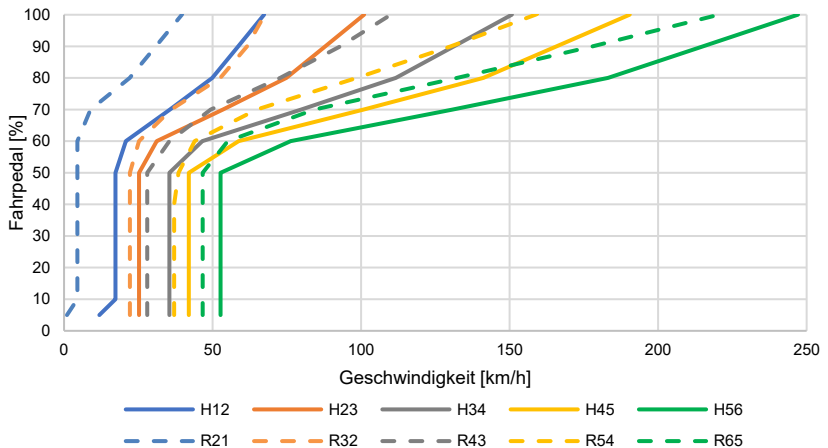


Abbildung 2.6: Schaltkennfeld eines beispielhaften 6-Gang Automatikgetriebes [*H* - Hochschaltung, *R* - Rückschaltung]

Um der Zu- bzw. Abnahme des Fahrwiderstandes infolge unterschiedlicher Steigungen Rechnung zu tragen, werden neben dem Basis-Kennfeld weitere Kennfelder für positive und negative Steigungen parametrisiert. Da diese sog. Berg-Kennfelder lediglich für einen expliziten Steigungswert (z.B. 15%) parametrisiert werden, kann in Abhängigkeit der aktuell identifizierten Steigung zwischen den jeweiligen Kennfeldern interpoliert werden. Eine durchgängige, fahrwiderstandsabhängige Verschiebung der Schaltpunkte wird somit sichergestellt.

Um der Fahrweise des Fahrers Rechnung zu tragen, werden analog zu den Berg-Kennfeldern gesonderte Sport-Kennfelder parametrisiert. In Abhängigkeit der identifizierten Sportlichkeit des Fahrers wird folglich zwischen dem Basis- und Sport-Kennfeld interpoliert (siehe Abbildung 2.7). Die Sportlichkeit wird dafür mittels des Fahrpedalgradienten sowie der Längs- und Querschleunigung innerhalb der Schaltstrategie separat berechnet. Neben dieser fahrweisen- und steigungsabhängigen Schaltpunktverschiebung werden dem Fahrer oftmals noch unterschiedliche Fahrmodi (z.B. Normal, Sport, Sport+) zur Verfügung gestellt, die er eigenständig auswählen bzw. aktivieren kann. In Abhängigkeit der jeweiligen Charakteristika werden für diese Modi individuelle Kennfelder appliziert, so dass beispielsweise in Sport

die Schaltpunkte bei gleichem Fahrpedalwert zu höheren Geschwindigkeiten verschoben werden, um ein dynamischeres Fahrverhalten⁷ in Form von höheren Motordrehzahlen zu erzielen. Dieser Zusammenhang ist ebenfalls in Abbildung 2.7 schematisch dargestellt.

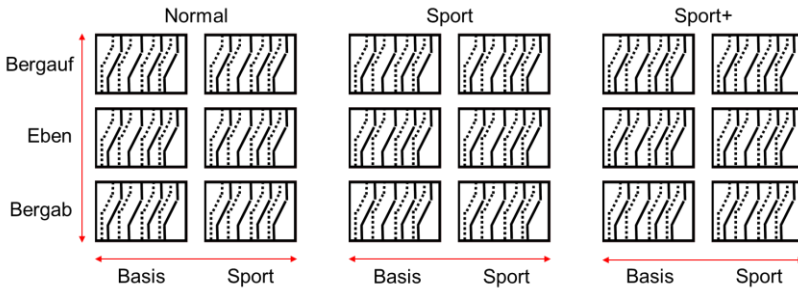


Abbildung 2.7: Schaltpunktverschiebung in Abhängigkeit der Fahrweise (Basis, Sport), der Steigung (Bergab, Eben, Bergauf) und des gewählten Fahrmodi (Normal, Sport, Sport+) [Interpolation rot markiert]

Wie bereits skizziert, kann im letzten Schritt der initiale Gang, welcher aus den Kennfeldern hervorgeht, durch gangbeeinflussende Sonderfunktionen nochmal angepasst werden. Dafür wird durch die Schaltstrategie analysiert, ob es sich in der aktuellen Fahrsituation um spezielle Sondersituationen handelt. Unter Berücksichtigung zusätzlicher Informationen wie Fahrpedalgradient oder Querbewegung in der Kurvenfahrt werden die Fahrsituationen identifiziert und die Gangwahl entsprechend angepasst (Gruhle, 2010). Da eine Vielzahl derartiger Sonderfunktionen existiert und die Berücksichtigung dieser stark von dem angestrebten Fahrzeugcharakter des jeweiligen OEM und der Markpositionierung abhängt, soll im Folgenden lediglich beispielhaft die Funktion der Bremsrückschaltungen dargestellt werden.

Für komfortable Fahrsituationen werden die Schaltkennfelder typischerweise verbrauchsoptimiert ausgelegt, weshalb im Schub frühestmöglich der nächsthöhere Gang eingelegt werden soll. Daraus resultiert folglich eine minimale Bremswirkung des Motors (Förster, 1991). Bei einer betont sportlichen Fahrweise wird jedoch bereits während der Verzögerungsphase vorm Kurveneingang angestrebt, den optimalen und somit niedrigeren Gang einzulegen, so dass beim Verlassen der Kurve

⁷ Als dynamischeres Fahrverhalten wird in diesem Kontext ein besseres Ansprechverhalten des Motors infolge von Fahrpedaländerungen verstanden

am Kurvenausgang eine maximale Beschleunigung ohne zusätzliche, zeitintensive Rückschaltungen ermöglicht wird. Folglich resultiert daraus auch eine erhöhte Bremswirkung des Motors, welche zusätzlich zur Reduktion des Bremsweges beiträgt. Diese gezielten Rückschaltungen in Abhängigkeit der sportlichen Fahrweise und der Negativbeschleunigung werden als Bremsrückschaltungen beschrieben und werden mittels separater Kennfelder parametrieren. Es ist evident, dass diese Sonderfunktion der Schaltstrategie vornehmlich bei sportlicheren Fahrzeugen Anwendung findet.

Aufgrund der Vielzahl an Möglichkeiten im Rahmen der gangbeeinflussenden Sonderfunktionen ist ein manueller Eingriff durch den Fahrer im Drive Mode (D) praktisch nicht mehr notwendig. Dennoch wird diese Option angeboten, um die Attraktivität von Automatikgetrieben weiter zu steigern (Gruhle, 2010). Dieser Eingriff durch den Fahrer kann typischerweise direkt in D (beispielsweise durch Betätigung der Schaltwippen⁸) oder in einem separaten, manuellen Modus (M) erfolgen. Ist dieser ausgewählt, werden nahezu alle Gangwechsel nur noch durch den Fahrer initiiert. Dennoch werden aus Gründen der Sicherheit und des Bauteilschutzes Grenzen in M definiert, so dass beispielsweise infolge von Schaltungen die Maximal- oder Leerlaufdrehzahl des Motors nicht über- oder unterschritten wird. In Abhängigkeit der individuellen Markenideologie des OEM können darüber hinaus auch in M automatische Schaltungen durch die Schaltstrategie initiiert werden, beispielsweise bei Unterschreiten einer definierten Grenzdrehzahl, was in der vorliegenden Fahrsituation zum Abwürgen des Motors führen kann.

2.2.2 Subjektive Wahrnehmung und Fahrbarkeit

Es wurde bereits dargestellt, dass die Antriebsapplikation und die Getriebeapplikation im Speziellen sehr stark geprägt ist durch die Aspekte des Fahrverhaltens und des Komforts, neben den Aspekten des Verbrauchs bzw. der Emission und der Fahrsicherheit. Wie Personen das Fahrverhalten jedoch im Detail wahrnehmen, ist geprägt von vielen Einflussfaktoren und stark subjektiv. Darüber hinaus ist das wahrgenommene Fahrverhalten geprägt vom jeweiligen Fahrzeug, der entsprechenden Fahrzeugklasse und der damit verbundenen Erwartungshaltung des Fahrers (Ladwig, Köhler & Schwalm, 2018). Fahrbarkeit ist dabei der Begriff, der genutzt wird, um das „empfundene Fahrverhalten in bestimmten Fahrsituationen zu beschreiben“ (Ladwig et al., 2018, S. 35). Die Fahrbarkeit wird als „wesentliche Komponente des Fahrkomforts“ sowie als „Grundpfeiler der Produktqualität“ beschrieben (Ladwig et al., 2018, S. 34). Die Fahrbarkeit gilt als essenziell für die

⁸ Im internationalen Umfeld auch als Paddles bezeichnet

Differenzierung von Fahrzeugmarken und Marktpositionen, insbesondere in Zeiten von Gleichteil- und Plattformfahrzeugen (Liu, Zhang & Zhao, 2013; Schöggli, Ramschak, Bogner & Dank, 2001). Isa, Abidin und Mansor (2014) definieren Fahrbarkeit im Allgemeinen so, dass das Fahrzeug sich genauso verhält, wie es sich der Fahrer wünscht. Diese Definition wird von Köber, Jacobs, Karakus und Albers (2020) gestützt, da sie feststellen, dass die subjektive Wahrnehmung der Fahrer signifikant von der selbstgewählten Fahrweise abhängt. Im Kontext der Getriebeapplikation bedeutet das, dass wenn sich die Getriebesteuerung mit ihren entsprechenden Funktionen (Schaltstrategie und Schaltablauf) genauso verhält, wie der Fahrer es sich wünscht, dann erhöht sich die wahrgenommene Fahrbarkeit des Fahrers. Da Fahrbarkeit stark von der individuellen, subjektiven Wahrnehmung des Fahrers und somit auch des Applikationsingenieurs⁹ im Rahmen des PEP abhängig ist, erfolgt ein großer Teil der Applikation und deren finale Freigabe weiterhin auf realen Fahrversuchen mit physischen Prototypen.

Die Abhängigkeit von der subjektiven Wahrnehmung führt jedoch zu besonderen Herausforderungen in der Entwicklung. Eine wesentliche Herausforderung ist, neben der Reproduzierbarkeit und dem hohen zeitlichen Aufwand, die Vergleichbarkeit bzw. Quantifizierung des aktuellen Entwicklungsstandes. Um dafür eine Unterstützung leisten zu können, wird als Hilfsmittel zur Quantifizierung von subjektiven Wahrnehmungen im Kontext der Fahrbarkeit oftmals die sog. ATZ-Skala nach Aigner (1982) herangezogen. Der Name beruht auf ihrer erstmaligen Veröffentlichung in der Automobiltechnischen Zeitschrift (ATZ). Grundlage ist eine unipolare 10-Punkte Skala. Diese ist so definiert, dass mindestens ein Wert von 5 erreicht werden muss, um den Mindestanforderungen des Kunden zu entsprechen. Werte oberhalb von 7 resultieren in einer positiven Wahrnehmung des Kunden. Die ATZ-Skala bietet mehrere Kriterien zur Bewertung, so dass der Bewertende die Möglichkeit bekommt, für jeden Anwendungsfall individuell über die Wahl der Bewertungskriterien zu entscheiden (siehe Abbildung 2.8).

⁹ Unter „Applikationsingenieur“ oder kurz „Applikateur“ werden gleichermaßen alle „Applikationsingenieur:innen“ bzw. „Applikateur:innen“ verstanden. Der Autor bittet um Verständnis, dass aus Gründen der Sprachvereinfachung diese grammatische Form verwendet wird.

	nicht annehmbar				Grenzfall	annehmbar				
Bewertungsindex	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Bewertung des Verhaltens der Aggregate	Produktions-Verwertung				Grenzfall	annehmbar	ausreichend	gut	sehr gut	ausgezeichnet
	schlecht		Kundenbeschwerden							
Festgestellt von	allen Kunden	Durchschnittskunden			kritischen Kunden		Experten		-	
Geräusche Vibrationen Schütteln Rauheit	nicht annehmbar			unannehmlich	Verbesserung erforderlich	mäßig	leicht	sehr leicht	Spuren	keine
Achsenbewertung	E	D			C		B		A	

Abbildung 2.8: ATZ-Bewertungsskala in Anlehnung an (Aigner, 1982; Dylla, 2006, 2010)

Die Vielfalt an Anwendungsmöglichkeiten hat zu einer breiten Verwendung der Skala geführt. Dylla (2010) führt beispielsweise an, dass eine Vielzahl an Automobilherstellern, -dienstlern und -zulieferer die ursprüngliche ATZ-Skala nutzen, um ihre eigenen Bewertungsskalen daraus abzuleiten. So nennt er den Porsche Bewertungsindex (PBI) der Porsche AG als Beispiel einer individuellen Anpassung der ATZ-Skala (Dylla, 2010).

Um die Bewertung der Fahrbarkeit anhand der ATZ-Skala durchführen zu können, werden bestimmte Kompetenzen benötigt. Bereits das Kriterium „Festgestellt von“ gibt einen Hinweis darauf, dass Unterschiede der Kriterien oberhalb einer Bewertung von 7 nur noch durch Experten wahrgenommen werden können. Schöggel et al. (2001) konnten sogar zeigen, dass die Kombination bestimmter Einzelkriterien mit einer Bewertung oberhalb von 7 dazu führen kann, dass ein spezieller Fahrzeugcharakter erzielt wird. Diese Untersuchungen unterstreichen die besonderen Eigenschaften und Kompetenzen, die notwendig sind, um die subjektive Wahrnehmung im Kontext der Fahrbarkeit zu bewerten. Typischerweise wird diese Aufgabe durch Experten der Applikation, sog. Applikateure oder Applikationsingenieure, übernommen. Diese sind darauf spezialisiert, minimale Änderungen des Fahrzeugverhaltens in bestimmten Fahrsituationen zu identifizieren und entsprechend zu bewerten. Demnach dient der Mensch in diesem Kontext als Messinstrument. Die dafür benötigte Sensorik wird nach DIN 10950 als „Wissenschaft vom Einsatz menschlicher Sinnesorgane zu Prüf- und Messzwecken“ beschrieben (DIN 10950:2020-09). Neben angeborenen Eigenschaften wird die Sensorik eines Menschen besonders durch Training und Erfahrung beeinflusst, was dazu führt, dass die Fahrbarkeit in

der Antriebsentwicklung bezüglich ihrer Änderungen sehr genau wahrgenommen und bewertet werden kann. Heißing und Brandl (2002) stellen beispielsweise dar, dass sich in der Praxis eine Differenzierung der 10-stufigen ATZ-Notenskala auf halbe oder sogar Viertelnoten bewährt hat. Diese Differenzierung impliziert, dass erfahrene Applikateure Änderungen in dem Bereich exakt identifizieren können.

Mit diesem Grundverständnis zur subjektiven Bewertung unterschiedlicher Fahrsituationen lässt sich der Applikationsprozess mithilfe des ZHO-Modells nach Albers et al. (2013) beschreiben. Hasel et al. (2015) beschreibt die Applikation als einen iterativen Prozess, welcher sich ebenfalls am ZHO-Modell nach Albers et al. (2013) orientiert. Die bisher beschriebenen Aspekte des manöverbasierten Testens (Fahren, Messen, Fühlen) und der entsprechenden Bewertung und Auswertung können als Analyse zusammengefasst werden. In der sich anschließenden Phase der Synthese wird die Parametrierung entsprechend den Erkenntnissen aus der Analyse angepasst. Die Synthese erfordert ein tiefgreifendes Verständnis des Motor-Getriebe-Verbundes, um die Auffälligkeiten der subjektiven Wahrnehmung in den dazugehörigen Messdaten zu lokalisieren, deren Ursachen zu identifizieren und geeignete Maßnahmen daraus abzuleiten. Ausgehend von einer initialen Erstbedatung erfolgt der gesamte Prozess in Iterationsschleifen, bis die geforderte Güte erreicht wird (siehe Abbildung 2.9). Das Erreichen der Güte kann auch als Zielsystem im Kontext des ZHO-Modells verstanden werden. Das Zielsystem im Sinne der Fahrbarkeit ist demnach geprägt durch die Forderungen des Kunden, der Marktpositionierung des Fahrzeuges, der Erfahrung des Applikateurs und dem Anspruch des OEM.

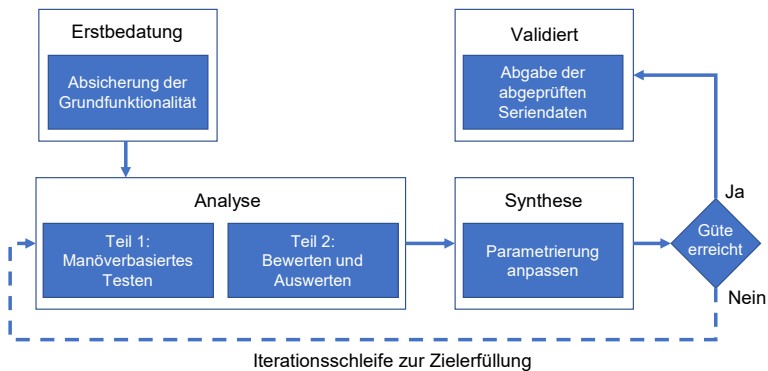


Abbildung 2.9: Iterativer Applikationsprozess nach Hasel, Albers und Behrendt (2015)

2.3 Ansätze zur Effizienzsteigerung der Applikation

Es wurde bereits dargestellt, dass der konventionelle Entwicklungsprozess der Antriebsapplikation mit besonderen Herausforderungen verbunden ist, welche zu großen Teilen auf die Abhängigkeit zur subjektiven Wahrnehmung zurückzuführen sind. Um diesen Herausforderungen zu begegnen und den Applikationsprozess mit geeigneten Werkzeugen zu unterstützen, wurden in der Literatur bereits erste Ansätze vorgestellt. Diese lassen sich im Wesentlichen auf zwei primäre Handlungsfelder aufteilen und sollen im Rahmen dieses Kapitels näher beleuchtet werden. So kann die Antriebsapplikation einerseits im Kontext des IPEK-XiL-Ansatzes methodisch unterstützt werden, indem ausgewählte Testfälle und Manöver auf alternative Validierungsumgebungen übertragen werden. Andererseits liegt ein großes Potenzial zur Effizienzsteigerung im Bereich der Objektivierung der subjektiven Wahrnehmung, da damit sowohl eine hinreichende Reproduzierbarkeit als auch Übertragbarkeit auf alternative Validierungsumgebungen ermöglicht wird.

2.3.1 Alternative Validierungsumgebungen

Unter Berücksichtigung der verschiedenen Ebenen des IPEK-XiL-Ansatzes kann das SiD in dieser Arbeit vom Gesamtfahrzeug bis hin zu einzelnen Software-Funktionen vorliegen. Entsprechend können auch die Validierungsumgebungen als Ausprägung vom realen Fahrversuch bis zur rein-virtuellen Simulation mit entsprechenden Restfahrzeugmodellen vorliegen. Es ist evident, dass im Rahmen dieser Arbeit nicht alle potenziellen Validierungsumgebungen der Antriebsapplikation dargestellt werden können, weshalb im Folgenden der Fokus zunächst auf Fahrversuchen, Gesamtfahrzeugprüfständen und Simulationen liegt.

2.3.1.1 Fahrversuche

Wie bereits in Kap. 2.2.2 dargestellt, ist der Applikationsprozess zu wesentlichen Teilen geprägt von der subjektiven Wahrnehmung des Applikationsingenieurs im realen Fahrzeug. Aus diesem Grund sind, trotz erster Ansätze zur Validierung mittels alternativer Validierungsumgebungen, Fahrversuche mit physischen Prototypen noch immer Stand der Technik heutiger Getriebeapplikationen (Wurm, 2015). Da im Sinne des IPEK-XiL-Ansatzes sowohl das Fahrzeug als auch dessen Fahrer und Umwelt real vorliegen, bedarf es keiner zusätzlichen Modellbildung zur Entwicklung der Validierungsumgebung. Daraus resultiert eine hohe Ergebnisgüte bei gleichzeitig geringer Reproduzierbarkeit. Typischerweise werden im Rahmen von Fahrversuchen entweder individuelle Manöver für spezifische Validierungsziele angefahren (manöverbasierte Validierung), oder es wird durch freies Fahren versucht, einen

Gesamteindruck über den Fahrzeugcharakter und die Fahrbarkeit zu gewinnen. Beim freien Fahren werden lediglich die Streckenanteile (z.B. Stadt, Überland, Gebirge, etc.) sowie die Temperaturzonen (z.B. kalt, heiß) vorher definiert. Wie der Applikateur das Fahrzeug jedoch bewegt (z.B. komfortabel, ausgeglichen, sportlich), ist frei wählbar.

Neben der essenziellen, subjektiven Bewertung der Fahrbarkeit werden zusätzlich objektive Messgrößen während des Fahrversuchs aufgezeichnet. Dies ist notwendig, um im Kontext der Analyse zunächst die Ursache des negativ empfundenen Verhaltens in spezifischen Situationen zu identifizieren. Darauf aufbauend werden im nächsten Schritt Rückschlüsse auf die zu verändernden Parameter gezogen (Synthese). Vielfach verwendete Tools zum Messen, Analysieren und Kalibrieren sind beispielsweise CANape der Firma Vector oder INCA der Firma ETAS. Mithilfe dieser Tools können alle gängigen Bus-Systeme (z.B. FlexRay oder CAN) sowie interne Steuergerätegrößen mitgemessen werden. Darüber hinaus kann direkt auf die Parameter und Kennfelder im Steuergerät zugegriffen werden. Letzteres setzt jedoch entweder die Verwendung eines speziellen Protokolls (sog. XCP-Protokoll) oder die Verwendung spezieller Steuergeräte mit einem gesonderten Tastkopf voraus (z.B. ETAS Emulator Tastkopf – ETK). Werden im Rahmen des Fahrversuches verbesserungswürdige Situationen identifiziert, so setzt der Fahrer in der Messung sog. Marker. Dies ermöglicht eine nachgelagerte Analyse, insbesondere bei längeren Messungen.

Neben dem freien Fahren nimmt die manöverbasierte Validierung einen wesentlichen Anteil der Fahrversuche ein. Im Rahmen der Getriebeapplikation werden dafür Manöverkataloge eingesetzt, welche sich an denen von Albers et al. (2015) orientieren (vgl. Kap. 2.1.3). Diese bieten den fundamentalen Vorteil, dass alle Applikateure produktgenerations- und produktlinienübergreifend dieselben Manöver fahren und somit auch bewerten. Insbesondere im Kontext der vier Hauptschaltarten und konventioneller verbrennungsmotorischer, aber auch hybrider Antriebe sind produktgenerations- und produktlinienübergreifend keine wesentlichen Anpassungen der definierten Manöver zu erwarten. Unter Berücksichtigung derselben Bewertungsskala resultiert daraus im Kontext der subjektiven Bewertung eine direkte Vergleichbarkeit der Ergebnisse. In Abbildung 2.10 ist beispielhaft ein Auszug eines Manöverkatalogs zur Validierung der Schaltqualität von ZHS eines OEM dargestellt.

Zughochschaltungen	Normal		D				
	1 - 2	2 - 3	3 - 4	4 - 5	5 - 6	6 - 7	7 - 8
10%							
20%							
30%							
40%							
50%							
60%							
70%							
80%							
90%							
100%							

Abbildung 2.10: Auszug eines Manöverkatalogs zur Validierung der Schaltqualität von ZHS in Normal und D *[Angaben in Prozent entsprechen den Fahrpedalwerten; Einzutragen sind die subjektiven Bewertungen der einzelnen Schaltungen beispielsweise anhand der ATZ-Skala]*

Alle Manöver des Manöverkatalogs sollen durch die Applikateure zu den jeweiligen Meilensteinen im PEP für jedes Fahrzeug angefahren und subjektiv bewertet werden. An dieser Stelle gilt es anzumerken, dass Manöverkataloge in der Getriebeapplikation typischerweise als globale Kataloge vorliegen. Global bedeutet in diesem Zusammenhang, dass der Katalog über alle Produktlinien und -generationen hinweg gültig ist und zunächst keine Unterscheidung in Abhängigkeit des SiD erfolgt. Im Sinne einer durchgehenden und kontinuierlichen Validierung ist dies prinzipiell als positiv zu bewerten, da der Manöverkatalog stetig weiterentwickelt wird. Ein produktlinien- und produktgenerationsübergreifender Wissenstransfer wird somit sichergestellt. Dennoch ist ein globaler Manöverkatalog ohne Berücksichtigung des SiD bzw. Sul auch mit Nachteilen verbunden, was bereits im Rahmen der manöverbasierten Validierung nach Albers et al. (2015) und Matros (2016) angemerkt wird (siehe 2.1.3). So kann es vorkommen, dass beispielsweise in Abhängigkeit der verschiedenen Antriebskonzepte¹⁰ nicht immer alle Manöver angefahren werden können. Im Kontext der Getriebeapplikation bedeutet das konkret, dass leistungs- und applikationsabhängig nicht alle Fahrzeuge alle Schaltungen des Manöverkatalogs anfahren können. Da zu Beginn der Validierung nicht bekannt ist, welche Schaltungen fahrbar sind und welche nicht, werden zunächst alle Schaltungen versucht anzufahren. Es ist evident, dass dieser Trial & Error Ansatz bei der Vielzahl an zu validierenden Schaltungen in signifikanten zeitlichen Nachteilen resultiert.

¹⁰ z.B. hybrid oder konventionell

2.3.1.2 Gesamtfahrzeugprüfstände

Um Entwicklungszeiten zu verkürzen und den Applikationsprozess somit effektiver zu gestalten, können Validierungsaktivitäten von Fahrversuchen auf Prüfstände verlagert werden. Dieses sog. „Road-to-Rig (R2R)“ Konzept wurde bereits anhand einer Vielzahl von Veröffentlichungen dargestellt (Albers et al., 2015; Albers, Schille, Hettel & Behrendt, 2018; Hasel et al., 2015; Matros, 2016; Schille, 2020).

In Abhängigkeit der eingebundenen physischen Systeme können unterschiedliche Prüfstandskonfigurationen wie z.B. Komponenten-, Antriebsstrang-, oder Gesamtfahrzeugprüfstände zum Einsatz kommen (Matros, 2016). Im Kontext des IPEK-XiL-Ansatzes sollen Manöver und Testfälle so realitätsnah wie möglich getestet werden, so dass Fahrer, Fahrzeug und Umwelt integriert werden. Albers und Düser (2010) erweitern deshalb einen konventionellen Rollenprüfstand konsequent zu einem Vehicle-in-the-Loop-Prüfstand (ViL), wie z.B. der IPEK-Akustikrollenprüfstand (ARP). Da das gesamte Fahrzeug das SiD darstellt und somit auf die Entwicklung eines Restfahrzeugmodells verzichtet werden kann, steht für die Weiterentwicklung des Rollenprüfstandes zum ViL die Fahrzeugintegration und die Umsetzung des Fahrers in einer Fahrersimulation im Vordergrund. Bei der Fahrzeugintegration fokussieren Albers und Düser (2010) sich zunächst auf Fahrzeuggeschwindigkeit und Motordrehzahl. Um jedoch auch Komfortbewertungen am IPEK-ARP ermöglichen zu können, erweitern Albers et al. (2018) diese Betrachtung um Analysen der resultierenden Längsbeschleunigung des Fahrzeuges. Zur Bestimmung der Längsbeschleunigung werden unterschiedliche Beschleunigungssensoren am Fahrzeug angebracht (Fußablage, Fahrersitzschiene und Anhängerkupplung). Es stellt sich heraus, dass die resultierende Längsbeschleunigung im Rahmen der Versuche maßgeblich durch die gewählte Fahrzeugfixierung (Hakenfixierung, Radnabenfixierung, Fahrbarkeitsfixierung) beeinflusst wird. Die verschiedenen Fixierungen weisen durch ihre unterschiedlichen Steifigkeiten unterschiedliche Eigenfrequenzen auf, was sich wiederum stark auf die sensorisch bestimmte Längsbeschleunigung auswirkt. Somit muss die Fahrzeugfixierung, in Abhängigkeit der zu untersuchenden Schwingungsphänomene, stets individuell gewählt werden. Es wird konstatiert, dass im Kontext der Komfortbewertung keine Fixierung über alle Frequenzbereiche hinweg priorisiert werden kann. Diese Ergebnisse werden durch Nehlsen, Jedicke, Bogner und Schöggel (2006) sowie Pillas (2017) bestätigt. Im Rahmen ihrer Untersuchungen zu Fahrbarkeitsbewertungen am Rollenprüfstand diskutieren sie ebenfalls den Einfluss der Fesselung und identifizieren die Radnabenfixierung als geeignetste Option, da sich der Fahrzeugaufbau frei bewegen kann. Das Schwingverhalten des Gesamtfahrzeuges entspricht somit am ehesten dem des Fahrversuchs. Kritisch bewertet wird auch das Eigenschwingverhalten, das jedoch im Rahmen ihrer Arbeit nicht näher untersucht wird.

Neben der Analyse der Längsbeschleunigung hinsichtlich komfortrelevanter Aspekte kann die derartig bestimmte Längsbeschleunigung auch herangezogen werden, um ein realistischeres Fahrzeugverhalten im Kontext der Antriebsapplikation zu generieren. Einen solchen Ansatz stellen Hasel et al. (2015) vor. Hasel et al. (2015) stellen fest, dass über die genannte Fahrbarkeitsfixierung (inkl. Kraftmessdose) die Längsbeschleunigung für analytische Zwecke bestimmt werden kann, die Steuergeräte des Fahrzeuges jedoch diese Information nicht erhalten. Um das Fahrzeug dennoch am ViL adäquat betreiben zu können, ohne dass ein spezieller Rollenmodus¹¹ aktiviert werden muss, emulieren Hasel et al. (2015) die Längsbeschleunigung. Dazu wird die gemessene Kraft an der Kraftmessdose unter Berücksichtigung der Fahrzeugmasse in eine Längsbeschleunigung umgerechnet und dem Antriebs-CAN des Fahrzeuges aufgeprägt (siehe Abbildung 2.11). Die relevanten Steuergeräte sehen somit die emulierte Längsbeschleunigung und können entsprechend darauf reagieren. Im Kontext der Getriebesteuerung können so beispielsweise Bremsrückschaltungen in Abhängigkeit der emulierten, negativen Längsbeschleunigung initiiert werden.

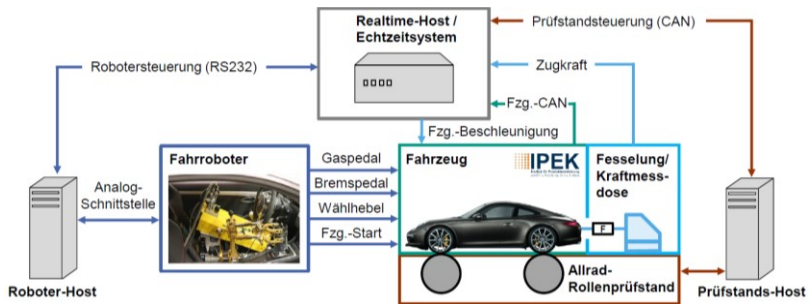


Abbildung 2.11: Versuchsaufbau zur ViL-Kalibrierung mittels emulierter Längsbeschleunigung am IPEK-Akustikrollenprüfstand (Hasel et al., 2015)

Neben den bereits thematisierten Nachteilen hinsichtlich des Einflusses der Fixierung auf die Längsbeschleunigung unterliegen Rollenprüfstände auch bezüglich der Testfalldynamik bestimmten Restriktionen infolge der hohen Massenträgheit der

¹¹ Modus, um Fahrzeuge am Prüfstand zu betreiben. Ist dieser aktiv, errechnen sich die Steuergeräte bspw. eine Ersatzbeschleunigung mittels alternativer Messsignale (z.B. Raddrehzahl). Darüber hinaus sind die Fahrerassistenzsysteme wie Traktionskontrolle oder ESP deaktiviert

Rollen (Bauer, 2011). Um diesen Nachteilen zu begegnen, gibt es alternative Gesamtfahrzeugprüfstandkonzepte, die vornehmlich darauf beruhen, dass an den Seitenwellen des Fahrzeugs (anstelle der Räder) Dynamometer (kurz Dyno) befestigt werden. Demnach wird die von Nehlsen et al. (2006) präferierte Radnabenfixierung aufgegriffen und weiterentwickelt. Dieses Konzept ist sowohl als ViL als auch als Powertrain-in-the-Loop Prüfstand (PiL) einsetzbar. Bauer (2011) stellt in diesem Zusammenhang ein neuartiges Regelungskonzept vor, welches das jeweils gemessene Seitenwellenmoment als Eingangsgröße für ein vollständiges Radmodell nutzt. Als Ausgangsgröße des Radmodells wird die Winkelgeschwindigkeit $\omega_{W,ref}$ berechnet, welche als Referenzwert für die Drehzahlregelung der Dynos dient (siehe Abbildung 2.12). Da die Ist-Drehzahl der Seitenwellen $\omega_{W,act}$ direkt messbar ist, kann gewährleistet werden, dass Soll- und Ist-Drehzahl hinreichend genau übereinstimmen und der Antriebsstrang am Prüfstand den Vorgaben entsprechend belastet wird. Aufgrund der hohen Drehzahlen wird eine entsprechend hohe Regelfrequenz gefordert, welche Bauer mit 10 kHz als ausreichend angibt.

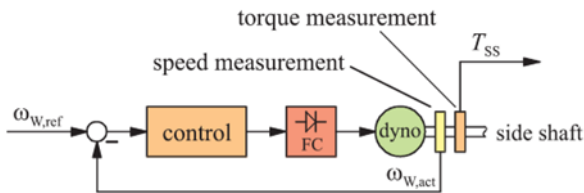


Abbildung 2.12: Drehzahlregelung jedes Dynos mit der Winkelgeschwindigkeit des Radmodells als Referenzwert (Bauer, 2011)

Für die Berechnung der Winkelgeschwindigkeit ω_W verwendet Bauer ein Momentengleichgewicht als Reifenmodell nach Gl. 2.1. Dabei berücksichtigt er die Massenträgheit des Rades J_W , das gemessene Moment an den Seitenwellen M_{SS} , das Moment auf Basis der transferierten Längskraft des Rades zur Straße in longitudinaler Richtung M_{Fx} und die Reibverluste M_{fric} .

$$J_W \frac{d\omega_W}{dt} = M_{SS} - M_{Fx} - M_{fric} \quad 2.1$$

Um die Längskräfte unter Berücksichtigung des Reifenschlupfes zu bestimmen, welche vom Reifen auf die Straße übertragen werden, verwendet Bauer (2011) die Magic Formula von Pacejka (2007). Für eine reine Längsdynamik und einen reinen

longitudinalen Schlupf kann die Kraft F_x wie folgt beschrieben werden (Pacejka, 2007):

$$F_x = D \sin\{C \operatorname{atan}[B\kappa - E(B\kappa - \operatorname{atan}(B\kappa))]\} \quad 2.2$$

Dabei stellen B, C, D und E individuelle Reifenparameter dar und κ entspricht dem longitudinalen Schlupfverhältnis. Da das Reifenmodell stets in Interaktion mit einem entsprechenden Fahrzeugmodell steht, soll dieses ebenfalls kurz eingeführt werden. Unter Annahme einer reinen Längsdynamik und unter Berücksichtigung des Steigungs- und Luftwiderstandes sowie der Summe aller übertragenen Längskräfte der Reifen F_x (vgl. Gl. 2.2) beschreibt Bauer (2011) dieses wie folgt:

$$m \frac{dv}{dt} = F_x - mg \sin(\gamma) - c_w A \frac{\rho}{2} v^2 \sin(v) \quad 2.3$$

Es ist evident, dass auf Basis dieser Gleichung die Längsbeschleunigung des Fahrzeuges bestimmt werden kann. Eine sensorische Bestimmung (z.B. bei Rollenprüfständen mittels Kraftmessdose) ist somit hinfällig. Wie bereits dargestellt, ist die Längsbeschleunigung im Kontext der Komfort- und Fahrbarkeitsbewertungen eine essenzielle Größe. Aus diesem Grund untersuchen Bauer et al. (2017) die Ergebnisse der nach Gl. 2.3 bestimmten Längsbeschleunigung hinsichtlich ihrer Vergleichbarkeit zum realen Fahrversuch. Es stellt sich heraus, dass die Längsbeschleunigung in quasi-statischen Situationen das reale Fahrverhalten sehr genau abbilden kann. In instationären Zuständen weicht die berechnete Längsbeschleunigung jedoch deutlich vom realen Verhalten ab (siehe Abbildung 2.13).

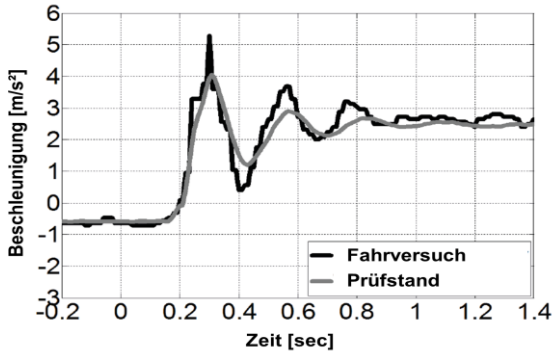


Abbildung 2.13: Abweichung der berechneten Längsbeschleunigung am ViL-Prüfstand im Vergleich zum Fahrversuch in transienten Zuständen (Bauer et al., 2017)

Bauer et al. (2017, S. 4) beschreiben den Kurvenverlauf der berechneten Längsbeschleunigung am Prüfstand im Vergleich zum realen Fahrversuch als zu "smooth". Da Fahrbarkeitsbewertungen vornehmlich in instationären Zuständen erfolgen (z.B. Lastwechsel), ist eine nach Gl. 2.3 berechnete Längsbeschleunigung ungeeignet. Um dieser Problemstellung zu begegnen, stellen Bauer et al. (2017) eine Methode vor, welche mittels physischer Anregung der Seitenwellen durch Linearaktuatoren einen realistischeren Kurvenverlauf der Längsbeschleunigung ergeben soll. Dazu wird die berechnete Längsbeschleunigung des Fahrzeugmodells zunächst in einen hoch- und niederfrequenten Anteil zerlegt. Aus dem hochfrequenten Anteil der Längsbeschleunigung wird mittels der Fahrzeugmasse eine Längskraft berechnet. Mit dieser Längskraft werden die Seitenwellen des Fahrzeuges durch die Linearaktuatoren angeregt und die resultierende Beschleunigung der Fahrzeugkarosserie im Bereich des Schwerpunktes gemessen. Abschließend wird die gemessene Beschleunigung der Karosserie und die berechnete Beschleunigung aus dem niederfrequenten Anteil zu einer Gesamtbeschleunigung aufsummiert. Der gesamte Prüfaufbau inkl. der Linearaktuatoren ist in Abbildung 2.14 dargestellt. (Bauer et al., 2017)

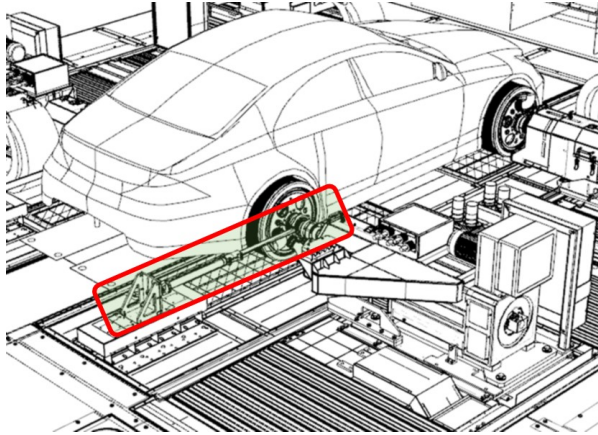


Abbildung 2.14: Anregung des Fahrzeuges mittels Linearaktuatoren (rot markiert) (in Anlehnung an Bauer et al., 2017)

Bauer et al. (2017) zeigen, dass die Methode in der Lage ist, die Längsbeschleunigung in transienten Zuständen deutlich exakter abzubilden (siehe Abbildung 2.15). Dennoch hat diese Methode zwei wesentliche Nachteile. Einerseits ist die Rüstung und Kalibrierung der Aktuatoren mit einem sehr hohen Zeitaufwand verbunden. Andererseits setzt diese Methode stets voraus, dass der Prüfstand als ViL-Prüfstand eingesetzt wird. Es ist evident, dass diese Methode nicht nutzbar ist, wenn der Prüfstand als PiL-Prüfstand ohne physische Karosserie betrieben wird. Das Übertragungsverhalten der antriebsstranginduzierten Schwingungen zur Karosserie ist am PiL-Prüfstand mittels einer physischen Anregung somit nicht darstellbar. Im Kontext des IPEK-XiL-Ansatzes und der Forderung nach einer durchgängigen Validierung ist dieser Nachteil als fundamental zu bewerten. Bauer et al. (2017) diskutieren bereits einen Modellansatz als potenzielle Alternative zum physischen Ansatz. Dafür wird eine Erweiterung des bisherigen Fahrzeugmodells von einem Ein-Massenschwinger zu einem Mehr-Massenschwinger vorgeschlagen, so dass ein potenziell exakteres Ergebnis aufgrund des modellbasierten Übertragungsverhaltens generiert werden kann. Dieser Ansatz wird jedoch durch Bauer et al. (2017) nicht weiterverfolgt, da der initiale Aufwand zur Erstellung des Modells und der entsprechenden Parametrierung als zu hoch eingeschätzt wird.

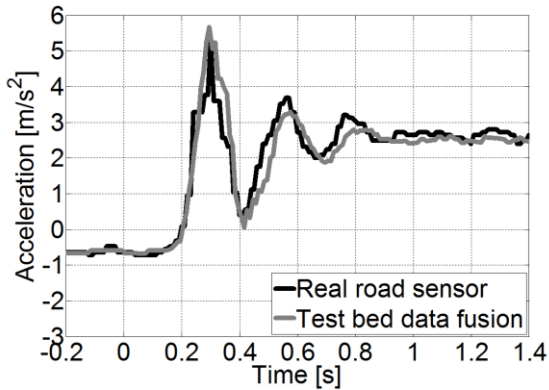


Abbildung 2.15: Resultierende Längsbeschleunigung in transienten Zuständen am ViL-Prüfstand in Folge der Anregung des Fahrzeuges mittels Linearaktuatoren im Vergleich zum Fahrversuch (Bauer et al., 2017)

2.3.1.3 Simulationen

Es existiert eine Vielzahl an Simulationsumgebungen, welche sowohl in den Fachabteilungen eines OEM als auch von Lieferanten entwickelt werden (Matthies, 2013). Simulationsmodelle können mit einer definierten Genauigkeit physikalische Prozesse abbilden und bereits in sehr frühen Phasen des PEP Fahrzeugkonzepte hinsichtlich Fahrleistung und Verbrauch bewerten. Darüber hinaus können auch Steuerungsalgorithmen bereits frühzeitig entwickelt und parametrisiert werden (Lindemann, Wolter, Freimann & Fengler, 2009). Die Genauigkeit der Simulationsergebnisse wird maßgeblich durch den Detaillierungsgrad der jeweiligen Modelle beeinflusst. Mit steigendem Detaillierungsgrad nimmt die Anzahl der Systemparameter und somit auch der Rechenaufwand proportional zu.

Grundsätzlich lassen sich Simulationsmodelle in eine Vielzahl von Klassen einteilen. Ortlieb, von Dresky, Gasser und Günzel (2013, S. 9–15) stellen beispielsweise eine Möglichkeit zur Klassifizierung von Simulationen vor, welche auch Schwarz (2013, S. 13) im Rahmen seiner Dissertation aufgreift:

- Formale / Semantische / Mathematische Modelle
- Physikalische / Teilweise physikalische / Nicht physikalische Modelle
- Geschlossene / Offene Modelle

- Spezifisch / Allgemein
- Diskret / Kontinuierlich
- Numerisch / Analytisch
- Stochastisch / Deterministisch
- Quantitativ / Qualitativ
- Makroskopisch / Mikroskopisch
- Induktiv / Deduktiv
- Statisch / Dynamisch
- Linear / Nicht linear

Im Rahmen dieser Arbeit soll die porscheeigene Simulationsumgebung (SimEnv) als eine wesentliche Säule der methodischen Effizienzsteigerung dienen. SimEnv wurde bereits im Rahmen verschiedener wissenschaftlicher Arbeiten herangezogen [vgl. (Peters, 2020) (Jäger, 2017)¹² (Jacobs, 2019)¹³ (Karakus, 2020)¹³ (Quiroga Mayorga, 2021)¹³ (Pflüger, 2019)¹³]. Dabei konnte gezeigt werden, dass die Ergebnisse von SimEnv im Rahmen der unterschiedlichen Validierungsziele als plausibel eingestuft werden können.

SimEnv beruht auf einer Fahrdynamiksimulation mit 14 Freiheitsgraden (Peters, 2020). Dazu zählen u.a. die translatorischen und rotatorischen Bewegungen des Fahrzeugaufbaus entlang der drei Raumkoordinaten ($x - y - z$) sowie der Radhubbewegungen und deren Drehbewegungen. Grundsätzlich ist SimEnv als Simulink-Modell in Matlab umgesetzt, wobei Achs- und Elastokinematik sowie Zug- und Druckanschläge über Kennfelder parametrisiert werden (Peters, 2020). Deren Charakteristik wird mittels vorgelagerter Mehrkörpersimulationen bestimmt. Gleiches gilt für die Nichtlinearitäten der Aufbaufedern und Schwingungsdämpfer. Die Reifenmodelle werden über die bereits beschriebene Magic Formula nach Pacejka (2007) dargestellt, so dass neben der Längs- und Querdynamik auch transiente Zustände simuliert werden können. Um im Kontext der vorliegenden Arbeit auch mittels SimEnv Validierungsaktivitäten im Bereich der Getriebeapplikation zu ermöglichen, wurde die initiale Fahrdynamiksimulation um die Funktionen der Schaltstrategie erweitert (Jäger, 2017)¹². Dazu wurde die Schaltstrategiesoftware in die Simulationsumgebung als S-Function eingebunden. Als S-Function wird ein Blockbaustein beschrieben, welcher in eine bestehende Simulationsumgebung integriert werden kann (MathWorks, 2021). Das bietet den Vorteil, Funktionen, welche in einer alternativen Programmiersprache implementiert wurden, in einem für Matlab geeignetem

¹² Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

¹³ Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

Format¹⁴ zu kompilieren und so in die bestehende Simulationsumgebung einzubinden. Die im Rahmen der wissenschaftlichen Arbeiten dargestellten Ergebnisse belegen, dass SimEnv im Kontext der Schaltstrategie reale Fahrmanöver sehr exakt abbilden kann (siehe Abbildung 2.16).

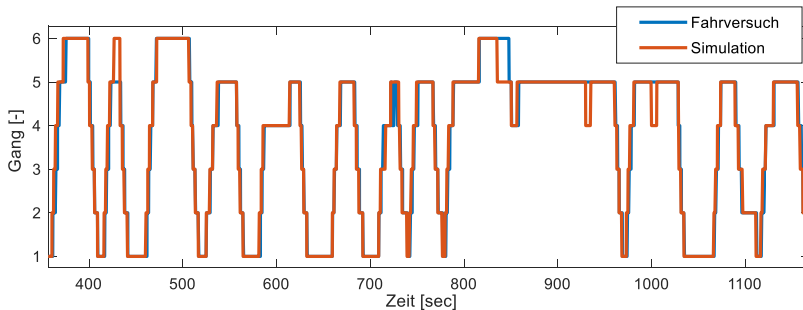


Abbildung 2.16: Güte der Simulationsergebnisse von SimEnv im Kontext der Schaltstrategie im Vergleich zum realen Fahrversuch

Es ist zu erkennen, dass der Gangverlauf, basierend auf den Simulationsergebnissen, direkt mit den Ergebnissen des Fahrversuchs vergleichbar ist. Als Sollwertvorgabe dient der aus dem Fahrversuch extrahierte Geschwindigkeitsverlauf, dem ein geeigneter Fahrerregler im Rahmen der Simulation folgt. In diesem Fall wird SimEnv demnach als Closed-Loop Modell verwendet. SimEnv kann jedoch auch als Open-Loop Modell betrieben werden, beispielsweise durch Vorgabe eines expliziten Fahrpedal- oder Bremspedalwertes, bis eine definierte Geschwindigkeit erreicht ist.

Im Kontext der Schaltstrategie wird SimEnv gegenwärtig vornehmlich verwendet, um unterschiedliche Getriebe-Datenstände hinsichtlich ihrer Gangverläufe zu vergleichen. Dazu werden die Datenstände auf verschiedenen Zyklen¹⁵ oder Streckenprofilen und dem dazugehörigen Geschwindigkeitsprofil simuliert und die resultierenden Gangverläufe miteinander verglichen. Werden relevante Unterschiede im Gangverlauf identifiziert, kann auf Basis der Simulationsergebnisse analysiert werden, worauf diese zurückzuführen sind. Ursächlich kann beispielsweise die Aktivie-

¹⁴ S-Function als MEX-Datei

¹⁵ Zyklen sind Testverfahren im automobilen Umfeld zur Bestimmung der Abgasemission und des Kraftstoffverbrauches. Diese werden typischerweise über Geschwindigkeitsanteile definiert, welche das Fahrzeug im Rahmen des Testes absolvieren muss.

rung oder Deaktivierung bestimmter Sonderfunktionen sein, was sich mittels Simulationen aufgrund ihrer Reproduzierbarkeit sehr gut bestimmen lässt. Basierend auf den Erkenntnissen können abschließend Rückschlüsse gezogen werden, ob die getätigte Änderung des Datenstandes beispielsweise einen Einfluss auf die Typisierung¹⁶ hat. Zu der resultierenden subjektiven Wahrnehmung kann auf Basis der identifizierten Abweichungen gegenwärtig jedoch noch keine Aussage getroffen werden. Somit kann nicht prognostiziert werden, wie sich die Änderung des Datenstandes auf die subjektiv wahrgenommene Fahrbarkeit oder den Fahrzeugcharakter auswirkt. Um diesen Einfluss zu untersuchen, werden im Rahmen der Schaltstrategie weiterhin die konventionellen Fahrversuche verwendet.

Es lässt sich demnach resümieren, dass SimEnv valide Ergebnisse im Kontext der Schaltstrategie liefert und als Validierungsumgebung zum objektiven Vergleich unterschiedlicher Datenstände der Schaltstrategie herangezogen werden kann. Aussagen zur subjektiven Wahrnehmung sind bisher jedoch nicht möglich. Darüber hinaus ist SimEnv für die Validierung des Schaltablaufes gänzlich ungeeignet, da dazu ein wesentlich komplexeres Simulationsmodell notwendig ist.

Rink und Waiss (2018) stellen einen ersten Ansatz zur digitalen Funktionsentwicklung für Automatikgetriebe inklusive des Schaltablaufs mittels Silver der Firma Synopsys vor. Dabei liegt der Fokus des Modells jedoch auf der funktionalen Validierung und nicht auf der Bewertung der Schaltqualität. Soll das reale Verhalten vollumfänglich abgebildet werden, so Rink und Waiss (2018, S. 12), wird der Modellierungsaufwand und die benötigte Rechenleistung „extrem hoch“. Aus diesem Grund ist die Validierung des Schaltablaufs hinsichtlich der Schaltqualität gegenwärtig noch nicht simulationsbasiert möglich und wird weiterhin am realen Fahrzeug durchgeführt.

2.3.2 Objektivierung der Getriebe-Applikation

Es wurde bereits dargestellt, dass die Applikation und deren Validierung zu großen Teilen von der subjektiven Wahrnehmung der Applikationsingenieure abhängt. Subjektive Bewertungen unterliegen jedoch stets Schwankungen und kaum reproduzierbaren Quereinflüssen wie z.B. Erfahrung oder Tagesform der jeweiligen Testperson. Diese Phänomene werden in der Psychologie als inter- und intraindividuelle Varianz bezeichnet (Wirtz, 2021). Darüber hinaus sind subjektive Wahrnehmungen

¹⁶ Typisierung (auch Typpgenehmigung) bezeichnet die Erlaubnis für den Marktzugang eines Fahrzeuges eines Herstellers in Übereinstimmung mit den jeweiligen gesetzlichen Anforderungen der lokalen Behörden (z.B. Kraftfahrt-Bundesamt in Deutschland). (Kraftfahrt-Bundesamt (2022)).

stark beeinflusst von Umwelteinflüssen wie z.B. Wetter. Um diesen Nachteilen zu begegnen, gibt es bereits erste Ansätze in der Literatur zur Objektivierung der Getriebeapplikation. Diese setzen sich jedoch vornehmlich mit der Objektivierung des Schaltablaufs und der daraus resultierenden Schaltqualität auseinander und nicht mit der Schaltstrategie. Im Folgenden sollen einige dieser Ansätze näher vorgestellt werden.

Erste Ansätze zur Objektivierung der Schaltqualität stellt Hagerodt (2003) vor. Diese beruhen vornehmlich auf dem Schwingungsempfinden des Menschen, weshalb er im Rahmen der Objektivierung die gemessene Längsbeschleunigung im Frequenzbereich analysiert. Analysen der Längsbeschleunigung widmet sich auch Böhl (2007), welcher den Effektivwert der Längsbeschleunigung im empfindlichen Bereich des Menschen (2-12 Hz) sowie gewichtete Kriterien unterschiedlicher Frequenzbereiche betrachtet. Darüber hinaus führen Böhl (2007) und Hagerodt (2003) zusätzlich zu den Aspekten der Komfortbewertung bereits die Schaltspontanität bzw. Schaltzeit als relevantes Kriterium im Kontext der Sportlichkeit ein.

Küçükay, Kassel, Alvermann und Gartung (2009) stellen eine Methode zur effizienteren Abstimmung von automatisch schaltenden Getrieben auf dem Rollenprüfstand vor. Wesentlicher Anteil dieser Arbeit liegt in der Objektivierung der subjektiv empfundenen Schaltqualität, wobei Küçükay et al. (2009) diesen Begriff in die Aspekte des Schaltkomforts und der Schaltspontanität unterteilen. Als Haupteinflussparameter des Schaltkomforts nennen Küçükay et al. (2009) die gemessene Längsbeschleunigung am Fahrersitz, wohingegen die Schaltspontanität maßgeblich durch die Drehzahlverläufe am Getriebeeingang und -ausgang bestimmt wird. Ausgehend von den Messdaten werden charakteristischen Größen (sog. Kennparameter) abgeleitet und diese mittels Korrelationsanalysen in Verbindung mit den subjektiven Bewertungen von Experten gebracht. Diese Objektivnotenmodelle werden abschließend in einem sog. Schaltkomfortassistenten zusammengetragen. Beim Transfer der Versuche auf einen Rollenprüfstand wählen Küçükay et al. (2009) einen ähnlichen Prüfaufbau wie Hasel et al. (2015) (vgl. Abbildung 2.11), verzichten jedoch auf die Emulierung der Längsbeschleunigung, welche ebenfalls über eine Kraftmessdose bestimmt wird. (Küçükay et al., 2009)

Neben der eigentlichen Objektivierung streben Küçükay et al. (2009) auch eine Optimierung ausgewählter Parameter der Applikation am Prüfstand an. Diesen Ansatz greift Wurm (2015) im Rahmen einer mehrkriteriellen Optimierung der Schaltqualität auf, wobei er zunächst literaturbasierte Ansätze zur Objektivierung als Basis seines Optimierungsproblems wählt. Als wesentliche Einflussgrößen im Rahmen der Optimierung wählt Wurm (2015), ähnlich wie Küçükay et al. (2009), die Schaltzeit und den Diskomfort, wobei sich Wurm (2015) an der Diskomfort-Definition von Kahlbau

(2013) orientiert. Nach Kahlbau (2013) kann der Diskomfort als mittlere Abweichung höherer Ordnung des idealen Beschleunigungsverlaufes während der Schaltung beschrieben werden. Kahlbau und Bestle (2013) leiten einen derartigen, idealen Beschleunigungsverlauf als Übergang zwischen zwei Beschleunigungsniveaus her.

Schöggel et al. (2001) stellen mit AVL-Drive ein zu Küçükay et al. (2009) vergleichbaren Ansatz der Objektivierung vor. Ausgehend von physikalischen Messgrößen wie beispielsweise Motordrehzahl, Geschwindigkeit, Längsbeschleunigung oder Fahr- und Bremspedal wird mittels Fuzzy Logik¹⁷ zunächst eine Fahrzustandserkennung durchgeführt. Dabei wird zwischen 15 Fahrzuständen und 75 Unterbetriebszuständen wie. z.B. Hochschalten mit Lastrücknahme unterschieden. In Abhängigkeit von den jeweiligen Fahrzuständen sind charakteristische Kriterien definiert, die mittels neuronaler Netze und konventioneller Berechnungen aus den genannten Messgrößen bestimmt werden. Für jeden Fahrzustand wird in Abhängigkeit der Gewichtung und Bewertung der einzelnen Kriterien eine Gesamtnote gebildet. Die Benotung und deren Interpretation orientiert sich ebenfalls an der bereits eingeführten ATZ-Skala (siehe Abbildung 2.8). In AVL-Drive ist die Längsbeschleunigung zur Bewertung der Schaltqualität in 15 von 21 Kriterien eine relevante und in 11 von 21 alleinige Bewertungsgrundlage. Folglich kann die Hypothese aufgestellt werden, dass die Längsbeschleunigung die relevanteste Messgröße zur Bewertung der Schaltqualität in AVL-Drive ist (AVL List GmbH, 2020).

Bezugnehmend auf die Prognosegüte von AVL-Drive konnten Chandrasekaran, Rao, Palraj, Kurella und Lebbai (2017) eine sehr hohe Korrelation ($R^2 = 0,8$) zwischen subjektiver Wahrnehmung und objektiver AVL-Drive Bewertung nachweisen. Schöggel et al. (2001) nennen in ihrer Veröffentlichung sogar eine Genauigkeit von 95% der AVL-Drive Noten im Vergleich zur subjektiven Wahrnehmung. Um die bereits sehr hohe Prognosegüte weiter zu steigern, stellen Ramsauer und Pujari (2021) eine auf AVL-Drive aufbauende Methode vor, welche bei der Bewertung der Schaltungen hinsichtlich der Schaltqualität bestimmte Schaltungs-Muster berücksichtigt. Es wurde bereits in Kap. 2.2.1.1 dargestellt, dass in Abhängigkeit der Fahr-situationen und Modi (z.B. Normal und Sport+) die Schaltabläufe unterschiedlich appliziert sind. Daraus ergeben sich, neben den abweichenden Drehzahlverläufen, auch abweichende Beschleunigungsverläufe. Da dieses Verhalten explizit erwünscht ist, um dem Fahrzeug einen individuellen Charakter zu verleihen, gilt es,

¹⁷ Die Fuzzy-Logik beschreibt eine Logik von unscharfen Mengen und wird bspw. für Mustererkennungen oder im Bereich der Regelungstechnik eingesetzt, bei welcher nicht eindeutige Zustände bewertet und verarbeitet werden sollen (Böhme (1993)).

dies in der Bewertung zu berücksichtigen. Durch Ramsauer und Pujari (2021) werden deshalb anhand von Zug-Hochschaltungen beispielhaft Muster von resultierenden Verläufen der Längsbeschleunigung definiert (z.B. Hochschaltung mit Motoreingriff oder Überhöhungsschaltungen). Ausgehend von den bekannten Bewertungskriterien von AVL-Drive werden diese individuell für jedes Muster und für jeden Betriebspunkt jeweils in Komfort und Dynamik zusammengefasst. Basierend auf der identifizierten Fahrweise wird die Gesamtbewertung als gewichtetes Mittel aus diesen Einzelnoten gebildet, was eine gezielte Analyse des Fahrzeugcharakters im Kontext der gewählten Applikation und der angestrebten Marktpositionierung ermöglicht. (Ramsauer & Pujari, 2021)

Für eine holistische Bewertung der Schaltqualität ist es unabdingbar, den Gangwechsel in unterschiedlichen Betriebspunkten zu analysieren. Wie beim realen Fahrversuch auch, ist es im Kontext der Objektivierung am Prüfstand und der Simulation notwendig, verschiedene Manöver in einer bestimmten Reihenfolge anzufahren. Dabei ist aufgrund von finanziellen und zeitlichen Restriktionen eine Reihenfolge anzustreben, welche eine möglichst zeiteffiziente Nutzung der alternativen Validierungsumgebungen ermöglicht. Um dieser Problemstellung zu begegnen, stellen Albers, Schwarz, Behrendt und Hettel (2012) einen Ansatz vor, welcher die Reihenfolge der Manöver so anordnet, dass der insgesamt benötigte Zeitaufwand minimal wird. Im Rahmen dieser Untersuchungen werden zunächst vier Manöver herangezogen. Einschränkend muss an dieser Stelle erwähnt werden, dass Albers et al. (2012) lediglich Manöver der Hochschaltungen für die Optimierung berücksichtigen und somit die verbleibenden Hauptschaltarten vernachlässigen. Ausgehend von sog. Evaluierungsmanövern werden Informationen über die Schaltpunkte¹⁸ des Fahrzeuges gesammelt. Diese Informationen werden im nächsten Schritt genutzt, um eine sog. Konditionierungsphase zwischen allen Schaltungen zu berechnen. Die Konditionierungsphase gibt an, wieviel Zeit benötigt wird, um nach einer gefahrenen Schaltung mit einer bekannten Endgeschwindigkeit zur Startgeschwindigkeit der nachfolgenden Schaltung zu gelangen. Diese Zeit gilt es so gering wie möglich zu wählen und dient somit als Basis für den nachfolgenden, kombinatorischen Optimierer. Um sich dem Optimierungsproblem zu nähern, abstrahieren Albers et al. (2012) dieses zunächst als Travel Salesman Problem. Das kombinatorische Optimierungsproblem des Travel Salesman beschäftigt sich mit der Fragestellung, wie eine Reihenfolge für den Besuch mehrerer Orte gewählt werden sollte, so dass kein Ort mehrmals besucht werden muss und die gesamte Reise möglichst kurz wird (Lawler, Lenstra, Rinnooy Kan & Shmoys, 1991). In der Literatur gibt es

¹⁸ Vornehmlich Start- und Endgeschwindigkeit der Schaltungen in Abhängigkeit des Fahrpedalwertes

eine Vielzahl an möglichen Lösungsansätzen für dieses Optimierungsproblem, wobei grundsätzlich zwischen exakten und heuristischen Ansätzen unterschieden wird. Albers et al. (2012) wählen zur Lösung des Problems die minimalaufspannende Baum-Heuristik (engl. Minimal Spanning Tree – MST), um die Konditionierungsphase zu minimieren. Albers et al. (2012) geben an, dass infolge der Optimierung inkl. aktivem Bremsen in den Konditionierungsphasen eine Zeitersparnis von bis zu 75% erzielt werden kann. Daraus resultiert, dass die Validierung der Schaltqualität von insgesamt drei Tagen auf dem Testgelände auf vier Stunden am Prüfstand reduziert werden kann.

Wurm (2015) greift diesen Ansatz der kombinatorischen Optimierung zur Festlegung einer optimalen Validierungsreihenfolge auf. Dabei konzentriert er sich bei der Wahl seiner Manöver beispielhaft auf ZHS und ZRS. Demnach vernachlässigt er im Rahmen seiner Optimierung ebenfalls die verbleibenden Hauptschaltarten des Schubes. Im Gegensatz zu Albers et al. (2012) erfolgt die Identifikation der Schaltpunkte nicht am Prüfstand, sondern simulationsbasiert. Bei der Wahl der finalen Schalt- bzw. Betriebspunkte berücksichtigt er zusätzliche Zeit vor und nach der eigentlichen Schaltung. In dieser Zeit wird das Fahr- oder Bremspedal weiterhin konstant gehalten, so dass sich potenzielle Schwingungen aufgrund des Lastwechsels nicht auf die Bewertung der Schaltqualität auswirken. Darüber hinaus wird erstmals die Notwendigkeit von Zwischenschaltungen thematisiert. Diese sind notwendig, wenn Ziel- und Startgang der aufeinanderfolgenden Validierungsmanöver nicht übereinstimmen. Es muss an dieser Stelle jedoch angemerkt werden, dass die Zwischenschaltungen zwar bei der finalen Reihenfolge durch Wurm (2015) berücksichtigt werden, nicht aber im Rahmen der Optimierung. Somit wird, neben der eigentlichen Reduktion des Zeitaufwandes, keine zusätzliche Reduktion der Zwischenschaltungen angestrebt. Daraus resultiert unweigerlich eine Mehrbelastung der involvierten Bauteile aufgrund der zusätzlichen, nicht validierungsrelevanten Zwischenschaltungen. Im Kontext der Bauteilbelastung gilt es zusätzlich anzumerken, dass weder Wurm (2015) noch Albers et al. (2012) das Risiko des erhöhten Wärmeeintrags im Rahmen ihrer Arbeiten berücksichtigen. In Folge der Optimierung ist davon auszugehen, dass die Anzahl an Schaltungen innerhalb eines betrachteten Zeitfensters deutlich steigt, was in einer erhöhten Bauteilbelastung und einem erhöhten Wärmeeintrag resultiert.

Bei der Wahl des geeignetsten Ansatzes zur Lösung des kombinatorischen Optimierungsproblems vergleicht Wurm (2015) die Ergebnisse einer trivialen Nearest-Neighbor-Heuristik (NNH) mit denen komplexerer Metaheuristiken. Dabei wählt er konkret das MAX-MIN Ant System (MMAS) von Stützle und Hoos (2000). Es stellt sich heraus, dass MMAS die geringste Zeit für den gesamten, simulationsbasierten

Ablauf benötigt, NNH jedoch bereits sehr gute und nur geringfügig schlechtere Ergebnisse zu MMAS liefert. Im Vergleich zu einer zufällig gewählten Reihenfolge von 123 Betriebspunkten kann demnach mit MMAS eine Zeitersparnis von ca. 77% und mit NNH ca. 72% erzielt werden (Wurm, 2015). Nach Pilorget (2012) kann der beschriebene Ablauf, welcher sich aus einer Vielzahl einzelner, aufeinanderfolgender Manöver zusammensetzt, auch als Testkampagne beschrieben werden. Demnach ergibt die Gesamtheit aller Manöver, welche nacheinander und idealerweise unterbrechungsfrei auf einer ausgewählten Validierungsumgebung validiert werden, eine Testkampagne.

2.4 Prognose der subjektiven Wahrnehmung

Es wurde bereits im vorhergehenden Kapitel dargestellt, dass aktuelle Bestrebungen zur Objektivierung der Getriebeapplikation vornehmlich im Kontext der Schaltqualität zu finden sind. Um sich dieser Thematik dennoch zu nähern, soll in diesem Kapitel zunächst das Konstrukt Fahrspaß beleuchtet und motivationspsychologische Modelle vorgestellt werden, welche in der Lage sind, Emotionen zu beschreiben. Im nächsten Schritt sollen mathematische Werkzeuge vorgestellt werden, welche zur statistischen Analyse empirischer Daten benötigt werden. Um die so generierten Informationen nicht nur beschreiben, sondern auch Prognosen daraus ableiten zu können, werden abschließend mathematische Modelle zur Prognose vorgestellt.

2.4.1 Fahrspaß im Kontext motivationspsychologischer Modelle

Um sich der Thematik des Fahrspaßes¹⁹ zu nähern, soll zunächst die Tätigkeit des Autofahrens im Allgemeinen beleuchtet werden. Tischler und Renner (2015) definieren diese als Interaktion zwischen Fahrer, Fahrzeug und Umwelt mit der Freiheit des Fahrers, seine eigene Fahrweise zu wählen. Daher wird nach Tischler und Renner (2015) ein positives Fahrerleben grundsätzlich von den zu bewältigenden Fahraufgaben bestimmt, welche in sog. Primär- und Sekundäraufgaben unterteilt werden können. Unter Primäraufgaben werden dabei alle Aufgaben verstanden, welche für

¹⁹ Der Begriff Fahrspaß wird in dieser Arbeit als Synonym zu Fahrvergnügen und Fahrfreude verwendet, wenngleich es einen semantischen Unterschied zwischen Spaß (fun – Ablenkung) und Freude (pleasure – Engagement) gibt. (Blythe und Hassenzahl, 2005).

die Führung des Fahrzeuges unabdingbar sind. Dazu zählen beispielsweise Manövrieren und Stabilisieren. Zu den Sekundäraufgaben zählen Aktivitäten wie Richtungsänderungen anzeigen (z.B. blinken) oder Radio ein- bzw. ausstellen. Tischler und Renner postulieren daraus die These, dass wahrgenommener Fahrspaß hauptsächlich durch die Erledigung der Primäraufgaben beeinflusst wird. In der Wissenschaft existiert bereits eine Vielzahl an teilweise sehr unterschiedlichen Definitionen für das Konstrukt Fahrspaß. So beschreiben Tischler und Renner (2015, S. 109) Fahrspaß als einen „durch aktives Handeln bestimmter, positiver emotionaler Zustand [...], welcher durch bewusst gesteuertes, proaktives und auch dynamisches Fahren“ entsteht. Dabei stellen Tischler und Renner (2015, S. 109) jedoch in ihren Untersuchungen fest, dass Fahrspaß auch als „komfortables Gleiten“ bzw. „gemütliches Fahren“ aufgefasst werden kann. Engelbrecht (2013, S. 22) definiert diesen Komfort, mit Verweis auf Kellerman und Bergquist (1981), als einen „Zustand der Entlastung, der Förderung und des Gefallens“. Begrifflichkeiten wie Bequemlichkeit, Wohlfühlen oder auch Sicherheit werden ebenfalls mit dem Konstrukt Fahrspaß in Verbindung gebracht (Faulhaber et al., 2013; Reichert, 2013). Es lässt sich somit festhalten, dass es für Fahrspaß bisher noch keine einheitliche Definition gibt, die Mehrheit der Studien den Fahrspaß jedoch in Abhängigkeit der empfundenen Sportlichkeit und Komfort einordnet.

Auf Basis dieser theoretischen Betrachtungen existiert eine Vielzahl an motivationspsychologischen Modellen, um Emotionen beschreiben zu können. Da Fahrspaß, unabhängig von den divergierenden Definitionen, stets als Emotion verstanden wird, ist eine Betrachtung einiger dieser Modelle für das weiterführende Verständnis dieser Arbeit notwendig. So ordnet Russell (1980) Emotionen und Gefühle in einer kreisförmigen Ebene an. Die Abszisse veranschaulicht dazu die Valenz, während die Ordinate die Aktivierung darstellt. Als Valenz wird in diesem Kontext die Wertigkeit beschrieben, welche dazu führt, dass Menschen, je nach Lust oder Unlust, ihr Verhalten verändern. Aktivierung ist in diesem Zusammenhang als Spannung bzw. Entspannung zu verstehen. Ein hohes Maß an Fahrspaß setzt somit eine möglichst hohe Valenz in Form von Begeisterung (\triangleq Sportlichkeit) oder hohe Aktivierung in Form von Entspannung (\triangleq Komfort) voraus.

Das motivationspsychologische Modell nach Rheinberg (2010) schafft erste Aspekte der Handlungsmotivation im Zusammenhang mit Spaß. Es setzt sich aus der vorliegenden Handlungssituation und den sich daraus ableitenden Ergebnissen und Folgen zusammen. Diesem Modell fügt Rheinberg (2010) außerdem die Quellen des Anreizes hinzu. Demnach geht Motivation aus Erwartungen und Anreizen hervor, die während der Tätigkeitsausübung anfallen bzw. daraus entstehen. Er unterscheidet dazu zwei Arten der Motivation. Zum einen führt er die extrinsische Motivation ein, welche aufgrund der Folgereize bzw. Nützlichkeit ausgeübt wird. Zum

anderen definiert er intrinsische Motivationen, welche den Anreiz nicht in der Folge, sondern in der Tätigkeit selbst beschreiben.

Vergleichbare Betrachtungen liefert Apter (1982) im Rahmen seiner „Reversal Theory“, wobei er ebenfalls zwischen einer Tätigkeits- und Zweckorientierung unterscheidet. Er versteht diese als unterschiedliche Erlebensweisen von Erregung. Auf dem Weg zum Erreichen eines zweckorientierten Zieles wird die erlebte Erregung in Form von Unsicherheit negativ wahrgenommen, wohingegen eine abnehmende Erregung im Sinne von Entspannung als positiv wahrgenommen wird. Bei tätigkeitsorientierten Handlungen steigt die Erregung beim Durchführen der Handlung und wird somit als aufregend bewertet. Ein geringeres Maß an Erregung führt im Umkehrschluss zu Langeweile.

Engeln et al. (2008) stellen das „Joy and Convenience in Activities“ Modell vor, welches die Entstehungsbedingungen von Spaß und Komfort beim Fahren aus motivationspsychologischer Sicht erklärt. Dieses heuristische Modell verbindet die Ideen von extrinsischer und intrinsischer Motivation mit den Grundgedanken der Reversal Theorie. Die Ordinate des Modells spiegelt dabei die Erlebnisqualität wider, wobei die Abszisse die Handlungsintensität abbildet (siehe Abbildung 2.17).

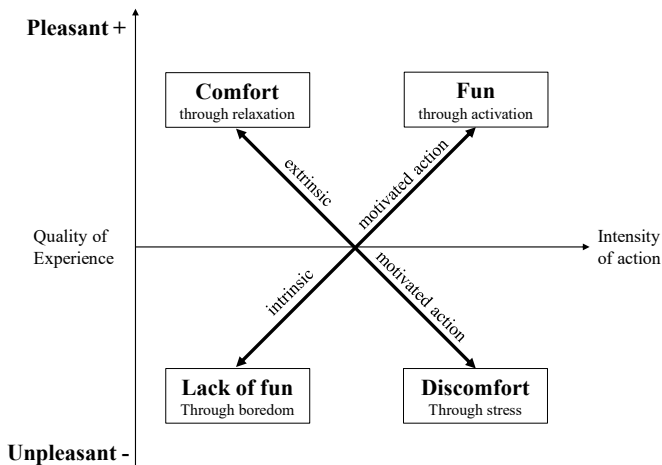


Abbildung 2.17: Joy and Convenience Modell (Engeln, Engelbrecht & Kieninger, 2008)

Auf Basis dieses Modells können Aussagen darüber getroffen werden, inwieweit eine Aktivität spaßfördernd bzw. -mindernd sowie komfortabel oder unkomfortabel empfunden wird. Demnach führt die Unterstützung bzw. Assistenz von extrinsisch motivierten Handlungen (z.B. Fahrerassistenzsysteme wie ACC) zu Komfort durch Entspannung, da das angestrebte Handlungsergebnis auch ohne eigenes Zutun erreicht wird (Engelbrecht, Engeln & Arndt, 2009). Muss diese extrinsisch motivierte Handlung jedoch eigenständig ausgeführt werden, wird dies zu Diskomfort führen. Umgekehrt führen intrinsisch motivierte Handlungen mit hohem Eigenanteil der Aktivität zu gesteigerter Wahrnehmung von Spaß. Wird dieser Eigenanteil jedoch reduziert, bei gleichbleibender intrinsischer Motivation, resultiert daraus Spaßmangel bzw. Langeweile. (Engelbrecht, 2013)

2.4.2 Mathematische Werkzeuge

Dieses Kapitel gibt zunächst einen Überblick über die Grundlagen der Statistik zur Analyse empirischer Daten. Im zweiten Teil des Kapitels werden Modelle des maschinellen Lernens zur Prognose vorgestellt, wobei sowohl parametrische als auch nicht-parametrische Modelle thematisiert werden sollen.

2.4.2.1 Grundlagen der Statistik zur Analyse empirischer Daten

Nach Rooch (2014, S. 71) besteht die Aufgabe der Statistik im Allgemeinen darin, Informationen aus Daten „zu destillieren“. Grundsätzlich kann dabei zwischen deskriptiver und inferentieller Statistik unterschieden werden. Ziel der deskriptiven Statistik ist es, empirische Daten sowohl numerisch als auch grafisch so zusammenzufassen, dass die wesentlichen Aspekte wiedergegeben werden. Die inferentielle Statistik hingegen analysiert die Daten hinsichtlich der Mechanismen, welche die Daten erzeugt haben, um beispielsweise Prognosen treffen zu können. (Rooch, 2014)

Wesentliche Kenngröße der deskriptiven Statistik ist der arithmetische Mittelwert \bar{x} , welcher den Durchschnittswert des Datensatzes x mit der Anzahl an Datenpunkten n angibt

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad 2.4$$

Der arithmetische Mittelwert hat jedoch den Nachteil, dass Ausreißer im Datensatz das Ergebnis beeinflussen. Um diesem Problem zu begegnen, eignet sich der Median x_{median} als weitere wesentliche Kennzahl. Dieser teilt den gesamten Datensatz

(Anzahl aller Messpunkte) x in zwei Hälften. Dabei wird die Größe der Daten ignoriert, weshalb er unempfindlich gegen besonders große bzw. kleine Werte ist (z.B. Ausreißer). (Rooch, 2014)

$$x_{median} = \begin{cases} x_{i=\frac{n+1}{2}} & \text{falls } n \text{ ungerade} \\ \frac{1}{2}(x_{i=\frac{n}{2}} + x_{i=\frac{n+2}{2}}) & \text{falls } n \text{ gerade} \end{cases} \quad 2.5$$

Um eine Aussage über die Streuung der Daten machen zu können, dient die empirische Varianz. Diese misst, wie stark die Daten x_i vom arithmetischen Mittelwert \bar{x} abweichen. Aus der Varianz s_x^2 lässt sich direkt die Standardabweichung s_x bestimmen. (Rooch, 2014)

$$s_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad 2.6$$

$$s_x = \sqrt{s_x^2} \quad 2.7$$

Um a priori eine Aussage darüber treffen zu können, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein unbekannter Parameter in einem definierten Bereich liegt, können Konfidenzintervalle genutzt werden. Dabei spielen Quantile einer Verteilung eine fundamentale Rolle. Diese geben Grenzen an, oberhalb welcher eine Zufallsvariable nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit Werte annimmt. Ein Konfidenzintervall für normalverteilte Daten X und bekannte Standardabweichung s_x lässt sich wie folgt bestimmen, wobei z_α das jeweilige Quantil der Standardnormalverteilung ist. (Rooch, 2014)

$$\left[\bar{X} - z_\alpha \frac{s_x}{\sqrt{n}}, \bar{X} + z_\alpha \frac{s_x}{\sqrt{n}} \right] \quad 2.8$$

Aus Gründen der Vereinfachung wird im Rahmen dieser Arbeit davon ausgegangen, dass alle empirischen Daten normalverteilt sind. Für ein beispielhaftes 95%-Konfidenzintervall entspricht das 2,5%-Quantil der Standardnormalverteilung $z_{0,025} = 1,96$. Der Wert lässt sich aus entsprechenden Quantil-Tabellen für Normalverteilungen oder direkt aus der empirischen Verteilungsfunktion entnehmen.

Um den Zusammenhang zweier Datensätze (x, y) zu bestimmen, kann der empirische Korrelationskoeffizient r_{xy} bestimmt werden, welcher sich aus der empirischen Kovarianz s_{xy} und den empirischen Varianzen $s_{x,y}^2$ ergibt.

$$s_{xy} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \quad 2.9$$

$$r_{xy} = \frac{s_{xy}}{\sqrt{s_x^2 s_y^2}} \quad 2.10$$

Für die Interpretation der Korrelation existieren in der Literatur unterschiedliche Richtlinien, wobei im Kontext der menschlichen Verhaltensforschung und subjektiven Wahrnehmung oftmals die Richtlinien nach Cohen (2013) herangezogen werden. Diese besagen, dass ab einem Korrelationskoeffizienten $|r| > 0,1$ bereits von einer schwachen Korrelation gesprochen werden kann. Ab $|r| > 0,3$ stuft Cohen (2013) die Korrelation als moderat ein und ab $|r| > 0,5$ spricht er von einer starken Korrelation. Die vorliegende Arbeit orientiert sich ebenfalls an dieser Interpretation.

Kosfeld (2016) weist darauf hin, dass infolge einer hohen Korrelation nicht per se davon ausgegangen werden kann, dass ebenfalls ein kausaler Zusammenhang zwischen den Datensätzen besteht. Unter Kausalität wird in diesem Kontext die ein- oder wechselseitige Abhängigkeit zwischen den Datensätzen verstanden. Liegt eine wechselseitige Abhängigkeit vor, wird diese als Interdependanz bezeichnet. Allein anhand des statistischen Zusammenhangs kann noch nicht auf eine Kausalität geschlossen werden. Hierfür bedarf es einer Hypothese, welche einen sachlichen Zusammenhang zwischen den Datensätzen postuliert. Ist keine Kausalität gegeben, wird von einer sog. Scheinkorrelation gesprochen. (Kosfeld, 2016)

Bei der Erstellung als auch der Analyse von Messmethoden (beispielsweise Probandenstudien) ist neben der Objektivität und Validität die Reliabilität wesentliches Gütekriterium. Die Reliabilität befasst sich mit der Messgenauigkeit eines Tests. Somit ist ein Test dann reliabel, wenn er das zu messende Merkmal exakt, also ohne Messfehler, misst (Moosbrugger, 2012). Um die Reliabilität zu steigern, werden im Rahmen von Probandenstudien oftmals Fragen (sog. Items) verwendet, welche das gleiche Merkmal erfassen. Insbesondere bei sehr ungenau messbaren Sachverhalten (z.B. subjektive Wahrnehmungen) liefert der gewichtete oder ungewichtete Durchschnitt (oder Summe) mehrerer Items ein besseres Ergebnis im Vergleich zu einem einzigen Item (Janssen, 2007). Basierend auf den Zusammenhangsstrukturen der einzelnen Items kann auf eine interne Konsistenz geschlossen werden, welche als Schätzung der Reliabilität des Testverfahrens dient. Zur Bestimmung der internen Konsistenz ist der Koeffizient Cronbachs Alpha α eine der am häufigsten verwendeten Methoden (Moosbrugger, 2012). Hierbei wird ein Test mit m Items in m Teile zerlegt, so dass jedes Item als separater Testteil betrachtet wird. Unter Berücksichtigung der Varianz $S_{x_i}^2$ der Items und der Varianz des Gesamttests S_x^2 ergibt

sich Cronbachs Alpha α und somit die Reliabilität $Rel(x)$ wie folgt: (Moosbrugger, 2012)

$$Rel(x) = \alpha = \frac{m}{m - 1} \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^m S_{x_i}^2}{S_x^2} \right) \quad 2.11$$

Tabelle 2.1 listet die Richtwerte zur Interpretation des Cronbachs Alphas, welche in der Literatur vornehmlich herangezogen werden.

Tabelle 2.1: Interpretationsrichtlinien für das Cronbachs Alpha zur Bestimmung der Reliabilität eines Messverfahrens (Wirtz, 2021)

Cronbachs Alpha α	Interpretation
>0,9	Exzellent
>0,8	Gut
>0,7	Akzeptabel
>0,6	Fragwürdig
>0,5	Schlecht
≤0,5	Inakzeptabel

Ein weiteres deskriptiv-statistisches Maß der Itemanalyse ist die sog. Trennschärfe. Diese gibt an, „wie groß der korrelative Zusammenhang zwischen den Itemwerten der Probanden und den Testwerten der Probanden ist“ (Moosbrugger, 2012, S. 84). Anders formuliert lässt sich mit der Trennschärfe ausdrücken, wie stark die Differenzierung zwischen den Probanden, basierend auf einem einzelnen Item, mit der Differenzierung der Probanden, basierend auf allen Items (entspricht dem Testwert), übereinstimmt. Da es sich bei der Trennschärfe um eine Korrelation handelt, kann sie Werte im Bereich von -1 bis +1 annehmen. Nach Moosbrugger (2012, S. 86) sind Items mit einer Trennschärfe zwischen 0,4 bis 0,7 als „gute“ Trennschärfe zu bezeichnen. Items mit einer Trennschärfe nahe Null oder im negativen Bereich sollten vernachlässigt werden. Bei intervallskalierten Items lässt sich die korrigierte Trennschärfe $r_{it(i)}$ unter Berücksichtigung der unkorrigierten Item-Testwert-Korrelation r_{it} , der Standardabweichung der Testwerte S_x und der Standardabweichung der Items S_{x_i} wie folgt bestimmen (Moosbrugger, 2012):

$$r_{it} = r_{(x,x_i)} \quad 2.12$$

$$r_{it(i)} = \frac{r_{it}S_x - S_{x_i}}{\sqrt{S_x^2 + S_{x_i}^2 - 2r_{it}S_xS_{x_i}}} \quad 2.13$$

Die unkorrigierte Item-Testwert-Korrelation r_{it} beschreibt dabei den Zusammenhang aller Itemwerte x_i mit dem eigentlichen Testwert x .

2.4.2.2 Prognostizierende Modelle des maschinellen Lernens

Nach Jo (2021) existieren vier Arten von maschinellen Lernalgorithmen:

- überwachtes (engl. Supervised) Lernen
- unüberwachtes (engl. Unsupervised) Lernen
- teil-überwachtes (engl. Semi-supervised) Lernen
- bestärkendes (engl. Reinforcement) Lernen

Diese können, in Abhängigkeit ihres Anwendungszweckes, weiter klassifiziert werden. So werden Algorithmen des überwachten Lernens beispielsweise vornehmlich zur Regression und Klassifikation genutzt, wohingegen unüberwachte Lernalgorithmen primär im Bereich des Clusterings eingesetzt werden. Da Regressionsalgorithmen eine Zielgröße anhand von einer oder mehreren Eingangsgrößen schätzen und somit als Modelle zur Prognose eingesetzt werden können, sollen diese im Folgenden näher erläutert werden. Regressionsalgorithmen lassen sich in parametrische und nicht-parametrische Algorithmen unterscheiden (Alpaydın, 2019). Zu den parametrischen Regressionsalgorithmen zählt beispielsweise die lineare Regression. Wesentlicher Vorteil der parametrischen Regressionsalgorithmen liegt darin begründet, dass das Modell mittels weniger Parameter beschrieben werden kann. Daraus ergibt sich typischerweise eine einfache und gute Interpretierbarkeit der Daten. Sollten die Eingangsgrößen jedoch nicht mehr vollumfänglich mit der zugrundeliegenden Funktion übereinstimmen, führt dies zu einer schlechten Anpassung des Modells und somit zu schwachen Ergebnissen²⁰. (Alpaydın, 2019)

Bei der Bestimmung der Funktion der linearen Regression wird ein linearer Zusammenhang zwischen einer abhängigen Y und n -unabhängigen Variablen X unter Berücksichtigung einer zufälligen, unabhängigen und normalverteilten Störung ε sowie

²⁰ Im internationalen Umfeld wird die Leistungsfähigkeit eines Modells hinsichtlich der Güte der Ergebnisse auch als Performance bezeichnet

der wahren, aber unbekanntenen Regressionskoeffizienten β angenommen (Fahrmeir, Kneib, Lang & Marx, 2013).

$$Y = X^T \cdot \beta + \varepsilon \quad \text{mit } X = [1 \ x_1 \ \dots \ x_n]^T; \beta = [\beta_0 \ \beta_1 \ \dots \ \beta_n]^T \quad 2.14$$

Als Ergebnis der linearen Regression ergibt sich mittels kleinster Quadrate Schätzer ein Schätzwert $\hat{\beta}$ für die tatsächlichen Regressionskoeffizienten β .

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad 2.15$$

Unter Verwendung der geometrischen Eigenschaften des Schätzers kann eine grundlegende Analyseformel für die empirische Varianz der beobachteten Antworten y_i abgeleitet werden. Damit kann das Bestimmtheitsmaß R^2 beschrieben werden, also der Anteil der Informationen in den Daten, welcher durch das Modell erklärt wird. (Fahrmeir et al., 2013)

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad 2.16$$

Somit kann das Bestimmtheitsmaß als Maß für die Anpassungsgüte des Modells verwendet werden. Je näher dieser Wert bei 1 ist, desto kleiner ist die Summe der Fehlerquadrate und umso besser ist die Anpassung der Daten. Ein Wert von 0,8 bedeutet beispielsweise, dass das Modell 80% der Variation des Ergebnisses erklären kann (Kuhn & Johnson, 2013). Im Falle einer einfachen linearen Regression kann gezeigt werden, dass das Quadrat des empirischen Korrelationskoeffizienten r_{xy} zwischen x und y dem Bestimmtheitsmaß R^2 entspricht.

$$R^2 = r_{xy}^2 \quad 2.17$$

Im Gegensatz zu parametrischen Modellen, bei welchen beispielsweise ein linearer oder quadratischer Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgabe angenommen wird, wird bei nicht-parametrischen Modellen lediglich angenommen, dass ähnliche Eingaben ähnliche Ausgaben haben (Alpaydın, 2019). Wie diese Ähnlichkeit definiert wird, unterscheidet letztendlich die verschiedenen nicht-parametrischen Modelle.

Bei parametrischen Modellen wirken sich alle Trainingsinstanzen auf die endgültige, globale Schätzung aus, wohingegen es im nicht-parametrischen Fall kein einzelnes globales Modell gibt, sondern lokale Modelle werden nach Bedarf geschätzt und von den jeweiligen Trainingsinstanzen beeinflusst. Demnach ist die Form eines nicht-parametrischen Modells nicht festgelegt, sondern hängt von der Komplexität des den Daten inhärenten Problems ab. (Alpaydin, 2019)

Zu den nicht-parametrischen Modellen zählen beispielsweise Entscheidungsbäume (engl. Decision Trees). Diese sind hierarchische Modelle des überwachten Lernens, bei dem die lokalen Regionen mittels rekursiver Teilungen ermittelt werden (Alpaydin, 2019). Decision Trees bestehen aus internen Entscheidungsknoten und terminalen Blättern. Jeder Entscheidungsknoten m implementiert eine Testfunktion $f_m(x)$ mit diskreten Ergebnissen, welche die Zweige des Baumes kennzeichnen. Bei einer Eingabe wird an jedem Knoten ein Test durchgeführt und in Abhängigkeit des Ergebnisses der entsprechende Zweig gewählt. Dieser Prozess beginnt an der Wurzel und wird rekursiv wiederholt, bis ein terminales Blatt erreicht wird. Der Wert, welcher in dem Blatt hinterlegt ist, stellt dann die Ausgabe des Modells dar. Gemäß der einführenden Definition von nicht-parametrischen Modellen sind auch Decision Trees in ihrer Baumstruktur a priori nicht festgelegt, sondern wachsen in Abhängigkeit der Komplexität des Problems. In Folge der hierarchischen Anordnung der Entscheidungen kann die Lokalisierung der Lösungsregion im Entscheidungsbaum schnell erfolgen. Ein weiterer Vorteil liegt in der hohen Interpretierbarkeit der Decision Trees, da die Struktur des Baumes als eine Aneinanderreihung von If-Then Regeln verstanden werden kann. (Alpaydin, 2019)

Um Decision Trees für Regressionen nutzen zu können, muss der kontinuierliche Ausgabewert diskretisiert werden (Jo, 2021). Zunächst muss das Maximum als obere Grenze y_{max} und das Minimum als untere Grenze y_{min} des Ausgabewertes definiert werden. Jedes Intervall wird nach Jo (2021) in allgemeiner Form wie folgt beschrieben, wobei die Anzahl der Intervalle b entspricht:

$$\left[y_{min} + (i - 1) \frac{y_{max} - y_{min}}{b}, y_{min} + i \frac{y_{max} - y_{min}}{b} \right] \quad 2.18$$

Ein daraus resultierender Decision Tree für Regressionen ist in Abbildung 2.18 exemplarisch dargestellt. Die Wahl der Größe und somit auch der Anzahl der Intervalle ist nicht trivial, da sich daraus direkt die akzeptierte Fehlerschwelle begründet. Werden die Intervalle zu klein gewählt, werden sehr große Bäume mit dem Risiko zum Overfitting erzeugt. Sind sie zu groß, besteht die Gefahr des Underfit und es wird zu sehr geglättet. Als Overfit bezeichnet man ein Modell, welches einen sehr

geringen Fehler auf die Trainingsdaten zeigt, jedoch nicht auf neue Daten generalisieren kann. Als Underfit werden hingegen Modelle bezeichnet, deren unabhängige Variablen die Zielvariable nicht hinreichend genau beschreiben können. Dies ist typischerweise ein Indikator dafür, dass das Modell zu trivial ist und valide Prognosen auf Basis der vorliegenden Performance nicht möglich sind. (Alpaydin, 2019)

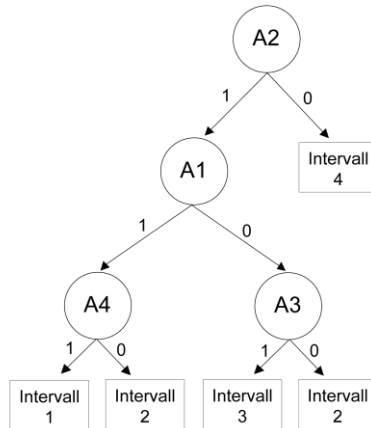


Abbildung 2.18: Struktur eines Decision Trees für Regressionen (Jo, 2021)

Um die Performance von Decision Trees weiter zu steigern, gibt es die Möglichkeit, mehrere solcher Bäume zu erstellen und diese zusammenzufassen. Derartige Vorgehensweisen werden als Ensemble-Methoden bezeichnet und liefern typischerweise bessere Ergebnisse, jedoch auf Kosten von Rechenleistung und algorithmischer Komplexität (Joshi, 2020). Neben der gesteigerten Modellgüte liegt der Hauptvorteil von Ensemble Decision Trees in der Reduktion des Overfittings (Joshi, 2020). Grundsätzlich existieren drei primäre Arten von Ensembles:

- Bagging
- Random Forest
- Boosting

Der grundlegende Unterschied dieser Methoden besteht in der Chronologie des Trainings. Bagging und Random Forest ermöglichen ein paralleles Training der einzelnen Decision Trees, wohingegen Boosting ein sequentielles Training der Bäume

erfordert (Joshi, 2020). Das ist darauf zurückzuführen, dass bei Bagging- oder Random-Forest-Methoden alle einzelnen Lerner mit Hilfe von Zufallsstichproben der Daten erzeugt werden. Da diese unabhängig voneinander sind, können diese parallel trainiert werden und ihre Ergebnisse abschließend zusammengeführt werden. Beim Boosting wird jedoch lediglich der erste Baum mit Hilfe einer Zufallsstichprobe der Daten trainiert. Die Auswahl der Daten zum Training des zweiten Baums werden nicht zufällig bestimmt, sondern hängen direkt von den Ergebnissen des Trainings des ersten Baums ab. Das Training des zweiten Baums konzentriert sich dabei auf die Stichproben, welche beim ersten Baum keine guten Ergebnisse geliefert haben. Diese Logik wird für weitere Bäume entsprechend fortgeführt. Da das Training des jeweils nachfolgenden Baums somit stets vom Trainingsergebnis des vorherigen Baums abhängt, kann dies nicht parallel erfolgen. Sind alle Bäume trainiert, wird die Ausgabe der Bäume mit den erforderlichen Gewichtungen zur finalen Ausgabe kombiniert. Es ist evident, dass das Training von Boosted Decision Trees im Vergleich zu den anderen Arten zeitintensiver ist. Trotz dieses Nachteils werden Boosted Decision Trees oftmals gegenüber den anderen Ensemble-Methoden bevorzugt, da ihre Prognosegüte deutlich überlegen ist. (Joshi, 2020)

Wie in diesem Kapitel bisher angedeutet, existiert eine Vielzahl an prognostizierenden Modellen des maschinellen Lernens. Daraus leitet sich der Bedarf nach Ansätzen zur Wahl des geeignetsten Modells und deren Evaluation ab. Bei der Identifikation dieser Ansätze gilt es zu berücksichtigen, dass das Ziel des maschinellen Lernens im Allgemeinen nicht darin liegt, die Trainingsdaten nachzubilden, sondern korrekte Ausgaben für Datensätze außerhalb der Trainingsdaten zu generieren (Alpaydin, 2019). Um beispielsweise das Phänomen des Overfittings zu vermeiden, werden im Rahmen des Trainings oftmals sog. Kreuz- oder Holdout-Validierungen angewendet. Für die Holdout-Validierung werden die Trainingsdaten in zwei Teile aufgeteilt, wobei ein Teil für das Training und der andere Teil für die Validierung des Modells verwendet wird. Hierfür ist jedoch ein sehr großer Trainingsdatensatz notwendig, da infolge der Teilung nicht alle Informationen bei der Modellbildung berücksichtigt werden (Forsyth, 2019). Im Gegensatz dazu wird bei der Kreuzvalidierung der gesamte Datensatz verwendet und zufällig in k gleichgroße Teile zerlegt. Anschließend wird eine Teilprobe für das Training der verbleibenden Daten $k - 1$ ausgeschlossen und zur Validierung des Modells als Eingabe verwendet. Dieser Vorgang wird k -fach wiederholt, stets mit dem Ausschluss einer anderen Teilprobe. So kann mittels realer Validierungsdaten beispielsweise das Bestimmtheitsmaß R^2 aus Gl. 2.17 als Anpassungsmaß des Modells bestimmt werden.

Eine weitere Methode zur Charakterisierung der Prognosegüte eines Modells ist die Berechnung von numerischen Fehlern. Die einfachste Form eines numerischen Fehlers ist die Berechnung des mittleren absoluten Fehlers (engl. Mean Absolute

Error – MAE), welcher eine Funktion der Modellresiduen ist. Als Residuum wird die Differenz des erwarteten Wertes y_i und des vom Modell prognostizierten Wertes \hat{y}_i bezeichnet. (Joshi, 2020; Kuhn & Johnson, 2013)

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad 2.19$$

Die alleinige Verwendung des MAE wird typischerweise jedoch vermieden, da er aufgrund der Kompensation negativer und positiver Fehler in ungewöhnlich niedrigen Werten resultiert. Um diesem Problem zu begegnen kann die Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme (engl. Root mean square error – RMSE) herangezogen werden. Der RMSE ergibt sich als Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers (engl. Mean square error – MSE), welcher als Funktion der Quadrate der Modellresiduen berechnet wird. (Joshi, 2020; Kuhn & Johnson, 2013)

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad 2.20$$

$$RMSE = \sqrt{MSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad 2.21$$

In der Regel gewichtet der MSE größere Fehler (sog. Ausreißer) stärker als eine große Anzahl von kleineren Fehlern. Der RMSE hingegen verringert die Empfindlichkeit gegen Ausreißer, ist aber dennoch empfindlicher als der MAE. Typischerweise wird der RMSE derart interpretiert, dass er den durchschnittlichen Abstand der beobachteten Werte zu den Vorhersagen angibt. (Joshi, 2020; Kuhn & Johnson, 2013)

Bei der Evaluation von Modellen ist ein weiterer wesentlicher Aspekt die sog. Multikollinearität. Von Multikollinearität wird gesprochen, wenn mehrere unabhängige Variablen (Prädiktorvariablen) eine erhebliche Korrelation miteinander aufweisen (Kuhn & Johnson, 2013). Dies sollte grundsätzlich verhindert werden, da redundante Prädiktoren dem Modell mehr Komplexität hinzufügen, als sie Informationen liefern. Darüber hinaus können korrelierende Prädiktoren zu sehr instabilen Modellen, numerischen Fehlern und verminderter Prognosegüte führen (Kuhn & Johnson, 2013). Um Multikollinearität zu diagnostizieren, kann der Varianzinflationsfaktor VIF verwendet werden, welcher sich aus dem Bestimmtheitsmaß R_i^2 der jeweiligen Prädiktoren ergibt.

$$VIF_i = \frac{1}{1 - R_i^2} \quad 2.22$$

Nach Wooldridge (2013) sollten Prädiktoren mit einem $VIF > 10$ bei der Modellbildung vernachlässigt werden. Die daraus resultierende Reduktion der Prädiktoren ist jedoch stets mit einem Informationsverlust verbunden. Um diesem Problem zu begegnen, gibt es eine weitere Methode zur Reduktion von Multikollinearität, die sog. Principal Component Analyse (PCA). Die PCA extrahiert Informationen, indem sie korrelierende Prädiktoren in eine kleinere Anzahl von nicht korrelierenden, orthogonalen Variablen (den sog. Principal Components - PC) überführt. Die PC sind Linearkombinationen der ursprünglichen Prädiktoren. PCA führt zur Reduktion der Dimensionen des Datensatzes und somit zur Reduktion von Multikollinearität. In Abhängigkeit der PC und deren Varianz führt PCA zwar auch zu einem geringen Informationsverlust, jedoch wird die vollständige Eliminierung von einzelnen Prädiktoren vermieden. Nach Trost, Ebel, Brosch und Reuss (2020) sollte die Anzahl der PC dabei so gewählt werden, dass sie mindestens 90% der Varianz repräsentieren.

3 Motivation, Zielsetzung und Forschungsfragen

3.1 Motivation und Forschungslücken

Basierend auf den in Kapitel 2 zusammengetragenen Informationen zum Stand der Forschung lässt sich die Motivation für die vorliegende Arbeit ableiten. Die heutige Applikation von Getrieben ist eine sehr komplexe Tätigkeit, welche sich mit enormen Herausforderungen konfrontiert sieht. In den letzten Jahren hat die Systemkomplexität der Getriebesteuerung infolge von Kundenanforderungen hinsichtlich Sportlichkeit und Komfort, der Fahrzeugsicherheit und den Anforderungen der Gesetzgebung bzgl. Kraftstoffverbrauch und Emission sowie der zunehmenden Hybridisierung der Antriebsstränge signifikant zugenommen. Borgeest (2021) hat die Anzahl der zu applizierenden Parameter und Kennfelder von komplexen Steuergeräten als fünfstellig beschrieben. Trotz zunehmender Marktanteile von rein elektrisch angetriebenen Fahrzeugen ist davon auszugehen, dass die Komplexität der Getriebesteuerung infolge verschärfter Gesetzgebungen und steigender Kundenanforderungen in den nächsten Jahren weiter zunehmen wird. Der daraus resultierende Aufwand für die Applikation und deren Validierung steigt somit stetig. Es ist evident, dass die Anwendung neuer Methoden unabdingbar ist, um die Komplexität und den damit verbundenen Aufwand im Kontext immer kürzer werdender Entwicklungszeiten beherrschbar zu halten. In der Literatur finden sich bereits erste Ansätze, um den Applikationsprozess und dessen Validierung effizienter zu gestalten.

Einen ersten Ansatz liefern Matros et al. (2015) im Kontext der manöverbasierten Validierung und des daraus resultierenden Manöverkataloges. Es wurde gezeigt, dass dieser Ansatz bereits zur Validierung im Kontext der Getriebeapplikation im OEM-Umfeld Anwendung findet. Dennoch liegen Manöverkataloge der Getriebeapplikation vornehmlich als globale Kataloge vor, weshalb diese über alle Produktgenerationen und -linien hinweg zum Einsatz kommen. Insbesondere bei realen Fahrversuchen führt dies zu einer sehr ineffizienten Validierung infolge des resultierenden Trial & Error Ansatzes.

Im Bereich der Objektivierung der Schaltqualität existieren in der Literatur eine Vielzahl von unterschiedlichen Ansätzen, was daraufhin deutet, dass bisher keine eindeutige Vorgehensweise existiert. Dennoch hat sich insbesondere im industriellen

Umfeld AVL-Drive als Anwendung mit einer hohen Aussagegüte etabliert. Eine konsequente Effizienzsteigerung kann jedoch erst erzielt werden, wenn der Einsatz derartiger Anwendungen auch auf alternativen Validierungsumgebungen mit vergleichbaren Ergebnissen zu den Fahrversuchen ermöglicht wird. Die bisher dazu vorgestellten Ansätze konzentrieren sich primär auf Rollenprüfstände, konnten jedoch keine hinreichend genauen Ergebnisse liefern.

Im Kontext der Schaltstrategie existieren bisher kaum nutzbare Ansätze zur Objektivierung der subjektiv wahrgenommenen Fahrbarkeit. Es konnte zwar gezeigt werden, dass die Schaltstrategie mittels Simulationen den realen Fahrversuch sehr gut abbildet, dies jedoch vornehmlich zum quantitativen Vergleich von Datenständen auf unterschiedlichen Zyklen oder Streckenprofilen genutzt wird. Eine objektive Aussage zur Fahrbarkeit kann auf Basis dieses quantitativen Vergleichs gegenwärtig noch nicht getroffen werden.

Es lässt sich somit konstatieren, dass in der Literatur erste Ansätze zur methodischen Unterstützung der Getriebeapplikation vorliegen, welche vornehmlich eine effizientere Validierung anstreben. Diese sind jedoch unterschiedlich stark ausgeprägt und somit etabliert. Alle Ansätze weisen darüber hinaus deutliche Potenziale zur Weiterentwicklung auf, um einen Beitrag zur effizienteren Validierung der Getriebeapplikation leisten zu können. Der Bedarf nach einer konsequenten Effizienzsteigerung begründet sich dabei vornehmlich auf den zunehmenden Anforderungen und dem damit verbundenen Komplexitätszuwachs der Getriebeapplikation bei gleichzeitig reduzierten Entwicklungszeiten.

3.2 Zielsetzung

Auf Basis der im vorherigen Kapitel dargelegten Motivation lässt sich die Zielstellung der vorliegenden Arbeit ableiten. Diese soll einen Beitrag dazu leisten, den Applikationsingenieur im Rahmen seiner herausfordernden Tätigkeit der Getriebeapplikation zu unterstützen. Die Unterstützung begründet sich auf einer effizienteren Validierung am Beispiel von Doppelkupplungsgetrieben, wobei die beiden primären Handlungsfelder der Getriebeapplikation (Schaltstrategie und Schaltablauf) fokussiert werden sollen.

Auf Basis des IPEK-XiL-Ansatzes sollen die Potenziale eines Manövertransfers zur Validierung der Schaltqualität auf Gesamtfahrzeugprüfständen untersucht werden. Voraussetzung dafür ist, dass vergleichbare Ergebnisse der objektiven Schaltqualitätsbewertung zum realen Fahrversuch erzielt werden können. Da der Manövertransfer lediglich als Beitrag zu verstehen ist und somit nicht dem Anspruch genügen

soll, eine Schaltqualitätsvalidierung gesamtheitlich, ohne reale Fahrversuche zu ermöglichen, ist eine Angabe notwendig, bis zu welchem Umfang Fahrmanöver durch diese Methode ersetzt werden können. Diese Angabe entspricht folglich den Grenzen der Methode.

Bezugnehmend auf die weiterhin notwendigen Fahrversuche soll ein Ansatz entwickelt werden, welcher den Fahrversuch mittels physischer Prototypen auf Teststrecken zur manöverbasierten Validierung der Schaltqualität effizienter gestalten kann. Die daraus generierten Informationen können wiederum bei der Auslegung des Manövertransfers direkt berücksichtigt werden.

Zur effizienteren Validierung der Schaltstrategie hinsichtlich der subjektiven Wahrnehmung soll untersucht werden, ob und inwieweit Simulationen dafür verwendet werden können. Auch in diesem Zusammenhang ist es unabdingbar, Grenzen der Methode zu definieren. Diese sind sowohl für die effizientere Validierung der Schaltstrategie als auch der Schaltqualität von zentraler Bedeutung, um die Akzeptanz der entwickelten Methoden bei den Applikationsingenieuren zu steigern.

3.3 Forschungshypothese und -fragen

Auf Basis der beschriebenen Zielsetzung für die Arbeit lässt sich im Folgenden eine zentrale Forschungshypothese ableiten:

Forschungshypothese: Durch den Transfer von Validierungsumfängen der Schaltstrategie und Schaltqualität von Fahrversuchen auf alternative Validierungsumgebungen im Kontext des IPEK-XiL-Ansatzes kann eine Effizienzsteigerung der Getriebeapplikation erzielt werden.

Um diese zu verifizieren, werden drei Forschungsfragen definiert, anhand derer die Erfüllung der definierten Zielsetzung überprüft werden kann:

Forschungsfrage 1: Wie kann die Validierung der subjektiv wahrgenommenen Schaltqualität von Doppelkupplungsgetrieben methodisch unterstützt werden, so dass eine Effizienzsteigerung auf Basis einer systematischen Vorauswahl der zu validierenden Manöver realisiert werden kann?

Forschungsfrage 2: In welchem Umfang können Gesamtfahrzeugprüfstände im Kontext des IPEK-XiL-Ansatzes reale Fahrversuche ersetzen, um die Schaltqualität von Doppelkupplungsgetrieben zu validieren?

Forschungsfrage 3: Wie kann eine Effizienzsteigerung der Validierung der Schaltstrategie im Kontext der subjektiven Wahrnehmung auf Basis von Simulationen realisiert werden und wo liegen die Grenzen dieses Vorgehens?

4 Systematische Vorauswahl zu validierender Manöver der Schaltqualität

Im nachfolgenden Kapitel werden die Forschungsbedarfe, welche sich aus der Forschungsfrage 1 begründen, aufgegriffen. Zunächst werden die Manöver zur Validierung der Schaltqualität im globalen Manöverkatalog analysiert und Effizienzpotentiale identifiziert (Kapitel 4.1). Im nächsten Schritt wird erläutert, wie synthetische Testfälle für Simulationen genutzt werden können, um diesen Potentialen zu begegnen (Kapitel 4.2). Darauf aufbauend wird dargestellt, wie diese Testfälle aufgebaut sein müssen und wie diese automatisiert generiert werden können. Kapitel 4.3 stellt abschließend dar, wie die Ergebnisse der Simulationen gemäß des initialen Zielsystems algorithmusbasiert und somit im Sinne der angestrebten Effizienzsteigerung ebenfalls automatisiert analysiert werden können. Wesentliche Aspekte dieses Kapitels wurden bereits im NAFEMS Online Magazin – Zeitschrift für numerische Simulationsmethoden und angrenzende Gebiete veröffentlicht (Köber, Pflüger, Behrendt & Albers, 2021).

4.1 Analyse des Manöverkatalogs und Identifikation von Potenzialen zur Validierung der Schaltqualität

Im Stand der Forschung wurde bereits dargestellt, dass Manöverkataloge im automobilen Umfeld weit verbreitet sind (siehe 2.1.3). Diese listen die Gesamtheit aller zu validierenden Manöver inkl. deren Start- und Randbedingungen sowie die objektiven bzw. subjektiven Bewertungskriterien zum Erreichen der Validierungsziele. Im Kontext der Schaltqualität bedeutet das, dass zunächst für alle Schaltarten definiert ist, wie die jeweiligen Schaltungen angefahren und wann sie ausgelöst werden. Als Validierungsziel ist festgelegt, welche subjektive ATZ-Note die Schaltungen zum jeweiligen Meilenstein mindestens benötigen. Neben den genannten Schaltungen listet der Manöverkatalog noch Manöver der Kategorien Anfahren, Rangieren, Fahrstufenwechsel und Kriechen, auf welche im Rahmen der vorliegenden Arbeit jedoch nicht näher eingegangen werden soll. Um im Kontext von Fahrversuchen eine Effizienzsteigerung der manöverbasierten Validierung erzielen zu können, ist es zunächst notwendig, die Manöver des Manöverkatalogs zu analysieren. Bei dieser

Analyse wird deutlich, dass insbesondere die Informationen darüber, wie die Schaltungen des Manöverkatalogs anzufahren sind, auf implizitem Wissen beruhen und nicht explizit im Manöverkatalog definiert sind.

Zug-Hochschaltungen

ZHS in D werden im Manöverkatalog lediglich über die Fahrpedalwerte definiert (siehe Abbildung 4.1 | links). Es ist bekannt, dass konventionelle Schaltkennfelder in Abhängigkeit von Fahrpedal und Geschwindigkeit parametrisiert sind. In Abhängigkeit des jeweiligen Fahrpedalwertes wird die Fahrzeuggeschwindigkeit zunehmen. Erreicht diese einen definierten Wert, wird durch die Schaltstrategie automatisch eine ZHS gefordert. Somit ist der einfachste Fall zur Validierung von ZHS in D aus dem Stillstand den definierten Fahrpedalwert vorzugeben und so lange zu beschleunigen, bis der maximale Gang erreicht wird oder das Fahrzeug infolge der hohen Fahrwiderstände keine Geschwindigkeitszunahme mehr aufweist.

Bei ZHS in M gilt es, neben dem Fahrpedalwert auch noch eine Zieldrehzahl zu berücksichtigen, auf welche beschleunigt werden muss. Wird diese erreicht, soll der Fahrer eine manuelle Schaltung auslösen. Somit ist es auch in diesem Fall möglich bei konstantem Fahrpedalwert vom niedrigsten bis in den höchsten Gang zu beschleunigen und stets bei der geforderten Drehzahl in den nächsthöheren Gang zu schalten (siehe Abbildung 4.1 | rechts).

Zug-Hochschaltungen D						Zug-Hochschaltungen M					
	1 - 2	2 - 3	3 - 4	4 - 5	5 - 6		2000 1/min	3000 1/min	4000 1/min	5000 1/min	6000 1/min
20%						Fahrpedal 50%	1-2				
30%							2-3				
40%							3-4				
50%							4-5				
60%							5-6				
80%							6-7				
100%							7-8				

Abbildung 4.1: Beispielhafte Vorgaben des Manöverkatalogs zur Bewertung der Schaltqualität anhand der ATZ-Noten für Zug-Hochschaltungen in D (links) und M (rechts)

Zug-Rückschaltungen

ZRS in D erfolgen typischerweise bei einer spontanen Fahrpedalzugabe, oftmals aufgrund von Beschleunigungs- oder Überholmanövern. Um diese zu validieren, werden im Manöverkatalog Zieldrehzahlen vorgegeben (siehe Abbildung 4.2 | links), bei welchen der Fahrpedalsprung erfolgen soll. Da auch der Fahrpedalsprung unterschiedliche Werte annehmen kann, ist es offensichtlich, dass dieser auch vorgegeben wird. Um die geforderte Zieldrehzahl im jeweiligen Gang zu erreichen, wird typischerweise in M der jeweilige Gang eingelegt und das Fahrzeug auf eine frei

wählbare Drehzahl oberhalb der Zieldrehzahl beschleunigt. Wird diese sog. Offset-Drehzahl erreicht, geht der Fahrer vom Fahrpedal, woraufhin das Fahrzeug vom Zug in den Schub wechselt und die Drehzahl sich somit langsam verringert. Ist die Zieldrehzahl im Schub erreicht, wird durch den Fahrer zunächst von M nach D gewechselt und anschließend mit einem maximalen Fahrpedalgradienten der geforderte Fahrpedalwert gestellt. Dieser wird so lange konstant gehalten, bis der Gangwechsel beendet ist. Bei großen Fahrpedalsprüngen werden die ZRS oftmals als Mehrfach-ZRS ausgeführt.

Die Zieldrehzahl von ZRS in M (siehe Abbildung 4.2 | rechts) wird im Vergleich zu ZRS in D nicht im Schub angefahren, sondern im Zug. Aus diesem Grund muss die Offset-Drehzahl niedriger sein als die Zieldrehzahl. Folglich wird der Fahrer in M und dem entsprechenden Gang zunächst eine niedrigere Offset-Drehzahl anfahren, um anschließend den geforderten Fahrpedalwert zu stellen. Ist infolge der sich einstellenden Beschleunigung die Zieldrehzahl erreicht, wird durch den Fahrer (bei weiterhin konstantem Fahrpedalwert) eine manuelle Rückschaltung ausgelöst. Auch in diesem Fall wird der Fahrpedalwert so lange konstant gehalten, bis die Schaltung beendet ist.

Zug-Rückschaltungen D					Zug-Rückschaltungen M				
		1000 1/min	2000 1/min	4000 1/min			1000 1/min	2000 1/min	4000 1/min
Fahrpedal 0% - 50%	2. Gang				Fahrpedal 50%	2-1			
	3. Gang					3-2			
	4. Gang					4-3			
	5. Gang					5-4			
	6. Gang					6-5			
	7. Gang					7-6			
	8. Gang					8-7			

Abbildung 4.2: Beispielhafte Vorgaben des Manöverkatalogs zur Bewertung der Schaltqualität anhand der ATZ-Noten für Zug-Rückschaltungen in D (links) und M (rechts)

Schub-Hochschaltungen

SHS werden vornehmlich in M validiert, da SHS in D im Rahmen von Fahrversuchen sehr schwer zu reproduzieren sind. Relevante Vorgabe im Rahmen der Validierung ist lediglich die Zieldrehzahl, da SHS typischerweise ungebremst validiert werden. Das ist darauf zurückzuführen, dass ein exaktes Anfahren von Zieldrehzahlen im gebremsten Zustand durch einen menschlichen Fahrer kaum realisierbar ist. Vergleichbar mit ZRS in D wird bei SHS in M zunächst eine frei wählbare Offset-Drehzahl angefahren, welche oberhalb der Zieldrehzahl liegt. An diesem Betriebspunkt wechselt der Fahrer in den Schub, woraufhin sich die Drehzahl reduziert. Wird die geforderte Zieldrehzahl erreicht, löst der Fahrer eine manuelle Hochschaltung aus. Ein entsprechender Auszug des Manöverkatalogs ist Abbildung 4.3 in dargestellt.

Schub-Hochschaltungen | M

		2000 1/min	3000 1/min	4000 1/min	5000 1/min	6000 1/min
Fahrpedal 0%	1-2					
	2-3					
	3-4					
	4-5					
	5-6					
	6-7					
	7-8					

Abbildung 4.3: Beispielhafte Vorgaben des Manöverkatalogs zur Bewertung der Schaltqualität anhand der ATZ-Noten für Schub-Hochschaltungen in M

Schub-Rückschaltungen

SRS in D zählen neben den ZHS in D zu den am häufigsten vorkommenden Schaltarten. Typische Fahrsituationen sind beispielsweise das Abbremsen vor einer Kreuzung oder Kreisverkehr. Einzige Vorgabe des Manöverkatalogs zur Validierung von SRS ist (sowohl in D als auch in M) die negative Beschleunigung, welche es durch den Fahrer einzuregeln gilt. Wie in Abbildung 4.4 zu erkennen, liegt die geforderte, negative Beschleunigung typischerweise im Bereich von ungebremst bis zu einer ABS-Bremung, wobei die Granularität der Abstufungen variieren kann. Auch für SRS in M gibt es keine Drehzahlvorgabe, da die Schaltung eigenständig durch das Getriebe im Bereich der Leerlaufdrehzahl ausgelöst wird, um zu verhindern, dass der Motor abgewürgt wird. Aus diesem Grund ist die Vorgabe des Manöverkatalogs für SRS in D und M identisch. Zur Validierung der Schaltart beschleunigt und schaltet der Fahrer zunächst in den höchsten Gang, reduziert das Fahrpedal und regelt dann die geforderte negative Beschleunigung bis in den ersten Gang ein. Anzumerken ist, dass insbesondere bei sehr hohen Bremsverzögerungen der Gangsprung der SRS oftmals nicht kontinuierlich ist. So fordert die Schaltstrategie aufgrund der längeren Schaltzeiten bei einer hohen negativen Beschleunigung bspw. nicht erst den 7.Gang, sondern direkt den 3.Gang. Aus diesem Grund werden SRS stets durchgehend vom höchsten bis in den niedrigsten Gang gefahren.

Schub-Rückschaltungen | D und M

	8 - 7	7 - 6	6 - 5	5 - 4	4 - 3	3 - 2	2 - 1
Ungebremsst							
Leicht gebr. (-2 bis -2,5m/s ²)							
Mittel gebr. (-4 bis -5m/s ²)							
Stark gebr. (-6 bis -8m/s ²)							
ABS							

Abbildung 4.4: Beispielhafte Vorgaben des Manöverkatalogs zur Bewertung der Schaltqualität anhand der ATZ-Noten für Schub-Rückschaltungen für Schaltungen sowohl in D als auch in M

Wie bereits in Kap. 2.3.1.1 dargelegt, sind Manöverkataloge der Getriebeapplikation typischerweise globale Kataloge und werden somit produktlinien- und produktgenerationsübergreifend eingesetzt. In Abhängigkeit der Fahrzeugklasse, der angestrebten Marktpositionierung, Motorisierung und Getriebevariante des Fahrzeuges resultieren allerdings gänzlich unterschiedliche Applikationen der Schaltstrategie und somit auch der Schaltpunkte. Hinzu kommt, dass in Abhängigkeit der Motorleistung und des Fahrwiderstandes die möglichen Betriebspunkte des Fahrzeuges variieren. So hat ein Sportwagen beispielsweise eine höhere maximale Motodrehzahl als eine deutlich komfortablere Limousine. Daraus resultiert, dass nicht immer alle Schaltungen des globalen Manöverkatalogs angefahren werden können.

Gemäß des Trial & Error Ansatzes wird gegenwärtig in Fahrversuchen auf abgesperrten Testgeländen versucht, die maximale Anzahl an Schaltungen anzufahren. Es ist evident, dass dieser Lösungsansatz aufgrund der Vielzahl an Schaltungen mit einem sehr hohen Zeit- und somit auch Kostenaufwand verbunden ist. Darüber hinaus nimmt diese heuristische Methode bewusst Fehler bei der Lösungsfindung in Kauf. Unter Berücksichtigung des ebenfalls in dieser Arbeit angestrebten Manövertransfers der Schaltqualität auf Gesamtfahrzeugprüfstände ist ein Trial & Error Ansatz nicht praktikabel. Eine Automatisierung der Testkampagne ohne explizites Wissen über die fahrbaren bzw. nicht-fahrbaren Schaltungen ist nur unter sehr hohem Aufwand realisierbar, was es zu vermeiden gilt. Somit ist es sowohl für die Effizienzsteigerung von realen Fahrversuchen zur manöverbasierten Validierung als auch für den Manövertransfer auf alternative Validierungsumgebungen essenziell, detailliertes Wissen über den Versuchsraum und dessen Grenzen zu erlangen.

4.2 Generierung synthetischer Testfälle für eine simulationsbasierte Vorauswahl

Es wurde bereits im vorherigen Kapitel dargestellt, dass explizites Wissen über den Versuchsraum und somit über die fahrbaren bzw. nicht-fahrbaren Schaltungen des globalen Manöverkatalogs in einer signifikanten Effizienzsteigerung für manöverbasierte Validierungen mittels Fahrversuchen resultiert. Basierend auf den applizierten Schaltkennfeldern können die Schaltpunkte theoretisch direkt aus den vorliegenden Getriebe-Datenständen ausgelesen werden. Dieser triviale Ansatz, welcher vornehmlich für Schaltungen in D Anwendung findet, benötigt sehr geringe Rechenkapazität und ermöglicht somit schnelle Analysen des Manöverkatalogs. Es gibt jedoch auch einige wesentliche Nachteile dieses theoretischen Ansatzes, welche im Folgenden kurz genannt werden sollen:

- Die motor- und fahrwiderstandsabhängigen Höchstgeschwindigkeiten je Fahrpedalwert können nicht hinreichend genau abgebildet werden
- Spezielle Fahrzustände (z.B. Fahren im schlupfenden Kupplungszustand) und die daraus resultierende Unterbindung des Gangwechsels können nicht abgebildet werden
- Gangbeeinflussende Sonderfunktionen der Schaltstrategie können nicht abgebildet werden (z.B. Zwangsrückschaltungen in M kurz vor Leerlaufdrehzahl)

Um diesen Nachteilen zu begegnen, können, anstelle des theoretischen Ansatzes, Simulationsmodelle verwendet werden. Im Stand der Forschung wurde SimEnv bereits als valide Simulationsumgebung eingeführt. SimEnv bietet den wesentlichen Vorteil, dass neben den dynamischen Eigenschaften des Fahrzeuges auch die Schaltstrategie vollumfänglich integriert ist. Mit Hilfe dieser Simulationsumgebung können alle Manöver des Manöverkatalogs chronologisch, gemäß ihrer Start- und Randbedingungen, simuliert werden und deren Ergebnisse, gemäß des initialen Zielsystems automatisiert analysiert werden. Das initiale Zielsystem in diesem Kontext beantwortet die Frage, ob die Schaltung fahrbar ist und somit innerhalb des Versuchsraums liegt, oder nicht. Somit wird der Trial & Error Ansatz im Sinne des IPEK-XiL-Ansatzes von realen Fahrversuchen auf Simulationen verlagert.

Wie im Stand der Forschung (siehe Kap. 2.1.3) bereits beschrieben, können die Manöver des Manöverkatalogs zunächst genutzt werden, um daraus geeignete Testfälle für die entsprechende Validierungsumgebung zu definieren. Um entsprechende Testfälle generieren zu können, bedarf es neben der Kenntnis darüber, wie die einzelnen Manöver im Detail angefahren werden sollen, explizites Wissen über

die Schnittstellen zum bestehenden Simulationsmodell. Die notwendigen Informationen, welche durch jeden Testfall zur Verfügung gestellt werden müssen, sind Informationen über die Straße, die dazugehörige Fahrlinie, die Fahrzeugparameter und die Parametrierung des Fahrermodells (siehe Abbildung 4.5). Das Fahrermodell erhält durch die Fahrlinie Informationen über den Streckenverlauf in Form von räumlichen Koordinaten. Diesen soll das Fahrermodell mittels längs- und querdynamischer Regelung folgen. Bezüglich der Längsdynamik kann das Fahrermodell dabei entweder direkt über einen expliziten Fahrpedalwert definiert werden (Open-Loop) oder mittels einer zeitabhängigen Geschwindigkeitsvorgabe eigenständig regeln (Closed-Loop). (Köber, Pflüger et al., 2021)

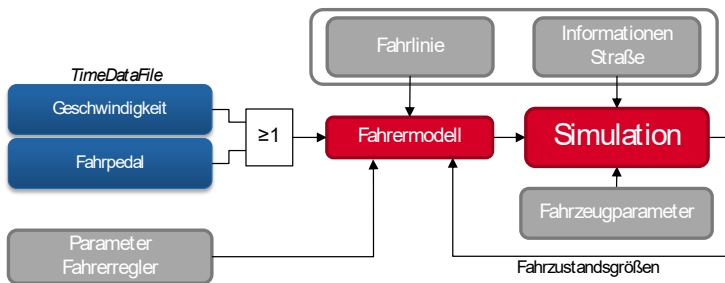


Abbildung 4.5: Notwendige Input-Daten zur Vorgabe eines synthetischen Testfalles [grau: obligatorisch, blau: fakultativ] (Köber, Pflüger et al., 2021)

Durch die Definition der Parameter des Fahrerreglers können sowohl Längs- als auch Querdynamikregelung unabhängig voneinander abgestimmt werden. Die resultierende längs- und querdynamische Aktuatorik des Fahrermodells¹ fungiert als direkte Eingangsgröße der Simulation. Neben dieser erhält das Simulationsmodell über die individuelle Testfalldefinition alle wesentlichen Informationen über die Fahrzeugparameter und allgemeine Informationen zur Straße wie z.B. deren Reibwert. Die Fahrzeugparameter definieren dabei alle Eigenschaften des zu simulierenden Fahrzeugs und haben somit signifikanten Einfluss auf das Simulationsergebnis. Bei der Wahl der Fahrzeugparameter können alle relevanten Hardware- und Softwarestände des zu simulierenden Fahrzeuges variiert werden, wie z.B. Motor- und Getriebevariante, Radstand, Spurweite oder Daten- bzw. Programmstände der Steuergeräte. Demnach enthalten die Fahrzeugparameter auch die notwendigen

¹ Fahr- und Bremspedal sowie Lenkwinkel

Informationen des aktuellen Getriebedatenstandes, in welchem u.a. die Schaltkennfelder hinterlegt sind. Alle genannten Informationen über Fahrermodell, Fahrzeug und Straße, welche im Rahmen der Testfallerstellung für das Simulationsmodell unabdingbar sind, sollen im Kontext der angestrebten Effizienzsteigerung algorithmusbasiert generiert werden. So können alle notwendigen Informationen automatisiert aus dem Manöverkatalog ausgelesen und in Parameter für das Fahrer- und Simulationsmodell überführt werden. Neben der offensichtlichen Effizienzsteigerung hat dies den Vorteil, dass bei potenziellen Anpassungen des Manöverkatalogs (beispielsweise Grad der Granularität) keine separate Korrektur der synthetischen Testfälle notwendig ist.

Basierend auf dem Wissen zum vorgestellten Manöverkatalog ist es evident, dass die Manöver der unterschiedlichen Schaltarten als individuelle Testfälle umgesetzt werden müssen. Je Schaltart ist es jedoch praktikabel, mehrere Manöver zu einem synthetischen Testfall zusammenzufassen. Das ist darauf zurückzuführen, dass die Manöver sich lediglich in ihrer Längsführung² und manuellen, durch den Fahrer initiierten Schaltpunkte unterscheiden. Dieser Zusammenhang wurde bereits im Rahmen der Analyse des Manöverkatalogs herausgestellt. So können beispielsweise alle ZHS in D mit identischem Fahrpedal oder alle SRS in M bei identischer Drehzahl zu einem synthetischen Testfall zusammengefasst werden.

Bei der Definition der synthetischen Testfälle gibt es zum Teil erhebliche Unterschiede in der Komplexität. Beispielsweise wird bei ZHS in D zunächst lediglich ein definierter Fahrpedalwert ab Stillstand des Fahrzeuges vorgegeben. Das Fahrzeug wird beschleunigen und bei Erreichen einer im Schaltkennfeld hinterlegten Geschwindigkeit automatisch in den nächsthöheren Gang schalten. Der Fahrpedalwert wird so lange konstant gehalten, bis entweder der höchste Gang erreicht wird oder die Fahrwiderstände die Fahrleistung übersteigen und das Fahrzeug somit nicht weiter beschleunigt. Letzteres gilt es abzufangen, da dieser Zustand in Abhängigkeit der unterschiedlichen Fahrpedalwerte nicht a priori vorhersehbar ist. Deshalb werden für jeden Gangwechsel Time-out-Zeiten definiert. Wird während des Time-out der notwendige Betriebspunkt für den nächsten Gangwechsel nicht erreicht, so wird die Simulation für den aktuellen Testfall beendet. Im Kontext des initialen Zielsystems bedeutet das, dass die jeweilige Schaltung im Manöverkatalog nicht umsetzbar ist. In Abbildung 4.6 ist dieser Zusammenhang anhand einer Zug-Hochschaltung in D beispielhaft dargestellt. Der Gangwechsel muss, nachdem das Fahrpedal gestellt wurde, innerhalb des vorgegebenen Time-out erfolgen, andernfalls wird diese Schaltung als nicht umsetzbar klassifiziert und der Testfall beendet. In Abbildung

² Validierung der Schaltqualität erfolgt lediglich in longitudinaler Richtung ohne Querkräfte

4.6 erfolgt der Gangwechsel vor Ablauf des Time-out ($\Delta t < t_{\text{timeout}}$), weshalb diese Schaltung als umsetzbar gilt und somit dem zu validierenden Versuchsraum zugeordnet wird. Die Berücksichtigung von Time-out Zeiten ist bei allen Schaltungen des Manöverkatalogs und somit allen daraus resultierenden synthetischen Testfällen notwendig, um einerseits nicht-fahrbare Schaltungen zu identifizieren und andererseits, um Endlosschleifen während der Testkampagne zu verhindern. (Köber, Pflüger et al., 2021)

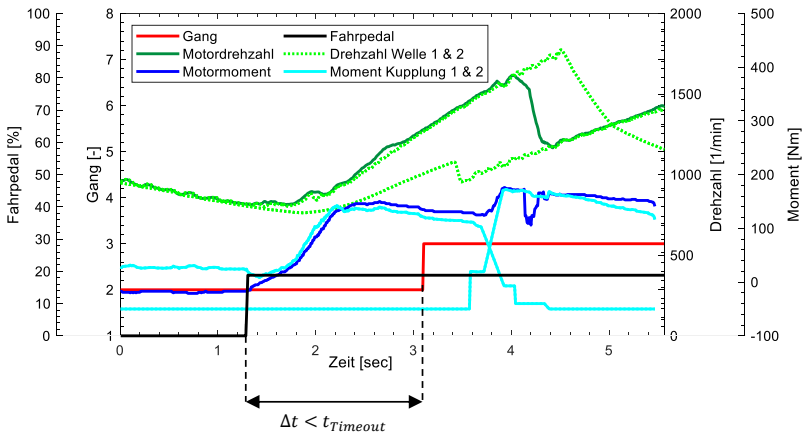


Abbildung 4.6: Berücksichtigung eines Time-out anhand einer Zug-Hochschaltung zur Identifikation von nicht-fahrbaren Schaltungen und zur Verhinderung von Endlosschleifen im Rahmen der Simulation

Wesentlich komplexer als ZHS in D sind entsprechende ZHS in M, da zusätzlich zum Fahrpedal und Time-out noch die manuellen Schaltungen durch den Fahrerregler initiiert werden müssen. Die Umsetzung dieses synthetischen Testfalles soll im Folgenden beispielhaft beschrieben werden. Genau wie bei Zug-Hochschaltungen in D wird das Fahrermodell zunächst mit einer expliziten Fahrpedalvorgabe als OpenLoopModell betrieben. Zusätzlich muss das Fahrermodell jedoch noch bei definierten Drehzahlen manuelle Schaltungen initiieren. Wie im Stand der Forschung bereits erläutert, werden jedoch auch in M nicht immer alle getippten Schaltungen durch die Schaltstrategie freigegeben (siehe Kap. 2.2.1.2). In Abhängigkeit der aktuellen Fahrsituation berechnet die Schaltstrategie stetig den minimal und maximal erlaubten Gang, welcher durch Tippen gegenwärtig angefordert werden darf. Dieser Aspekt muss bei der Auslegung des synthetischen Testfalles berücksichtigt werden, da ein singuläres

Tippen ohne Berücksichtigung der Freigabe durch die Schaltstrategie am vorliegenden Betriebspunkt dazu führen kann, dass der Gangwechselwunsch von der Schaltstrategie übergangen wird. Der weitere Ablauf der Testkampagne wäre an diesem Punkt gestört, da der vom Testfall erwartete Gang nicht eingelegt ist. Bei der Definition des Testfalles ist es somit notwendig, dass bei Erreichen der geforderten Schalt-Drehzahl zunächst algorithmusbasiert geprüft wird, ob eine Freigabe durch die Schaltstrategie (sog. Tip-Erlaubnis) für den nächsthöheren Gang vorliegt. Wenn ja, wird durch das Fahrermodell eine manuelle Schaltung mittels Betätigung der Schaltwippen initiiert. Ist dies nicht der Fall, wird die manuelle Schaltung so lange herausgezögert, bis die Freigabe durch die Schaltstrategie erfolgt. Da das Fahrpedal in dieser Phase des Wartens weiterhin konstant gehalten wird, erhöht sich die Motordrehzahl entsprechend und die Schaltung wird erst bei einer deutlich höheren Drehzahl als initial gefordert ausgelöst. Dies gilt es bei der anschließenden Ergebnisanalyse (siehe Kap. 4.3) zu berücksichtigen. Auch bei diesem Testfall ist es notwendig, ein Time-out zu berücksichtigen, um potenzielle Endlosschleifen auszuschließen. Anders als bei Zug-Hochschaltungen in D, bei welchen das Time-out in Abhängigkeit des folgenden Gangwechsels (und somit der Geschwindigkeit) definiert ist, ist im vorliegenden Testfall die Motordrehzahl das relevante Kriterium. Wird innerhalb des Time-out die geforderte Drehzahl in Abhängigkeit des aktuellen Ganges und Fahrpedals nicht erreicht, so wird vorzeitig in den nächsthöheren Gang getippt.

Neben den spezifischen Definitionen der jeweiligen Testfälle kann es praktikabel sein, auch globale Vorgaben zu ermöglichen. So kann es beispielsweise notwendig sein, eine Höchstgeschwindigkeit für alle Manöver festzulegen, um den bauartbedingten Höchstgeschwindigkeiten vieler Teststrecken Rechnung zu tragen. Auch Gesamtfahrzeugprüfstände sind diesbezüglich oftmals limitiert aufgrund von unzureichender Kühlung oder Abgasabsaugung. Unter Berücksichtigung dieser Rahmenbedingungen ist das Ergebnis der Simulation des synthetischen Testfalles einer beispielhaften ZHS in M mit konstantem Fahrpedal in Abbildung 4.7 dargestellt. Dabei sollen Schaltungen durch das Fahrermodell bei 2000 1/min manuell ausgelöst werden. Es ist zu erkennen, dass beim ersten Überschreiten der Zieldrehzahl von 2000 1/min ($t \approx 0,8$ s) noch keine Schaltung durch das Fahrermodell ausgelöst wird. Das Tip-Signal bleibt unverändert auf 0. Gemäß der erläuterten Vorgabe überschreitet die Motordrehzahl zwar die Zieldrehzahl, eine Tip-Erlaubnis der Schaltstrategie liegt jedoch noch nicht vor. Dies ist anhand des Signals „Tip-Erlaubnis“ zu erkennen, welches zu diesem Zeitpunkt noch nicht in den 2. Gang gesprungen ist. Das Signal der Tip-Erlaubnis gibt dabei an, welcher Gang aktuell maximal durch den Fahrer manuell wählbar ist und wird durch die Schaltstrategie in Abhängigkeit der Fahrsituation limitiert bzw. freigegeben. Die fehlende Freigabe ist zu diesem Zeitpunkt darauf zurückzuführen, dass das Fahrzeug sich noch im Anfahren befindet. In diesem

Betriebspunkt ist die aktive Kupplung noch im schlupfenden Zustand, weshalb der Gangwechsel aus Gründen des Komforts unterbunden wird.

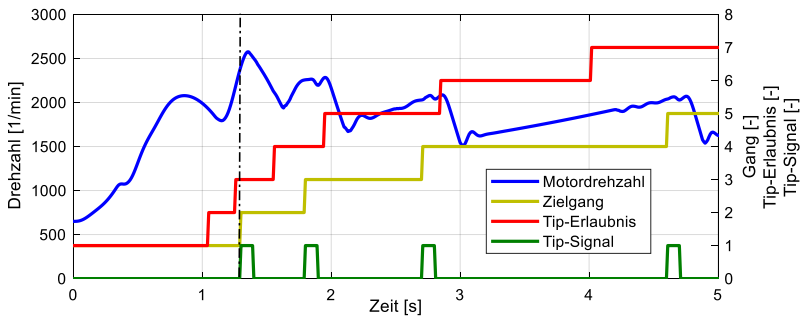


Abbildung 4.7: Zug-Hochschaltung in M als synthetischer Testfall und konstantem Fahrpedalwert (Köber, Pflüger et al., 2021)

Es schließt sich der Abbau des Kupplungsschlupfes an, was zum Abknicken der Motordrehzahl führt. Nach Abbau des Kupplungsschlupfes erfolgt die Freigabe der Tip-Erlaubnis in den 2. Gang, das Anfahren ist somit beendet. Da die Drehzahl zu diesem Zeitpunkt jedoch wieder unter die geforderten 2000 1/min abgefallen ist, erfolgt zunächst keine manuelle Schaltung durch das Fahrermodell. Erst nachdem die Zieldrehzahl von 2000 1/min zum zweiten Mal mit einer steigenden Flanke erreicht wird und die Tip-Erlaubnis vorliegt, löst das Fahrermodell eine manuelle Schaltung mittels Tippen (Betätigung der Paddels) aus. Das Tip-Signal springt kurzzeitig auf 1 und das Signal des Zielgangs wechselt in den 2. Gang. Dieser Moment ist mittels senkrechter Strich-Punkt-Linie in Abbildung 4.7 markiert. Die marginale Latenz zwischen dem Erreichen der Zieldrehzahl und dem darauffolgenden Tip-Signal ist auf das Modell des Fahrerreglers zurückzuführen. Da im Rahmen einer ZHS vor der Drehzahlüberführung zunächst die Kupplungsbefüllung und Momentenüberschneidung erfolgt, knickt die Motordrehzahl im Moment des Tip-Signals nicht sofort ab, sondern steigt kurzzeitig weiter an. Diese Information ist auch für die nachfolgende Ergebnisauswertung von Relevanz.

4.3 Automatisierte Ergebnisanalyse

Im vorherigen Kapitel wurde anhand einer ZHS in D und M beispielhaft dargestellt, wie synthetische Testfälle aufgebaut und umgesetzt werden müssen, um mittels eines bestehenden Simulationsmodells zu analysieren, ob Schaltungen eines globa-

len Manöverkatalogs fahrbar oder nicht-fahrbar sind. Dabei steht die Effizienzsteigerung stets im Fokus, weshalb der Transfer des Manöverkatalogs in synthetische Testfälle vollständig automatisiert umgesetzt wird. Um diesen Anspruch konsequent weiter zu verfolgen, ist neben der Testfallgenerierung auch eine automatisierte Analyse der Simulationsergebnisse gemäß des initialen Zielsystems unabdingbar. Für eine automatisierte Analyse der Simulationsergebnisse sind nach Köber und Pflüger et al. (2021, S. 53) zwei wesentliche Aspekte notwendig:

1. Ausreichendes Wissen über das initiale Zielsystem
2. Quantifizierbare und somit objektivierbare Bewertungskriterien

Im vorliegenden Kontext ist das initiale Zielsystem bekannt, da eine Plausibilisierung erfolgen soll, ob Schaltungen fahrbar sind oder nicht. Die dem Zielsystem zugrundeliegenden Bewertungskriterien sind darüber hinaus quantifizierbar, da es sich um boolesche Abfragen handelt (ja oder nein). Eine automatisierte Analyse ist somit möglich. Im Folgenden soll anhand des in Kapitel 4.2 dargestellten Beispiels der Zug-Hochschaltung in M erläutert werden, wie die Simulationsergebnisse gemäß des initialen Zielsystems automatisiert ausgewertet werden können. Der Testfall wurde so umgesetzt, dass eine manuelle Schaltung erst initiiert wird, wenn sowohl die geforderte Zieldrehzahl erreicht als auch die entsprechende Freigabe der Schaltstrategie erfolgt ist. Für die Ergebnisanalyse wird zu dem Zeitpunkt, in welchem die manuelle Schaltung durch das Fahrermodell initiiert wird, die Motordrehzahl ausgelesen. Es ist wichtig, dass explizit dieser Punkt für die Analyse berücksichtigt wird und nicht das sich anschließende lokale Maximum der Drehzahl (siehe Abbildung 4.7). Wie in Kapitel 4.2 mittels der einzelnen Phasen des Schaltablaufes bereits dargestellt, beschreibt das Maximum nicht den Startzeitpunkt der Schaltung und kann somit nicht für die Auswertung herangezogen werden. Für die Analyse wird die Drehzahl im nächsten Schritt mit der Vorgabe des Manöverkatalogs bzw. des sich daraus ableitenden Testfalles abgeglichen. Liegt die Drehzahl nicht im Bereich der geforderten Zieldrehzahl inklusive eines definierten Toleranzbandes, so ist die Schaltung am gegebenen Betriebspunkt nicht fahrbar. Gleiches gilt, wenn innerhalb des definierten Time-out die Zieldrehzahl nicht erreicht wird. Entsprechend wird die Schaltung vorzeitig ausgelöst und die Drehzahl wird von der geforderten Zieldrehzahl inkl. des Toleranzbandes abweichen. Die Berücksichtigung eines Toleranzbandes ist aufgrund der beschriebenen Latenz des Fahrermodells notwendig. Darüber hinaus kann bei der eigentlichen Validierung der Schaltqualität mit physischen Prototypen eine geforderte Drehzahl ebenfalls nicht exakt angefahren werden. Dies gilt sowohl für Fahrversuche mit menschlichen Fahrern als auch auf Gesamtfahrzeugprüfständen mit Fahrrobotern. Eine Abweichung liegt somit in der natürlichen Streuung und sollte bei der Analyse der Simulationsergebnisse berücksichtigt werden.

Abschließend gilt es, die Ergebnisse so aufzuarbeiten, dass eine maximale Nutzerfreundlichkeit und Anwendbarkeit sichergestellt werden. Um dieser Forderung gerecht zu werden, sollen die Ergebnisse im initialen, dem Applikateur vertrauten, Manöverkatalog eingetragen werden. Im Kontext der booleschen Abfrage ist es ausreichend, die nicht fahrbaren Schaltungen lediglich farblich hervorzuheben. Basierend auf diesem Dokument ist direkt ersichtlich, welche Schaltungen mit dem jeweiligen Fahrzeug fahrbar sind und welche nicht. Das ist beispielhaft für Zug-Hochschaltungen in M bei 80% Fahrpedal in Abbildung 4.8 dargestellt. Alle nicht-fahrbaren Schaltungen des beispielhaft zugrundeliegenden Fahrzeuges sind im Manöverkatalog ausgegraut.

Zughochschaltungen in Normal in M							
		1000 1/min	2000 1/min	3000 1/min	4000 1/min	5000 1/min	6000 1/min
80% FP	1-2						
	2-3						
	3-4						
	4-5						
	5-6						
	6-7						
	7-8						

Abbildung 4.8: Finaler Manöverkatalog für Zug-Hochschaltungen in Normal in M bei 80% Fahrpedal [Grau: nicht fahrbare Schaltungen eines beispielhaften Fahrzeuges] (Köber, Pflüger et al., 2021)

Neben der prinzipiellen Frage, ob eine Schaltung fahrbar ist oder nicht, gibt es in Abhängigkeit der Schaltarten weitere, individuell zu verarbeitende Informationen. Im Kontext der ZRS in D stellt sich beispielsweise nicht nur die Frage, ob eine Schaltung in Folge des Fahrpedalsprunges grundsätzlich ausgelöst wird, sondern auch, welcher Zielgang von der Schaltstrategie im vorliegenden Betriebspunkt gewählt wird. Diese Information ist aus zwei unterschiedlichen Aspekten von Relevanz, welche sich auf unterschiedliche Validierungsumgebungen beziehen. Unter Berücksichtigung des Fahrversuchs als Validierungsumgebung ist dieses Wissen für eine geeignete Dokumentation, Messdatenanalyse und Reproduzierbarkeit notwendig. Zwar ist es möglich, neben der Eintragung der Note auch den Zielgang nachträglich händisch im Manöverkatalog zu vermerken, allerdings ist dies infolge der Dynamik der Manöver nicht immer umsetzbar und oftmals fehleranfällig. Im Kontext des angestrebten Manövertransfers der Schaltqualitätsvalidierung auf Gesamtfahrzeugprüfstände ist dieses Wissen ebenfalls von erheblicher Relevanz. Wie von Wurm (2015) bereits diskutiert, kann eine effiziente, vollständig automatisierte Testkampagne nur dann realisiert werden, wenn von jedem Manöver die Start- und Endbedingungen bekannt sind (vgl. Kap. 2.3.2). Zu diesen Randbedingungen zählen konsequenterweise auch Start- und Zielgang jedes Manövers. Ohne dieses Wissen

kann keine Reihenfolge der Validierung festgelegt werden, was in einer signifikanten Komplexitätssteigerung für eine automatisierte Validierung auf alternativen Validierungsumgebungen resultiert. Gemäß der bereits dargestellten Eintragung der Ergebnisse im initialen Manöverkatalog werden auch alle zusätzlichen Informationen in diesem hinterlegt. Für ZRS in D wird beispielsweise, neben den ausgegrauten, nicht fahrbaren Schaltungen, vermerkt, welcher Zielgang des jeweiligen Manövers gemäß der Simulationsergebnisse erwartet wird. Dem Applikationsingenieur wird so ein einheitliches und arbeitsfähiges Dokument zur Verfügung gestellt. Der Auszug eines finalen Manöverkatalogs für ZRS mit einem Fahrpedalsprung von 0-100% ist in Abbildung 4.9 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass eine Vielzahl der Gangwechsel als Mehrfach-ZRS umgesetzt werden. Das unterstreicht den dargestellten Bedarf nach Wissen über den Zielgang ausgewählter Manöver.

Zugrückschaltung in Normal in D		1000 1/min	2000 1/min	4000 1/min	6000 1/min
0% - 100%	2.Gang	G1	G1		
	3.Gang	G1	G2		
	4.Gang	G1	G2	G3	
	5.Gang	G2	G2	G4	
	6.Gang	G2	G3	G4	
	7.Gang	G2	G3	G5	
	8.Gang		G4		

Abbildung 4.9: Finaler Manöverkatalog für Zug-Rückschaltungen in Normal in D bei einem Fahrpedalsprung von 0% auf 100% [Werte in Spalten entsprechen den erwarteten Zielgängen des jeweiligen Manövers]

4.4 Zwischenfazit

Es wurde dargestellt, dass der bestehende Trial & Error Ansatz zur Identifikation, ob Schaltungen des Manöverkatalogs zur Schaltqualitätsvalidierung fahrbar sind oder nicht, signifikante Effizienzdefizite aufweist. Darüber hinaus ist dieser Ansatz nicht praktikabel für einen angestrebten Manövertransfer auf eine alternative Validierungsumgebung wie Gesamtfahrzeugprüfstände. Dem wird die Forschungsfrage 1 und die sich daraus resultierenden Forschungsbedarfe gerecht, welche im Rahmen dieses Kapitels thematisiert wurden. Es konnte gezeigt werden, dass bestehende Simulationsmodelle genutzt werden können, um diesen Nachteilen zu begegnen. Dazu wurden in Abhängigkeit der unterschiedlichen Schaltarten

synthetische Testfälle generiert, welche es ermöglichen, mehrere Manöver zu einem Testfall zusammenzufassen. Da das übergeordnete Ziel die Effizienzsteigerung der Validierung darstellt, wurde der gesamte Ansatz automatisiert. Dies involviert, neben der eigentlichen Simulation, die Generierung der synthetischen Testfälle aus bestehenden Manöverkatalogen und die anschließende Analyse der Simulationsergebnisse. Somit erfolgt die Effizienzsteigerung zweistufig. Durch eine vollständige Automatisierung der simulationsbasierten Identifikation nicht-fahrbarer Schaltungen wird der Aufwand für den Applikationsingenieur vorab minimal. Basierend auf den so gewonnenen Erkenntnissen kann im nächsten Schritt ein signifikanter Hub bezüglich des zeitlichen Bedarfs von Fahrversuchsvalidierungen der Schaltqualität im Vergleich zum gegenwärtigen Trial & Error Ansatz generiert werden. Darüber hinaus legt der vorgestellte Ansatz den Grundstein für den angestrebten Manövertransfer der Schaltqualitätsvalidierung auf VIL-Prüfständen.

5 Automatisierte Validierung der Schaltqualität auf Gesamtfahrzeugprüfständen

Basierend auf den Forschungsbedarfen, welche sich aus der Forschungsfrage 2 begründen, wird in diesem Kapitel untersucht, inwieweit die manöverbasierte Validierung der Schaltqualität von Fahrversuchen auf ViL-Prüfstände transferiert werden kann. Aufgrund der im Stand der Forschung beschriebenen Defizite von Rollenprüfständen (Restriktionen in der Dynamik der Manöver und Einflüsse auf die Längsbeschleunigung in Abhängigkeit der Fahrzeugfixierung) soll in diesem Kapitel als Validierungsumgebung das beschriebene ViL-Konzept mittels Dynos verwendet werden (siehe Kap. 2.3.1.2). Im weiteren Verlauf der Arbeit wird das Akronym ViL daher exklusiv für dieses Prüfstandskonzept verwendet.

Für den angestrebten Manövertransfer ist es zunächst notwendig, den bestehenden Manöverkatalog in ein geeignetes Format zu überführen, welches eine automatisierte Umsetzung der gesamten Testkampagne an ViL-Prüfständen ermöglicht. Für die Umsetzung der resultierenden Testkampagne wird eine neuartige Methode zur exakten Ansteuerung von Fahrzeugen auf ViL-Prüfständen ohne Fahrroboter entwickelt. Unter Zuhilfenahme dieser Ansätze wird im nächsten Schritt untersucht, inwieweit objektive Aussagen zur Schaltqualität auf ViL-Prüfständen grundsätzlich getroffen werden können. Um den identifizierten Defiziten der Machbarkeitsstudie zu begegnen, wird ein Modell entwickelt, welches das reale Verhalten des Fahrzeuges insbesondere in transienten Zuständen auf ViL-Prüfständen exakter abbilden kann. Abschließend werden der Einfluss des neuen Modells auf die Ergebnisse untersucht und entsprechende Grenzen der Methode abgeleitet. Zentrale Inhalte dieses Kapitels wurden bereits auf der DRITEV 2021 in Bonn und Kupplungstagung 2021 in Ettlingen veröffentlicht (Albers, Köber, Breitinger & Behrendt, 2021; Köber, Gärtner et al., 2021).

5.1 Manöverplan und Ansteuerung des Fahrzeuges

In diesem Kapitel werden die Voraussetzungen geschaffen, um eine automatisierte Validierung der Schaltqualität auf ViL-Prüfständen zu ermöglichen. Dafür ist es zunächst notwendig, eine adäquate und konsistente Schnittstelle zum Prüfstand zu definieren. Diese Schnittstelle dient als Vorlage für die Entwicklung eines neuen Formates, welches dem Prüfstand alle relevanten Informationen des Manöverkatalogs zur Verfügung stellt. Im nächsten Schritt wird die Reihenfolge des resultierenden Manöverplans hinsichtlich des Zeitbedarfs optimiert. Abschließend wird eine geeignete Methode vorgestellt, mit welcher das Fahrzeug auf dem ViL-Prüfstand ohne Fahrroboter angesteuert werden kann.

5.1.1 Umsetzung eines Manöverplans als Voraussetzung für die automatisierte Validierung der Schaltqualität

Es wurde in Kap. 4 bereits dargestellt, wie ein globaler Manöverkatalog bezüglich seiner fahrbaren Schaltungen analysiert werden kann. Der daraus resultierende, finale Manöverkatalog dient somit, unabhängig von der Validierungsumgebung, als Vorlage für die manöverbasierte Validierung der Schaltqualität. Da der Manöverkatalog jedoch lediglich eine Sammlung aller zu validierenden Manöver darstellt, fehlen zwei wesentliche Aspekte, um eine direkte Umsetzung am Prüfstand zu ermöglichen. Einerseits fehlt eine Information über die Reihenfolge, in welcher die Manöver zu validieren und somit abzufahren sind. Dabei ist es zunächst irrelevant, ob die Reihenfolge chronologisch, optimiert oder randomisiert ist. Andererseits wurde bereits erläutert, dass viele Informationen des Manöverkatalogs auf implizitem Wissen beruhen (siehe Kap. 4.1). Dieses implizite Wissen muss in explizite Vorgaben überführt werden, um eine Ansteuerung der Fahrzeuge auf ViL-Prüfständen sicherzustellen.

Um sich dieser Problemstellung zu nähern, ist es zunächst zielführend, eine geeignete Schnittstelle für die Validierung am Prüfstand zu definieren. Diese Schnittstelle muss so ausgelegt sein, dass sie alle relevanten Informationen bezüglich der Manövervorgaben einlesen und verarbeiten kann. Darüber hinaus ist es notwendig, diese Informationen in entsprechende Signale zur Ansteuerung des Fahrzeuges umzusetzen. Prädestiniert für diese Anforderungen ist die Prüfstandssteuerung als zentrales Steuer- und Kontrollzentrum. Typische, im industriellen Umfeld weit verbreitete Tools zur Prüfstandssteuerung sind beispielsweise AVL Puma oder KS Tornado. Diese ermöglichen neben der Überwachung und Ansteuerung des Prüfstandes auch eine effiziente Automatisierung der Validierung. So können definierte

Manöver vorgegeben werden, welche durch die Prüfstandssteuerung anschließend automatisiert in einer definierten Reihenfolge abgefahren werden. Demnach gilt es bei der Schnittstellenbeschreibung zunächst die relevanten Ein- und Ausgänge der Prüfstandssteuerung zu definieren. Diese ergeben sich anhand der Analyse aller bisher vorgestellten Manöver zur Validierung der Schaltqualität (siehe Kap 4.1). Es ist ersichtlich, dass alle Manöver stets mit expliziten Vorgaben (z.B. Fahrpedalwert, Startgang, Modus) definiert sind, welche so lange beibehalten werden, bis ein definiertes Kriterium erfüllt ist. So wird beispielsweise bei einer ZHS in D das Fahrpedal so lange konstant gehalten, bis der geforderte Zielgang erreicht oder das Time-out überschritten wird. Bei einer ZRS in D wird wiederum erst der Fahrpedalsprung initiiert, wenn eine definierte Zieldrehzahl erreicht ist. Dieses zu erreichende Kriterium wird im weiteren Verlauf der Arbeit als Fortschaltkriterium (FSK) beschrieben. Unter Berücksichtigung dieser Informationen leiten sich alle relevanten Ein- und Ausgänge für die Schnittstellenbeschreibung ab. In Richtung des Fahrzeuges (Ausgang der Schnittstelle) werden alle Vorgaben der Manöver benötigt, beispielsweise Fahrpedal oder Startgang. Vom Fahrzeug in Richtung Schnittstelle (Eingang der Schnittstelle) werden alle Signale benötigt, die als FSK fungieren. Da die Schnittstelle sowohl die Informationen des Fahrzeuges als auch die dazugehörigen, expliziten Vorgaben je Manöver benötigt, müssen diese Informationen der Schnittstelle ebenfalls als Eingang zur Verfügung gestellt werden. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 5.1 dargestellt.

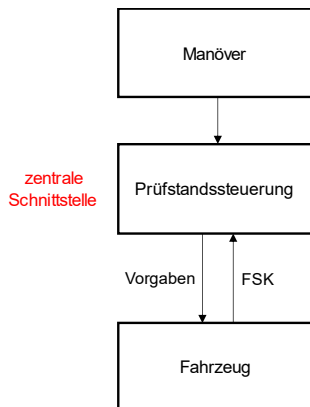


Abbildung 5.1: Definition der zentralen Schnittstelle zur manöverbasierten, automatisierten Validierung der Schaltqualität auf ViL-Prüfständen

Wie bereits dargestellt, kann der Manöverkatalog die geforderten Informationen jedoch nicht zur Verfügung stellen. Es bedarf einer Überführung des Manöverkatalogs, welcher lediglich die zu validierenden Manöver sammelt, in ein neues Format, welches definiert, wie und in welcher Reihenfolge die Manöver gefahren werden. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle ein sog. Manöverplan eingeführt, welcher die Reihenfolge der zu validierenden Manöver vorgibt. Die Reihenfolge der Manöver kann innerhalb eines Manöverplans variabel gewählt werden. Wie eine möglichst optimale Reihenfolge gewählt werden kann, wird in Kap. 5.1.2 erläutert. Wie die Manöver innerhalb des Manöverplans jedoch explizit angefahren werden sollen, wird gemäß des Ansatzes von Matros et al. (2015) mittels eines Manöverablaufs realisiert. Dazu wird das Manöver in einzelne Zwischenschritte zerlegt, welche nach Köber und Gärtner et al. (2021) am ehesten als „Sub-Manöver“ beschrieben werden können. Jedes Sub-Manöver wird mittels seines Vorgabe-Wertes (z.B. Fahrpedal oder Bremse) und seines zu erreichenden FSK definiert. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 5.2 dargestellt. Wie Matros et al. (2015) bereits im Rahmen ihres Fluss-Diagramms vorgeben, ist die Reihenfolge der Sub-Manöver innerhalb eines Manöverablaufs fix definiert. So wird sichergestellt, dass die Schaltungen stets korrekt angefahren werden. In welcher Reihenfolge die Manöver innerhalb des Manöverkatalogs jedoch zu validieren sind, wird, wie bereits erläutert, durch den Manöverplan festgelegt. Dieser Zusammenhang ist ebenfalls in Abbildung 5.2 ersichtlich.

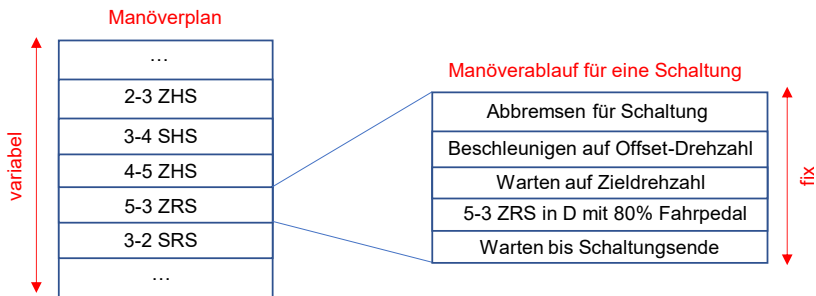


Abbildung 5.2: Struktur und Chronologie eines Manöverplans zur Validierung der Schaltqualität (Köber, Gärtner et al., 2021)

Folglich beschreibt der Manöverablauf lediglich den expliziten Ablauf eines einzelnen Manövers mit allen notwendigen Sub-Manövern und deren Reihenfolge, wohingegen der Manöverplan als übergeordnetes Format die Reihenfolge aller zu validierenden Manöver beschreibt. Die Gesamtheit aller gemeinsam validierter Manöver kann nach Pilorget (2012), wie bereits im Stand der Forschung beschrieben (siehe

Kap. 2.3.2), als eine Testkampagne bezeichnet werden. Mit diesem Verständnis definiert der Manöverplan die Reihenfolge aller zu validierenden Manöver innerhalb einer Testkampagne.

Im Folgenden soll zunächst dargestellt werden, wie die Manöverabläufe für die jeweiligen Manöver der Schaltqualität im Detail umgesetzt werden. Gemäß der initialen Schnittstellenbeschreibung müssen je Sub-Manöver stets Vorgaben zur Fahrzeugansteuerung sowie deren FSK definiert werden. Alle relevanten FSK und Vorgaben zur Fahrzeugansteuerung, welche zur Validierung der Schaltqualität benötigt werden, sind in Tabelle 5.1 gelistet.

Tabelle 5.1: Übersicht aller relevanten Vorgaben und Fortschaltkriterien zur Validierung der Schaltqualität auf Prüfständen

Vorgabe zur Fahrzeugansteuerung	Fortschaltkriterium (FSK)
Fahrpedal	Drehzahl
Bremse	Geschwindigkeitsobergrenze
Fahrstufe (P, N, D, R, M)	Geschwindigkeitsuntergrenze
Tippen	Zeit
Steigung	Schaltablauf
Fahrmodus	Gang

Je Sub-Manöver werden explizite Werte dem Fahrzeug vorgegeben und bis zum Ende des jeweiligen Sub-Manövers konstant gehalten. Dabei ist zu beachten, dass stets alle Vorgaben definiert werden müssen. Da die in der Tabelle 5.1 gelisteten Vorgaben zur Ansteuerung des Fahrzeuges eindeutig sind, bedarf es keiner weiteren Erläuterung diesbezüglich. Im Kontext der Fortschaltkriterien sind jedoch nähere Ausführungen notwendig. Wie bereits dargestellt, werden über FSK die Werte definiert, welche es für das jeweilige Sub-Manöver durch die Vorgaben zu erreichen gilt. Demnach definieren die FSK das Ende eines jeden Sub-Manövers. Daraus ergibt sich, dass für jedes Sub-Manöver auch nur genau ein FSK definiert werden kann (z.B. Gang oder Drehzahl). Bei den FSK handelt es sich um eine kontinuierliche, boolesche Abfrage der Prüfstandssteuerung (also der Schnittstelle) in Richtung des Fahrzeuges. In Tabelle 5.2 sind alle booleschen Abfragen der jeweiligen FSK im Detail beschrieben.

Basierend auf den Kenntnissen über FSK und der Vorgabe zur Fahrzeugansteuerung soll im Folgenden anhand eines beispielhaften Manövers der ZRS in D darge-

stellt werden, wie die einzelnen Sub-Manöver des Manöverablaufs definiert werden¹. Es wurde bereits in Kap. 4.1 erläutert, wie die Manöver der ZRS in D mittels Fahrversuchen gegenwärtig validiert werden. An dieser Vorgehensweise soll sich auch die Validierung am Prüfstand orientieren. An dieser Stelle gilt es anzumerken, dass die synthetischen Testfälle aus Kap.4.2 für den vorliegenden Kontext nicht verwendet werden sollen, da im Rahmen der Simulation mehrere Manöver (Schaltungen) zu einem synthetischen Testfall zusammengefasst wurden. Für Validierungen am Prüfstand wäre dies theoretisch ebenfalls möglich, würde jedoch dazu führen, dass die Reihenfolge des Manöverplans nicht mehr frei wählbar und somit optimierbar ist. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle jedes Manöver individuell mittels eines Manöverablaufs definiert

Tabelle 5.2: Boolesche Abfragen der Fortschalkriterien

Fortschaltkriterium	Boolesche Abfrage
Drehzahl	Erreichen einer Zieldrehzahl, wobei es zunächst irrelevant ist, ob dies aus einer Zug- oder Schubsituation geschieht
Geschwindigkeitsobergrenze	Unterschreiten einer maximalen Geschwindigkeit aus einer Schubsituation
Geschwindigkeitsuntergrenze	Überschreiten einer minimalen Geschwindigkeit aus einer Zugsituation
Zeit	Ablauf eines Timers
Schaltablauf	Identifikation des Schaltungsendes
Gang	Änderung des Gangsignals, wobei es zunächst irrelevant ist, ob der Gang sich erhöht oder verringert

Wie in Kap. 4.1 beschrieben, soll die ZRS in Folge eines Fahrpedalsprunges zu einer definierten Drehzahl erfolgen. Die Zieldrehzahl soll im ungebremsten Schub erreicht werden, weshalb zunächst auf eine Drehzahl (Offset-Drehzahl) oberhalb der Zieldrehzahl mit einem definierten Fahrpedalwert beschleunigt werden muss (siehe Tabelle 5.3 | SM-ID 2). Das FSK entspricht somit der Drehzahl in diesem Sub-Manöver und die primäre Vorgabe ist der Fahrpedalwert. Es muss an dieser Stelle erwähnt werden, dass in Tabelle 5.3 aus Gründen der Übersichtlichkeit lediglich die relevanten FSK und veränderlichen Vorgaben zur Fahrzeugansteuerung gelistet sind. Vorgaben wie Tippen oder Steigung sind das gesamte Manöver konstant 0 und werden deshalb in der Übersicht vernachlässigt. Zusätzlich ist in Tabelle 5.3

¹ Alle weiteren Manöverabläufe sind im Detail dem Anhang A zu entnehmen

eine sog. Sub-Manöver ID (SM-ID) gelistet. Diese ist zur eindeutigen Identifikation der Sub-Manöver notwendig und insbesondere bei der nachfolgenden Ergebnisauswertung von Relevanz.

Tabelle 5.3: Auszug eines Manöverablaufs einer beispielhaften 6-2 ZRS mit 80% Fahrpedal bei 1000 1/min in D [SM-ID = Sub-Manöver ID, FSK-ID = Fortschaltkriterium-ID] (Köber, Gärtner et al., 2021)

SM-ID	FSK-ID	Fortschaltkriterien			Vorgaben		Kommentar
		Drehzahl	Schaltablauf	Gang	Bremse	Fahrpedal	
1	Drehzahl	1000	-	6	50	0	Abbremsen für Schaltung
2	Drehzahl	1300	-	6	0	50	Beschleunigen auf Offset-Drehzahl
3	Drehzahl	1000	-	6	0	0	Warten auf Zieldrehzahl
4	Gang	-	-	6	0	80	6-2 in D 0% - 80% / 1000 1/min
5	Schaltablauf	-	0	2	0	80	Bis Schaltungsende

Um einen Schub-Zustand sicherzustellen, muss das Delta zwischen Ziel- und Offset-Drehzahl variabel einstellbar sein, da die Zeit, welche benötigt wird, um nach einer Fahrpedalreduktion von einem Zug- in den Schubzustand zu wechseln, stark fahrzeugabhängig ist. Sollte sich die Drehzahl des Fahrzeuges, aufgrund des vorgelagerten Manövers, bereits oberhalb der Offset-Drehzahl befinden, wird die geforderte Offset-Drehzahl durch eine Fahrpedalzugabe niemals überschritten (Fahrzeug beschleunigt weiter). Um diese Situation also abzufangen, muss zunächst auf eine definierte Drehzahl abgebremst werden (Tabelle 5.3 | SM-ID 1). Ist das Fahrzeug jedoch vor Betätigung der Bremse bereits unterhalb dieser geforderten Drehzahl, ist die Ablaufsteuerung so programmiert, dass das Sub-Manöver übersprungen und der Manöverablauf mit der Beschleunigung zur Offset-Drehzahl fortgesetzt wird (Tabelle 5.3 | SM-ID 2).

Nach dem eigentlichen Fahrpedalsprung (Tabelle 5.3 | SM-ID 4) und der daraus resultierenden Änderung des Gangsignals (entspricht FSK Gang), wird im letzten Sub-Manöver (Tabelle 5.3 | SM-ID 5) auf das Ende des Schaltablaufs gewartet. Typischerweise stellt das Getriebesteuergerät diese Information über die Bus-Architektur des Fahrzeuges zur Verfügung, weshalb dieser Status gemessen werden

kann und nicht separat ermittelt werden muss (Albers et al., 2021). In Abbildung 5.3 ist der resultierende Ablauf der beschriebenen ZRS in D dargestellt. Die jeweiligen Sub-Manöver sind dabei kenntlich gemacht und können der Chronologie aus Tabelle 5.3 zugeordnet werden.

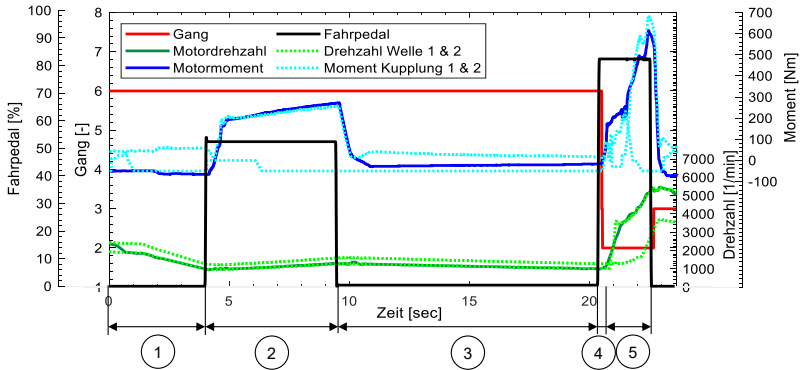


Abbildung 5.3: Resultierender Ablauf der Zug-Rückschaltung am ViL-Prüfstand gemäß des definierten Manöverablaufs [1: *Abbremsen für Schaltung*; 2: *Beschleunigung auf Offset-Drehzahl*; 3: *Warten auf Zieldrehzahl*; 4: *Zug-Rückschaltung mit 80% Fahrpedal*; 5: *Warten bis Schaltungsende*]

Im Sinne der angestrebten Effizienzsteigerung werden alle Manöver des Manöverkatalogs vollständig automatisiert eingelesen und unter Berücksichtigung der Nutzervorgaben in die beschriebenen Manöverabläufe transferiert. Die Nutzervorgaben entsprechen dabei den frei wählbaren, nicht explizit durch den Manöverkatalog definierten Vorgaben zur Ansteuerung des Fahrzeuges oder FSK. Dazu zählt im Kontext der ZRS in D beispielsweise, wie stark in SM-ID 1 auf welche Drehzahl gebremst wird oder mit welchem Fahrpedalwert auf welche Offset-Drehzahl in SM-ID 2 beschleunigt wird. Diese Nutzervorgaben ermöglichen dem Anwender in Abhängigkeit des zu validierenden Fahrzeuges Anpassungen an den Manöverabläufen vorzunehmen, ohne die zu validierende Schaltung zu beeinflussen.

Im nächsten Schritt ist es notwendig, alle zu validierenden Manöver inkl. ihrer Sub-Manöver in eine strukturierte Reihenfolge und somit in den finalen Manöverplan zu überführen. Welche Manöver es zu validieren gilt, ist im finalen Manöverkatalog basierend auf den synthetischen Testfallsimulationen (vgl. Kap. 4) hinterlegt. Dement-

sprechend ist der finale Manöverkatalog das Dokument, welches als Basis zur Generierung des Manöverplans fungiert. Es wurde bereits in Kapitel 4.3 dargestellt, dass eine effiziente und automatisierte Testkampagne nur möglich ist, wenn die expliziten Start- und Endbedingungen jedes Manövers bekannt sind. Dies wird durch die synthetischen Testfälle ebenfalls sichergestellt, da sowohl Start- als auch Zielgang identifiziert und im finalen Manöverkatalog hinterlegt werden. Um die Manöver in eine fahrbare Reihenfolge zu überführen, ist es zunächst ausreichend, dass der Zielgang des aktuellen Manövers dem Startgang des nachfolgenden Manövers entspricht. Da dies jedoch nicht immer sichergestellt werden kann, insbesondere wenn der Manöverkatalog chronologisch oder randomisiert abgefahren werden soll, muss der Algorithmus zur Erstellung des Manöverplans potenzielle Diskrepanzen zwischen den Start- und Zielgängen identifizieren. Gemäß des Ansatzes von Wurm (2015) ist es an dieser Stelle notwendig, dass der Algorithmus zusätzliche, für die Validierung jedoch nicht relevante Schaltungen in den Manöverplan einfügt. Diese Zwischenschaltungen (ZWS) sind von zentraler Bedeutung, um eine unterbrechungsfreie Testkampagne sicherzustellen.

Darüber hinaus muss durch den Manöverplan sichergestellt werden, dass die gesamte Testkampagne stets mit einem definierten Start- und Endzustand beginnt bzw. endet. Das Fahrzeug sollte zu Beginn der Testkampagne stehen, die Fahrstufe D eingelegt und die Bremse betätigt sein, damit Kriechen unterbunden wird. Am Ende der Testkampagne muss das Fahrzeug aus Gründen der Sicherheit ebenfalls stehen und P eingelegt sein. Unter Berücksichtigung dieser Aspekte stellt der Manöverplan sicher, dass die Validierung aller Manöver des Manöverkatalogs ohne Unterbrechung vollständig automatisiert am Prüfstand gefahren werden kann. Dabei enthält der Manöverplan, neben der Reihenfolge zur Validierung der Manöver und den definierten Start- und Endbedingungen, auch die Manöverabläufe aller Manöver. Infolge der vorangegangenen Schnittstellenbeschreibung ist es zunächst unerheblich, ob die Validierung im Rahmen von Simulationen, Powertrain- oder Gesamtfahrzeugprüfständen erfolgt, da der Manöverplan entsprechend flexibel und modular einsetzbar ist. Damit stellt der Manöverplan das zentrale Dokument zur automatisierten Validierung der Schaltqualität auf alternativen Validierungsumgebungen dar und ermöglicht eine durchgängige Validierung auf unterschiedlichen Ebenen im Sinne des IPEK-XiL-Ansatzes (Albers, Düser, Sander, Roth & Henning, 2010).

5.1.2 Generierung eines zeitoptimierten Manöverplans

Wie im vorherigen Kapitel dargestellt, ist der trivialste Ansatz zur Generierung eines fahrbaren Manöverplans, die Manöver aus dem Manöverkatalog chronologisch abzufahren und lediglich eine Durchgängigkeit der Start- und Zielgänge der Manöver

mittels ZWS sicherzustellen. Wie in Kap. 2.3.2 bereits beschrieben, weist dieser Ansatz signifikante Defizite in Bezug auf die benötigte Zeit und damit Effizienz auf. Darüber hinaus wird die Anzahl der gefahrenen Schaltungen infolge der Vielzahl an ZWS drastisch erhöht, was eine erhebliche Mehrbelastung der involvierten Bauteile darstellt. Wie Albers et al. (2012) und Wurm (2015) bereits zeigen konnten, kann infolge einer Reihenfolgenoptimierung bezüglich der Start- und Endgeschwindigkeiten der Manöver eine Reduktion der insgesamt benötigten Zeit der Testkampagne realisiert werden. Wie im Stand der Forschung jedoch kritisch diskutiert, ist es im Rahmen der Optimierung ebenfalls notwendig, Start- und Zielgang zu berücksichtigen. Entspricht der Zielgang des aktuellen Manövers dem Startgang des nachfolgenden Manövers, werden keine zusätzlichen ZWS benötigt, was in einer zusätzlichen Reduktion des Zeitbedarfs bei gleichzeitig geringerer Bauteilbelastung resultiert. Im Kontext der Bauteilbelastung und des Wärmeeintrages gilt es ebenfalls zu berücksichtigen, dass infolge der Optimierung die Anzahl der Schaltungen in einem betrachteten Zeitfenster deutlich zunimmt. Somit ist eine Reihenfolgenoptimierung in Abhängigkeit der Gänge, der Geschwindigkeit und der Bauteilbelastung bzw. des Wärmeeintrages anzustreben.

Wie bereits dargestellt, können Start- und Zielgänge der zu validierenden Manöver direkt aus dem finalen Manöverkatalog ausgelesen werden. Die Start-Geschwindigkeiten, bei welchen die Schaltungen in D initiiert werden, können aus dem jeweiligen Schaltkennfeld des Getriebe-Datenstandes ausgelesen werden. Folglich müssen, neben dem finalen Manöverkatalog, auch alle Schaltkennfelder dem Algorithmus zur Generierung des Manöverplans zur Verfügung gestellt werden. Da die aktuelle Geschwindigkeit bei Schaltungen, welche in Abhängigkeit einer definierten Drehzahl ausgelöst werden sollen, nicht direkt über ein Schaltkennfeld ausgelesen werden kann, muss die Drehzahl zunächst in eine Fahrzeuggeschwindigkeit umgerechnet werden. In Abhängigkeit des dynamischen Radhalbmessers r_{dyn} , der Motordrehzahl n_1 und der Gesamtübersetzung, welche sich aus der Gangübersetzung i_{Gx} und der Achsgetriebeübersetzung i_A zusammensetzt, lässt sich die Fahrzeuggeschwindigkeit zu Beginn der Schaltung v_{start} nach Köber und Gärtner et al. (2021) wie folgt bestimmen:

$$v_{start} = \frac{2 \cdot r_{dyn} \cdot \pi \cdot n_{mot} \cdot 60}{i_{Gx} \cdot i_A \cdot 1000} \quad 5.1$$

Die Motordrehzahl n_{mot} in der Gleichung entspricht dabei der Drehzahl, bei welcher die Schaltung gemäß des Manöverkatalogs durch den Fahrer initiiert werden soll, beispielsweise durch manuelles Tippen. Da jede Schaltung in Abhängigkeit von Last und Schaltart unterschiedlich lang für den gesamten Schaltablauf benötigt, kann

eine exakte Geschwindigkeit nach Beendigung der Schaltung vorab nicht berechnet werden. Es wird zunächst jedoch vereinfachend davon ausgegangen, dass eine näherungsweise Aussage im vorliegenden Kontext hinreichend ist, da geringfügige Abweichungen der End-Geschwindigkeiten bei der Vielzahl an Schaltungen kaum relevant sind. Deshalb wurden für ein beispielhaftes Fahrzeug die mittleren End-Geschwindigkeiten nach diversen Zug- und Schubschaltungen im Verhältnis zur Start-Geschwindigkeit analysiert. Demnach kann als Schätzwert die End-Geschwindigkeit mit einem Faktor (ε_{Zug} bzw. ε_{Schub}) von 1,1 der Start-Geschwindigkeit bei Zugschaltungen und mit 0,98 bei Schub-Schaltungen gemäß Gl. 5.2 beschrieben werden. Es ist anzumerken, dass diese Werte für ein beispielhaftes Fahrzeug gelten und demnach in Abhängigkeit des Fahrzeuges, des Getriebes und der Motorisierung variieren können. Explizite statistische Untersuchungen können die Genauigkeit des Wertes weiter steigern. Basierend auf der bekannten Startgeschwindigkeit v_{start} lässt sich die näherungsweise Endgeschwindigkeit v_{end} somit unter Verwendung des Faktors ε_{Zug} bzw. ε_{Schub} wie folgt berechnen: (Köber, Gärtner et al., 2021)

$$v_{end} = v_{start} \cdot \varepsilon_{Zug/Schub} \quad 5.2$$

Damit sind alle relevanten Start- und Endbedingungen bekannt, um im nächsten Schritt die einzelnen Manöver in eine geeignete Reihenfolge zu überführen. Um sich dieser Problemstellung zu nähern, kann die Suche nach der optimalen Reihenfolge als Travel-Salesman-Problem abstrahiert werden. Diese Abstraktion wurde im vorliegenden Kontext bereits durch Albers et al. (2012) vorgestellt und soll an diesem Punkt aufgegriffen werden. Wie im Stand der Forschung bereits dargestellt, gibt es in der Literatur eine Vielzahl an möglichen Lösungsansätzen für dieses Optimierungsproblem, wobei grundsätzlich zwischen exakten oder heuristischen Ansätzen unterschieden wird. Da bereits die End-Geschwindigkeiten der Schaltungen lediglich auf Schätzungen beruhen, bedarf es keiner exakten Lösung für das vorliegende Problem. Darüber hinaus benötigen diese Ansätze unter Berücksichtigung der Anzahl der zu ordnenden Schaltungen deutlich zu viel Rechenaufwand. Wie Wurm (2015) im Rahmen seiner Arbeit zeigt (siehe Kap. 2.3.2), können mittels der simplen Nearest-Neighbor-Heuristik bereits sehr gute Ergebnisse erzielt werden. Aus diesem Grund soll die Nearest-Neighbor-Heuristik zur Lösung des Travel-Salesman-Problems herangezogen werden. Diese beruht auf der Annahme, dass ausgehend von einem festgelegten Startpunkt der nächstgelegene Punkt als folgender Punkt identifiziert wird. Diese Suche wird so lange fortgesetzt, bis alle Punkte abgefahren wurden. Grundsätzlich liefert die Nearest-Neighbor-Heuristik nicht die beste Lösung, da Start- und Endknoten nicht berücksichtigt werden und die Verbindung derer zu

einem Hamiltonischen-Kreis mit einer beliebig großen Distanz akzeptiert wird (Lawler et al., 1991). Dieser Nachteil erübrigt sich im vorliegenden Kontext jedoch, da eine Rückkehr zum Startpunkt nicht notwendig ist.

Da die Nearest-Neighbor-Heuristik sich mit der Optimierung eines zurückgelegten Weges in einem n -dimensionalen Raum auseinandersetzt, gilt es zunächst, die Entfernungen der einzelnen Manöver zueinander zu bestimmen. Bekanntermaßen lässt sich der zurückgelegte Weg s als eine Funktion der Geschwindigkeit v und Zeit t beschreiben:

$$s(t) = \int v(t)dt \quad 5.3$$

Unter Annahme einer konstanten Geschwindigkeit v im betrachteten Zeitabschnitt Δt resultiert daraus der zurückgelegte Weg s wie folgt:

$$s(t) = v \cdot \Delta t \quad 5.4$$

Es wurde bereits dargestellt, dass das Ziel der Optimierung darin liegt, die Geschwindigkeits- und Gangunterschiede zwischen den Manövern zu minimieren und somit den Zeitbedarf für die gesamte Testkampagne zu reduzieren. Unter Berücksichtigung von Gl. 5.4 kann ein virtueller, zu optimierender Weg s_{virt} zwischen den Manövern als Faktor des absoluten Deltas der Endgeschwindigkeit des aktuellen Manövers v_{end_n} und der Startgeschwindigkeit des nachfolgenden Manövers $v_{start_{n+1}}$ sowie des betrachteten Zeitabschnitts Δt nach Köber und Gärtner et al. (2021) wie folgt berechnet werden:

$$s_{virt}(t) = |v_{end_n} - v_{start_{n+1}}| \cdot \Delta t \quad 5.5$$

Dabei entspricht der virtuelle Weg s_{virt} nicht dem tatsächlich zurückgelegten Weg des Fahrzeuges am Prüfstand, sondern einem virtuellen Weg zwischen zwei aufeinanderfolgenden Manövern, den es zu minimieren gilt. Es wird demnach eine konstante Geschwindigkeitsdifferenz und keine Geschwindigkeitsänderung zur Berechnung des virtuellen Wegs herangezogen. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 5.4 symbolisch dargestellt.

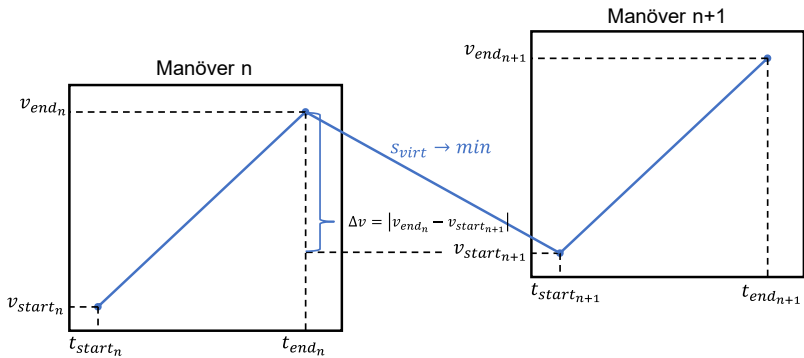


Abbildung 5.4: Bestimmung des virtuellen Weges im Rahmen der Nearest-Neighbor-Heuristik zur Lösung des Traveling-Salesman-Problems

Da eine exakte Beschreibung der benötigten Zeit nicht möglich ist, werden an dieser Stelle die benötigten ZWS als Zeitkonstante eingeführt. Somit wird, wie einleitend diskutiert, an dieser Stelle die Diskrepanz der Start- und Zielgänge im Rahmen der Optimierung berücksichtigt. Je größer das Delta des Zielganges des aktuellen Manövers G_{ziel_n} zum Startgang des folgenden Manövers $G_{start_{n+1}}$, desto mehr Zeit wird entsprechend für die notwendigen Hilfs-Schaltungen benötigt. Für die Dauer der Schaltabläufe wird eine frei wählbare Zeitkonstante θ_t eingeführt (siehe Gl. 5.6). Auf Basis des beispielhaft verwendeten Fahrzeuges wird diese als arithmetisches Mittel der Schaltdauer einer Vielzahl von Zug- und Schubschaltungen ermittelt und beträgt 0,6 s. Der Wert kann in Abhängigkeit des Fahrzeuges ebenfalls abweichen und ist somit nicht repräsentativ. (Köber, Gärtner et al., 2021)

$$\Delta t = (1 + |G_{ziel_n} - G_{start_{n+1}}|) \cdot \theta_t \quad 5.6$$

Die Addition mit 1 begründet sich darin, dass bei identischen Gängen der Faktor Δt nicht zu null wird und somit der Einfluss der Geschwindigkeitsänderung nicht vernachlässigt wird. Damit ergibt sich der virtuelle Weg zwischen den einzelnen Manövern zu

$$s_{virt}(t) = |v_{end_n} - v_{start_{n+1}}| \cdot (1 + |G_{ziel_n} - G_{start_{n+1}}|) \cdot \theta_t \quad 5.7$$

Basierend auf dieser Gleichung wird für jedes Manöver der virtuelle Abstand zu allen anderen Manövern berechnet und in einer entsprechenden Matrix abgelegt. Ausgehend von einem definierten Start-Manöver sucht die Nearest-Neighbor-Heuristik im Folgenden stets das Manöver mit dem geringsten Abstand, bis alle Manöver einmal abgefahren wurden. (Köber, Gärtner et al., 2021)

Wie im Stand der Forschung (siehe Kap. 2.3.2) und zu Beginn dieses Kapitels bereits kritisch angemerkt, wird in Folge der Optimierung die Anzahl der ausgeführten Schaltungen innerhalb eines betrachteten Zeitfensters deutlich steigen. Daraus resultiert, dass der Bauteilbelastung und insbesondere dem Wärmeeintrag im Rahmen der gesamten Testkampagne eine besondere Aufmerksamkeit zukommen muss. Um dieser potenziellen Problemstellung bereits frühzeitig zu begegnen, wird die Reihenfolgenoptimierung so ausgelegt, dass die Manöver mit den höchsten Geschwindigkeiten direkt zu Beginn gefahren werden und sich die durchschnittliche Geschwindigkeit über den weiteren Verlauf der Testkampagne sukzessive reduziert. Realisiert wird dieses Verhalten durch die Definition eines geeigneten Startmanövers für die Nearest-Neighbor-Heuristik, welches eine möglichst hohe Startgeschwindigkeit aufweist. Der so resultierende Geschwindigkeitsverlauf ist in Abbildung 5.5 dargestellt. Die punktuellen Einbrüche der Geschwindigkeit bei $t \approx 1200$ s sind auf die SRS in D und M zurückzuführen. Wie in Kap. 4.1 bereits dargestellt, werden diese als einzige Manöver chronologisch vom höchsten bis in den ersten Gang angefahren. Folglich wird im Rahmen dieser Manöver bis zum Stillstand abgebremst, was anhand des Geschwindigkeitsverlaufes zu erkennen ist. Neben dem Geschwindigkeitsverlauf sind in Abbildung 5.5 die resultierenden Temperaturverläufe des Motorkühlmittels, des Motoröls und der Getriebeöltemperatur abgebildet. Es ist ersichtlich, dass die Temperaturen lediglich zu Beginn bei sehr hohen Geschwindigkeiten etwas erhöht sind und sich anschließend nahezu konstant verhalten. Diese Erkenntnis bestätigt die beschriebene Herangehensweise.

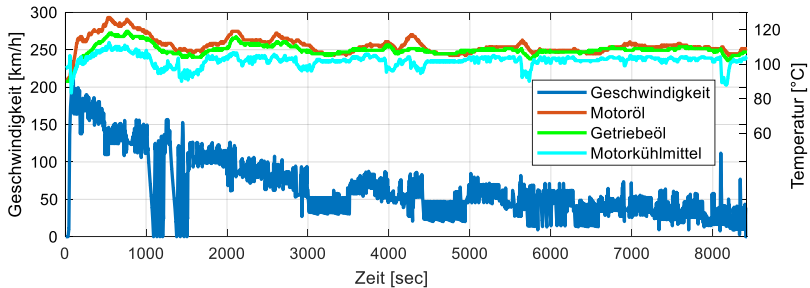


Abbildung 5.5: Geschwindigkeit- und Temperaturverläufe einer optimierten Testkampagne zur Validierung der Schaltqualität (Köber, Gärtner et al., 2021)

Infolge der Reihenfolgenoptimierung konnte die Anzahl der insgesamt gefahrenen Schaltungen inkl. ZWS um ca. 10% im Vergleich zu einer chronologischen Reihenfolge reduziert werden. Die Zeit zwischen den einzelnen Schaltungen wurde von durchschnittlich 5,22 s (chronologische Reihenfolge) auf 3,75 s (optimierte Reihenfolge) reduziert, was bei einer durchschnittlichen Anzahl an zu validierenden Schaltungen von 6500 in einer Zeitersparnis von mehr als 2,5 h bzw. 30% resultiert. (Köber, Gärtner et al., 2021)

5.1.3 Entwicklung eines geeigneten Ansatzes zur Ansteuerung des Fahrzeuges auf Gesamtfahrzeugprüfständen

Basierend auf den Ergebnissen des vorherigen Kapitels soll im Folgenden dargestellt werden, wie der Manöverplan über die beschriebene Schnittstelle als explizite Fahrzeugansteuerung umgesetzt werden kann. Im Kontext der hochdynamischen Validierung der Schaltqualität auf ViL-Prüfständen lässt sich feststellen, dass etablierte Ansätze zur Fahrzeug-Ansteuerung wesentliche Defizite aufweisen. So kann neben der fehlenden Reproduzierbarkeit davon ausgegangen werden, dass infolge der optimierten Reihenfolge der Schaltqualitätsvalidierung ein menschlicher Fahrer den hochdynamischen Anforderungen über einen längeren Zeitraum nicht mehr folgen kann. Fahrroboter sind zwar in der Lage, den Vorgaben zu folgen, erfordern jedoch einen sehr hohen Rüst- und Kalibrierungsaufwand. Insbesondere die stetige Nachkalibrierung führt dazu, dass die Validierung nicht vollständig reproduzier- und automatisierbar ist. Darüber hinaus sind konventionelle Fahrroboter oftmals lediglich dazu befähigt Basisanforderungen wie Fahr- oder Bremspedal zu betätigen. Komplexe Anforderungen wie ein Wechsel von D nach M oder getippte Schaltungen

über die Paddles, welche im Rahmen des beschriebenen Testablaufs unabdingbar sind, können lediglich mit erheblichem Zeit- und Kostenmehraufwand realisiert werden. Auf Basis dieser Situationsanalyse leitet sich der Bedarf nach einem alternativen Ansatz zur Fahrzeugansteuerung auf ViL-Prüfständen ab. Dafür soll der von Hasel et al. (2015) vorgestellte Ansatz, Signale in einem gegebenen Bussystem vor relevanten Steuergeräten zu verändern, aufgegriffen werden. Hasel et al. (2015) nutzen diesen Ansatz, um den Steuergeräten von Fahrzeugen auf ViL-Prüfständen eine Längsbeschleunigung zu emulieren. Im vorliegenden Kontext soll dieser Ansatz übertragen werden, so dass die relevanten Steuergeräte diese Signaländerung als eine durch den Fahrer initiierte Vorgabe interpretieren und entsprechende Aktionen daraus ableiten (beispielsweise Tip in den nächsthöheren Gang). Abweichend zum Ansatz von Hasel et al. (2015) soll dies jedoch in einer gegebenen FlexRay-Architektur umgesetzt werden.

Basierend auf den Kenntnissen über die vorliegende FlexRay-Architektur eines beispielhaft analysierten Fahrzeuges ist es notwendig, gezielt Signale innerhalb der Branches² zu manipulieren, an welchen die relevanten Steuergeräte verbaut sind. Um alle Vorgaben zur Fahrzeugansteuerung aus Tabelle 5.1 umsetzen zu können, ist es notwendig, Signale des Getriebe- und Motorsteuergerätes zu beeinflussen. Ein wesentlicher Unterschied des FlexRay-Bussystems im Vergleich zu konventionellen Bussystemen (z.B. CAN) liegt darin, dass die Kommunikation in festgelegten Zyklen erfolgt (Rausch, 2008). Aus diesem Grund ist ein triviales Auftrennen und beliebiges Routen oder Manipulieren der Signale des jeweiligen Branches nicht möglich. Um dies dennoch zu ermöglichen, bieten verschiedene Unternehmen hardware- bzw. softwarebasierte Lösungen an. Beispielhaft kann an dieser Stelle die Software-Lösung CANoe der Firma Vector oder Hardware-Lösung FlexDevice der Firma StarCooperation genannt werden. Mit diesen können synthetische Gateways erzeugt werden, welche die Signale unter Berücksichtigung der jeweiligen Zykluszeiten entweder routen oder manipulieren. Aufgrund der wesentlich geringeren Anschaffungskosten und der flexibleren Handhabung³ wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Hardware-Lösung der Firma StarCooperation präferiert. Die konkret verwendete FlexDevice-L muss lediglich einmal programmiert werden und kann im Anschluss dauerhaft im Fahrzeug verbleiben, ohne dass eine gesonderte

² Ausgehend vom Gateway als zentraler Knotenpunkt werden die weiteren Steuergeräte über sog. Branches an diesem angebunden. Somit besteht jeder Branch aus einer Verkettung von Steuergeräten, wobei sich die Leitung vom einen zum nächsten Teilnehmer zieht.

³ Es wird kein zusätzlicher Computer mit entsprechender Lizenz während des Testablaufs benötigt

Kommunikationsschnittstelle benötigt wird. Das bietet insbesondere Vorteile in Bezug auf die Fahrzeugvorbereitung und notwendige Rüstzeit am Prüfstand. In Abbildung 5.6 ist der prinzipielle Aufbau der Signalmanipulation innerhalb der gegebenen FlexRay-Architektur mittels einer FlexDevice-L dargestellt, wobei die physische Auftrennung der Branches rot markiert ist.

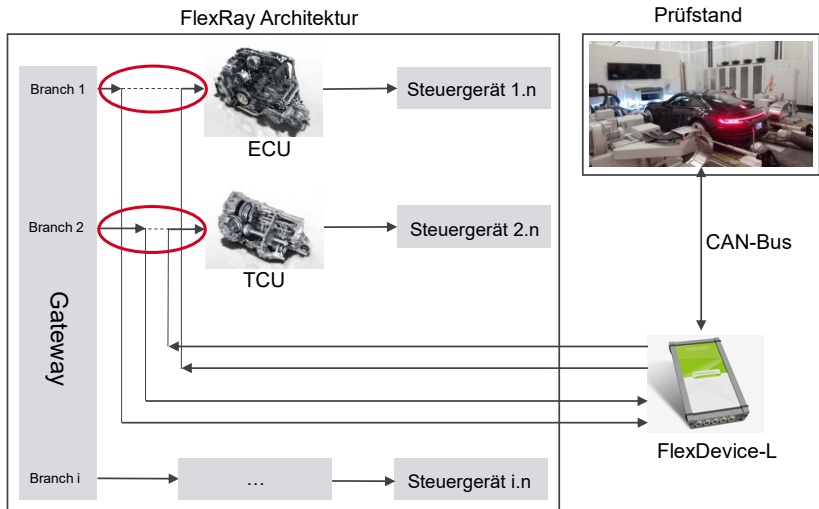


Abbildung 5.6: Grundlegender Aufbau der Signalmanipulation innerhalb einer gegebenen FlexRay-Architektur mittels einer FlexDevice-L der Firma StarCooperation als synthetisches Gateway (Köber, Gärtner et al., 2021)

Um die festgelegten Zykluszeiten des FlexRay-Netzwerkes auch bei hohen Buslasten und der damit verbundenen hohen Rechenleistung der FlexDevice-L nicht zu stören, ist es notwendig, innerhalb der FlexDevice-L eine Offset-Zeit zwischen Ein- und Ausgang zu definieren. Um die angestrebte Signalmanipulation sicherzustellen, werden die Signale, welche als Vorgabe zur Fahrzeugansteuerung benötigt werden, vom Routing zunächst ausgeschlossen. Auf diese Signale werden die Werte eines zweiten und unabhängigen Netzwerkes geroutet, welches als Schnittstelle zum Prüfstand fungiert. Dieser Zusammenhang ist ebenfalls in Abbildung 5.6 dargestellt. Aufgrund der geringen Anforderungen an die maximale Buslast und Übertragungsgeschwindigkeit sowie der simplen Handhabung wurde das zweite Netzwerk als CAN-Bus umgesetzt. Anzumerken ist an dieser Stelle, dass andere Bussysteme

ebenfalls verwendet werden können. Folglich werden über den Prüfstand mittels CAN-Bus alle Signale zur Vorgabe der Fahrzeugansteuerung gesendet, welche innerhalb der FlexDevice-L auf die entsprechenden FlexRay-Signale geroutet werden.

Bei der Vorgabe zur Fahrzeugansteuerung gibt es jedoch zwei Signale, welche aufgrund ihrer besonderen Anforderungen an Sicherheit und minimalen Latenz nicht direkt über das FlexRay-Bussystem manipuliert werden können. Diese Signale sind die Fahr- und Bremspedalvorgabe. So ist das Fahrpedal moderner Fahrzeuge typischerweise direkt mit dem Motorsteuergerät über einen Pedalwertgeber verbunden. Lange Zeit wurden als Pedalwertgeber zwei Potentiometer verwendet, welche die Gaspedalstellung in Form zweier gegenläufiger Spannungswerte an das Steuergerät übergeben. Die analogen Potentiometer werden jedoch zunehmend durch digitale Signale ersetzt, welche die Gaspedalstellung beispielsweise mittels des SENT-Protokolls⁴ an das Motorsteuergerät übergeben (SAE J2716_201604). Für die digitalen Schnittstellen gibt es auf dem Markt sog. Zweikanal-Umsetzer käuflich zu erwerben, welche ein vorgegebenes analoges oder CAN-Signal in ein SENT-Signal übersetzen. Als Beispiel kann an dieser Stelle der Dual Analog SENT Converter der Firma Amium angeführt werden. Mit Hilfe dieses Zweikanal-Umsetzers kann somit über die verfügbare Fahrpedalschnittstelle dem Motorsteuergerät ein beliebiger Wert innerhalb der definierten Grenzen vorgegeben werden, ohne dass das Fahrpedal physisch betätigt werden muss. Als physikalische Schnittstelle dient die Steckverbindung des Fahrpedals, welche als Konnektor zum Motorsteuergerät fungiert. Da eine Signal-Vorgabe über CAN-Bus ebenfalls möglich ist, kann der Zweikanal-Umsetzer direkt in die bestehende Infrastruktur zur Signalmanipulation eingebunden werden.

Bei der Vorgabe des Bremspedals wird ein anderer Lösungsansatz verfolgt. Es ist grundsätzlich möglich, dass aktive Bremsen des Fahrzeuges unter Zuhilfenahme von Fahrerassistenzsystemen auszulösen. So können beispielsweise Signale des Branches vom ACC-Steuergerät derartig manipuliert werden, dass das Steuergerät definierte Verzögerungen bis hin zur Notbremsung einleitet. Diese Vorgehensweise hat jedoch den Nachteil, dass das Getriebesteuergerät diese Verzögerung nicht als aktives Bremsen des Fahrers identifiziert und dementsprechend andere Schaltpunkte sowie -abläufe wählt (z.B. Bremsrückschaltungen). Darüber hinaus werden durch das ACC-Steuergerät initiale Bremsdrücke gewählt, welche zur Verzögerung

⁴ SENT (Single Edge Nibble Transmission) ist eine serielle Schnittstelle. In der SAE J2716_201604 wird die physikalische Schnittstelle und das Protokoll definiert. SENT wird vornehmlich für die Kommunikation von Sensoren in der Automobilbranche verwendet. (SAE J2716_201604)

des Gesamtfahrzeuges für eine geforderte Negativbeschleunigung erwartet werden. Da die Karosserie des Fahrzeuges aber auf dem ViL-Prüfstand nicht bewegt wird und somit lediglich der Antriebsstrang abgebremst werden muss, sind die zu überwindenden Trägheiten wesentlich geringer. Entsprechend hoch ist der initiale Bremsruck. Das ACC wird infolgedessen den Bremsdruck zwar reduzieren und auf die geforderte Negativbeschleunigung einregeln, der Ruck führt dennoch zu einem erheblichen Schlag im Antriebsstrang. Aus diesen Gründen wird von einem aktiven Bremsen des Fahrzeuges abgesehen und die angestrebte Verzögerung durch Einregeln der Fahrwiderstände über die E-Maschinen des Prüfstandes forciert. Infolge der sehr hohen Regelfrequenz der E-Maschinen kann die gewünschte Verzögerung sehr exakt eingeregelt und der Schlag im Antriebsstrang vermieden werden. Anhand der resultierenden, negativen Beschleunigung wird das Getriebesteuergerät jedoch kein aktives, durch den Fahrer initiiertes Bremsen erkennen, sondern davon ausgehen, dass das Fahrzeug infolge hoher Fahrwiderstände abbremst. Aus diesem Grund bedarf es einer zusätzlichen Signalmanipulation auf dem Branch des Getriebesteuergerätes. Die Information darüber, ob der Fahrer aktiv bremst und somit das Bremspedal betätigt, wird vom ESP-Steuergerät über den FlexRay-Bus zur Verfügung gestellt. Dieses Signal gilt es folglich zu manipulieren, um ein vergleichbares Verhalten des Getriebesteuergerätes zum Fahrversuch in Bremsmanövern sicherzustellen. Prominentes Beispiel sind die bereits beschriebenen Bremsrückhaltungen.

In der bisherigen Darstellung wurde von einer physischen Auftrennung des jeweiligen Branches im Rahmen der Signalmanipulation gesprochen. Es ist evident, dass die physische Auftrennung jedes einzelnen Branches vor den entsprechenden Steuergeräten einen signifikanten Mehraufwand in der Fahrzeugvorbereitung darstellt. Oftmals ist dies ohne professionelle Unterstützung eines Werkstattmitarbeiters nicht realisierbar. Darüber hinaus ist das Fahrzeug ab diesem Zeitpunkt nicht mehr fahrbereit, was das Rüsten am Prüfstand oder einen potenziellen Transport erheblich erschwert. Somit ist es notwendig eine handhabbarere und somit effizientere Lösung für die Auftrennung der Branches zu entwickeln. Unter Berücksichtigung des prinzipiellen Aufbaus typischer Gateway-Steuergeräte im automobilen Umfeld wird ersichtlich, dass alle Branches des FlexRay-Busses mittels individueller Pin-Zuweisung über einen gemeinsamen Stecker mit dem zentralen Gateway verbunden sind. Diese Steckverbindung kann für die angestrebte Signalmanipulation der einzelnen Branches genutzt werden. Dazu ist in Abhängigkeit des zentralen Gateways ein speziell angefertigtes Kabel nötig, welches zwischen der Gateway- und Branchesteckverbindung angebracht werden kann (siehe Abbildung 5.7). An dieser Stelle ist es notwendig anzumerken, dass für die Anfertigung eines solchen Kabels explizites Wissen über das Gateway und dessen Verpinnung an der Schnittstelle zu den Bran-

ches notwendig ist. Die Pins, auf welchen die Branches ohne angestrebte Signalmanipulation liegen, werden bei der Anfertigung des Kabels direkt verdrahtet. Die verbleibenden und somit für die Manipulation relevanten Pins werden ausgekoppelt und über eine separate Steckverbindung miteinander verbunden. Dafür bieten sich beispielsweise SUB-D Stecker als geläufige und weltweit eingesetzte Steckverbindungen im automobilen Umfeld an (DIN 41652-1:1990-06). Aufgrund ihrer Polarität⁵ bietet SUB-D zusätzlich den Vorteil, dass bei einer konsequenten und durchgängigen Verwendung eine eindeutige Zuordnung der Gateway- und Branch-Seite möglich ist.

Ist die SUB-D Steckverbindung geschlossen, werden alle Signale des Branches geroutet und das Fahrzeug ist gemäß des Ausgangszustandes voll funktionsfähig. Wird sie jedoch geöffnet, ist der Signalfluss unterbrochen und es kann die entsprechende FlexDevice-L zur Signalmanipulation eingebunden werden. Dieser einfach zu handhabende Plug & Play Ansatz stellt sicher, dass das Fahrzeug einerseits für den Transport ohne Einschränkungen rangiert und verladen werden kann und andererseits, dass der Rüstaufwand am Prüfstand aufgrund der unkomplizierten Verbindung der SUB-D Stecker mit der FlexDevice-L minimal wird. In Abhängigkeit der Position des Gateways im Fahrzeug wird für die initiale Integration des angefertigten Kabels möglicherweise ebenfalls professionelle Unterstützung benötigt. Dies ist jedoch nicht als Nachteil zu bewerten, da der Aufwand der Integration infolge des simplen An- und Absteckens am Gateway marginal ist. Darüber hinaus kann das Kabel während der gesamten Entwicklungs- und Validierungsphase im Fahrzeug verbleiben, da dieses, wie bereits erläutert, bei geschlossenen SUB-D Steckern weiterhin voll funktionsfähig ist. Das resultierende Kabel zur Auftrennung der Branches mit geschlossenen SUB-D Steckern ist in Abbildung 5.7 dargestellt.

⁵ Buchse und Stecker bzw. männlich und weiblich

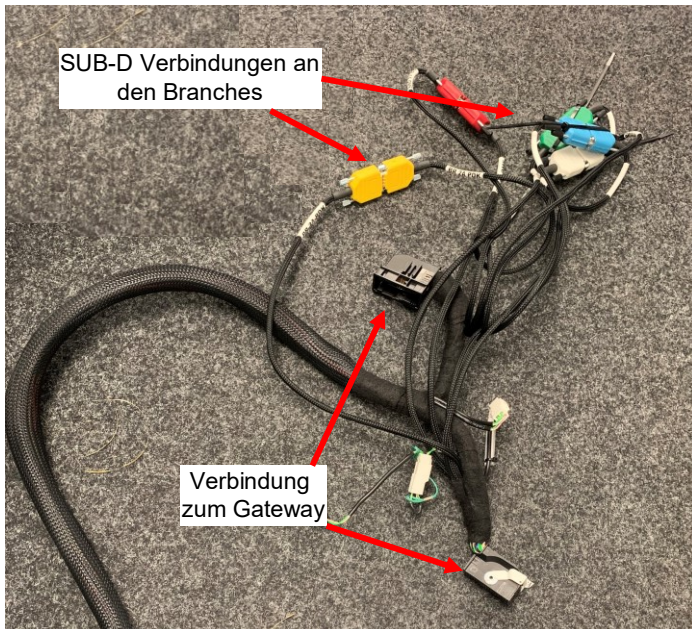


Abbildung 5.7: Kabel zur Auftrennung der FlexRay-Branches am Gateway mittels SUB-D Steckverbindern im geschlossenen Zustand

Folglich konnte ein neuer Ansatz zur Fahrzeugansteuerung entwickelt werden, welcher infolge der digitalen Signalvorgabe eine vollständige Reproduzierbarkeit bei minimaler Rüstzeit ermöglicht. Darüber hinaus können alle relevanten Vorgaben zur Validierung der Schaltqualität am ViL-Prüfstand (z.B. manuelles Tippen oder Fahrstufenwechsel) direkt umgesetzt werden, was mit konventionellen Ansätzen bisher lediglich unter erheblichem Mehraufwand möglich war. Damit werden die Effizienz der gesamten Methode erheblich gesteigert und eine vollständige Automatisierung des Testablaufs sichergestellt.

5.2 Abbildung der Schaltqualität auf Gesamtfahrzeugprüfständen

Im folgenden Kapitel wird mittels einer initialen Machbarkeitsstudie zunächst untersucht, ob objektive Aussagen zur Schaltqualität auf ViL-Prüfständen grundsätzlich

getroffen werden können. Basierend auf den Defiziten, welche im Rahmen der Machbarkeitsstudie identifiziert werden, werden im nächsten Schritt deren Ursachen untersucht. Abschließend werden daraus geeignete Handlungsmaßnahmen abgeleitet, um die Güte der Ergebnisse im Kontext der Schaltqualitätsvalidierung am ViL-Prüfstand zu erhöhen.

5.2.1 Machbarkeitsstudie zur Identifikation der Schaltqualität auf Gesamtfahrzeugprüfständen

Um zu untersuchen, ob eine objektive Aussage bezüglich der Schaltqualität auf ViL-Prüfständen getroffen werden kann, müssen die Ergebnisse von sowohl potenziell fehlerfreien Schaltabläufen als auch von reproduzierbar fehlerhaften Schaltabläufen mit den Ergebnissen des Fahrversuchs verglichen werden. Als potenziell fehlerfreie Schaltabläufe werden in diesem Kontext alle Schaltungen eines Datenstandes bezeichnet, mit denen das jeweilige Fahrzeug einer Produktgeneration am Markt vor Kunde ist. Reproduzierbar fehlerhafte Schaltungen müssen jedoch im Rahmen der Machbarkeitsstudie zunächst appliziert werden. Um einer Schaltung einen fehlerhaften Schaltablauf aufzuprägen, gibt es eine Vielzahl an Optionen, welche sich in Abhängigkeit der Schaltart unterscheiden. Demnach gilt es zu zunächst, beispielhafte und dennoch repräsentative Schaltungen für die Machbarkeitsstudie zu definieren. Als die geläufigsten und vom Fahrer am ehesten wahrgenommenen Schaltungen bieten sich ZHS für diese Untersuchungen an. Darüber hinaus bieten ZHS in D eine sehr hohe Reproduzierbarkeit aufgrund ihrer singulären Abhängigkeit vom Fahrpedalwert, was insbesondere im Rahmen der realen Fahrversuche als Validierungsumgebung von Relevanz ist. Beispielhaft werden folglich ZHS in D mit 50% Fahrpedal gewählt, wobei lediglich der Gangwechsel 3-4 negativ appliziert wird und alle anderen Schaltungen dem Seriendatenstand entsprechen.

Im Stand der Forschung wurde bereits beschrieben, dass Abweichungen vom idealen Momentenverlauf erheblichen Einfluss auf die resultierende Schaltqualität haben. Diese Abweichungen führen zu Unstetigkeiten im Beschleunigungsverlauf, was vom Fahrer als unangenehm empfunden wird. Da der Momentenverlauf in der Überschneidungsphase primär durch das Öffnen bzw. Schließen der Kupplungen beeinflusst wird, wird das Öffnungsverhalten der abschaltenden Kupplung variiert. Daraus resultiert, dass zu Beginn der Überschneidung ein abrupter Beschleunigungseinbruch ($t \approx 1,3$ s) auftritt. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 5.8 anhand einer Messung eines realen Fahrversuchs dargestellt.

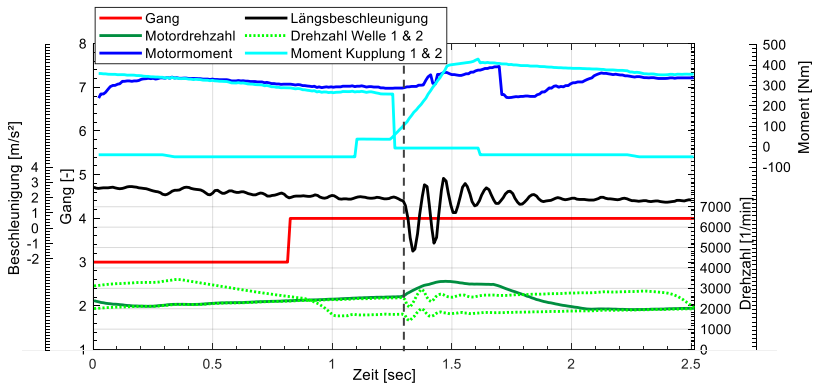


Abbildung 5.8: Resultierender Schaltablauf eines realen Fahrversuches bei einer 3-4 Zug-Hochschaltung in D mit 50% Fahrpedal infolge einer verlängerten Haltezeit am Ende der Überschneidung der Basiskupplung [vertikale, gestrichelte Linie markiert Beschleunigungseinbruch]

Basierend auf einem vorliegenden Serierendatenstand wird somit ein neuer Datenstand erzeugt, welcher sich lediglich bezüglich der 3-4 ZHS in D mit 50% Fahrpedal vom ursprünglichen Datenstand unterscheidet. Es werden im Anschluss ZHS in D mit 50% Fahrpedal sowohl am ViL-Prüfstand als auch auf dem Testgelände mehrfach gefahren und bezüglich Ihrer Ergebnisse miteinander verglichen. Wie bereits im Stand der Forschung beschrieben, ist AVL-Drive im automobilen Umfeld ein weit verbreitetes Tool und es konnte bereits in einigen Veröffentlichungen gezeigt werden, dass die objektive Bewertung der Schaltqualität sehr nah an den Ergebnissen der subjektiven Bewertung liegt (vgl. Chandrasekaran et al., 2017; Schöggel et al., 2001). Aus diesem Grund soll die Analyse der Schaltqualität im Rahmen der vorliegenden Arbeit mittels AVL-Drive erfolgen.

In Abbildung 5.9 sind die Mittelwerte der AVL-Drive Analyse der Schaltungen sowie die entsprechende Standardabweichung der Noten abgebildet. Im Rahmen der initialen Machbarkeitsstudie wurden alle Schaltungen jeweils fünfmal gefahren. Unter Berücksichtigung des Diagramms können zunächst drei Erkenntnisse festgehalten werden:

1. Signifikant fehlerhafte Schaltabläufe (ATZ<5) können identifiziert werden
2. Schaltungen des Fahrversuches werden durchgehend schlechter bewertet als am ViL-Prüfstand
3. Streuung der Noten ist am ViL-Prüfstand deutlich geringer

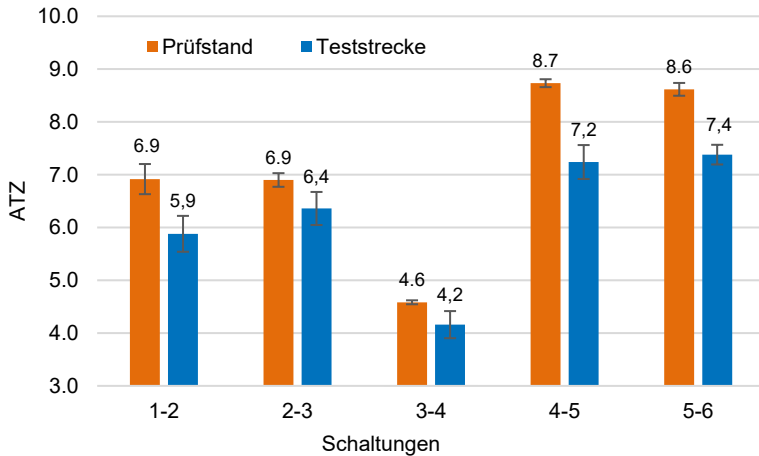


Abbildung 5.9: Vergleich der Zug-Hochschaltung in D mit Fahrpedal 50% und einer ungenügenden Applikation der 3-4 Schaltung

Um die Ursache der offensichtlichen Abweichungen in der Notengebung zu identifizieren, müssen die aufgezeichneten Messdaten der Versuche analysiert werden. Da AVL-Drive nur eine geringe Auswahl der zur Verfügung stehenden Messsignale für die Bewertung benötigt, ist es für die Analyse zunächst ausreichend, sich auf diese zu beschränken. Wie im Stand der Forschung (siehe Kap. 2.3.2) bereits dargestellt, kann die Hypothese aufgestellt werden, dass unter allen von AVL-Drive berücksichtigten Signalen die Längsbeschleunigung die relevanteste Bewertungsgrundlage ist. Diese Erkenntnis ist insbesondere von Relevanz, da die Längsbeschleunigung, im Vergleich zu allen anderen für AVL-Drive relevanten Signalen, keine direkt messbare Größe am Prüfstand ist, sondern mittels zusätzlicher Messgrößen berechnet werden muss (siehe Kap. 2.3.1.2). Dementsprechend sind in Abbildung 5.10 die resultierenden Verläufe der Längsbeschleunigung vom ViL-Prüfstand und Fahrversuch infolge einer negativen 3-4 ZHS in D im Zeit- und Frequenzbereich dargestellt.

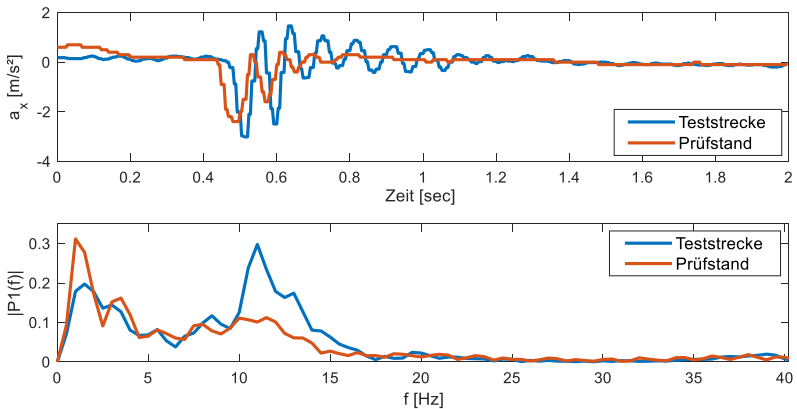


Abbildung 5.10: Vergleich der Längsbeschleunigungen in Abhängigkeit der Zeit (oben) und Frequenz (unten) infolge einer negativ applizierten 3-4 Zug-Hochschaltung in D (in Anlehnung an Albers et al., 2021)

Unter Berücksichtigung der zeitabhängigen Beschleunigungsverläufe ist ersichtlich, dass es fundamentale Unterschiede zwischen der berechneten Beschleunigung des Prüfstandes und der gemessenen Beschleunigung des Fahrversuches gibt. Zum einen sind die resultierenden Amplituden am Prüfstand wesentlich geringer als beim realen Fahrversuch. Zum anderen weist der Verlauf der Prüfstandsmessung ein wesentlich höheres Dämpfungsmaß auf, weshalb die Schwingung deutlich schneller abklingt. Dieses Verhalten deckt sich mit den Untersuchungen von Bauer et al. (2017) (vgl. Kap. 2.3.1.2), in denen er die nicht hinreichend genaue Abbildung der Längsbeschleunigung insbesondere in instationären Zuständen am ViL-Prüfstand thematisiert. Da Gangwechsel stets als instationäre Zustände beschrieben werden können, ist ein Vergleich mit den Ergebnissen von Bauer et al. (2017) plausibel. Nach Überführung der Beschleunigungsverläufe in den Frequenzbereich ist in Abbildung 5.10 zu erkennen, dass die Frequenzen im Bereich von 10-13 Hz am Prüfstand nicht abgebildet werden. Dieser Frequenzbereich entspricht der Eigenfrequenz des Fahrzeugaufbaus des beispielhaft gewählten Fahrzeuges im Rahmen der Machbarkeitsstudie. Da aktuelle Fahrzeuge typischerweise die integrierten Beschleunigungssensoren in Höhe ihres Schwerpunktes angebracht haben, stellen die Messungen der Längsbeschleunigung des Fahrversuches das resultierende Schwingverhalten des Aufbaus dar. Diese Information lässt den Rückschluss zu, dass das Übertragungsverhalten der antriebsstranginduzierten Schwingungen auf den Aufbau im aktuellen Modell des Prüfstandes nicht hinreichend genau abgebildet

wird. Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Machbarkeitsstudie leiten sich zwei zentrale Hypothesen ab, welche es im weiteren Verlauf des Kapitels zu untersuchen gilt:

1. Wenn die berechnete Längsbeschleunigung am ViL-Prüfstand vergleichbare Verläufe zum Fahrversuch aufweist, können vergleichbare Ergebnisse der Schaltqualität mittels AVL-Drive erzielt werden.
2. Es kann eine realistischere Längsbeschleunigung in instationären Situationen am ViL-Prüfständen bestimmt werden, wenn das Übertragungsverhalten der antriebsstranginduzierten Schwingungen auf den Aufbau hinreichend genau abgebildet wird.

5.2.2 Entwicklung eines geeigneten Modells zur exakteren Berechnung der Längsbeschleunigung in instationären Zuständen

Wie im vorherigen Kapitel dargestellt, kann der gegenwärtige Ansatz zur Berechnung der Längsbeschleunigung am ViL-Prüfstand nicht genutzt werden, um die objektive Schaltqualität hinreichend genau zu bestimmen. Im Stand der Forschung (siehe 2.3.1.2) wurde die Berechnung der Längsbeschleunigung am vorliegenden Prüfstandskonzept bereits erläutert. Das der Berechnung zugrundeliegende Fahrzeugmodell entspricht dabei einem trivialen Ein-Massenschwinger. Auch wenn Bauer et al. (2017, S. 4) die Ursachen des beschriebenen „smoother“ Beschleunigungsverhaltens nicht genau spezifizieren, entwickeln sie dennoch einen ersten Lösungsansatz, um diesem Problem zu begegnen. Mittels einer physischen Anregung der Antriebsachsen und den entsprechenden, resultierenden Schwingungen des Aufbaus wird versucht, das beschriebene Übertragungsverhalten nachzubilden. Basierend auf den Nachteilen dieses Ansatzes, welche bereits im Stand der Forschung umfangreich diskutiert wurden, kann dieser Ansatz jedoch im Rahmen dieser Arbeit als nicht praktikabel deklariert werden. Bauer et al. (2017) deuten bereits an, dass ein alternativer Lösungsansatz ein Mehrmassenmodell darstellen kann. Da für die Umsetzung und Parametrierung des Modells aber explizites Wissen über die Gesamtfahrzeugeigenschaften benötigt wird, welches üblicherweise lediglich beim OEM vorhanden ist, wurde dieser Ansatz in deren Arbeit nicht weiterverfolgt. In der Forschungsumgebung der vorliegenden Arbeit sind diese Aspekte jedoch hinfällig, da die Arbeit im Rahmen einer Forschungs Kooperation mit der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG entstanden ist. Darüber hinaus bietet der Lösungsansatz eines Mehrmassenmodells fundamentale Vorteile im Vergleich zum Ansatz der physischen Anregung von Bauer et. al. So bedarf es, bei entsprechender Vorbereitung und Validierung des Modells, keinerlei zusätzlicher Rüstzeit am Prüfstand, was im Sinne der angestrebten Effizienzsteigerung eine erhebliche Relevanz hat. Darüber hinaus

kann eine Modell-Lösung im Sinne der Forderung nach einer durchgängigen Validierung gemäß des IPEK-XiL-Ansatzes auch auf anderen Validierungsumgebungen wie z.B. Antriebsstrangprüfständen genutzt werden.

Basierend auf den genannten Vorteilen sowie der Verfügbarkeit von notwendigen Informationen wird die Umsetzung eines Mehrmassenmodells als die geeignetste Lösung im Rahmen der vorliegenden Arbeit deklariert. Um sich der Fragestellung der Modellumsetzung zu nähern, muss zunächst analysiert werden, welche unabhängigen, schwingfähigen Massen im relevanten System existieren. In Abbildung 5.11 ist aus diesem Grund beispielhaft der Antriebsstrang eines Porsche Panamera dargestellt. Es ist evident, dass infolge der Komplexität eines Antriebsstranges die Wahl der berücksichtigten Massen mit beliebiger Genauigkeit erfolgen kann. Um eine hinreichende Genauigkeit des Übertragungsverhaltens bei vertretbarer Modellkomplexität zu gewährleisten, werden zunächst lediglich die primären, schwingfähigen Massen des Antriebsstranges berücksichtigt. Anhand von Abbildung 5.11 ist zunächst ersichtlich, dass sowohl der Motor, das Getriebe als auch die Achsen relevante Massen des Antriebsstranges darstellen.

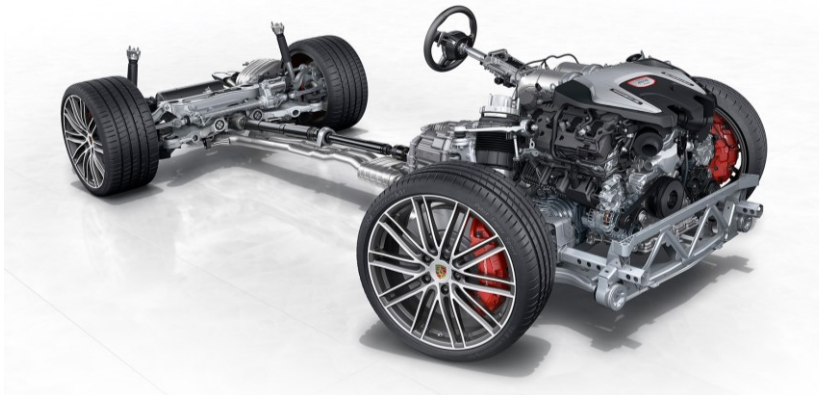


Abbildung 5.11: Antriebsstrang eines Porsche Panamera (Porsche AG, 2016)

Neben der eigentlichen Achsmasse müssen zusätzlich noch die Massen des Fahrschemels (beispielsweise auch eine Hinterachslenkung), des Achsdifferentials und der Räder inklusive der Bremsanlage berücksichtigt werden. Diese Massen sind entweder direkt über die Fahrschemellager oder indirekt über die Achsen am Fahrschemmel und somit ebenfalls über die Fahrschemellager an der Karosserie angebunden. Aus Gründen der Komplexitätsreduktion sollen diese Massen mit der Achsmasse zu einer Masse zusammengefasst werden. Gleiches gilt für Motor und

Getriebe, welche zusammen über die Motorlager an der Karosserie angebunden sind. Somit ist es praktikabel, Motor und Getriebe ebenfalls als eine gemeinsame Masse für das Modell anzunehmen, welche im Folgenden als Aggregatmasse bezeichnet wird. Da das Übertragungsverhalten der Anregungen des Antriebsstranges auf die Karosserie abgebildet werden soll, ist die Karosserie konsequenterweise als zusätzliche, schwingfähige Masse zu berücksichtigen. Folglich resultieren zunächst drei schwingfähige Massen⁶, welche in dem Modell berücksichtigt werden und über die beschriebenen Lager miteinander verbunden sind (siehe Abbildung 5.12). Die Parametrierung der Lager bezüglich ihrer Feder- und Dämpfungseigenschaften erfolgt in Abhängigkeit des zu validierenden Fahrzeuges. Dabei muss, neben der Produktgeneration einer bestimmten Produktlinie, auch die vorliegende Motor- und Getriebekombination berücksichtigt werden, da in Abhängigkeit derer unterschiedliche Lager verbaut werden. Da moderne Motor- als auch Fahrschemellager nicht mehr als konventionelle Elastomerlager, sondern typischerweise als Hydrolager umgesetzt werden, sind deren resultierende Eigenschaften frequenz- und amplitudenabhängig. Demnach müssten für eine exakte Modellparametrierung die entsprechenden Kennlinien der Lager in dem Modell hinterlegt werden. Aus Komplexitätsgründen soll jedoch zunächst darauf verzichtet werden. Es wird angenommen, dass bei einer näherungsweisen Wahl von konstanten Parametern bereits hinreichend genaue Ergebnisse erzielt werden können, zumal die Wahl der Massen bereits eine Vereinfachung darstellt.

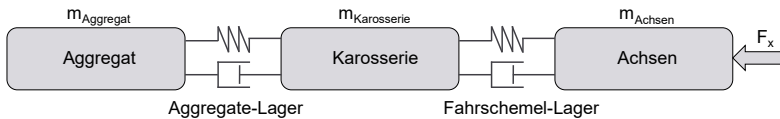


Abbildung 5.12: Modell eines Drei-Massenschwingers zur Abbildung des Übertragungsverhaltens antriebsstranginduzierter Schwingungen auf die Karosserie [Anregung F_x ergibt sich aus der berechneten Längskraft des Reifenmodells] (Albers et al., 2021)

Im nächsten Schritt gilt es, das Modell bezüglich der resultierenden Schwingungen adäquat anzuregen. Wie bereits diskutiert, ist die Ursache der antriebsstranginduzierten Schwingung im vorliegenden Kontext der Schaltablauf und somit das Ge-

⁶ Aggregate, Achsen, Karosserie

triebe. Die aus den Drehungleichförmigkeiten der Getriebeausgangswelle resultierende Anregung des Antriebsstranges kann jedoch nur mit erheblichem Mehraufwand gemessen werden. Das Abtriebsmoment kann jedoch über die Dynos des Prüfstands hochauflösend und ohne Mehraufwand direkt gemessen werden. Unter Berücksichtigung des Reziprozitätsprinzips, welches besagt, dass der Ort der Anregung mit dem Ort der Antwort vertauscht werden kann, kann die Anregung anstelle der Aggregate auch über die Achsen erfolgen (siehe Abbildung 5.12) (Möser & Kropp, 2010). Die Anregung entspricht dabei dem gemessenen Abtriebsmoment der Räder, welches mittels eines geeigneten Reifenmodells in eine Längskraft F_x umgerechnet wird. Dieser Ansatz entspricht der Vorgehensweise des bisher verwendeten Modells und wurde bereits im Stand der Forschung dargestellt (siehe Kap. 2.3.1.2). Als Reifenmodell wird ebenfalls die Magic Formula von Pacejka (2007) als etabliertes Reifen-Modell verwendet.

Das resultierende Modell des Drei-Massenschwingers wurde als MATLAB SimuLink Modell umgesetzt, woraufhin die berechnete Beschleunigung der Karosserie direkt ausgegeben werden kann. Dadurch wird ein hoher Freiheitsgrad garantiert, da die Längsbeschleunigung sowohl am Prüfstand direkt durch Integration des Modells mitgemessen als auch im Postprocessing mit angepassten Modellparametern berechnet werden kann.

In Abbildung 5.13 ist der resultierende Verlauf der Längsbeschleunigung des neuen Modells in Folge der beschriebenen, negativen 3-4 ZHS in D dargestellt. Um die erzielten Ergebnisse besser einordnen zu können, sind zusätzlich der Verlauf der gemessenen Längsbeschleunigung aus dem Fahrversuch und der Verlauf des bisherigen Modells des Ein-Massenschwingers abgebildet. Unter Berücksichtigung der Amplituden und des Dämpfungsverhaltens wird ersichtlich, dass das neue Modell das reale Fahrverhalten wesentlich besser abbilden kann als das Modell des Ein-Massenschwingers. Aufgrund der weiterhin starken Vereinfachung des Modells und der grundsätzlichen Streuung des Schaltablaufes kann ein identischer Kurvenverlauf nicht vollständig realisiert werden. Dies entspricht jedoch auch nicht der Zielstellung der Modellbildung, da eine weitere Steigerung der Abbildungsgüte eine unverhältnismäßige Komplexitätssteigerung bedeuten würde.

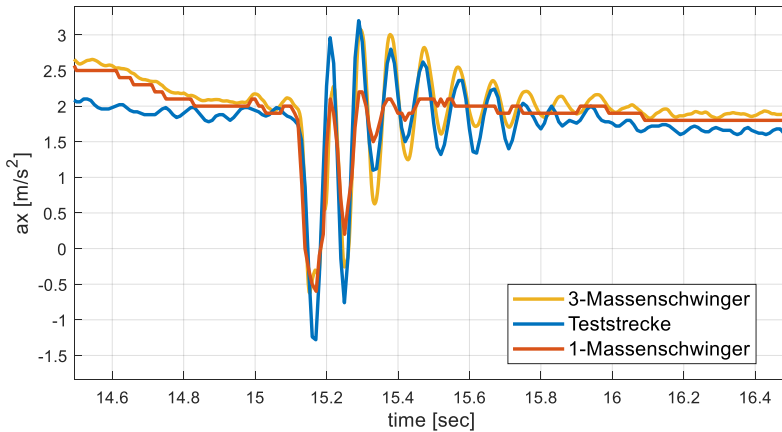


Abbildung 5.13: Verlauf der berechneten Längsbeschleunigung infolge einer negativen 3-4 Zug-Hochschaltung in D basierend auf dem Modell eines Drei-Massenschwingers im Vergleich zum Verlauf des konventionellen Modells sowie des Fahrversuchs (Albers et al., 2021)

Mit der Entwicklung des Drei-Massenschwingermodells zur exakteren Abbildung des Übertragungsverhaltens der antriebsstranginduzierten Schwingungen auf die Karosserie konnte gezeigt werden, dass eine realistischere Längsbeschleunigung am Prüfstand in instationären Zuständen berechnet werden kann. Hypothese 2 aus Kapitel 5.2.1 kann somit als bestätigt angesehen werden.

5.3 Validierung und Identifikation von Grenzen

Nachdem im vorherigen Kapitel gezeigt werden konnte, dass die Abbildungsgüte der Längsbeschleunigung signifikant verbessert werden kann, soll im nächsten Schritt untersucht werden, wie sich dies auf die objektive Bewertung der Schaltqualität mittels AVL-Drive auswirkt. Dazu werden beispielhaft Schaltungen aller Schaltarten am ViL-Prüfstand sowie Fahrversuch auf abgesperrten Teststrecken gefahren und bezüglich der resultierenden AVL-Drive Noten verglichen. Basierend auf den daraus abgeleiteten Erkenntnissen werden in Abhängigkeit der Schaltart Konfidenzintervalle definiert und Grenzen der Methode aufgezeigt. Um eine direkte Vergleichbarkeit der Ergebnisse zwischen Fahrversuch und Prüfstand zu erzielen, ist

es notwendig, die Messungen des Fahrversuchs um potentielle Störfaktoren zu reduzieren. Ein wesentlicher Störfaktor sind die eingebrachten Frequenzanteile durch die Straßenanregung, da diese maßgeblichen Einfluss auf die Bewertung der Schaltqualität mittels AVL-Drive haben können. Um die gemessene Längsbeschleunigung um diese Frequenzanteile zu reduzieren und somit bei der Bewertung zu vernachlässigen, bietet AVL-Drive einen sog. „Road Interference Compensation Filter“ (AVL List GmbH, 2020). Dieser Filter entspricht einem adaptiven Bandpassfilter. Mittels separater Beschleunigungsaufnehmer an den Radaufhängungen werden die vertikalen Anregungen der Straße aufgezeichnet und bei Überschreiten eines frei wählbaren Grenzwertes im Frequenzbereich vom originalen Längsbeschleunigungssignal des Fahrzeuges eliminiert. Die gefilterte Längsbeschleunigung wird letztendlich zur Berechnung der Schaltqualität der realen Fahrversuche mittels AVL-Drive herangezogen. (AVL List GmbH, 2020)

Alle Schaltungen wurden im Rahmen der Validierungsmessungen unter konstanten Rahmenbedingungen fünfmal angefahren, um potentielle Ausreißer zu identifizieren und zusätzlich eine Aussage bezüglich der Streuung der Schaltungen treffen zu können. Die resultierenden Schaltqualitätsbewertungen der gefilterten Längsbeschleunigung des Fahrversuches sowie die berechneten Längsbeschleunigungen der Prüfstandsmessungen mittels Ein- und Drei-Massenschwinger diverser Zug-Hochschaltungen in D sind in Abbildung 5.14 dargestellt. Zunächst ist ersichtlich, dass die Bewertungen der Schaltungen mittels Drei-Massenschwinger und Fahrversuch eine vergleichbare Standardabweichung aufweisen. Es kann somit davon ausgegangen werden, dass die Messungen des Fahrversuchs keinen zusätzlichen Störfaktoren unterliegen. Zusätzlich lässt sich daraus ableiten, dass auch unter reproduzierbaren Bedingungen die Schaltungen eine relevante Streuung hinsichtlich ihres Schaltablaufs aufweisen. Eine singuläre Validierung der Schaltqualität ist folglich nicht ausreichend und gilt es im Rahmen des PEP zukünftiger Produktgenerationen zu berücksichtigen.

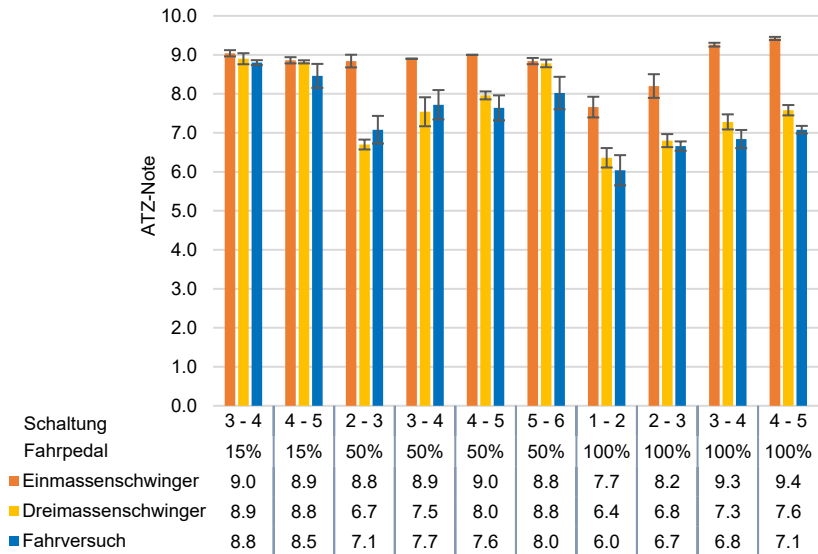


Abbildung 5.14: Vergleich der Schaltqualitätsbewertungen diverser Zug-Hochschaltungen in D mittels AVL-Drive inkl. deren Standardabweichung von fünf Messreihen (in Anlehnung an Albers et al., 2021)

Darüber hinaus lässt sich zunächst konstatieren, dass der entwickelte Ansatz des Drei-Massenschwingers einen signifikanten Einfluss auf die Bewertung mittels AVL-Drive hat. Die dadurch erzielten Noten sind unter Berücksichtigung der Standardabweichung direkt vergleichbar mit den Ergebnissen des realen Fahrversuchs, womit Hypothese 1 aus Kap. 5.2.1 als bestätigt angesehen werden kann. Der Einfluss des Drei-Massenschwingers auf die Noten ist jedoch nicht konstant. Es ist ersichtlich, dass sehr gute Schaltabläufe zu einem geringen Einfluss des Drei-Massenschwingers führen (z.B. 3-4 mit 15% Fahrpedal), wohingegen schlechtere Schaltabläufe (z.B. 2-3 mit 50% Fahrpedal) in einem wesentlich größeren Einfluss resultieren. Dieses Phänomen ist mit der zunehmenden Unstetigkeit der Längsbeschleunigung bei abnehmender Schaltqualität zu begründen. Je besser die Schaltung appliziert ist, desto weniger Unstetigkeiten resultieren in der Längsbeschleunigung. Somit wird auch die Längsbeschleunigung basierend auf dem Modell des Drei-Massenschwingers kaum Schwingungen aufweisen. Die Schaltungen nähern sich folglich einem stationären Zustand an, bei welchem auch das Modell des Ein-Massenschwingers

bereits hinreichend genaue Ergebnisse liefert. Nimmt die Schaltqualität jedoch ab, nehmen die antriebsstranginduzierten Anregungen und damit der Einfluss des Drei-Massenschwingers auf die berechnete Längsbeschleunigung und die daraus resultierende AVL-Drive Bewertung zu. Unterschreitet die Schaltqualität jedoch einen unbestimmten Grenzwert, dann ist die Schaltung und die damit verbundene Längsbeschleunigung des Ein-Massenschwingers bereits so schlecht bewertet, dass die Unterschiede zur exakteren Berechnung der Längsbeschleunigung des Drei-Massenschwingers bei der AVL-Drive Bewertung kaum mehr Einfluss haben. Dieses Phänomen ist in der Machbarkeitsstudie aus Kap. 5.2.1 und der besonders schlecht applizierten Schaltung ersichtlich.

Nachdem anhand der ZHS gezeigt wurde, dass das Modell des Drei-Massenschwingers es ermöglicht, vergleichbare Ergebnisse der Schaltqualitätsbewertung zum Fahrversuch zu erzielen, bedarf es im nächsten Schritt einer Quantifizierung der Modellgüte, um daraus Grenzen abzuleiten. Um eine Aussage über die Abweichungen der Prüfstandsmessungen zum Fahrversuch treffen zu können, soll der RMSE verwendet werden. Basierend auf den zufällig gewählten ZHS in D aus Abbildung 5.14, wird ein Streudiagramm (siehe Abbildung 5.15) der Ergebnisse abgeleitet und der RMSE bestimmt. Mit Hilfe dieses Fehlers kann eine Aussage zur Güte der Prüfstandsergebnisse und der zu erwartenden Abweichung im Vergleich zum Fahrversuch getroffen werden. Der RMSE der Mittelwerte beträgt für ZHS 0,40. Unter Berücksichtigung der gemittelten Standardabweichungen der Schaltqualitätsbewertungen des Fahrversuches, welche bei den berücksichtigten ZHS bei 0,26 liegt, ist dieser Fehler als sehr gut zu bewerten. Die Abbildungsgüte liegt demnach nahezu im Bereich der natürlichen Streuung. Darüber hinaus ist anhand der Nullfehler-Gerade (engl. Perfect Prediction) ersichtlich, dass die Ergebnisse am Prüfstand tendenziell besser bewertet werden als die des Fahrversuches. Dieser Zusammenhang wird bei den Ergebnissen der übrigen Hauptschaltarten bestätigt (siehe Anhang B). Die resultierenden Fehler und gemittelten Standardabweichungen des Fahrversuches aller vier Hauptschaltarten sind in Tabelle 5.4 gelistet.

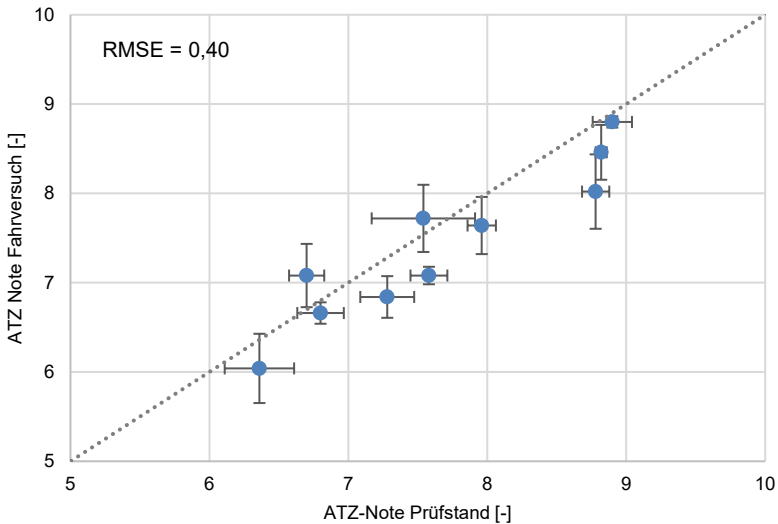


Abbildung 5.15: Streudiagramm der Schaltqualitätsbewertungen diverser Zug-Hochschaltungen in D am Prüfstand und Fahrversuch

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse ist zunächst ersichtlich, dass sowohl die Standardabweichung der Schaltqualität als auch der RMSE in Abhängigkeit der Schaltarten variieren. Erwartungsgemäß nimmt mit höheren, empirischen Standardabweichungen des Fahrversuches auch der RMSE am Prüfstand zu. Basierend auf dem RMSE lassen sich im Folgenden die Grenzen der Methode in Abhängigkeit der Schaltart ableiten. Um sich dieser Fragestellung zu nähern, gilt es zunächst die relevanten Bereiche der Schaltqualität zu spezifizieren.

Tabelle 5.4: Übersicht der Fehler (RMSE) aller Hauptschaltarten der Prüfstandsmessungen im Vergleich zum Fahrversuch sowie die Standardabweichung (SD) des Fahrversuches

Schaltart	RMSE	SD
Zug-Hochschaltung	0,40	0,26
Zug-Rückschaltung	0,31	0,18
Schub-Hochschaltung	0,41	0,21
Schub-Rückschaltung	0,61	0,45

Es ist evident, dass alle Bewertungen oberhalb von 8 als hinreichend gut appliziert beschrieben werden können, da die resultierenden Anregungen, gemäß der Definition der ATZ-Noten, vom Kunden nicht mehr wahrnehmbar sind (siehe Abbildung 2.8). Folglich ist es im Rahmen der Analyse irrelevant, ob eine Schaltung mit 8,5 oder 9,0 bewertet wird. Diese Schaltungen müssen nicht gesondert analysiert werden und können, basierend auf den Ergebnissen der Prüfstandsmessungen, direkt freigegeben werden. Vergleichbares gilt für alle Schaltungen unterhalb einer Bewertung von 6. Diese Schaltungen sind als schlecht einzuschätzen, so dass jeder Applikateur diese als ungenügend wahrnehmen wird. Dementsprechend ist es irrelevant, ob die Schaltung mit 5 oder 5,5 bewertet wird, da alle Schaltungen in diesem Bereich durch die Applikateure gesondert analysiert werden müssen. Diese beiden Bereiche können unter Berücksichtigung der RMSE aus Tabelle 5.4 am Prüfstand zu jedem Zeitpunkt im PEP eindeutig identifiziert werden. Im verbleibenden Bereich (Benotungen zwischen 6 und 8) sind unter Berücksichtigung der empirischen Standardabweichung der jeweiligen Schaltarten die RMSE als hinreichend genau zu beschreiben. Wird bei der Analyse zusätzlich berücksichtigt, dass die Ergebnisse am Prüfstand tendenziell positiver ausfallen (siehe Abbildung 5.15) und die Ausprägung der Fehler somit einer bestimmten Orientierung folgt, kann die Aussagekraft und damit das Vertrauen in die Bewertungen in diesem Bereich weiter gesteigert werden. Dies gilt insbesondere in frühen Phasen des PEP, da zu diesem Zeitpunkt die verbleibende Unsicherheit akzeptabel ist. Wenngleich, basierend auf der Methode, eine Validierung mittels Fahrversuchen theoretisch nicht mehr zwingend notwendig ist, sollten dennoch im Rahmen der finalen Freigabe des Produktes die Schaltungen in dem kritischen Bereich zwischen 6-8 durch Fahrversuche gesondert validiert werden.

Neben den Grenzen infolge der Abbildungsgüte existieren weitere Einschränkungen der Methode. So erfordert die Parametrierung des Modells des Drei-Massenschwingers zunächst explizites Wissen über die Gesamtfahrzeugeigenschaften, welche typischerweise lediglich im Umfeld eines OEM vorhanden sind. Darüber hinaus ist die

Parametrierung der Lager gegenwärtig mittels konstanter Parameter und nicht als vollständige Kennlinie der Lager umgesetzt. Daraus resultiert der Bedarf, die Güte des Modells für eine neue Produktgeneration initial mit den Ergebnissen eines Fahrversuches abzugleichen und beispielsweise die Parametrierung anzupassen. Dieser Einschränkung kann jedoch begegnet werden, wenn zukünftig die gesamte Kennlinie des Lagers implementiert wird. Darüber hinaus können gegenwärtig keine akustischen Phänomene im Kontext der Schaltqualitätsvalidierung am Prüfstand berücksichtigt werden.

Zusätzlich wird die Methode durch die Funktionalität von AVL-Drive limitiert, weshalb bestimmte Ausprägungen der Fahrbarkeitsapplikation in speziellen Fahrmodi nicht hinreichend genau abgebildet werden können. So werden beispielsweise Schaltungen im Race-Modus gezielt performance-orientiert bei gleichzeitig reduziertem Komfort appliziert. Dazu zählen beispielsweise Überhöhungsschaltungen mit angepasstem Motormomenteneingriff, bei welchen die resultierenden Unstetigkeiten in der Längsbeschleunigung durch AVL-Drive gegenwärtig noch negativ bewertet werden. Die objektiven Bewertungen am Prüfstand und Fahrversuch mittels AVL-Drive sind zwar weiterhin direkt vergleichbar (in diesem Fall werden beide schlechter bewertet), eine Validierung der Schaltqualität allein mittels AVL-Drive ist in diesem Modus jedoch nicht möglich. Die objektive Bewertung von AVL-Drive entspricht demnach nicht der subjektiven Bewertung des Applikateurs bei performance-orientierten Schaltungen im Race-Modus. Wie im Stand der Forschung erläutert, stellen Ramsauer und Pujari (2021) bereits einen ersten Ansatz vor, um dieser Problemstellung zu begegnen, jedoch wurde der Funktionsumfang gegenwärtig noch nicht in AVL-Drive integriert.

5.4 Zwischenfazit

In diesem Kapitel wurde im Kontext der Forschungsfrage 2 untersucht, ob die objektive Bewertung der Schaltqualität auf ViL-Prüfständen erfolgen kann und in welchem Umfang diese Validierungsumgebung den realen Fahrversuch ersetzen kann. Dafür wurde zunächst eine Methode entwickelt, mit welcher bestehende Manöverkataloge zur Validierung der Schaltqualität in einen Manöverplan überführt werden können. Der Manöverplan ermöglicht eine vollständig automatisierte Validierung auf alternativen Validierungsumgebungen. Um die Effizienz der Methode weiter zu steigern, wird einerseits die Reihenfolge des Manöverplans hinsichtlich der benötigten Zeit optimiert und andererseits ein Ansatz vorgestellt, mit welchem die Ansteuerung des Fahrzeuges auf Basis von Signalmanipulationen innerhalb einer gegebenen FlexRay-Architektur ermöglicht wird. Diese Fahrzeugansteuerung stellt, neben der

Automatisierung des Testablaufs, eine vollständige Reproduzierbarkeit der Ergebnisse sicher. Infolge der Reproduzierbarkeit ist es erstmals möglich, die Streuung der Schaltqualität aller Schaltungen des Manöverkatalogs zu untersuchen.

Um an Prüfständen vergleichbare Ergebnisse zu realen Fahrversuchen im Kontext der Schaltqualitätsvalidierung erzielen zu können, wurde das Fahrzeugmodell zur Berechnung der Längsbeschleunigung erweitert. Das dafür entwickelte Modell eines Drei-Massenschwingers ermöglicht im Kontext des IPEK-XiL-Ansatzes eine durchgängige Validierung über den gesamten PEP, da eine Verwendung des Modells beispielsweise auch auf PiL-Prüfständen möglich ist. Somit wird eine direkte Vergleichbarkeit der Applikationsstände hinsichtlich der Schaltqualität infolge der exakteren Bestimmung der Längsbeschleunigung ermöglicht.

Die Ergebnisse des Drei-Massenschwingers wurden abschließend bezüglich ihrer Abweichungen zum realen Fahrversuch untersucht und daraus Grenzen der Methode abgeleitet. Es konnte gezeigt werden, dass die Schaltqualität von Doppelkupplungsgetrieben an ViL-Prüfständen validiert werden kann. Somit ist die vorgestellte Methode in der Lage, den Fahrversuch in einem definierten Rahmen zu ersetzen. Dabei ist die Methode insbesondere dazu geeignet, um in einer frühen Phase Schwachstellen im Kontext der Getriebeapplikation und daraus resultierende, schlechte Schaltabläufe (ATZ-Note < 6) zu identifizieren. So kann im Sinne des Pull-Prinzips der Validierung nach Matros (2016) bereits frühzeitig eine deutliche Steigerung der Applikationsgüte erzielt werden.

6 Modellbasierte Prognose der subjektiv wahrgenommenen Schaltstrategie

Basierend auf den Forschungsbedarfen, welche sich aus der Forschungsfrage 3 begründen, wird im folgenden Kapitel untersucht, inwieweit eine Effizienzsteigerung der Schaltstrategievalidierung im Kontext der subjektiven Wahrnehmung auf Basis von Simulationen realisiert werden kann. Dazu soll ein Modell entwickelt werden, welches auf Basis von Simulationsergebnissen prognostizieren kann, wie sich die Änderung eines Datenstandes auf die subjektive Wahrnehmung der Fahrbarkeit auswirkt. Basierend auf dieser Prognose und dem damit verbundenen Wissen ist der Applikateur in der Lage, Betriebspunkte gezielt anzufahren und hinsichtlich der Änderungen zu bewerten. Insbesondere bei kurzfristigen Datenstandsänderungen in späten Phasen des PEP kann dieser Ansatz zu einer Effizienzsteigerung führen, da eine vollumfängliche Validierung zu diesem Zeitpunkt kaum mehr möglich ist. Um sich dieser Thematik zu nähern, wird zunächst eine Probandenstudie entwickelt und durchgeführt, so dass der Einfluss unterschiedlicher Getriebedatenstände auf die subjektive Wahrnehmung gemessen werden kann. Basierend auf den subjektiven Ergebnissen der Probandenstudie und den objektiven Simulationsergebnissen der Datenstände wird ein Modell des maschinellen Lernens zur Prognose der subjektiven Wahrnehmung trainiert. Um dieses Modell hinreichend genau zu validieren, wird mittels zusätzlicher Probandenstudien die Prognosegüte des Modells analysiert. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse werden abschließend genutzt, um Grenzen der Methode abzuleiten. Erste Lösungsansätze dieses Kapitels wurden bereits auf der FISITA Web Conference 2020 veröffentlicht (Köber et al., 2020).

6.1 Probandenstudie

Im vorliegenden Kapitel wird untersucht, inwieweit sich unterschiedliche Datenstände der Schaltstrategie auf die resultierende subjektive Wahrnehmung im Kontext der Fahrbarkeit auswirken. Um diesen Einfluss messbar zu machen, wird eine geeignete Probandenstudie entwickelt und durchgeführt. Zunächst wird erläutert, wie die notwendigen Datenstände für die Studie generiert werden und inwieweit sich diese voneinander unterscheiden. Um die subjektive Wahrnehmung messen zu können, werden im nächsten Schritt ein geeigneter Fragebogen entwickelt und die

notwendigen Rahmenbedingungen für die Probandenstudie festgelegt. Abschließend werden die statistischen Ergebnisse der Studie dargestellt und notwendige Handlungsschritte daraus abgeleitet.

6.1.1 Entwicklung der Datenstände zur Analyse der subjektiven Wahrnehmung

Da im Rahmen der Probandenstudie untersucht werden soll, wie sich unterschiedliche Datenstände der Schaltstrategie auf die subjektive Wahrnehmung auswirken, soll im Folgenden dargestellt werden, wie diese Datenstände erzeugt werden. Wie bereits im Stand der Forschung (siehe 2.4.1) beschrieben, folgt diese Arbeit dem heuristischen Modell „Joy and Convenience in Activities“ nach Engeln et al. (2008). Demnach setzt sich das Konstrukt Fahrspaß aus den Konstrukten Komfort und Sportlichkeit zusammen. Unter Berücksichtigung dieser Information werden, ausgehend von einem Serien-Getriebedatenstand, gezielt Parameter angepasst, so dass die resultierenden Datenstände potenziell komfortabler oder sportlicher durch die Probanden wahrgenommen werden. Auf Basis einer initialen Befragung von Experten der Getriebe-Applikation konnten vier Faktoren (Drehzahlniveau, Bremsrückschaltungen, Momenteneingriff, Schaltpunktverschiebung bei Steigung) identifiziert werden, welche innerhalb der Schaltstrategie den vermeintlich größten Einfluss auf das Konstrukt Fahrspaß haben. Die Anpassung des Seriendatenstandes soll in Abhängigkeit der vier Faktoren im Folgenden dargestellt werden.

Drehzahlniveau

Der Verlauf der Motordrehzahl innerhalb eines endlichen Zeitabschnittes wird maßgeblich durch die Fahrpedalvorgabe des Fahrers und die Schaltpunkte der Schaltstrategie definiert. Das arithmetische Mittel dieses Verlaufs im betrachteten Zeitabschnitt wird als Drehzahlniveau beschrieben. Es ist evident, dass die Anpassung der Schaltpunkte einen direkten Einfluss auf das resultierende Drehzahlniveau hat. Infolge des angehobenen oder abgesenkten Drehzahlniveaus verändert sich u.a. die verfügbare Zugkraftreserve in den unterschiedlichen Betriebspunkten. Darüber hinaus hat das Drehzahlniveau direkten Einfluss auf die akustischen Phänomene infolge der Motorgeräusche. Folglich ist das Drehzahlniveau ein signifikanter Faktor im Kontext der subjektiven Wahrnehmung der Schaltstrategie, welchen es in der Probandenstudie zu berücksichtigen gilt. Um Datenstände zu generieren, welche im Vergleich zu einem Seriendatenstand ein angehobenes oder reduziertes Drehzahlniveau haben, gibt es eine Vielzahl an Möglichkeiten. In der vorliegenden Arbeit wird der Ansatz einer angepassten Schaltpunkt-Interpolation verfolgt. Es wurde bereits im Stand der Forschung beschrieben, dass moderne Schaltstrategien

in Abhängigkeit der aktuell gemessenen Sportlichkeit die Schaltpunkte mittels Interpolation verschieben. Die initiale Sportlichkeit, welche aus Längs- und Querbesehleunigung sowie Fahr- und Bremspedalaktivität berechnet wird, wird mittels einer parametrierbaren Übertragungsfunktion in die finale Sportlichkeit überführt. Um das Drehzahlniveau des Seriidatenstandes zu erhöhen, wurde die Übertragungsfunktion entsprechend angepasst, was in Abbildung 6.1 dargestellt ist. Es ist ersichtlich, dass infolge der angepassten Übertragungsfunktion auch bei einer sehr niedrigen, initialen Sportlichkeit eine finale Sportlichkeit mit 0,3 resultiert. Dieser Wert führt wiederum zu einer entsprechenden Interpolation der Schaltkennfelder von Basis in Richtung Sport.

Um das Drehzahlniveau abzusenken, wird zunächst eine Interpolation in Abhängigkeit der Sportlichkeit unterbunden, wodurch der Fahrer stets innerhalb des Basis-Schaltkennfeldes ohne Schaltpunktanhebung fährt. Des Weiteren werden im niedrigen Lastbereich die Schaltpunkte des Basis-Schaltkennfeldes weiter abgesenkt, wobei dies jedoch definierten Grenzen (z.B. Leerlaufdrehzahl des Motors) unterliegt.

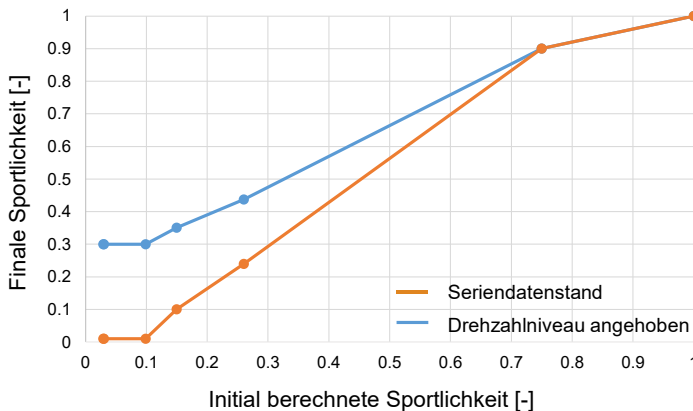


Abbildung 6.1: Anpassung der Übertragungsfunktion zur Berechnung der finalen Sportlichkeit im Kontext der angestrebten Anhebung des Drehzahlniveaus (in Anlehnung an Köber et al., 2020)

Bremsrückschaltungen

Im Stand der Forschung wurden Bremsrückschaltungen und deren Anwendungsfall bereits beschrieben. Es wurde dargestellt, dass eine Anhebung der Rückschaltunkte bei identifizierter, sportlicher Fahrweise zur Performanceoptimierung genutzt

wird. Diese Performanceoptimierung infolge der stärkeren Verzögerung und der höheren Motordrehzahlen führt aber auch zu einer potenziell sportlicheren Wahrnehmung der Fahrbarkeit. Entsprechend gilt es, diesen Faktor bei der Generierung neuer Datenstände zu berücksichtigen. Ausgehend von der Applikation des Serierdatenstandes lässt sich feststellen, dass Bremsrückschaltungen als individuelle Kennfelder der Fahrzeuggeschwindigkeit und Längsbeschleunigung appliziert sind. Analog zu den konventionellen Schaltkennfeldern werden die finalen Schaltpunkte von Bremsrückschaltungen mittels Interpolation innerhalb des Basis- und Sportkennfelds im jeweiligen Modus ermittelt. Diese Information wird genutzt, um neue Datenstände hinsichtlich der Bremsrückschaltungen zu erzeugen. So wird das Basis-Kennfeld des Sport-Modus in das Basis-Kennfeld des Normal-Modus übertragen (siehe Abbildung 6.2). Gleiches gilt für das Sport-Kennfeld des Race-Modus, welches in das Sport-Kennfeld des Normal-Modus übertragen wird. Da die Probanden lediglich im Normal-Modus fahren sollen, führt die Übertragung der Kennfelder direkt zu frühzeitigeren Bremsrückschaltungen im Vergleich zum Serierdatenstand. Es wird erwartet, dass dies in einer sportlicheren Wahrnehmung resultiert. Infolge der Wahl der Kennfelder aus Sport- und Race-Modus wird zusätzlich eine hinreichend große Spreizung zwischen den Basis- und Sportkennfeldern sichergestellt.

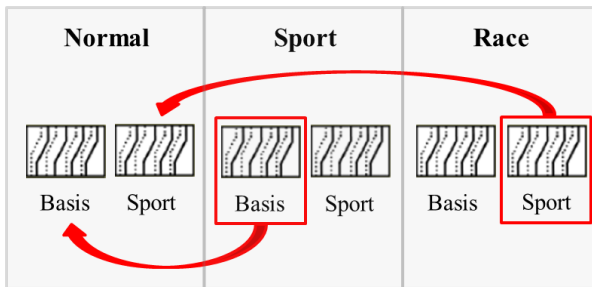


Abbildung 6.2: Transfer der Schaltkennfelder der Bremsrückschaltungen für eine Anhebung der Rückschaltpunkte (Köber et al., 2020)

Um im Kontext der Bremsrückschaltungen die potenziell wahrgenommene Sportlichkeit zu reduzieren, bietet die Schaltstrategie die Möglichkeit, Bremsrückschaltungen und die damit verbundenen Kennfelder gänzlich zu deaktivieren. Demnach erfolgen die Rückschaltungen lediglich in Abhängigkeit der konventionellen Schaltkennfelder, welche als Funktion des Fahrpedals und der Geschwindigkeit parametrisiert sind.

Momenteneingriff und Drehzahlgradient

Auch wenn die Schaltstrategie sich primär mit der Fragestellung beschäftigt, wann ein Gangwechsel zu erfolgen hat, so gibt es dennoch in einigen Schaltstrategien die Möglichkeit, Einfluss auf die gewünschte Schaltzeit zu nehmen. In Abhängigkeit der vorliegenden Fahrsituation und Fahrweise kann die Schaltstrategie gezielt schnelle oder langsame Schaltzeiten fordern, welche im Rahmen der Schaltablaufsteuerung umgesetzt werden soll. Da die benötigte Schaltzeit jedoch von einer Vielzahl an Einflussgrößen abhängt, ist diese Forderung der Schaltstrategie durch die Ablaufsteuerung nicht immer exakt umsetzbar. Um die geforderte Schaltzeit umsetzen zu können, wird bei Doppelkupplungsgetrieben vornehmlich der Momenteneingriff des Motors variiert. In Abhängigkeit des Motormomenteneingriffs fällt der Gradient der Drehzahl unterschiedlich steil aus. Je steiler der Gradient ist, desto kürzer ist die Synchronisationszeit und damit auch die durch den Fahrer wahrgenommene Schaltzeit. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 6.3 anhand einer ZHS beispielhaft dargestellt.

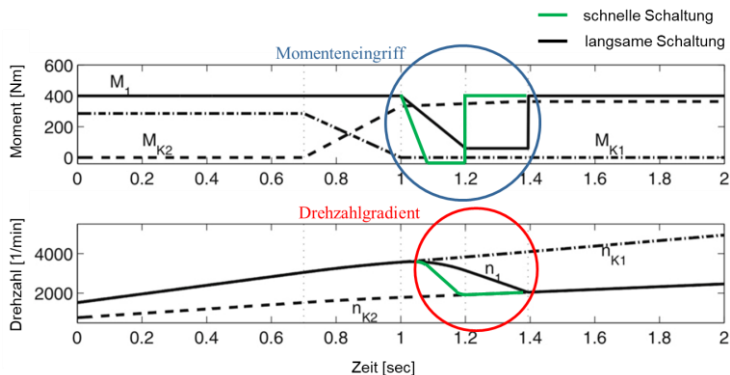


Abbildung 6.3: Zug-Hochschaltung mit unterschiedlichen Motormomenteneingriffen [M_1 - Motormoment; M_{K1} - Moment der abschaltenden Kupplung; M_{K2} - Moment der zuschaltenden Kupplung; n_1 - Motordrehzahl; n_{K1} - Drehzahl der abschaltenden Kupplung; n_{K2} - Drehzahl der zuschaltenden Kupplung] (in Anlehnung an Fischer et al., 2016; Köber et al., 2020)

Es wird angenommen, dass schnellere Schaltungen als sportlicher und langsamere Schaltungen als komfortabler wahrgenommen werden. Die Vorgaben des Drehzahl-

gradienten sind in einem gesonderten Kennfeld hinterlegt, welches von Motordrehzahl und Fahrpedal abhängig ist. Um der Forderung nach schnelleren Schaltungen gerecht zu werden, werden die Daten des Kennfeldes mit einem Faktor von 2,5 multipliziert. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass insbesondere in höheren Last- und Drehzahlbereichen der Motormomenteneingriff physikalischen Grenzen unterliegt und demnach nicht beliebig steil gewählt werden kann.

Um flachere Gradienten zu erzielen, wird im oberen Drehzahlbereich¹ ein Quotient von 1,75 auf die ursprünglichen Parameter angenommen. Im unteren Drehzahlbereich wird ein linear steigender Subtrahend von $500 \frac{1}{\text{min}\cdot\text{sec}}$ bis $1500 \frac{1}{\text{min}\cdot\text{sec}}$ gewählt. Diese drehzahlabhängige Unterscheidung ist notwendig, da sowohl Motor als auch Getriebe bei den niedrigen Drehzahlen nicht für derartig langsame Schaltungen abgestimmt sind.

Schaltpunktverschiebung bei Steigungen

Wie im Stand der Forschung beschrieben, werden die Schaltpunkte nicht nur infolge einer sportlichen Fahrweise verschoben, sondern auch infolge der aktuellen Steigung der Straße und der damit verbundenen Zu- bzw. Abnahme der Fahrwiderstände. In Abhängigkeit der gemessenen Steigung wird über eine eigens parametrisierte Kennlinie ein sog. Bergfaktor gebildet, welcher direkten Einfluss auf die Verschiebung der Schaltpunkte hat. Analog zur Übertragungsfunktion der Sportlichkeit (siehe Abbildung 6.1) führt eine Anpassung dieser Kennlinie direkt zur Verschiebung der Schaltpunkte auf Strecken mit Steigungen. Die Anpassung der Kennlinie ist in Abbildung 6.4 dargestellt. Es ist evident, dass sich infolge der Anpassung ein geringerer Bergfaktor bei positiven Steigungen ergibt, woraus ein tendenziell niedrigeres Drehzahlniveau resultiert. Der neue Datenstand ist folglich als potenziell komfortabler im Vergleich zum Seriidatenstand zu bewerten.

¹ $n \geq 4000 \frac{1}{\text{min}}$

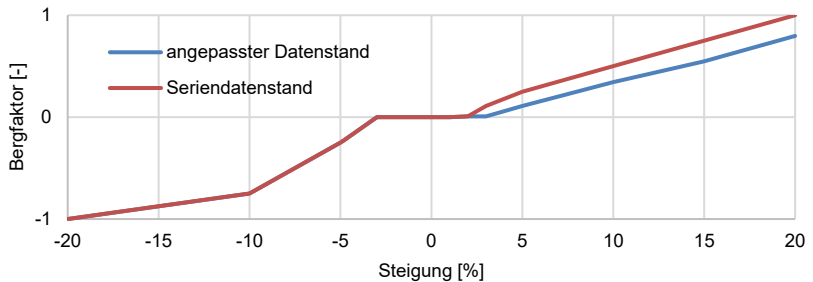


Abbildung 6.4: Anpassung der Kennlinie zur Schaltpunktverschiebung bei Steigungen

6.1.2 Festlegung der Rahmenbedingungen und Entwicklung eines geeigneten Fragebogens für die Probandenstudie

Um zu untersuchen, wie die im vorherigen Kapitel beschriebenen Datenstände die subjektive Wahrnehmung der Probanden beeinflussen, gilt es, geeignete Rahmenbedingungen für die Probandenstudie festzulegen. Dazu zählt, neben einigen anderen Kriterien (beispielsweise Wahl des Fahrzeuges und Strecke), auch die Festlegung des Teilnehmerkreises für die Probandenstudie. Auch wenn die wesentlichen Stakeholder einer Produktentwicklung stets die Kunden sind, kann angenommen werden, dass im Vergleich zu Experten eine wesentlich größere Anzahl an Probanden notwendig ist, um ähnlich signifikante Ergebnisse zu erzielen. Wie im Stand der Forschung (siehe Kap. 2.2.2) beschrieben, verfügen Experten (im vorliegenden Kontext Applikationsingenieure) über wesentlich ausgeprägtere Fähigkeiten zur Identifikation kleinster Veränderungen und können diese darüber hinaus präzise und reproduzierbar in einer vorgegebenen Skala einordnen. Dementsprechend wurden für die Probandenstudie ausschließlich Ingenieure der Motor- und Getriebeapplikation berücksichtigt. Insgesamt nahmen 21 Experten der Motor- und Getriebeapplikation an der Studie teil. Diese sollen zu Beginn der Studie den initialen Getriebe-Seriendatenstand und anschließend die angepassten Datenstände fahren. Aus Gründen der Normierung muss spätestens nach zwei angepassten Datenständen erneut der Seriendatenstand gefahren werden, wobei dieser bei Bedarf auch vorher nochmal gefahren werden kann. Es ist evident, dass die Probanden weder darüber in Kenntnis gesetzt werden, was an den jeweiligen Datenständen geändert wurde, noch welchen Datenstand sie aktuell fahren. Die finale Reihenfolge der Datenstände wurde für jeden Probanden randomisiert festgelegt.

Im nächsten Schritt ist es notwendig, eine geeignete Strecke zu identifizieren, welche einer Vielzahl an Anforderungen genügt. Um der initialen Hypothese gerecht zu werden, dass Fahrspaß sich aus Komfort und Sportlichkeit gleichermaßen zusammensetzt, muss eine möglichst große Spreizung der Fahranforderungen erfolgen. Somit muss die Strecke sich sowohl aus ruhigen bzw. komfortablen (z.B. Ortsdurchfahrt) und dynamischen bzw. sportlichen Streckenanteilen (z.B. Landstraße) zusammensetzen. Darüber hinaus sind viele Kurven und Steigungen anzustreben, um die Einflüsse der Bremsrückschaltungen und der angepassten Steigungsinterpolation besser herauszustellen. Um die Störgrößen zu minimieren, sollen Baustellen und ein hohes Verkehrsaufkommen vermieden werden. Neben der Beschaffenheit des Streckenprofils ist die Länge und der damit verbundene zeitliche Umfang ein wesentlicher Faktor. Unter Berücksichtigung der Anzahl der angepassten Datenstände und der notwendigen Normierungsfahrten mit dem Seriidatenstand ergibt sich ein minimaler Umfang von elf Fahrten. Eine reine Fahrzeit von 20min sollte demnach nicht überschritten werden, da zusätzlich Zeit für das Ausfüllen des Fragebogens, Pausen und Flashen des jeweiligen Getriebedatenstandes eingeplant werden muss. Das final gewählte Streckenprofil mit entsprechenden Streckenanteilen ist in Abbildung 6.5 dargestellt.

Alle Fahrten werden mit einem baugleichen Porsche 911 der Produktgeneration 992 und Basis-Motorisierung (385 PS) durchgeführt. Um direkt vergleichbare Rahmenbedingungen zu schaffen sind die Probanden angehalten, das Radio auszuschalten, die Fenster zu schließen und durchgehend im Normal-Modus zu fahren. Manuelle Gangwechsel durch die Probanden sind ebenfalls untersagt. Die Fahrweise kann jedoch im Rahmen der Straßenverkehrsordnung (StVO) frei gewählt werden und soll nach jeder Fahrt durch die Probanden, neben der eigentlichen Bewertung der Datenstände, subjektiv eingeschätzt werden. Zur Einschätzung der Fahrweise standen drei Kategorien zur Auswahl (sportlich, komfortabel und ausgeglichen). Bei jeder Fahrt ist ein Versuchsleiter als Beifahrer im Fahrzeug, wobei aus Gründen der Konzentration eine Kommunikation zu diesem während der Fahrt untersagt ist.

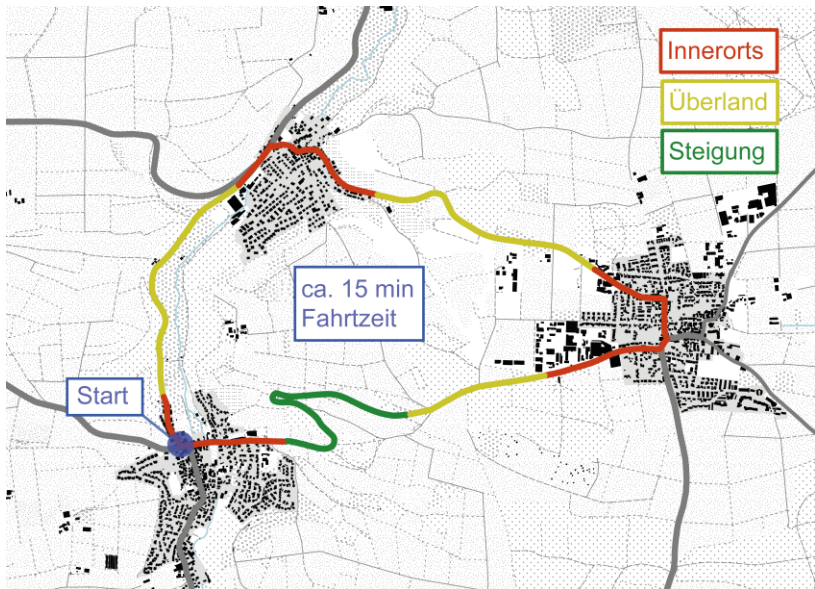


Abbildung 6.5: Ausgewähltes Streckenprofil für die Probandenstudie [rot: Innerorts, gelb: Überland, grün: Steigung, blau: Streckenprofil] (© Google LLC)

Um die subjektive Wahrnehmung der Probanden in Abhängigkeit der unterschiedlichen Datenstände messbar zu machen, ist es unabdingbar, einen geeigneten Fragebogen zu entwickeln. Dazu wurde, auf Basis von etablierten Fragebogenmodellen, ein neuer Fragebogen entwickelt. Zunächst wurden unterschiedliche Fragebogenmodelle wie die PANAVA-Kurzskala von Schallberger (2005) oder die Flow-Kurzskala von Rheinberg, Vollmeyer und Engeser (2002) bezüglich relevanter Bewertungskriterien wie Nutzerfreundlichkeit oder Zeitaufwand bewertet. Gängige Anforderungen an eine Probandenstudie wie Objektivität, Reliabilität und Validität wurden ebenfalls berücksichtigt. Die gewichtete Bewertung (siehe Anhang C) zeigt, dass im vorliegenden Kontext die Flow-Kurzskala mit ihrem unipolaren Aufbau der Items und der Skalenausführung den besten Ansatz bietet, um präzise Aussagen über die subjektive Wahrnehmung der Schaltstrategie zu erhalten. Darüber hinaus zeichnet sich die Flow-Kurzskala durch ein hohes Maß an Objektivität und Reliabilität aus.

Da die Arbeit der Theorie von Engelbrecht et al. (2009) folgt, dass Fahrspaß sich aus Komfort und Sportlichkeit zusammensetzt, sind diese folglich die zu messenden Konstrukte des Fragebogens. Um für den finalen Fragebogen passende Items auszuwählen, wird zunächst eine Liste mit potenziellen Items erstellt, welche die Konstrukte Komfort und Sportlichkeit möglichst gut beschreiben. Im Rahmen einer Umfrage sollten 15 Experten zunächst bewerten, wie gut die Items in der Lage sind, die übergeordneten Konstrukte zu beschreiben. Der entsprechende Fragebogen ist dem Anhang D.1 zu entnehmen. Mittels einer Reliabilitätsanalyse wurden Indikatoren wie Mittelwert, Trennschärfe und Cronbachs Alpha bestimmt und die finalen Items auf Basis dieser Analyse für den Fragebogen ausgewählt (siehe Tabelle 6.1). Mit einem Cronbachs Alpha von $>0,7$ (Sportlichkeit) und $>0,8$ (Komfort) deuten die Items auf eine akzeptable bzw. gute interne Konsistenz hin.

Tabelle 6.1: Ergebnisse der Reliabilitätsanalyse zur Identifikation der finalen Items *[durchgestrichene Items wurden vernachlässigt]* (in Anlehnung an Jacobs, 2019)²

	Items	Min	Max	Mittelwert	Trennschärfe	Cronbachs Alpha bei Reduktion	Cronbachs Alpha
Sportlichkeit	Leistungsstark	1	7	6,33	0,957	0,730	0,762
	Fließend	1	7	4,67	0,964	0,728	
	Direkt	1	7	6,27	0,804	0,788	
	Träge	1	7	1,47	0,765	0,778	
	Dynamisch	1	7	6,33	0,969	0,746	
	Aufgeregt	1	7	3,6	0,943	0,723	
	Beschleunigend	1	7	5,67	0,988	0,677	
	Schnell	1	7	5,73	0,817	0,756	
	Beanspruchend	1	7	4,6	0,944	0,764	
	Ruckartig	1	7	3,67	0,711	0,746	
Komfort	Entspannt	1	7	6,20	0,620	0,854	0,868
	Stressfrei	1	7	6,07	0,853	0,833	
	Erholsam	1	7	5,80	0,276	0,890	
	Ausgeglichen	1	7	5,67	0,631	0,852	
	Passend	1	7	5,20	0,731	0,837	
	Vertraut	1	7	5,40	0,866	0,813	
	Sicher	1	7	5,73	0,663	0,849	

Ein Indikator zur Reduktion eines Items ist, wenn sich infolge der Reduktion das Cronbachs Alpha erhöht, die interne Konsistenz also steigt. Darüber hinaus sollten nach Moosbrugger Items mit einer Trennschärfe nahe null vernachlässigt werden

² Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

(Moosbrugger, 2012). Im Rahmen der Arbeit werden alle Items mit einer Trennschärfe < 0,3 eliminiert. Auf Basis dessen werden die durchgestrichenen Items aus Tabelle 6.1 im Fragebogen nicht berücksichtigt. Zusätzlich hatten die Experten die Möglichkeit, eigene Items zur Beschreibung des übergeordneten Konstrukts zu nennen. Wurden dabei Items von mehreren Experten genannt, welche noch nicht gelistet sind, wurden diese zusätzlich im Fragebogen berücksichtigt. Für das Konstrukt Komfort sind dementsprechend noch folgende Items hinzugekommen

- Hektisch
- Nervös
- Voraussagbar

Da nicht davon ausgegangen werden kann, dass alle Items das übergeordnete Konstrukt in gleicher Ausprägung beschreiben, wird in einer zweiten Umfrage deren Gewichtung untersucht. Dazu wurden 16 Experten der Getriebe-Applikation befragt, inwieweit die finalen Items die übergeordneten Konstrukte stärker oder schwächer im Kontext der subjektiven Wahrnehmung beschreiben. Der dafür verwendete Fragebogen ist dem Anhang D.2 zu entnehmen. Alle berücksichtigten Items mit ihrem resultierenden Gewichtungsfaktor sind in Tabelle 6.2 gelistet.

Tabelle 6.2: Übersicht der finalen Items zum Messen der Konstrukte Sportlichkeit und Komfort sowie deren Gewichtungsfaktor (Karakus, 2020)³ (Köber et al., 2020)

	Sportlichkeit						Komfort									
	Leistungsstark	Fließend	Dynamisch	Aufgeregt	Beschleunigend	Schnell	Ruckartig	Entspannt	Stressfrei	Ausgeglichen	Passend	Vertraut	Sicher	Hektisch	Nervös	Voraussagbar
Gewichtungsfaktor	1,02	0,97	1,05	0,95	1,01	1,02	0,98	1,02	1,01	1,01	1,01	1,00	1,00	0,98	1,00	0,98

Basierend auf den ausgewählten 16 Items und der methodischen Vorlage der Flow-Kurzskala wurde der finale Fragebogen abgeleitet. In Abbildung 6.6 ist ein beispielhafter Ausschnitt des Fragebogens für die Items leistungsstark und dynamisch dargestellt. Bei der Bewertung der einzelnen Datenstände sind die Probanden angehalten, die wahrgenommene Veränderung zum Seriidatenstand zu bewerten.

³ Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

Anhand des beispielhaften Items „leistungsstark“ gilt es folglich zu bewerten, ob dieses bei dem aktuellen Datenstand stärker (trifft zu) oder schwächer (trifft nicht zu) im Vergleich zum Seriidatenstand wahrgenommen wird. Folglich ist „teils-teils“ anzukreuzen, wenn keine Veränderung des Items im Vergleich zum Seriidatenstand wahrgenommen wurde.

	trifft nicht zu			teils-teils			trifft zu
leistungsstark	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
dynamisch	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Abbildung 6.6: Auszug des finalen Fragebogens für die Items leistungsstark und dynamisch (Jacobs, 2019)⁴

Neben der unipolaren Befragung zu den einzelnen Items sollten die Probanden den wahrgenommenen Fahrspaß nach jeder Fahrt gesamtheitlich bewerten und ihre Fahrweise innerhalb der gegebenen Kategorien (Ausgeglichen, Komfortabel, Sportlich) einschätzen. Darüber hinaus ist der Fragebogen so gestaltet, dass die Probanden einmalig eine zusätzliche, aber freiwillige Auskunft über ihre Berufserfahrung, ihr Alter und ihre Erwartungen an die Studie geben. Der gesamte Fragebogen für einen Datenstand ist Anhang D.3 zu entnehmen.

6.1.3 Statistische Auswertung der Probandenstudie

Wie bereits im vorherigen Kapitel dargestellt, wurden die 21 Probanden angehalten, nach jeder Fahrt den aktuellen Datenstand im Vergleich zum Seriidatenstand anhand der Flow-Kurzskala subjektiv zu bewerten. Um eine geeignete statistische Auswertung zu ermöglichen, müssen diese Informationen zunächst in metrisch skalierbare Werte überführt werden. Dazu erhält die Aussage „trifft nicht zu“ den Wert 1 und „trifft zu“ den Wert 7. Folglich entspricht der Wert 4 der Aussage „teils teils“ und wird als „keine wahrnehmbare Veränderung“ definiert. In Abbildung 6.7 ist der Einfluss zweier Datenstände (erhöhtes Drehzahlniveau und frühere Bremsrück-schaltung) auf den gesamtheitlich wahrgenommenen Fahrspaß der 21 Probanden dargestellt. Zunächst ist ersichtlich, dass beide Datenstände, unter Berücksichtigung des Mittelwertes, zu einer gesteigerten Wahrnehmung des Fahrspaßes führen. Darüber hinaus wird jedoch auch ersichtlich, dass die subjektive Wahrnehmung der Datenstände von einer sehr großen Streuung geprägt ist. Diese Streuung findet

⁴ Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

sich bei allen Datenständen und Konstrukten wieder und ist auf unterschiedliche Ursachen zurückzuführen. Zunächst gilt es zu berücksichtigen, dass vorliegende Studie die subjektive Wahrnehmung von Probanden misst und diese stets mit einer gewissen Streuung aufgrund von persönlichen Präferenzen und Quereinflüssen verbunden ist. Ebenso ist davon auszugehen, dass die berufliche Erfahrung der Probanden im Kontext der Applikation Einfluss auf die Ergebnisse hat. Ein Applikationsingenieur mit mehr als 30 Jahren Berufserfahrung ist potenziell eher in der Lage, minimale Abweichungen wahrzunehmen und entsprechend einzuordnen als ein Berufseinsteiger mit weniger als fünf Jahren Berufserfahrung. Darüber hinaus müssen die Störfaktoren der Studie berücksichtigt werden. So wurde beispielsweise bei 27 von insgesamt 145 Fahrten angegeben, dass die Fahrt infolge äußerer Einflüsse beeinträchtigt wurde. Dabei wurden Aspekte genannt wie „nasse Straße“ oder „Bus ist voraus gefahren“. Diese Beeinträchtigungen führen zu einer angepassten Fahrweise der Probanden, was die Vermutung zulässt, dass dies ebenfalls Einfluss auf die subjektive Wahrnehmung hat.

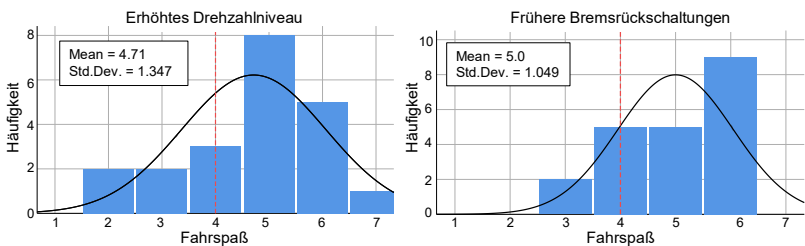


Abbildung 6.7: Subjektive Wahrnehmung des Fahrspaß in Abhängigkeit unterschiedlicher Datenstände von insgesamt 21 Probanden [Seriendatenstand entspricht 4,0] (Köber et al., 2020)

Für die statistische Auswertung der Probandenstudie hinsichtlich der zu messenden Konstrukte „Komfort“ und „Sportlichkeit“ werden die subjektiven Bewertungen aller Items zunächst für jeden Fahrer mit ihrem Gewichtungsfaktor multipliziert und anschließend zu deren übergeordneten Konstrukten je Fahrer zusammengefasst. Diese fahrerabhängige Bewertung der Konstrukte wird im nächsten Schritt als arithmetisches Mittel zu einer gesamtheitlichen Bewertung des Konstruktes für alle Probanden zusammengefasst. In Tabelle 6.3 sind die Ergebnisse der Probandenstudie dargestellt.

Tabelle 6.3: Subjektive Wahrnehmung der unterschiedlichen Datenstände im Vergleich zu einem Seriendatenstand [Skala von 1 bis 7; 4 entspricht keine Änderung wahrgenommen] (Köber et al., 2020)

Datenstand	Sportlichkeit	Komfort
Frühere Bremsrückschaltung	4,62	4,50
Deaktivierung Bremsrückschaltung	3,71	4,49
Erhöhtes Drehzahlniveau	4,38	4,38
Reduziertes Drehzahlniveau	3,89	5,04
Flacher Drehzahlgradient	3,90	5,18
Steiler Drehzahlgradient	4,27	4,92
Schaltpunktverschiebung Steigung	3,70	4,87

Zunächst ist ersichtlich, dass alle Hypothesen zu den prognostizierten subjektiven Wahrnehmungen der Datenstände für das Konstrukt „Sportlichkeit“ bestätigt wurden. Alle potenziell sportlicheren Datenstände (z.B. erhöhtes Drehzahlniveau) führen zu einer sportlicheren Wahrnehmung (>4) und alle potenziell komfortableren Datenstände zu einer reduzierten sportlicheren Wahrnehmung (<4). Die Validität der Probandenstudie kann somit als bestätigt angesehen werden.

Bei dem Konstrukt „Komfort“ muss jedoch konstatiert werden, dass sich die initialen Hypothesen nicht bestätigen, da alle Datenstände (auch die potentiell sportlicheren) in einer Steigerung des wahrgenommenen Komforts resultieren. Zwar wird die prinzipielle Validität der Ergebnisse bestätigt, da prognostiziert komfortablere Datenstände, wie reduziertes Drehzahlniveau oder flacher Drehzahlgradient, im Vergleich zu den übrigen Datenständen zu einer deutlichen Steigerung des wahrgenommenen Komforts (>5) führen, eine pauschale, vom Datenstand unabhängige Steigerung der Komfort-Wahrnehmung gilt es jedoch anzuzweifeln. Dies kann einerseits auf die beschriebene Streuung zurückgeführt werden, andererseits aber auch auf die gewählte Fahrweise. Es wurde bereits dargestellt, dass Störfaktoren zu einer angepassten Fahrweise und einer demnach veränderten, subjektiven Wahrnehmung führen. Die Korrelation zwischen der Fahrweise und der subjektiven Wahrnehmung lässt sich jedoch auch unabhängig von den Störfaktoren beobachten. Von insgesamt 145 Fahrten wurde die Fahrweise bei 84 Fahrten als ausgeglichen, bei 39 Fahrten als komfortabel und bei 22 Fahrten als sportlich durch die Probanden

eingeschätzt. Unter Berücksichtigung dieser Information wird in Abbildung 6.8 dargestellt, wie die Fahrweise sich auf den gesamtheitlich wahrgenommenen Fahrspaß in Abhängigkeit beispielhaft ausgewählter Datenstände auswirkt.

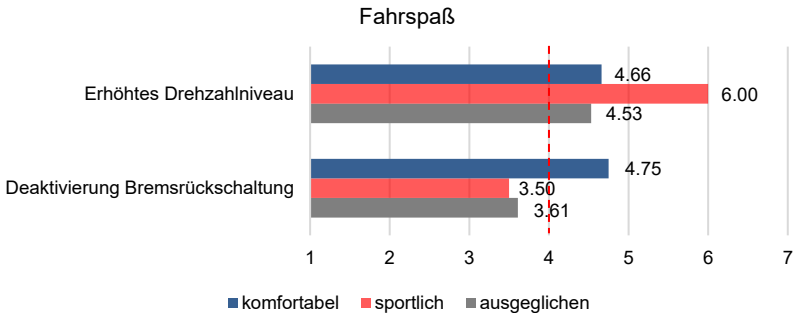


Abbildung 6.8: Einfluss der Fahrweise auf den gesamtheitlich wahrgenommenen Fahrspaß in Abhängigkeit unterschiedlicher Datenstände [Skala von 1 bis 7; gestrichelte Linie bei 4 entspricht keine Änderung wahrgenommen] (Köber et al., 2020)

Es ist ersichtlich, dass ein potenziell sportlicherer Datenstand, wie beispielsweise erhöhtes Drehzahlniveau, bei einer sportlichen Fahrweise in einer deutlichen Steigerung des Fahrspaßes resultiert. Umgekehrt resultiert ein potenziell komfortablerer Datenstand (z.B. Deaktivierung Bremsrückschaltung) bei sportlicher Fahrweise in einer negativeren Wahrnehmung, wohingegen dieser Datenstand bei einer komfortablen Fahrweise wesentlich positiver wahrgenommen wird. Es kann somit konstatiert werden, dass die subjektive Wahrnehmung der jeweiligen Datenstände maßgeblich durch die gewählte Fahrweise der Probanden beeinflusst wird. Erst wenn die intrinsische Motivation des Fahrers hinsichtlich der Fahrweise mit der Orientierung des Datenstandes harmoniert, wird der Fahrer Fahrspaß verspüren und diesen Datenstand positiver bewerten. Diese Erkenntnis bestätigt die von Engeln et al. (2008) im Rahmen des „Joy and Convenience“ Modells aufgestellte Theorie, wie eine spaßfördernde bzw. -mindernde Wahrnehmung einer Aktivität entsteht.

Folglich gilt es, die Fahrweise bei der Modellerstellung zu berücksichtigen, was Köber et al. (2020) bereits diskutiert haben. Es wird an dieser Stelle die Hypothese aufgestellt, dass die Plausibilität der Ergebnisse der Probandenstudie unter Berücksichtigung der Fahrweise deutlich gesteigert werden kann.

6.2 Modellentwicklung zur Prognose der subjektiven Wahrnehmung

In diesem Kapitel wird dargestellt, wie ein Modell zur Prognose der subjektiven Wahrnehmung entwickelt werden kann. Zunächst wird eine messdatenbasierte Methode zur Klassifizierung der Fahrweise vorgestellt, wodurch eine wesentlich exaktere Interpretation der subjektiven Wahrnehmungen der Probandenstudie möglich ist. Im nächsten Schritt wird erläutert, wie mittels numerischer Simulationen objektive Kennwerte für die jeweiligen Datenstände generiert werden. Basierend auf den subjektiven und objektiven Daten wird anschließend eine Korrelationsanalyse durchgeführt, um die relevanten Messsignale zur Prognose der subjektiven Wahrnehmung zu identifizieren. Abschließend werden diese Informationen genutzt, um ein geeignetes Modell zur Prognose der subjektiven Wahrnehmung zu trainieren.

6.2.1 Identifikation der Fahrweise und deren Einfluss auf die subjektive Bewertung

Wie bereits in Kapitel 6.1.3 dargestellt, ist eine Berücksichtigung der Fahrweise zur Interpretation der Ergebnisse der Probandenstudie unabdingbar. Wenngleich die Probanden ihre Fahrweise bereits im Rahmen der Probandenstudie selbstständig eingeschätzt haben, kann diese Information nicht direkt für die Klassifizierung der subjektiven Wahrnehmung genutzt werden, da mehr als die Hälfte der Versuchsfahrten (84 von 145) als ausgeglichen beschrieben wurden. Eine Gewichtung der Ergebnisse ist basierend auf dieser subjektiven Einschätzung somit nicht zielführend. In der Literatur existiert eine Vielzahl an Ansätzen, welche eine Quantifizierung der Fahrweise ermöglichen. Eine Klassifizierung der Fahrweise basierend auf dieser Quantifizierung ist gegenwertig jedoch noch nicht hinreichend genau möglich, da aktuelle Ansätze die berechnete Fahrweise zur Klassifizierung lediglich mit Kennwerten eines zuvor parametrisierten Kennfeldes vergleichen (Kuhn, 1994; Kurz et al., 1999). Somit werden Informationen beispielsweise über die Beschaffenheit des Streckenprofils nicht berücksichtigt. Folglich gilt es zunächst einen geeigneten Ansatz zur Quantifizierung der Fahrweise zu wählen und darauf aufbauend eine neuartige Methode zur Klassifizierung zu entwickeln. Wie bereits im Stand der Forschung dargestellt, berechnen moderne Getriebesteuerungen bereits eine Sportlichkeit, um beispielsweise Schaltpunkte zu verschieben. Diese Berechnung beruht typischerweise auf messbaren Größen wie Fahrpedalgradient, Querschleunigung, Längsbeschleunigung und -verzögerung. Bei dieser messbaren Sportlichkeit der Getriebesteuerung handelt es sich jedoch um eine aktuell identifizierte Sportlichkeit. Um eine Aussage über die gesamte Fahrweise FW_{Ges} in einem betrachteten Zeit- oder Streckenabschnitt zu erhalten, wird für diesen Abschnitt das

arithmetische Mittel der gemessenen Sportlichkeit gebildet. Die damit generierten Werte zu FW_{Ges} gilt es im nächsten Schritt hinsichtlich ihrer Aussagekraft zu plausibilisieren. Dazu wird das am Markt erhältliche Tool „SPA“ der Firma AVL herangezogen, welches vornehmlich zur Objektivierung applikationsabhängiger Fahrbarkeitsthemen genutzt wird. Im Rahmen der Objektivierung berechnet AVL SPA ebenfalls eine Fahrweise über die gesamte Messung. Zur Plausibilisierung der errechneten FW_{Ges} sollen die Ergebnisse der Sportlichkeit von AVL SPA genutzt werden, was in Abbildung 6.9 dargestellt ist. Unter der Berücksichtigung des Korrelationskoeffizienten ($R = 0,91$) wird ersichtlich, dass ein starker Zusammenhang zwischen den beiden Fahrweisen besteht (Quiroga Mayorga, 2021)⁵. Der Ansatz zur Quantifizierung der Fahrweise als gemittelter Wert der getriebeinternen Sportlichkeit in einem betrachteten Zeit- oder Streckenabschnitt kann folglich als valide beschrieben werden und wird für den weiteren Verlauf der Arbeit herangezogen. Auf die Verwendung separater Tools wie AVL SPA kann somit verzichtet werden.

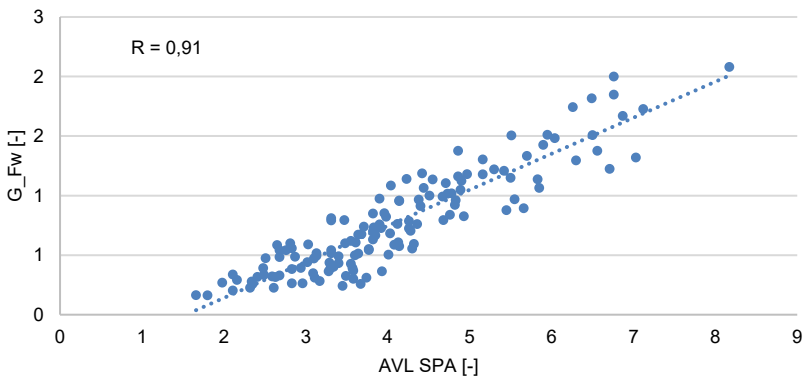


Abbildung 6.9: Plausibilisierung der berechneten, getriebebasierten Gesamtfahrweise FW_{Ges} mittels AVL SPA (Quiroga Mayorga, 2021)⁵

Die berechnete FW_{Ges} gilt es im nächsten Schritt in einen Kontext zu setzen, so dass eine qualitative Aussage zur Fahrweise getroffen werden kann. Ein wesentlicher Aspekt zur Interpretation dieses Wertes ist die Beschaffenheit des Streckenprofils, welches für die Analyse der Fahrweise betrachtet wird.

⁵ Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

Es ist evident, dass bei Fahrten auf beispielsweise Überlandstraßen wesentlich höhere FW_{Ges} erzielt werden können, als bei Fahrten durch die Innenstadt. Folglich müssen die Werte, welche auf den beispielhaft genannten Überlandstraßen erzielt werden, anders bewertet werden als die Werte einer Innenstadtfahrt. So kann ein niedriger FW_{Ges} -Wert innerorts bereits auf eine sportliche Fahrweise hindeuten, wohingegen dieser außerorts tendenziell komfortabler zu bewerten ist. Ursächlich für diese variierende Bewertung sind die gegebenen Grenzen eines Streckenprofils, welche durch Faktoren wie StVO, Verkehrsaufkommen oder auch physikalische Grenzen definiert sind. Basierend auf diesen Grenzen leitet sich eine maximale sportliche Fahrweise für den betrachteten Streckenabschnitt ab, welche als Bezugspunkt zur Interpretation des FW_{Ges} -Wertes genutzt wird. Zur Bestimmung der maximalen Sportlichkeit wird das bereits vorgestellte Simulationsmodell SimEnv herangezogen. Die Strecke der Probandenstudie inklusive deren Geschwindigkeitsbegrenzungen gemäß StVO wird als simulationsfähiges Streckenmodell aufbereitet. Als Fahrermodell wird für diese Untersuchung ein etabliertes Modell aus dem Motorsport verwendet, welches so parametrisiert ist, dass das Fahrzeug sich stets an den maximalen, physikalischen Grenzen hinsichtlich Längs- und Querbeschleunigung bewegt. Anhand des resultierenden Simulationsergebnisses, welches ebenfalls die getriebeinterne Sportlichkeit als Messgröße enthält, kann analog der Methodik für FW_{Ges} eine maximale Fahrweise FW_{Max} bestimmt werden. Dieser Wert entspricht 100% Sportlichkeit und beträgt bei der Strecke der Probandenstudie 0,284 auf einer Skala von 0 bis 1. Die sportlichste Fahrt der gesamten Studie weist einen FW_{Ges} von 0,2262 auf und ist somit bereits sehr nah an dem maximalen Wert. Aus Gründen der Vereinfachung wird deshalb der maximal gemessene Wert der Probandenstudie als obere Grenze der Strecke für die weitere Betrachtung herangezogen.

In Abbildung 6.10 ist die Verteilung der subjektiven Einschätzungen zur Fahrweise über der normierten Gesamtfahrweise FW_{Ges_n} dargestellt. Die Normierung resultiert daraus, dass FW_{Max} den Wert 1 annimmt und alle anderen Werte innerhalb dieser Grenzen $[0; FW_{Max}]$ skaliert werden. Insbesondere bei der subjektiven Einschätzung zur sportlichen Fahrweise ist ersichtlich, dass diese einer sehr großen Streuung unterliegen. Dennoch können diese Informationen genutzt werden, um basierend auf den Mittelwerten der drei Klassen (komfortabel, ausgeglichen, sportlich) Konfidenzintervalle abzuleiten. Basierend auf einem 99,85% Konfidenzniveau ergeben sich folgende Werte für FW_{Ges_n}

- $0,09 \leq \text{komfortabel} \leq 0,21$
- $0,26 \leq \text{ausgeglichen} \leq 0,39$
- $0,39 \leq \text{sportlich} \leq 0,76$

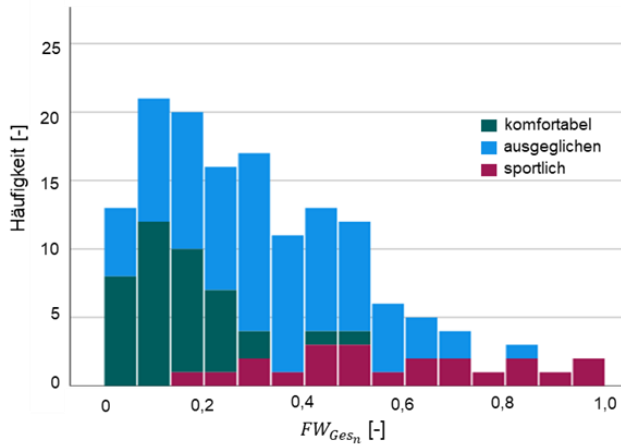


Abbildung 6.10: Häufigkeitsverteilung der subjektiv klassifizierten Fahrweise in Abhängigkeit der normierten Gesamtfahrweise FW_{Ges_n} (Quiroga Mayorga, 2021)⁶

Da die beschriebenen Intervalle den gesamten Parameterraum nicht vollumfänglich abdecken, wird das Konfidenzintervall für „ausgeglichen“ als Referenzgröße herangezogen. Alle Werte, welche kleiner als dieses Intervall sind, werden folglich als „komfortabel“ klassifiziert. Umgekehrt gilt, dass alle Werte, welche größer als dieses Intervall sind, als „sportlich“ klassifiziert werden. Demnach ergibt sich folgende Definition für die drei Klassen (Quiroga Mayorga, 2021)⁶:

- $0 \leq \text{komfortabel} < 0,26$
- $0,26 \leq \text{ausgeglichen} \leq 0,39$
- $0,39 < \text{sportlich} \leq 1$

Infolge der Normierung ist diese Definition auf alle Strecken übertragbar, da lediglich ein neuer Maximalwert definiert werden muss, welcher als Bezugspunkt dient. Unter Berücksichtigung dieser Klassendefinition verschieben sich die Anteile der Fahrweisen erheblich, was eine gewichtete Auswertung der Probandenstudie ermöglicht. So wurden initial 84 von 145 Fahrten durch die Probanden als „ausgeglichen“ beschrieben und infolge der neuen Definition liegen nur noch 28 Fahrten innerhalb dieses Intervalls.

⁶ Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

Im nächsten Schritt gilt es zu untersuchen, wie sich diese Informationen auf die Ergebnisse der Probandenstudie auswirken. Es wird angenommen, dass eine sportliche Fahrweise nicht nur dazu führt, dass ein sportlicher Datenstand positiver wahrgenommen wird, sondern auch, dass ein Proband das Konstrukt Sportlichkeit und alle dazugehörigen Items exakter bewerten kann als die Items des Konstruktes Komfort. Gleiches gilt entsprechend bei komfortabler Fahrweise und komfortablen Datenständen. Demnach muss die subjektive Wahrnehmung der einzelnen Konstrukte und deren Items in Abhängigkeit der Fahrweise unterschiedlich gewichtet werden. Die subjektive Bewertung eines potenziell komfortablen Datenstandes bei komfortabler Fahrweise gilt es stärker zu gewichten als bei sportlicher Fahrweise und umgekehrt. Von einer Gewichtung bei ausgeglichener Fahrweise kann entsprechend abgesehen werden.

Da die Fahrweisen innerhalb ihrer Klassen⁷ ebenfalls Unterschiede aufweisen (z.B. gerade noch sportlich bis hin zu sehr sportlich), gilt es, diese Information ebenfalls zu berücksichtigen. Um eine Aussage zur Intensität der Fahrweise für die Gewichtungsfaktoren zu erhalten, wird die Fahrweise innerhalb der Grenzen des jeweiligen Klassenintervalls erneut normiert. Es resultiert eine normierte, klassenabhängige Fahrweise (FW_{S/K_n}) zwischen 0 und 1, wobei sowohl die maximal komfortable als auch die maximal sportliche Fahrweise dem Wert 1 entspricht. Die Gewichtungsfaktoren ergeben sich in Abhängigkeit von FW_{S_n} bzw. FW_{K_n} und der zu bewertenden Konstrukte gemäß Tabelle 6.4. Es ist ersichtlich, dass der resultierende Gewichtungsfaktor GF Werte zwischen 0 und 2 annehmen kann und somit einen erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse hat.

Tabelle 6.4: Berechnung der Gewichtungsfaktoren in Abhängigkeit der Fahrweise und der zu messenden Konstrukte [GF = Gewichtungsfaktor; FW_{K_n} = normierte Fahrweise Komfort; FW_{S_n} = normierte Fahrweise Sport]

Fahrweise	Konstrukte	
	Komfort	Sportlichkeit
komfortabel	$GF = 1 + FW_{K_n}$	$GF = 1 - FW_{K_n}$
sportlich	$GF = 1 - FW_{S_n}$	$GF = 1 + FW_{S_n}$

Unter Berücksichtigung der fahrweiseabhängigen Gewichtungsfaktoren kann die Probandenstudie neu analysiert werden. Die resultierenden Ergebnisse sind in Ab-

⁷ Lediglich gültig für komfortable und sportliche Fahrweise

bildung 6.11 dargestellt, wobei die initiale Skala (1 bis 7) aus Gründen der einfacheren Interpretation in eine -3 bis +3 Skala überführt wurde. Dementsprechend entspricht eine Bewertung von 0 einer nicht-wahrnehmbaren Veränderung zum Seriendatenstand.

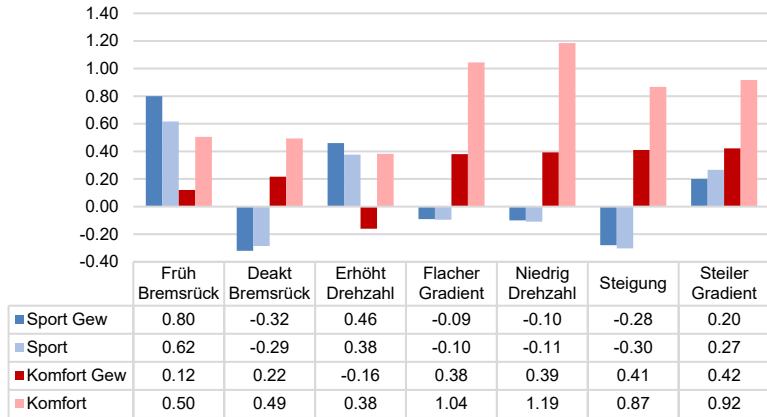


Abbildung 6.11: Gewichtete Ergebnisse der Probandenstudie in Abhängigkeit der Fahrweise [Skala von -3 bis +3; 0 entspricht keine Änderung wahrgenommen]

Es ist ersichtlich, dass die gewichtete Bewertung für das Konstrukt „Sportlichkeit“ keine signifikante Veränderung der Ergebnisse erzielt. Diese Erkenntnis ist als plausibel zu bewerten, da die Ergebnisse bereits ohne Gewichtung als plausibel eingeschätzt wurden. Für das Konstrukt „Komfort“ ist der Einfluss jedoch wesentlich signifikanter. So wird beispielsweise der Datenstand mit einem erhöhten Drehzahlniveau im Vergleich zum Seriendatenstand negativer bewertet. Dies entspricht vollumfänglich der Erwartungshaltung und macht deutlich, dass die Berücksichtigung der Fahrweise zur Analyse der Probandenstudie valide ist. Auch die potenziell komfortableren Datenstände wie Steigung oder niedrige Drehzahl werden in ihrer Komfortbewertung deutlich abgeschwächer beschrieben, was ebenfalls als plausibel zu bewerten ist, da die Anpassung der Datenstände lediglich minimal war. Einzig die Ergebnisse für die Datenstände „frühe Bremsrückschaltung“ und „Steiler Drehzahlgradient“ entsprechen nicht der Erwartungshaltung hinsichtlich der Komfortwahrnehmung. Da es sich jedoch lediglich um eine initiale Erwartungshaltung handelt und alle anderen Ergebnisse der Studie als plausibel beschrieben werden können, sind diese Abweichungen als akzeptabel zu bewerten.

6.2.2 Ableitung singulärer Kennwerte aus zeitabhängigen Simulationsergebnissen

Um eine Prognose zur subjektiven Wahrnehmung, basierend auf Simulationsergebnissen, treffen zu können, sollen Modelle des maschinellen Lernens verwendet werden. Für das notwendige Modelltraining müssen, neben den subjektiven Ergebnissen der Probandenstudie, auch die objektiven Daten der einzelnen Datenstände berücksichtigt werden. Zur Generierung dieser objektiven Daten sollen Simulationen genutzt werden, so dass eine direkte Vergleichbarkeit der Datenstände ermöglicht wird. Es ist evident, dass reale Messdaten dafür nicht nutzbar sind, da unterschiedliche Fahrweisen, Verkehrssituationen und eventuelle Störfaktoren zu individuellen, nicht direkt vergleichbaren Resultaten führen.

Als Simulationsmodell soll an dieser Stelle erneut das bereits mehrfach in dieser Arbeit verwendete SimEnv Berücksichtigung finden. Als Eingangsgröße für die Simulation dient das Streckenprofil der Probandenstudie. In Abbildung 6.12 sind beispielhaft die Simulationsergebnisse der Drehzahlverläufe der Datenstände „Reduziertes Drehzahlniveau“ und „Seriendatenstand“ dargestellt.

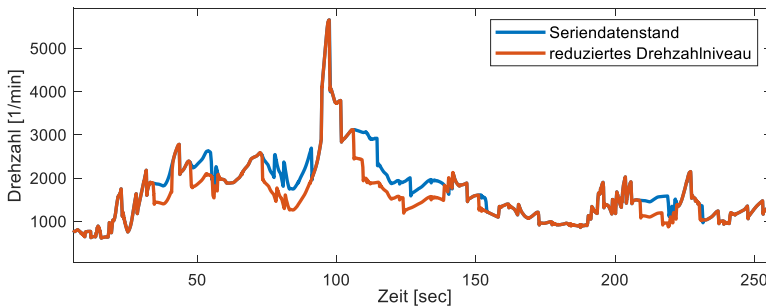


Abbildung 6.12: Simulationsergebnisse zum Vergleich der Drehzahlverläufe unterschiedlicher Datenstände

Gemäß den initialen Vorgaben zur Probandenstudie, bei welcher die wahrgenommenen Änderungen im Vergleich zum Seriendatenstand bewertet werden sollten, gilt es, die resultierenden Abweichungen der Kurvenverläufe in signifikante Kennzahlen zu überführen. Dabei müssen die Abweichungen der zeitabhängigen Kurvenverläufe als singuläre Kennzahlen ausgedrückt werden, damit eine nachfolgende Korrelationsanalyse und Modellbildung mit den statistischen Ergebnissen der Probandenstudie erfolgen kann. Zur Übertragung der Abweichungen von zeitabhängigen Daten in singuläre Kennwerte stellen Köber et al. (2020) bereits einen ersten

Ansatz vor, wobei zunächst ein Delta aus beiden Kurvenverläufen gebildet wird und aus diesem dann ein Effektivwert⁸ berechnet wird. Formel 6.1 stellt diesen Zusammenhang (Ansatz 1) für zeitdiskrete Signale dar.

$$RMS_1\{x(n)\} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [\Delta x(n)]^2} \quad 6.1$$

Köber et al. (2020) präferieren den Effektivwert gegenüber dem arithmetischen Mittel, da positive und negative Werte sich nicht gegenseitig aufheben und deren Einfluss auf die subjektive Wahrnehmung entsprechend berücksichtigt wird. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, zunächst die individuellen Effektivwerte zu berechnen und aus diesen nachfolgend ein Delta zu berechnen, was in Formel 6.2 ebenfalls für zeitdiskrete Signale dargestellt ist (Ansatz 2)

$$RMS_2\{x(n)\} = \Delta \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n)^2} \quad 6.2$$

Köber et al. (2020) stellen bereits in Ausblick, dass sich weitere Möglichkeiten zur Berechnung der singulären Kennwerte über Analysen im Frequenzbereich ergeben können. Folgt man dem Satz von Parseval, so kann der RMS sowohl im Frequenz- als auch im Zeitbereich berechnet werden, wobei $X(m) = FFT\{x(n)\}$ ist (Oppenheim & Schaffer, 2014).

$$RMS_2\{x(n)\} = \Delta \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n)^2} = \Delta \sqrt{\frac{1}{N^2} \sum_{m=1}^N |X(m)|^2} \quad 6.3$$

Da die Summe der quadrierten Fourier-Transformierten die Gesamtenergie eines Signals darstellt, kann das Delta der Effektivwerte aus Ansatz 2 auch als Energiedifferenz interpretiert werden (Sundararajan, 2018).

In Abbildung 6.13 werden die erzielten singulären Kennzahlen der beiden Ansätze anhand unterschiedlicher Datenstände miteinander verglichen. Es wird ersichtlich, dass Ansatz 1 (Effektivwert der Differenz) zur Bestimmung der singulären Kennzah-

⁸ engl. Root Mean Square (RMS)

len prinzipiell in der Lage ist, die Stärke der Abweichung zweier Signale zu beschreiben. Es kann jedoch nicht identifiziert werden, ob die Abweichung positiv oder negativ ist, was aber für die anschließende Korrelation mit den subjektiven Ergebnissen der Probandenstudie essenziell ist. Diese Möglichkeit wird durch Ansatz 2 (Delta der Effektivwerte) geboten. Da mit diesem Ansatz nicht nur eine Aussage zur Ausprägung der Abweichung und dessen Orientierung (positiv oder negativ) getroffen werden kann, sondern auch die Energie der Signale berücksichtigt wird, wird dieser Ansatz im Rahmen der Arbeit weiterverfolgt. Dabei ist es irrelevant, ob es sich um instationäre Signale (z.B. Drehzahl) oder stationäre Signale (z.B. Gangverlauf) handelt, da der Ansatz zur Bestimmung der singulären Kennzahlen aus zeitabhängigen Daten universell einsetzbar ist.

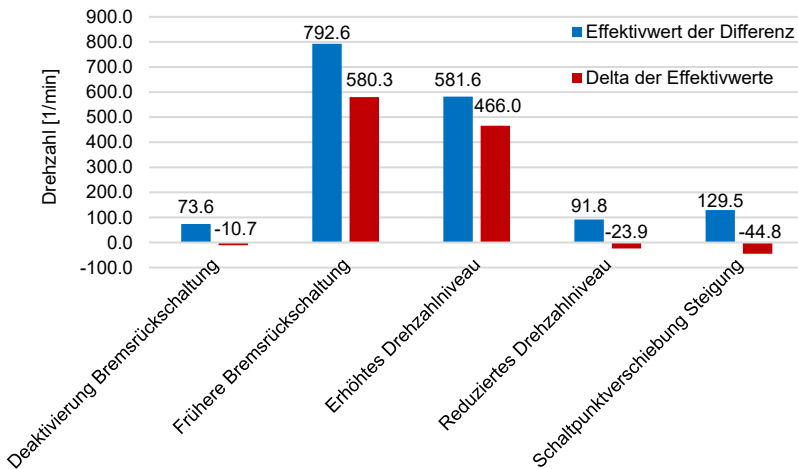


Abbildung 6.13: Vergleich der singulären Kennzahlen in Abhängigkeit unterschiedlicher Datenstände in Bezug auf den Seriidatenstand

6.2.3 Modellbildung zur Prognose der subjektiven Wahrnehmung

Basierend auf den gewichteten, fahrweiseabhängigen Ergebnissen der Probandenstudie (subjektive Daten) und den singulären Kennzahlen der Simulationsergebnisse (objektive Daten) wird in diesem Kapitel dargestellt, wie die finale Modellbildung zur Prognose der subjektiven Wahrnehmung von divergierenden

Datenständen erfolgt. Es ist davon auszugehen, dass von den ca. 2400 Signalen der Schaltstrategie, welche durch die Simulation ausgegeben werden, nicht alle einen direkten Einfluss auf die subjektive Wahrnehmung haben. Um bei der Modellbildung lediglich relevante Signale zu berücksichtigen und somit den Rechenaufwand für das Modelltraining zu reduzieren, wird eine initiale Korrelationsanalyse durchgeführt, welche den Zusammenhang zwischen den subjektiven und objektiven Daten untersuchen soll.

Um der Fahrweise auch auf Seiten der objektiven Daten Rechnung zu tragen, wird die Simulation für jeden Datenstand mit drei ausgewählten Geschwindigkeitsprofilen auf der Strecke der Probandenstudie durchgeführt. Diese entsprechen einer komfortablen, ausgeglichenen und sportlichen Fahrweise und dienen dem bereits in dieser Arbeit eingeführten Fahrermodell als Führungsgröße. Um die Menge an Daten für die Korrelationsanalyse zu vergrößern, wird nicht nur die Veränderung der sieben Datenstände zum Seriendatenstand berücksichtigt, sondern auch der Datenstände untereinander, wodurch sich 28 Kombinationen von subjektiven und objektiven Daten für jede Fahrweise ergeben. In Summe resultieren demnach 84 zu korrelierende Kombinationen für jedes Signal der Simulation. In Abbildung 6.14 ist in einem Streudiagramm beispielhaft der Zusammenhang der simulierten Motordrehzahl und der wahrgenommenen Sportlichkeit aller Kombinationen dargestellt. Erwartungsgemäß nimmt die wahrgenommene Sportlichkeit mit einem steigenden Drehzahlniveau zu. Mit einem Korrelationskoeffizienten r nach Pearson von 0,816 entspricht dies gemäß der Interpretation von Cohen (2013) einer starken Korrelation. Für die weitere Betrachtung werden lediglich Signale berücksichtigt, welche nach Cohen (2013) eine starke Korrelation⁹ aufweisen. Für das Konstrukt Sportlichkeit trifft dies auf 250 und für Komfort auf 130 Signale zu.

⁹ $r \geq 0,5$

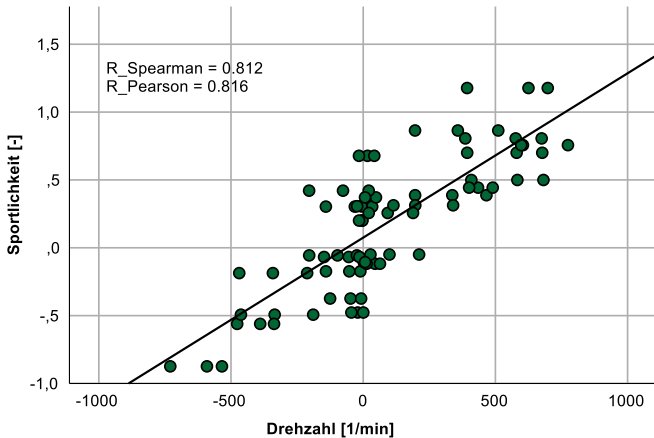


Abbildung 6.14: Korrelation nach Spearman und Pearson zwischen der wahrgenommenen Sportlichkeit und der Motordrehzahl (in Anlehnung an Quiroga Mayorga, 2021)¹⁰

Da das Getriebesteuergerät und damit die Simulation auch Signale berechnet, welche, infolge der definierten Rahmenbedingungen der Probandenstudie, keinen Einfluss auf die Wahrnehmung der Probanden hatten (z.B. Freigabe manueller Gänge), gilt es diese Signale, trotz starker Korrelation, zu eliminieren. Darüber hinaus gibt es eine Vielzahl an Signalen, welche innerhalb unterschiedlicher Funktionen der Schaltstrategie verarbeitet werden, jedoch denselben Zusammenhang beschreiben. Ein Indikator hierfür sind Signale mit identischem Korrelationskoeffizienten, welche es ebenfalls zu eliminieren gilt. Die verbleibenden Signale wurden abschließend im Rahmen eines Experten-Workshops plausibilisiert, um Scheinkorrelationen zu vermeiden und sicherzustellen, dass ein kausaler Zusammenhang zu den Konstrukten besteht. Es verbleiben 42 Signale für das Konstrukt „Sportlichkeit“ und 24 Signale für das Konstrukt „Komfort“, welche für die Modellbildung herangezogen werden. Die vollständige Signalliste ist Anhang E zu entnehmen.

Da die Berücksichtigung der Differenzen der Datenstände untereinander und die damit verbundene Vergrößerung der Datenmenge sich bereits im Rahmen der Korrelationsanalyse als vorteilhaft erwiesen hat, wird dieser Ansatz auch bei der Modellbildung verfolgt. Demnach ergibt sich eine 42x84 Datenmatrix für das Training

¹⁰ Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

des Modells zur Prognose der Sportlichkeit und eine 24x84 Datenmatrix für das Training des Modells zur Prognose des Komforts.

Wie im Stand der Forschung (vgl. Kap. 2.4.2.2) bereits dargestellt, gibt es in der Literatur eine Vielzahl an potenziellen Modellen zur Prognose der subjektiven Wahrnehmung. Köber et al. (2020) konnten zeigen, dass parametrische Modelle mittels multipler Regression valide Prognosen zur subjektiven Wahrnehmung in Abhängigkeit unterschiedlicher Getriebedatenstände treffen können. Dieser Ansatz soll demnach in vorliegender Arbeit zunächst Anwendung finden. Als nicht-parametrische Modelle haben sich Decision Trees bewährt. Um deren Prognosegüte weiter zu steigern, werden diese miteinander zu Boosted Decision Trees kombiniert. Da Boosted Decision Trees eine sehr hohe Prognosegüte bei großer Flexibilität der Input-Daten aufweisen (vgl. Kap. 2.4.2.2), werden diese ebenfalls berücksichtigt und deren Ergebnisse mit denen der parametrischen Modelle verglichen (Joshi, 2020).

Im Rahmen der Modellerstellung mittels multipler Regression führen Köber et al. (2020) bereits die Problematik der Multikollinearität an, welche die Abhängigkeit der Signale untereinander beschreibt. Mit zunehmender Multikollinearität wird das Verfahren zur Schätzung des Regressionskoeffizienten instabiler und damit die Prognose ungenauer. Ein Indikator zur Identifikation von Multikollinearität ist der VIF, welcher ebenfalls bereits im Stand der Forschung eingeführt wurde. Da einzelne der vorliegenden 24 bzw. 42 Regressoren einen VIF größer als 10 aufweisen, was nach Wooldridge (2013) als problematisch zu bewerten ist, sollten diese eliminiert werden. Da die Eliminierung jedoch in einem Informationsverlust resultiert, wird, konträr zum Ansatz von Köber et. al, eine weitere Methode zur Reduzierung der Multikollinearität herangezogen. Die PCA, welche auch im Stand der Forschung vorgestellt wurde, extrahiert Informationen, indem sie korrelierende Regressoren in eine kleinere Anzahl von nicht korrelierenden, orthogonalen Variablen (den Principal Components) überführt. Nach der PCA wurden für das Modell zur Prognose des Komforts die ersten zwei PC ausgewählt, welche 90,1 % der Varianz der Regressoren erklären (Quiroga Mayorga, 2021)¹¹. Für das Modell zur Prognose der Sportlichkeit wurden drei PC mit einer Varianz von 91,1% gewählt. Mit diesen wurde das Modelltraining mittels Kreuzvalidierung durchgeführt, wobei infolge der geringen Datenmenge auf eine Holdout-Validierung verzichtet wurde. Abbildung 6.15 zeigt die Ergebnisse des Trainings mittels multipler Regression für die Modelle Komfort und Sportlichkeit. Um eine Vergleichbarkeit der Modelle zu ermöglichen, wird für jedes Modell der RMSE berechnet. Dieser beträgt 0,21 für Sportlichkeit und 0,23 für Komfort.

¹¹ Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

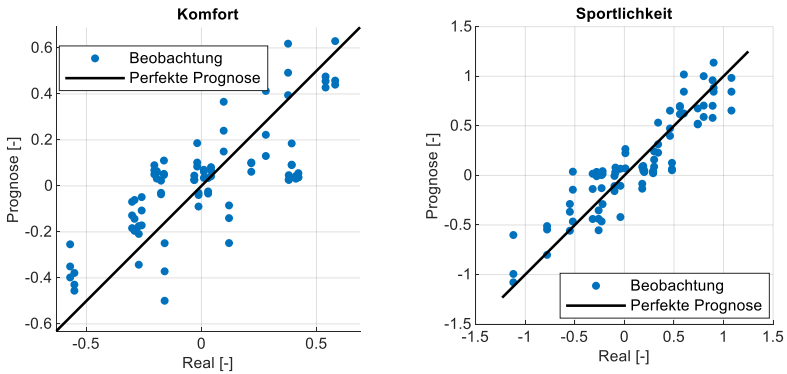


Abbildung 6.15: Modelltraining mittels multipler Regression für Komfort und Sportlichkeit [$RMSE_{Komfort}=0,21$; $RMSE_{Sportlichkeit}=0,23$] (in Anlehnung an Quiroga Mayorga, 2021)¹²

Im Vergleich zur multiplen Regression kann das Training der nicht-parametrischen Modelle mit allen Regressoren ohne zusätzliche Informationsverluste durchgeführt werden, was die angesprochene Modellflexibilität unterstreicht. In Abbildung 6.16 sind die Ergebnisse des Modelltrainings mittels Boosted Decision Trees dargestellt. Anhand der RMSE ist ersichtlich, dass sich auch die hohe Prognosegüte infolge der Kombination einzelner Decision Trees bestätigt. Es kann folglich konstatiert werden, dass die Modelle, welche mittels Boosted Decision Trees generiert wurden, in der Lage sind, präzisere Prognosen hinsichtlich der subjektiven Wahrnehmung in Abhängigkeit divergierender Datenstände zu treffen. Aufgrund der erhöhten Flexibilität und der damit verbundenen Berücksichtigung aller Signale ohne Informationsverlust sowie der gesteigerten Prognosegüte werden die Modelle der Boosted Decision Trees für die weitere Betrachtung herangezogen.

¹² Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

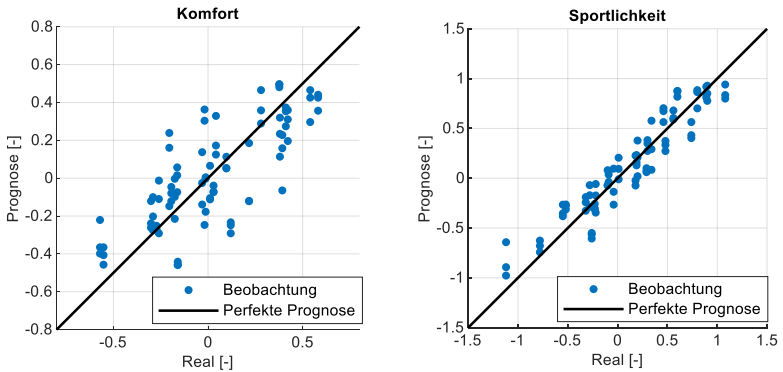


Abbildung 6.16: Modelltraining mittels Boosted Decision Trees für Komfort und Sportlichkeit [$RMSE_{Komfort}=0,19$; $RMSE_{Sportlichkeit}=0,175$] (in Anlehnung an Quiroga Mayorga, 2021)¹³

6.3 Validierung und Identifikation von Grenzen

Im vorherigen Kapitel wurden für die einzelnen Modelle der RMSE der Kreuzvalidierung bestimmt, welcher ein gutes Maß für die zu erwartende Prognosegüte des Modells ist. Eine Aussage zum „realen“ Fehler des Modells ist dennoch kaum möglich, da dafür Daten benötigt werden, welche nicht für das Training des Modells verwendet wurden. Um diese zu erheben, werden zunächst neue Probandenstudien mit unterschiedlichen Fahrzeugen und Datenständen durchgeführt. Die subjektiven Ergebnisse, welche im Rahmen der neuen Probandenstudien generiert werden, werden anschließend mit den objektiven Modellprognosen verglichen. Auf Basis dessen wird die Prognosegüte des Modells bestimmt und Grenzen des Modells daraus abgeleitet.

6.3.1 Erhebung von Validierungsdaten

Ziel der Validierung ist es, unter Berücksichtigung des RMSE, die Prognosegüte des Modells zu bestimmen. Dafür können typischerweise Daten herangezogen werden,

¹³ Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

welche von der initialen Probandenstudie und den daraus resultierenden Trainingsdaten ausgespart wurden (sog. Hold-Out Validierung). Alternativ dazu können im Rahmen einer neuen und unabhängigen Probandenstudie separate Daten zur Validierung generiert werden. Dies bietet den Vorteil, dass die Prognosegüte des Modells auch für abweichende Einflussfaktoren (z.B. anderer Probandenpool oder andere Fahrzeuge) untersucht werden kann und die Grenzen des Modells somit besser identifiziert werden können. Aus diesem Grund wird dieser Validierungsansatz im Rahmen der vorliegenden Arbeit gewählt. Bei der Planung der neuen Probandenstudien zur Erhebung der Validierungsdaten müssen zunächst diejenigen Faktoren analysiert werden, welche einen Einfluss auf die Modellprognose haben und quantifizierbar sind. Als quantifizierbare Faktoren werden alle diejenigen bezeichnet, welche nicht durch unvorhersehbare und nicht planbare Einflüsse wie Wetter oder Verkehr die Fahrweise oder Wahrnehmung beeinflussen. Dazu zählen:

- Getriebedatenstand
- Fahrzeug
- Streckenprofil
- Probanden

Um die Probandenstudie in einem vertretbaren Rahmen zu halten, sollen ausgewählte Einflussfaktoren konstant gehalten werden. So erfolgt die Wahl der Teilnehmer aus demselben Probandenpool der initialen Probandenstudie. Die Anzahl der Probanden wird auf fünf beschränkt, da dies im Kontext der Modellvalidierung und des dafür benötigten zeitlichen Umfangs als hinreichend genau angesehen werden kann. Ebenso wird das Streckenprofil von der initialen Studie übernommen, da sich dieses hinsichtlich der Vielfalt an Streckenabschnitten bei vertretbarer Länge und Verkehrsaufkommen bereits bewährt hat. Demnach verbleiben das Fahrzeug und der Getriebedatenstand als variable Einflussfaktoren der Validierungsstudie. Als Fahrzeug dient, wie in der initialen Probandenstudie, ein Porsche 911 Carrera der Produktgeneration 992, jedoch mit einer stärkeren Motorisierung (Derivat GTS; 480PS) um die Modellvalidität innerhalb einer Produktlinie zu untersuchen. Um die Modellgüte anderer Produktlinien zu untersuchen, wird ein weiteres Fahrzeug (Porsche Cayenne Turbo der Produktgeneration E3) für die Probandenstudie berücksichtigt. Dieses Fahrzeug zeichnet sich dadurch aus, dass es nicht nur einem anderen Fahrzeugsegment zuzuordnen ist (SUV), sondern auch, dass es ein anderes Motor- und Getriebekonzept¹⁴ im Vergleich zum Porsche 911 Carrera aufweist. Bei der Wahl der Datenstände werden drei unterschiedliche Ansätze verfolgt. Einerseits soll ein Datenstand bewertet werden, welcher bereits im Rahmen der initialen Pro-

¹⁴ V8-Frontmotor und 8-Gang Wandler-Automatik Getriebe

bandenstudie gefahren wurde, um die Ergebnisse der neuen Studie zu plausibilisieren. Dazu wird der Datenstand „Schaltpunktverschiebung bei Steigung“ genutzt. Für den zweiten Ansatz werden neue Datenstände als Kombination bestehender Varianten gewonnen. Dazu wird der Datenstand „frühere Bremsrückschaltung“ mit dem „erhöhtes Drehzahlniveau“ kombiniert und der Datenstand „deaktivierte Bremsrückschaltung“ wird mit dem „reduzierten Drehzahlniveau“ kombiniert. Der dritte Ansatz stellt eine Extrapolation des Datenstandes „erhöhtes Drehzahlniveau“ dar, wodurch das durchschnittliche Drehzahlniveau weiter angehoben wird. Infolge dieser Dreifaltigkeit kann eine Aussage zur Prognosegüte des Modells bei bekannten Datenständen, neuen Datenständen innerhalb initialer Intervallgrenzen sowie neuen Datenständen außerhalb dieser Grenzen getroffen werden. Da die Porsche-Schaltstrategie produktlinienübergreifend ist, können die beschriebenen Datenstände, ausgehend von den individuellen Seriidatenständen, konsistent erzeugt werden. Es resultieren somit für jedes Fahrzeug vier Datenstände. Unter Berücksichtigung der Normierungsfahrten mit dem Seriidatenstand, analog der initialen Probandenstudie, resultieren folglich sechs Fahrten je Proband und Fahrzeug. Der ursprüngliche Fragebogen aus der initialen Probandenstudie wird für die Validierungsstudie übernommen, da sich die item-basierte Bewertung und die dadurch generierten Ergebnisse bestätigt haben. Ebenso bietet die Übernahme des Fragebogens den Vorteil, dass die entwickelte Methode zur gewichteten Bewertung der subjektiven Wahrnehmung übernommen werden kann.

6.3.2 Analyse der Prognosegüte und Identifikation der Grenzen

Die Auswertung der Validierungsstudie erfolgt analog der initialen Probandenstudie. Somit wird, basierend auf den Bewertungen der Items und deren Gewichtung, für jeden Fahrer zunächst eine subjektive Bewertung je Konstrukt gebildet. Diese Bewertung wird anschließend, in Abhängigkeit der identifizierten Fahrweise, gewichtet und für alle Fahrer zu einer Gesamtbewertung zusammengefasst. Die resultierenden, in Abhängigkeit der Fahrweise gewichteten Ergebnisse der Validierungsstudie sind in Tabelle 6.5 dargestellt, wobei die bekannte 1-7 Skala zur Auswertung herangezogen wurde.

Tabelle 6.5: Gewichtete subjektive Wahrnehmung der Validierungsstudie [Skala von 1 bis 7; 4 entspricht keine Änderung wahrgenommen] (in Anlehnung an Quiroga Mayorga, 2021)¹⁵

Datenstand	Sportlichkeit		Komfort	
	911	Cayenne	911	Cayenne
Frühere Bremsrückschaltung & erhöhtes Drehzahlniveau	4,74	4,85	3,36	2,97
Deaktivierung Bremsrückschaltung & reduziertes Drehzahlniveau	3,13	3,08	4,29	4,28
Erhöhtes Drehzahlniveau extrapoliert	4,63	4,45	3,61	3,65
Schaltpunktverschiebung Steigung	3,90	3,81	4,39	4,52

Zunächst ist ersichtlich, dass unabhängig vom Fahrzeugsegment die Auswirkungen der Datenstände auf die subjektive Wahrnehmung vergleichbar sind. Alle Datenstände führen bei beiden Fahrzeugen zu einer konsistenten Erhöhung (>4) bzw. Reduktion (<4) der Komfort- oder Sportlichkeitswahrnehmung. Auch die absoluten Abweichungen zwischen den beiden Fahrzeugen sind direkt miteinander vergleichbar ($\Delta < 0,2$). Lediglich der Datenstand „Frühere Bremsrückschaltung und erhöhtes Drehzahlniveau“ weicht hinsichtlich der Komfortwahrnehmung davon ab, da dieser bei dem Porsche Cayenne zu einer deutlicheren Komfortreduktion führt. Es ist möglich, dass dies auf das komfortablere Fahrzeugkonzept des Cayennes zurückzuführen ist und ein derart sportlicher Datenstand deshalb zu einer wesentlich negativen Wahrnehmung führt. Aufgrund der begrenzten Datenbasis kann die Ursache jedoch nicht abschließend beurteilt werden.

Im nächsten Schritt gilt es, die Ergebnisse mit der Prognose der Modelle zu vergleichen. In Abbildung 6.17 sind die Ergebnisse für das Fahrzeug 992 Carrera GTS dargestellt. Es wird ersichtlich, dass sich die hohe Prognosegüte der Kreuzvalidierung auch im Rahmen der realen Validierungsstudie bestätigt. Es ist auffällig, dass die Prognose des Modells insbesondere die positive Veränderung eines Datenstandes (Zunahme von Sportlichkeit oder Komfort) sehr genau abbilden kann, jedoch bei der negativen Veränderung noch Defizite aufweist. Demnach prognostiziert das Modell tendenziell eine geringere negative Veränderung, als sie durch die Probanden tatsächlich wahrgenommen wird. Dennoch ist die Prognose für den Datenstand „extrapoliertes, erhöhtes Drehzahlniveau“ und das Konstrukt „Komfort“ sehr genau. Möglicherweise ist diese Abweichung auf die natürliche Streuung der subjektiven

¹⁵ Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

Wahrnehmung und die geringe Anzahl an Probanden zurückzuführen. Mit einem RMSE von 0,19 für beide Modelle kann die Prognosegüte als geeignet beschrieben werden, um die subjektive Wahrnehmung in Abhängigkeit divergenter Datenstände für Derivate des Fahrzeuges Carrera 911 hinreichend genau zu prognostizieren.

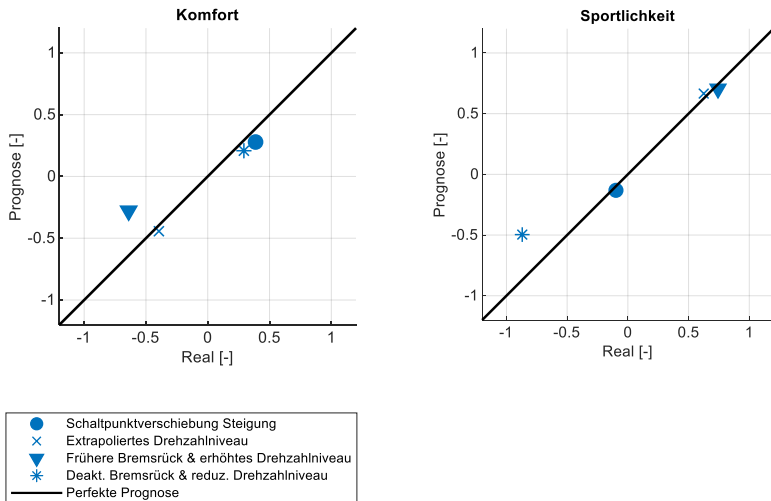


Abbildung 6.17: Vergleich der Modellprognosen für Sportlichkeit und Komfort mit den gewichteten Ergebnissen der Validierungsstudie mit einem Porsche 911 Carrera GTS [$RMSE_{\text{Komfort}} = 0,19$; $RMSE_{\text{Sport}} = 0,19$] (in Anlehnung an Quiroga Mayorga, 2021)¹⁶

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Studie mit einem Porsche Cayenne Turbo ergibt sich jedoch ein anderes Bild (siehe Abbildung 6.18). Zunächst kann festgestellt werden, dass das Modell prinzipiell in der Lage ist, eine Zu- oder Abnahme der Komfort- bzw. Sportlichkeitswahrnehmung infolge einer Datenstandsänderung zu prognostizieren. Sowohl für die positive als auch die negative Veränderung der Datenstände weisen die Prognosen des Modells jedoch deutliche Abweichungen von der tatsächlichen, subjektiven Wahrnehmung auf. Der resultierende, mittlere quadratische Fehler der Modelle ($RMSE_{\text{Komfort}} = 0,41$; $RMSE_{\text{Sport}} = 0,36$) ist somit in einem Bereich, in dem er nicht mehr als akzeptabel beschrieben werden kann. Die deutlich reduzierte Prognosegüte des Modells für eine andere Produktlinie ist auf zwei Ursachen zurückzuführen. Einerseits handelt es sich bei

¹⁶ Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

dem Fahrzeug, wie bereits beschrieben, um ein wesentlich komfortableres Fahrzeugsegment, weshalb Änderungen der Datenstände durch die Probanden grundsätzlich anders wahrgenommen und somit auch bewertet werden. Andererseits ist das Getriebe, welches im Porsche Cayenne verbaut ist, kein Doppelkupplungsgetriebe. Durch die Schaltstrategie werden bedarfsgerecht für die jeweiligen Getriebearten unterschiedliche Signale als Ausgangsgrößen generiert, was dazu führt, dass relevante Input-Signale für die Prognose des Modells bei der Simulation des Porsche Cayenne nicht zur Verfügung standen. Um dennoch eine modellbasierte Prognose durchführen zu können, wurden die Signale mit einem konstanten Wert (null) erzeugt.

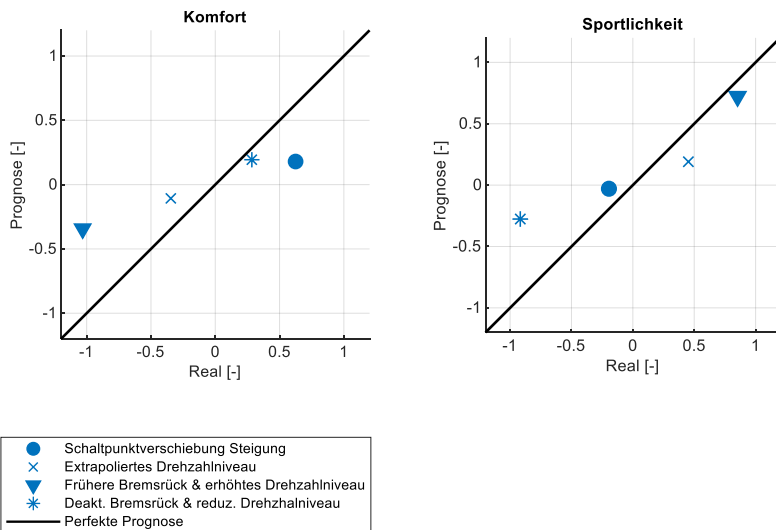


Abbildung 6.18: Vergleich der Modellprognosen für Sportlichkeit und Komfort mit den gewichteten Ergebnissen der Validierungsstudie mit einem Porsche Cayenne Turbo [$RMSE_{Komfort} = 0,41$; $RMSE_{Sport} = 0,36$] (in Anlehnung an Quiroga Mayorga, 2021)¹⁷

Auf Basis dieser Ergebnisse lassen sich im Folgenden Modellgrenzen ableiten. Es konnte gezeigt werden, dass sich die hohe Prognosegüte bei Fahrzeugen innerhalb einer Produktlinie, unabhängig von der Motorisierung, bestätigt. Die Prognosegüte kann dabei als datenstandsunabhängig beschrieben werden, da im Rahmen der

¹⁷ Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

Validierung neue Datenstände berücksichtigt wurden, welche sich sowohl als Kombination als auch als Extrapolation ergeben haben. Es kann somit zunächst konstatiert werden, dass das Modell für eine hinreichend genaue Prognose der subjektiven Wahrnehmung divergierender Datenstände innerhalb einer Produktlinie genutzt werden kann. Außerhalb der Produktlinie, mit welcher das Modell initial trainiert wurde, ist dies jedoch nicht mehr bzw. nur unter signifikanter Reduktion der Prognosegüte möglich. Da der Fehler außerhalb der initialen Produktlinie deutlich zunimmt und eine valide Aussage zur subjektiven Wahrnehmung demnach nicht mehr getroffen werden kann, kann dies als Grenze des Modells definiert werden. Für Prognosen zur subjektiven Wahrnehmung anderer Produktlinien ist es somit notwendig, eigenständige Modelle mit Trainingsdaten der jeweiligen Fahrzeuge zu trainieren.

6.4 Zwischenfazit

Im Rahmen dieses Kapitels konnte gezeigt werden, dass die Ergebnisse von Simulationen genutzt werden können, um die subjektive Wahrnehmung in Abhängigkeit unterschiedlicher Getriebe-Datenstände zu prognostizieren. Dafür wurde zunächst im Rahmen einer Probandenstudie untersucht, wie sich unterschiedliche Datenstände auf die subjektive Wahrnehmung auswirken. Dabei hat sich herausgestellt, dass es unabdingbar ist, bei der Auswertung die Fahrweise der Probanden zu berücksichtigen, da diese einen maßgeblichen Einfluss auf die subjektive Wahrnehmung hat. Da die Fahrweise wiederum maßgeblich durch das Streckenprofil beeinflusst wird und dem Autor kein Ansatz bekannt ist, welcher dieses bei der Klassifizierung berücksichtigt, wurde ein neuer Ansatz zur Klassifizierung der Fahrweise und der entsprechenden Gewichtung der subjektiven Wahrnehmung entwickelt. Diese gewichteten, subjektiven Bewertungen und die Ergebnisse der Simulationen der unterschiedlichen Datenstände wurden im nächsten Schritt genutzt, um verschiedene Modelle zur Prognose der subjektiven Wahrnehmung zu trainieren. Dabei hat sich herausgestellt, dass die Modelle der Boosted Decision Trees die höchste Prognosegüte aufweisen. Um die finalen Modelle zu validieren, wurden im Rahmen einer neuen Probandenstudie Validierungsdaten erhoben, welche abschließend mit den Prognosen der Modelle abgeglichen wurden. Dadurch konnte gezeigt werden, dass die Prognosegüte der Modelle für Fahrzeuge innerhalb einer Produktlinie hinreichend genau ist. Für Fahrzeuge anderer Produktlinien trifft dies jedoch nicht zu. Somit kann dies als eine eindeutige Grenze des Modells verstanden werden.

Basierend auf den erzielten Ergebnissen ist es erstmals möglich, die Änderungen der Getriebe-Datenstände bzgl. der resultierenden, subjektiven Wahrnehmung auf

den Fahrer zu analysieren. Dieser Erkenntnisgewinn ermöglicht eine signifikante Effizienzsteigerung der Getriebeapplikation im Kontext der Validierung. So können beispielsweise Änderungen des Datenstandes, welche sehr spät im PEP vorgenommen werden, gezielt bezüglich ihres Einflusses auf die subjektive Wahrnehmung untersucht werden. Darüber hinaus ist es möglich, diesen Einfluss in Abhängigkeit des Streckenprofils weiter zu spezifizieren. So kann unter Berücksichtigung diverser Streckenprofile analysiert werden, bei welchen der größte Einfluss auf die subjektive Wahrnehmung resultiert. Der Datenstand kann im Anschluss gezielt durch den Applikateur auf diesem Streckenprofil gefahren und bewertet werden. Dadurch kann der Bedarf an zeitintensiven Fahrversuchen reduziert werden, zumal eine vollumfängliche Validierung insbesondere in späten Phasen des PEP kaum mehr möglich ist. Es wird jedoch auch deutlich, dass die Modelle und die dadurch erzielten Prognosen nicht dem Anspruch genügen, Fahrversuche im Rahmen der Applikation gänzlich zu ersetzen. Vielmehr soll der Applikateur dabei unterstützt werden, wesentlich gezielter und somit effizienter Datenstandsänderungen mittels Fahrversuchen zu validieren.

7 Zusammenfassung und Ausblick

In vorliegender Arbeit wurden Ansätze und Methoden entwickelt, um einen Beitrag zur effizienteren Validierung der Getriebeapplikation am Beispiel eines Doppel-Kupplungsgetriebes zu leisten. Dafür wurde die Getriebeapplikation gesamtheitlich betrachtet und eine Effizienzsteigerung der Validierung sowohl für Schaltstrategie als auch für den Schaltablauf angestrebt. Dabei wird die Effizienzsteigerung durch den Transfer der Validierungsumfänge von Fahrversuchen auf alternative Validierungsumgebungen fokussiert, da dies sowohl in einem reduzierten Zeitaufwand als auch einem reduzierten Bedarf an physischen Prototypen für reale Fahrversuche resultiert.

In Kontext der Validierung des Schaltablaufes stützt sich der Beitrag zur Effizienzsteigerung auf zwei zentrale Säulen. Unter Berücksichtigung der weiterhin notwendigen Fahrversuche wurde zunächst eine Methode vorgestellt, welche einen produktlinien- und produktgenerationsübergreifenden Manöverkatalog hinsichtlich der Umsetzbarkeit der einzelnen Manöver in Abhängigkeit des zu validierenden Fahrzeuges analysiert. Im Sinne der angestrebten Effizienzsteigerung erfolgt die Erstellung der dafür notwendigen synthetischen Testfälle für ein bestehendes Simulationsmodell vollständig automatisiert. Auch die Analyse der Ergebnisse im Sinne des initialen Zielsystems erfolgt vollumfänglich automatisiert. Somit ergibt sich eine Effizienzsteigerung für Fahrversuche zur Validierung der Schaltqualität einerseits durch das generierte Wissen über die Umsetzbarkeit der Manöver und dem damit verbundenen Entfall des bisherigen Trial & Error Ansatzes, andererseits durch die vollständige Automatisierung der Analyse des Manöverkatalogs und dem damit verbundenen minimalen Vorbereitungsaufwand für den Applikateur.

Im zweiten Schritt wird untersucht, ob Manöver des Schaltablaufes hinsichtlich der Schaltqualitätsbewertung auf ViL-Prüfständen validiert werden können. Der dafür notwendige Manövertransfer setzt voraus, dass die objektive Bewertung der Schaltqualität vergleichbare Ergebnisse zum Fahrversuch liefert. Dafür wird zunächst das gewonnene Wissen über die prinzipielle Umsetzbarkeit der Manöver aus der simulationsbasierten Analyse herangezogen. Es wird dargestellt, wie der resultierende, finale Manöverkatalog in einen direkt fahrbaren Manöverplan überführt wird und wie die Ansteuerung des Fahrzeuges gemäß des Manöverplans durch die Manipulation der Signale einer gegebenen FlexRay-Architektur ermöglicht wird. Im Vergleich zu bestehenden Ansätzen bietet dieser Ansatz den Mehrwert, dass die Validierung am ViL-Prüfstand vollständig automatisierbar ist, die Ergebnisse reproduzierbar sind

und die Rüstzeit am Prüfstand minimal wird. Um die benötigte Zeit am Prüfstand weiter zu reduzieren, wird die Reihenfolge der Validierung der Manöver mittels Nearest-Neighbor-Heuristik optimiert. Zur eigentlichen Analyse der Schaltqualität wird zunächst eine initiale Machbarkeitsstudie durchgeführt. Dabei wird ersichtlich, dass die objektive Bewertung der Schaltqualität aufgrund der abweichenden Kurvenverläufe der Längsbeschleunigung in transienten Zuständen von den Ergebnissen des Fahrversuchs deutlich abweicht. Um eine exaktere Berechnung der Längsbeschleunigung in transienten Zuständen zu ermöglichen, wird ein Modell eines Drei-Massenschwingers umgesetzt, welches das Übertragungsverhalten der antriebsstrang-induzierten Schwingungen zur Karosserie hinreichend genau abbilden kann. Die damit generierten Ergebnisse der objektiven Bewertung der Schaltqualität weisen unter Berücksichtigung der natürlichen Streuung der Schaltabläufe eine direkte Vergleichbarkeit zum Fahrversuch auf. Auf Basis dieser Ergebnisse werden die Grenzen der Methode abgeleitet, wobei zunächst konstatiert werden kann, dass eine objektive Bewertung der Schaltqualität auf ViL-Prüfständen grundsätzlich möglich ist. Insbesondere ist diese Methode aber geeignet, um bereits frühzeitig im PEP alle Betriebspunkte hinsichtlich negativer Schaltabläufe zeiteffizient zu untersuchen. Im Rahmen der sich anschließenden Fahrversuche weisen die Getriebe-Datenstände somit bereits ein deutlich höheres Maß an Fahrbarkeit auf, was zu einer Entzerrung des zeitlich sehr begrenzten Applikationsprozesses führen kann.

Im Kontext der Schaltstrategie wird im Rahmen dieser Arbeit untersucht, ob Simulationen verwendet werden können, um die subjektive Wahrnehmung infolge unterschiedlicher Datenstände zu prognostizieren. Dafür wurde zunächst eine Probandenstudie entwickelt und umgesetzt, welche den Einfluss unterschiedlicher Datenstände auf die subjektive Wahrnehmung misst. Diese Datenstände wurden im Anschluss auf dem Streckenprofil der Probandenstudie simuliert und die Ergebnisse in objektive Kennwerte überführt. Mittels einer Korrelationsanalyse wurden diejenigen Signale der Simulation identifiziert, welche den signifikantesten Zusammenhang mit der subjektiven Wahrnehmung aufweisen. Die objektiven Kennwerte der entsprechenden Signale und die statistischen Ergebnisse der Probandenstudie wurden abschließend genutzt, um ein Modell des maschinellen Lernens zur Prognose der subjektiven Wahrnehmung zu trainieren. Um die Modelle bezüglich ihrer Prognosegüte hinreichend genau zu validieren, wurde eine unabhängige Validierungsstudie mit neuen Fahrzeugen und Datenständen durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass bei Fahrzeugen innerhalb der Produktlinie des Modelltrainings die hohe Prognosegüte der Kreuzvalidierung bestätigt wird und die Ergebnisse des Modells somit als valide beschrieben werden können. Für Fahrzeuge außerhalb dieser Produktlinie ist die Prognosegüte jedoch deutlich reduziert und muss als nicht hinreichend genau beschrieben werden. Auf Basis dieser Erkenntnisse lassen sich die

Grenzen der Methode ableiten. Das Modell ist in der Lage, innerhalb einer Produktlinie, welche für das initiale Modelltraining verwendet wurde, fahrzeug- und datenstandsübergreifend sehr gute Prognosen bezüglich der subjektiven Wahrnehmung zu generieren. Außerhalb dieser Produktlinie ist eine hinreichend genaue Prognose jedoch nicht möglich, was folglich die Grenze des Modells definiert. Die Effizienzsteigerung der Methode basiert vornehmlich darauf, dass simulationsbasiert eine Aussage getroffen werden kann, inwieweit sich eine Veränderung von Datenständen auf die subjektive Wahrnehmung auswirkt. Da die Simulation stets in Verbindung mit einem bestimmten Streckenprofil erfolgt, können die Einflüsse der Änderungen bei einer Vielzahl von Strecken untersucht und verglichen werden. Werden dabei Streckenprofile identifiziert, bei welchen die Änderungen besonders signifikanten Einfluss auf die subjektive Wahrnehmung haben, können diese durch die Applikateure im Nachgang gezielt angefahren und validiert werden. Insbesondere in späten Phasen im PEP bietet diese Methode den Vorteil, dass eine gezielte Validierung von Datenstandsänderungen erfolgen kann, da eine ganzheitliche Validierung infolge der zeitlichen Restriktionen kaum mehr realisierbar ist.

Zusammenfassend lässt sich konstatieren, dass die Zielstellung dieser Arbeit, einen Beitrag zur Effizienzsteigerung der Validierung der Getriebeapplikation zu leisten, erfüllt wurde. Dabei gilt es jedoch bei der Anwendung der beschriebenen Methoden stets die definierten Grenzen und Einschränkungen zu berücksichtigen. Neben der Validität der erzielten Ergebnisse ist dies unabdingbar, um in der praktischen Anwendung die Akzeptanz durch die Applikateure zu steigern. Die vorgestellten Methoden gilt es nun im PEP kommender Produktgenerationen zu verankern und somit weiterführende Kenntnisse über die praktische Anwendbarkeit zu erlangen. Dies ist im Rahmen der Validierung der Schaltqualität sowohl auf Basis der simulationsbasierten Analyse des Manöverkatalogs als auch des Manövertransfers auf ViL-Prüfstände bereits für eine Produktgeneration exemplarisch umgesetzt wurden. Die Ergebnisse dieser Arbeit konnten dadurch bestätigt werden. Dies gilt es auch für die effizientere Validierung der Schaltstrategie anzustreben.

Literaturverzeichnis

- Adolf, J., Balzer, C., Joedicke, A., Schabla, U. & Wilbrand, K. (Shell Deutschland Oil GmbH, Hrsg.). (2014). *Shell PKW-Szenarien bis 2040. Fakten, Trends und Perspektiven für Auto-Mobilität*. 26. Verfügbar unter: https://www.shell.de/promos/media/shell-passenger-car-scenarios-to-2040/_jcr_content.stream/1455700315660/c4968e7f206e1dfe72caf825e-ceb1fb472487d4e/shell-pkw-szenarien-bis-2040-vollversion.pdf
- Aigner, J. (1982). Zur zuverlässigen Beurteilung von Fahrzeugen. The Reliable Evaluation of Motor Vehicles. *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, (09/1982), 447–450.
- Albers, A., Schille, F., Hettel, R. & Behrendt, M. (2018). Auswirkung der Validierungsumgebung und Manöverumsetzung auf Komfortbewertungen hybridspezifischer Triebstrangphänomene. In J. Liebl & C. Beidl (Hrsg.), *VPC - Simulation und Test 2015. Methoden der Antriebsentwicklung im Dialog 17. MTZ-Fachtagung* (Proceedings, S. 63–79). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Albers, A. (2010). Five Hypotheses about Engineering Processes and their Consequences. In I. Horvath, F. Mandorli & Z. Rusak (Hrsg.), *Proceedings of the 8th International Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering (TMCE 2010)* (S. 343–356). Delft, Netherland: Delft University of Technology.
- Albers, A., Behrendt, M., Klingler, S. & Matros, K. (2016). Verifikation und Validierung im Produktentstehungsprozess. In U. Lindemann (Hrsg.), *Handbuch Produktentwicklung* (S. 541–568). München: Carl Hanser.
- Albers, A., Behrendt, M., Klingler, S., Reiß, N. & Bursac, N. (2017). Agile product engineering through continuous validation in PGE – Product Generation Engineering. *Design Science*, 3(5), 16–35. <https://doi.org/10.1017/dsj.2017.5>
- Albers, A., Behrendt, M. & Ott, S. (2010). Validation - Central Activity to Ensure Individual Mobility. In *Proceedings of the FISITA 2010 World Automotive Congress* (F2010-B-084, 1-10). Hungary, Budapest: Gépipari Tudományos Egyesület (GTE).

- Albers, A., Behrendt, M., Schroeter, J., Ott, S. & Klingler, S. (2013). X-in-the-Loop: A framework for supporting central engineering activities and contracting complexity in product engineering processes. In U. Lindemann, S. Venkataraman, Y. S. Kim, S. W. Lee, J. Clarkson & G. Cascini (eds.), *Proceedings of 19th International Conference on Engineering Design* (S. 379–388). Glasgow, UK: The Design Society.
- Albers, A. & Düser, T. (2010). Implementation of a Vehicle-in-the-Loop Development and Validation Platform. In *Proceedings of the FISITA 2010 World Automotive Congress* (S. 173–182). Hungary, Budapest: Gépipari Tudományos Egyesület (GTE).
- Albers, A., Düser, T. & Ott, S. (2008). X-in-the-loop als integrierte Entwicklungsumgebung von komplexen Antriebssystemen. In *8. Haus der Technik-Tagung. Hardware-in-the-Loop-Simulation* (S. 1–7). Kassel.
- Albers, A., Düser, T., Sander, O., Roth, C. & Henning, J. (2010). X-in-the-Loop-Framework für Fahrzeuge, Steuergeräte und Kommunikationssysteme. *AT-Zelektronik*, 13(05), 60–65.
- Albers, A., Köber, J., Breiting, T. & Behrendt, M. (2021). Development of a method for the automated validation of the shift quality of modern dual clutch transmissions on full-vehicle test benches. In *DRITEV – Drivetrain for Vehicles 2021. 21st International VDI Congress* (VDI-Berichte, vol. 2381, S. 399–414). Düsseldorf: VDI.
- Albers, A., Mandel, C., Yan, S. & Behrendt, M. (2018). System of systems approach for the description and characterization of validation environments. In *Proceedings of the DESIGN 2018 15th International Design Conference* (Design Conference Proceedings, S. 2799–2810). Glasgow, UK: 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. In Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.), *Konstruktion. Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieur-Werkstoffe* (Bd. 6, S. 74–81). Düsseldorf: VDI Fachmedien.
- Albers, A., Schwarz, A., Behrendt, M. & Hettel, R. (2012). Method for time-saving capturing of characteristic gear-shifting diagrams of vehicles on the rollertest

- bench carried out with dual clutch transmissions. In *6th International CTI Symposium and Exhibition. Innovative Automotive Transmissions, Hybrid & Electric Drives* (n.p.). Rochester, MI, USA: CTI.
- Albers, A. & Wintergerst, E. (2014). The Contact and Channel Approach (C&C2-A): Relating a System's Physical Structure to Its Functionality. In A. Chakrabarti & L. T. M. Blessing (Hrsg.), *An Anthology of Theories and Models of Design* (Bd. 23, S. 151–171). London: Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-6338-1_8
- Alpaydın, E. (2019). *Maschinelles Lernen* (De Gruyter Studium, 2., erweiterte Auflage). Berlin: De Gruyter. <https://doi.org/10.1515/9783110617894>
- Apter, M. J. (1982). *The experience of motivation. The theory of psychological reversals*. London, New York: Academic Press.
- AVL List GmbH. (2020). *AVL-DRIVE 4.4. The Objective Assessment of Vehicle Attributes*. Function Description - DCT (36 Aufl.). Graz.
- Bauer, R. (2011). New Methodology for Dynamic Drive Train Testing. In *Symposium on International Automotive Technology* (SAE Technical Paper Series, 2011-26-0045, S. 1–6). Pune, India: SAE International.
- Bauer, R., Rossegger, W., Uphaus, F., Gebhardt, A., Kirschbaum, F. & Jakobi, R. (2017). Agility Simulation for Driveability Calibration on Powertrain Test Beds. In *7th International Symposium on Development Methodology* (S. 1–7). Graz: AVL List.
- Blythe, M. & Hassenzahl, M. (2005). The Semantics of Fun: Differentiating Enjoyable Experiences. In J. Karat, J. Vanderdonck, G. Abowd, G. Calvary, J. Carroll, G. Cockton et al. (Hrsg.), *Funology. From Usability to Enjoyment* (Human-Computer Interaction Series, Bd. 3, S. 91–100). Dordrecht: Springer. https://doi.org/10.1007/1-4020-2967-5_9
- Böhl, J. (2007). *Effiziente Abstimmung von Automatikgetrieben* (Schriftenreihe des Instituts für Fahrzeugtechnik TU Braunschweig, Bd. 10). Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2007. Aachen: Shaker.

- Böhme, G. (1993). *Fuzzy-Logik. Einführung in die algebraischen und logischen Grundlagen* (Springer eBook Collection). Berlin, Heidelberg: Springer.
<https://doi.org/10.1007/978-3-642-86785-9>
- Borgeest, K. (2021). *Elektronik in der Fahrzeugtechnik. Hardware, Software, Systeme und Projektmanagement* (Springer eBook Collection, 4., aktualisierte und erweiterte Auflage). Wiesbaden: Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-23664-9>
- Chandrasekaran, K., Rao, N., Palraj, S., Kurella, C. & Lebbai, M. n. (2017). Objective Drivability Evaluation on Compact SUV and Comparison with Subjective Drivability. In *Symposium on International Automotive Technology* (SAE Technical Paper Series, 2017-26-0153, 1-7). Pune, India: SAE International.
- Cohen, J. (2013). *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences* (2nd ed.). Hoboken: Taylor and Francis. Retrieved from <http://gbv.ebib.com/patron/FullRecord.aspx?p=1192162>
- DIN, 41652-1:1990-06 (1990). *Steckverbinder für die Einschubtechnik, trapezförmig, runde Kontakte*. Berlin: Beuth.
- DIN EN ISO, 9000:2015-11 (2015). *Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe*. Berlin: Beuth.
- DIN, 10950:2020-09 (2020). *Sensorische Prüfung - Allgemeine Grundlagen*. Berlin: Beuth.
- Dylla, S. (2006). Einfluss von Schwingungsparametern auf den Schaltbetätigungs-komfort von Fahrzeugen mit Handschaltgetriebe. In *Getriebe in Fahrzeugen* (VDI-Berichte, Bd. 1943, S. 263–288). Düsseldorf: VDI.
- Dylla, S. (2010). Entwicklung einer Methode zur Objektivierung der subjektiv erlebten Schaltbetätigungsqualität von Fahrzeugen mit manuellem Schaltgetriebe. Dissertation. In A. Albers & S. Matthiesen (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung. Systeme, Methoden, Prozesse* (Bd. 42). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
<https://doi.org/10.5445/IR/1000019821>
- Engelbrecht, A. (2013). *Fahrkomfort und Fahrspaß bei Einsatz von Fahrerassistenzsystemen*. Zugl.: Berlin, Humboldt. Univ., Diss. 2013. Norderstedt: Grin.

- Engelbrecht, A., Engeln, A. & Arndt, S. (2009). Unterstützung von Fahrkomfort und Fahrspaß durch Fahrerassistenzsysteme. In A. Lichtenstein (Hrsg.), *Der Mensch im Mittelpunkt technischer Systeme. 8. Berliner Werkstatt - Mensch-Maschine-Systeme* (186-192). Düsseldorf: VDI.
- Engeln, A., Engelbrecht, A. & Kieninger, C. (2008). Joy and convenience of driving. In *Proceedings and abstracts of the 4th International Congress of Traffic and Transport Psychology* (n.p.). Washington DC, USA: International Association of Applied Psychology (IAAP).
- Fahrmeir, L., Kneib, T., Lang, S. & Marx, B. (2013). The Classical Linear Model. In L. Fahrmeir, T. Kneib, S. Lang & B. Marx (Hrsg.), *Regression* (Bd. 34, S. 73–175). Berlin, Heidelberg: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-34333-9_3
- Faulhaber, A., Hermann, J., Lindau, J., Breuer, J., Kiessling, L. & Schmidt, J. (2013). Fahrspaß, mit Sicherheit. *ATZextra*, (5), 132–137.
- Fischer, R., Küçükay, F., Jürgens, G. & Pollak, B. (2016). *Das Getriebebuch* (2. überarbeitete Auflage). Wiesbaden: Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-13104-3>
- Förster, H. J. (1991). *Automatische Fahrzeuggetriebe. Grundlagen, Bauformen, Eigenschaften, Besonderheiten*. Berlin, Heidelberg: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-84118-7>
- Forsyth, D. (2019). *Applied Machine Learning* (Springer eBook Collection, 1st ed. 2019). Cham, Switzerland: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-18114-7>
- Gruhle, W.-D. (2010). Steuerung und Regelung von Automatikgetrieben. In R. Isermann (Hrsg.), *Elektronisches Management motorischer Fahrzeugantriebe. Elektronik, Modellbildung, Regelung und Diagnose für Verbrennungsmotoren, Getriebe und Elektroantriebe* (ATZ / MTZ-Fachbuch, S. 288–305). Wiesbaden: Vieweg+Teubner / GWV Fachverlage.
- Grundhoff, S. (Axel Springer SE, Hrsg.). (2020). *Handarbeit kommt aus der Mode. Automatik oder Handschaltung: Trend und Hintergrund*, Auto Bild. Verfügbar unter: <https://www.autobild.de/artikel/automatik-oder-handschaltung-trend-und-hintergrund-16270769.html>

- Hagerodt, A. (2003). *Automatisierte Optimierung des Schaltkomforts von Automatikgetrieben* (Schriftenreihe des Instituts für Fahrzeugtechnik TU Braunschweig, Bd. 4). Zugl.: TU Braunschweig, Diss., 2003. Aachen: Shaker.
- Hasel, M., Albers, A. & Behrendt, M. (2015, 28. April). *XiL-basierte Kalibrierung und Validierung von Antriebssystemen durch den Einsatz von Rollenprüfständen*. Vortrag bei VDI-Fachkonferenz: Schwingungsreduzierung in mobilen Systemen. Das Wechselspiel zwischen Kupplung, Dämpfer und Antriebssystemen, Karlsruhe.
- Heise Auto (Heise Medien GmbH & Co. KG, Hrsg.). (2019). *Anteil von Autos mit Automatikgetriebe steigt*. Verfügbar unter: <https://www.heise.de/autos/artikel/Anteil-von-Autos-mit-Automatikgetriebe-steigt-4503398.html>
- Heißing, B. & Brandl, H. J. (2002). *Subjektive Beurteilung des Fahrverhaltens* (Vogel-Fachbuch, 1. Aufl.). Würzburg: Vogel.
- Isa, I. Y. A. M., Abidin, M. A. Z. & Mansor, S. (2014). Objective Driveability. Integration of Vehicle Behavior and Subjective Feeling into Objective Assessments. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences (JMES)*, (Volume 6), 782–792.
- Janssen, J. (2007). *Statistische Datenanalyse Mit SPSS Für Windows. Eine Anwendungsorientierte Einführung in das Basissystem und das Modul Exakte Tests* (6th ed.). Berlin, Heidelberg: Springer. Verfügbar unter: <https://e-bookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=417977>
- Jo, T. (2021). *Machine learning foundations. Supervised, unsupervised, and advanced learning*. Cham, Switzerland: Springer.
- Joshi, A. V. (2020). *Machine Learning and Artificial Intelligence* (Springer eBook Collection, 1st ed. 2020). Cham, Switzerland: Springer.
<https://doi.org/10.1007/978-3-030-26622-6>
- Kahlbau, S. (2013). *Mehrkriterielle Optimierung des Schaltablaufs von Automatikgetrieben*. Dissertation. Brandenburgischen Technischen Universität. Verfügbar unter: <https://d-nb.info/1037725379/34>

- Kahlbau, S. & Bestle, D. (2013). Optimal Shift Control for Automatic Transmission. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 41(3), 259–273. <https://doi.org/10.1080/15397734.2012.756719>
- Kellerman, D. F. & Bergquist, S. R. (1981). *New Webster's dictionary of the English language. Deluxe Encyclopedic Edition*. Delair Publishing Company.
- Klingler, S. (2017). Eine Methode zur effizienten und effektiven Unterstützung der kontinuierlichen Validierung im Kontext der PGE - Produktgenerationsentwicklung. In A. Albers & S. Matthiesen (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung. Systeme, Methoden, Prozesse* (Bd. 101). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000073864>
- Köber, J., Gärtner, M. & Albers, A. (2021). Entwicklung einer Methode zur Effizienzsteigerung des Manövertransfers auf Gesamtfahrzeug- und Rollenprüfstände am Beispiel der Validierung der Schaltqualität. In *Kupplungen und Kupplungssysteme in Antrieben 2021. Auslegung, Systemverhalten, Lösungen* (VDI-Berichte, Bd. 2382, S. 29–42). Düsseldorf: VDI.
- Köber, J., Jacobs, P.-M., Karakus, E. & Albers, A. (2020). Subjective perception prognosis of divergent data sets of the shift strategy of modern dual-clutch transmissions on the basis of simulation results. In *FISITA Web Congress 2020* (F2020-VDC-074, 1-9). Paris: FISITA.
- Köber, J., Pflüger, L., Behrendt, M. & Albers, A. (2021). Entwicklung eines modularen Ansatzes zur automatisierten, simulationsbasierten Validierung der Schaltstrategie moderner Doppelkupplungsgetriebe. *NAFEMS Online-Magazin: Zeitschrift für numerische Simulationsmethoden und angrenzende Gebiete*, 03/2021(59), 47–55.
- Kopp, C. & Schaller, J. (2016). Applikation von Dieselmotoren. In H. Tschöke, K. Mollenhauer & R. Maier (Hrsg.), *Handbuch Dieselmotoren* (Springer Reference Technik, S. 1–20). Wiesbaden: Springer Vieweg. https://doi.org/10.1007/978-3-658-07997-0_38-1
- Kosfeld, R. (2016). *Deskriptive Statistik. Grundlagen - Methoden - Beispiele - Aufgaben* (Springer eBook Collection, 6. Aufl. 2016). Wiesbaden: Springer Gabler. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-13640-6>

- Kraftfahrt-Bundesamt (Hrsg.). (2020). *Jahresbilanz 2020*. Verfügbar unter: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/Jahresbilanz_Neuzulassungen/jahresbilanz_node.html;jsessionid=CFCFA8399D9D7E1C586946D1795B0A6B.live!11311
- Kraftfahrt-Bundesamt (Hrsg.). (2022). *Typgenehmigungserteilung*. Verfügbar unter: https://www.kba.de/DE/Themen/Typgenehmigung/Typgenehmigungserteilung/typgenehmigungserteilung_node.html
- Küçükay, F., Kassel, T., Alvermann, G. & Gartung, T. (2009). Effiziente Abstimmung von automatisch schaltenden Getrieben auf dem Rollenprüfstand. *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, 111(03), 216–223.
- Kuhn, K.-P. (1994). *Verfahren zur graduellen Fahrweisenklassifikation und dieses anwendendes Kraftfahrzeug*, DE4401416C2.
- Kuhn, M. & Johnson, K. (2013). *Applied Predictive Modeling*. New York, NY: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6849-3>
- Kurz, G., Müller, A., Röhrig-Gericke, T., Schöb, R., Tröster, H. & Yap, A. (1999). *Verfahren und Vorrichtung zur Klassifizierung der Fahrweise eines Fahrers in einem Kraftfahrzeug. Europäische Patentanmeldung*, EP 1 013 509 A2. <https://patentimages.storage.googleapis.com/e3/e3/65/d86120cf4000b3/EP1013509A2.pdf>.
- Ladwig, S., Köhler, A.-L. & Schwalm, M. (2018). Fahrbarkeit in der Kundenanwendung. Ein konzeptueller Ansatz. *ATZextra*, 23(Sonderheft 9), 34–38.
- Lawler, E. L., Lenstra, J. K., Rinnooy Kan, A. H. G. & Shmoys, D. B. (1991). *The traveling salesman problem. A guided tour of combinatorial optimization* (Wiley Series in Discrete Mathematics and Optimization, Reprint). Chichester: Wiley.
- Lindemann, M., Wolter, T.-M., Freimann, R. & Fengler, S. (2009). Konfiguration von Hybridantriebssträngen mittels Simulation. *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, 05/2009(111), 332–338.
- Liu, P., Zhang, T. & Zhao, X. (2013). Vehicle Drivability Evaluation and Pedal-acceleration Response Analysis. *International Journal on Advances in Information Sciences and Service Sciences*, 5(10), 506–513. <https://doi.org/10.4156/AISS.VOL5.ISSUE10.59>

- MathWorks (Hrsg.). (2021). *What is an S-Function?* Verfügbar unter: <https://de.mathworks.com/help/simulink/sfg/what-is-an-s-function.html>
- Matros, K. (2016). Entwicklung von Hybridantriebssystemen auf Basis des Pull-Prinzips der Validierung und des IPEK-X-in-the-Loop-Ansatzes. Dissertation. In A. Albers & S. Matthiesen (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung. Systeme, Methoden, Prozesse* (Bd. 95). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Matros, K., Schille, F., Behrendt, M. & Holzer, H. (2015). Manöverbasierte Validierung von Hybridantrieben. *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, 117(2), 64–71. <https://doi.org/10.1007/s35148-015-0384-z>
- Matthies, F. (2013). *Beitrag zur Modellbildung von Antriebssträngen für Fahrbarkeitsuntersuchungen*. Dissertation. Technische Universität Berlin.
- Moosbrugger, H. (2012). *Testtheorie und Fragebogenkonstruktion* (SpringerLink Bücher, 2., aktualisierte und überarbeitete Auflage). Berlin, Heidelberg: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-20072-4>
- Möser, M. & Kropp, W. (2010). *Körperschall. Physikalische Grundlagen und technische Anwendungen* (SpringerLink Bücher). Berlin, Heidelberg: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-49048-7>
- Nationale Plattform Zukunft der Mobilität (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Hrsg.). (2019). *Wege zur Erreichung der Klimaziele 2030 im Verkehrssektor. Zwischenbericht 03/2019*. Verfügbar unter: <https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2020/03/NPM-AG-1-Wege-zur-Erreichung-der-Klimaziele-2030-im-Verkehrssektor.pdf>
- Naunheimer, H., Bertsche, B., Ryborz, J., Novak, W. & Fietkau, P. (2019). *Fahrzeuggetriebe* (3. Aufl.). Berlin, Heidelberg: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-58883-3>
- Nehlsen, M., Jedicke, F., Bogner, E. & Schöggel, P. (2006). Fahrbarkeitsuntersuchungen auf dem Rollenprüfstand. *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, 05/2006(108), 376–381.

- Oppenheim, A. V. & Schafer, R. W. (2014). *Discrete-time signal processing* (Always learning, 3. Edition). Harlow: Pearson. Retrieved from <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=5832333>
- Ortlieb, C. P., von Dresky, C., Gasser, I. & Günzel, S. (2013). *Mathematische Modellierung. Eine Einführung in zwölf Fallstudien* (Springer eBook Collection, 2., akt. Aufl. 2013). Wiesbaden: Springer Spektrum. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-00535-1>
- Pacejka, H. B. (2007). *Tyre and vehicle dynamics* (2.ed., reprint). Amsterdam: Elsevier/Butterworth-Heinemann.
- Peters, Y. (2020). *Ein Beitrag zur Entwicklung eines zentralen Fahrwerkreglers*. Dissertation. Universität Duisburg-Essen.
- Pillas, J. (2017). *Modellbasierte Optimierung dynamischer Fahrmanöver mittels Prüfständen* (Forschungsberichte Mechatronische Systeme im Maschinenbau, 1. Auflage). Zugl.: TU Darmstadt, Diss. 2017. Herzogenrath: Shaker.
- Pilorget, L. (2012). Test-Definitionen & Begriffe. In L. Pilorget (Hrsg.), *Testen von Informationssystemen* (S. 13–63). Wiesbaden: Vieweg+Teubner. https://doi.org/10.1007/978-3-8348-8677-4_2
- Porsche AG (Hrsg.). (2016). *Porsche 4D-Chassis Control. vernetzte Fahrwerksysteme beim neuen Panamera*. Verfügbar unter: <https://presskit.porsche.de/specials/de/porsche-fahrwerkentwicklung/topic/porsche-4d-chassis-control.html>
- Ramsauer, A. & Pujari, A. (2021). Frontloading for (Hybrid-) Transmission Integration at BMW. In *DRITEV – Drivetrain for Vehicles 2021. 21st International VDI Congress* (VDI-Berichte, vol. 2381, S. 101–115). Düsseldorf: VDI.
- Rausch, M. (2008). *FlexRay. Grundlagen, Funktionsweise, Anwendung ; 59 Tabellen*. München: Hanser. Verfügbar unter: http://deposit.d-nb.de/cgi-bin/dokserv?id=2948224&prov=M&dok_var=1&dok_ext=htm
- Reichert, U. (2013). *Objektive Kriterien für Langstreckenkomfort bei Personenkraftwagen*. Dissertation. Technische Universität Berlin. <https://doi.org/10.14279/depositon-3548>

- Rheinberg, F. (2010). Intrinsische Motivation und Flow-Erleben. In J. Heckhausen & H. Heckhausen (Hrsg.), *Motivation und Handeln* (Springer-Lehrbuch, 4., überarbeitete und erweiterte Auflage, S. 365–385). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Rheinberg, F., Vollmeyer, R. & Engeser, S. (2002). Die Erfassung des Flow-Erlebens. In J. Stiensmeier-Pelster & F. Rheinberg (Hrsg.), *Diagnostik von Motivation und Selbstkonzept* (1. Aufl., S. 261–279).
- Rink, A. & Waiss, A. (2018). Digitale Funktionsentwicklung für Automatikgetriebe mit Silver und Testweaver. In QTronic (Hrsg.), *User Conference 2018. Virtual ECUs and Applications* (o. S.). Verfügbar unter: <https://www.synopsys.com/content/dam/synopsys/verification/presentations/daimler-function-development.pdf>
- Roach, A. (2014). *Statistik für Ingenieure. Wahrscheinlichkeitsrechnung und Datenauswertung endlich verständlich* (Springer-Lehrbuch). Berlin, Heidelberg: Springer. Verfügbar unter: <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-epflicht-1486123>
- Ropohl, G. (1975). *Systemtechnik. Grundlagen und Anwendung*. München, Wien: Carl Hanser.
- Russell, J. A. (1980). A circumplex model of affect. *Journal of Personality and Social Psychology*, 39(6), 1161–1178. <https://doi.org/10.1037/h0077714>
- Schallberger, U. (2005). *Kurzskalen zur Erfassung der Positiven Aktivierung, Negativen Aktivierung und Valenz in Experience Sampling Studien (PANAVA-KS). Theoretische und methodische Grundlagen, Konstruktvalidität und psychometrische Eigenschaften bei der Beschreibung intra- und interindividueller Unterschiede* (Forschungsberichte aus dem Projekt „Qualität des Erlebens in Arbeit und Freizeit“ Nr. 6). Zürich: Universität Zürich, Psychologisches Institut der Universität Zürich, Fachrichtung Angewandte Psychologie.
- Schille, F. (2020). Methode zur generationsübergreifenden NVH-Optimierung des Wiederstartkomforts von Hybridfahrzeugen durch eine manöverbasierte Validierung auf dem Akustikrollenprüfstand. Dissertation. In A. Albers & S. Matthiesen (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung. Systeme, Methoden, Prozesse* (Bd. 123). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

- Schöggel, P., Ramschak, E., Bogner, E. & Dank, M. (2001). Driveability Design. *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, 103(3), 186–195. <https://doi.org/10.1007/BF03224361>
- Schwarz, A. (2013). Integration von Messdaten in die Simulation zur multikriteriellen, zeiteffizienten versuchsbasierten Optimierung technischer Systeme. Dissertation. In A. Albers & S. Matthiesen (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung. Systeme, Methoden, Prozesse* (Bd. 71). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000037800>
- Stützel, T. & Hoos, H. H. (2000). MAX–MIN Ant System. *Future Generation Computer Systems*, 16(8), 889–914. [https://doi.org/10.1016/S0167-739X\(00\)00043-1](https://doi.org/10.1016/S0167-739X(00)00043-1)
- Sundararajan, D. (2018). *Fourier Analysis. A Signal Processing Approach* (Springer eBook Collection Computer Science). Singapore: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-1693-7>
- Tischler, M. A. & Renner, G. (2015). Ansatz zur Messung von positiven Fahrerleben. Die Messung von Fahrspaß und Ableitungen für die Fahrzeuggestaltung. In VDI Wissensforum (Hrsg.), *Fahrer im 21. Jahrhundert. Human Machine Interface* (VDI-Berichte, S. 105–117). Düsseldorf: VDI.
- Trost, D., Ebel, A., Brosch, E. & Reuss, H.-C. (2020). Driver Classification of Shifting Strategies Using Machine Learning Algorithms. In *SAE Powertrains, Fuels & Lubricants Meeting* (SAE Technical Paper Series, 2020-01-2241, S. 1–10). Krakow: SAE International.
- Umweltbundesamt (Hrsg.). (2020). *Marktdaten. Bereich Mobilität*. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/konsumprodukte/gruene-produkte-marktzahlen/marktdaten-bereich-mobilitaet#motorisierter-individualverkehr>
- SAE, J2716_201604 (2016). *SENT - Single Edge Nibble Transmission for Automotive Applications*. Warrendale, PA: SAE International.
- Verband der Automobilindustrie e.V. (Hrsg.). (2020). *Jahresbericht 2020. Die Automobilbranche in Daten und Fakten*. Verfügbar unter:

https://en.vda.de/dam/vda/publications/2020/VDA5193_JB_2020_DE_WEB/VDA5193_JB_2020_DE_WEB_RZ2.pdf

VDI-Richtlinie, 2206:2021-11 (2021). *Entwicklung mechatronischer und cyber-physischer Systeme*. Berlin: Beuth.

Wirtz, M. A. (Hrsg.). (2021). *Dorsch - Lexikon der Psychologie* (20., überarbeitete Auflage). Bern: Hogrefe.

Wooldridge, J. M. (2013). *Introductory econometrics. A modern approach* (5. Aufl.). Mason, OH: South-Western.

Wurm, A. (2015). *Ein Beitrag zur robusten mehrkriteriellen Optimierung des Schaltablaufs von Automatikgetrieben*. Dissertation. Technische Universität Cottbus.

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

Jacobs, P.-M. (2019). *Identifikation der Einflussfaktoren auf die emotionale Wahrnehmung der Schaltungen*. unveröffentlichte Studienarbeit. Technische Universität Braunschweig.

Karakus, E. (2020). *Objectification of the subjective perception of shifting strategy of modern automatic transmission with data analysis*. unveröffentlichte Masterarbeit. Hochschule Albstadt-Sigmaringen.

Pflüger, L. (2019). *Entwicklung eines modularen Ansatzes zur automatisierten Absicherung der softwarebasierten Schaltstrategie*. unveröffentlichte Bachelorarbeit. Duale Hochschule Baden-Württemberg, Stuttgart.

Quiroga Mayorga, D. F. (2021). *Modellbildung zur Prognose der subjektiv wahrgenommenen Schaltstrategie moderner Automatikgetriebe auf Basis von numerischen Simulationen*. unveröffentlichte Masterarbeit. Universität Stuttgart.

Des Weiteren wird auf nachfolgende studentische Arbeiten referenziert, die nicht durch den Autor dieser Arbeit Co-betreut wurden:

Jäger, T. (2017). *Entwicklung eines simulationsgestützten Prozesses zur Validierung und Absicherung der Applikationskontinuität am Beispiel des KSP-Konzernschartprogramm*. unveröffentlichte Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie.

Glossar

Testkampagne	Gesamtheit aller Manöver, welche gemeinsam und somit aufeinanderfolgend und idealerweise unterbrechungsfrei auf einer ausgewählten Validierungsumgebung validiert werden.
Sub-Manöver	Einzelner Schritt innerhalb eines zu validierenden Manövers, welches explizit mit seinen Fahrereingaben und zu erreichenden Zielwerten beschrieben wird. Die Reihenfolge aller Sub-Manöver innerhalb eines Manövers ist dabei aus Gründen der Reproduzierbarkeit festgelegt.
Manöverablauf	Beschreibt den expliziten Ablauf eines einzelnen Manövers unter Berücksichtigung aller notwendigen Sub-Manöver und Definition deren Reihenfolge.
Manöverplan	Beschreibt die Reihenfolge aller zu validierender Manöver innerhalb einer Testkampagne.
Fahrspaß	Wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit als Synonym zu Fahrvergnügen und Fahrfreude verwendet, wenngleich es einen semantischen Unterschied zwischen Spaß (Fun – Ablenkung) und Freude (Pleasure – Engagement) gibt. (Blythe & Hassenzahl, 2005)
Zyklus	Testverfahren im automobilen Umfeld zur Bestimmung der Abgasemission und des Kraftstoffverbrauches. Diese werden typischerweise über Geschwindigkeitsanteile definiert, welche das Fahrzeug im Rahmen des Testes absolvieren muss.
Typisierung	Bezeichnet die Erlaubnis für den Marktzugang eines Fahrzeuges eines Herstellers in Übereinstimmung mit den jeweiligen gesetzlichen Anforderungen der lokalen Behörden (z.B. Kraftfahrt-Bundesamt in Deutschland).

Anhang

A Manöverpläne

Tabelle A.1: Auszug eines Manöverablaufs einer beispielhaften 4-5 ZHS mit 50% Fahrpedal in D [SM-ID = Sub-Manöver ID, FSK-ID = Fortschaltkriterium-ID]

SM-ID	FSK-ID	Fortschaltkriterien			Vorgaben		Kommentar
		V-Untergr.	Schaltablauf	Gang	Bremse	Fahrpedal	
1	V-Untergrenze	54	-	4	30	0	Abbremsen für Schaltung
2	Gang	-	-	4	0	50	4-5 in D bei 50% Fahrpedal
3	Schaltablauf	-	0	5	0	50	Bis Schaltungsende

Tabelle A.2: Auszug eines Manöverablaufs einer beispielhaften 4-5 ZHS mit 50% Fahrpedal bei 5000 1/min in M [SM-ID = Sub-Manöver ID, FSK-ID = Fortschaltkriterium-ID]

SM-ID	FSK-ID	Fortschaltkriterien			Vorgaben			Kommentar
		Drehzahl	Schaltablauf	Gang	Tipp	Bremse	Fahrpedal	
1	Drehzahl	4800	-	4	-	30	0	Abbremsen für Schaltung
2	Drehzahl	5000	-	4	-	0	50	Beschleunigen auf Ziel-Drehzahl
3	Gang	-	-	4	+1	0	50	4-5 in M 5000 1/min 50% FP
4	Schaltablauf	-	0	5	-	0	50	Bis Schaltungs-ende

Tabelle A.3: Auszug eines Manöverablaufs einer beispielhaften 6-5 ZRS mit 40% Fahrpedal bei 4000 1/min in M [SM-ID = Sub-Manöver ID, FSK-ID = Fortschaltkriterium-ID]

SM-ID	FSK-ID	Fortschaltkriterien			Vorgaben			Kommentar
		Drehzahl	Schaltablauf	Gang	Tipp	Bremse	Fahrpedal	
1	Drehzahl	3700	-	6	-	30	0	Abbremsen für Schaltung
2	Drehzahl	4000	-	6	-	0	40	Beschleunigen auf Ziel-Drehzahl
3	Gang	-	-	6	-1	0	40	6-5 in M 4000 1/min 40% FP
4	Schaltablauf	-	0	5	-	0	40	Bis Schaltungs-ende

Tabelle A.4: Auszug eines Manöverablaufs einer beispielhaften 3-4 SHS bei 4000 1/min in M [SM-ID = Sub-Manöver ID, FSK-ID = Fortschaltkriterium-ID]

SM-ID	FSK-ID	Fortschaltkriterien			Vorgaben			Kommentar
		Drehzahl	Schaltablauf	Gang	Tipp	Bremse	Fahrpedal	
1	Drehzahl	3800	-	3	-	30	0	Abbremsen für Schaltung
2	Drehzahl	4300	-	3	-	0	70	Beschleunigen auf Offset-Drehzahl
3	Drehzahl	4000	-	3	-	0	0	Warten auf Ziel-Drehzahl
4	Gang	-	-	3	+1	0	0	3-4 in M 4000 1/min 0% FP
5	Schaltablauf	-	0	4	-	0	0	Bis Schaltungs-ende

Tabelle A.5: Auszug eines Manöverablaufs einer beispielhaften 8-1 SRS leicht gebremst in D oder M [SM-ID = Sub-Manöver ID, FSK-ID = Fortschaltkriterium-ID]

SM-ID	FSK-ID	Fortschaltkriterien			Vorgaben			Kommentar
		Drehzahl	Schaltablauf	Gang	Tipp	Bremse	Fahrpedal	
1	Drehzahl	2500	-	8	-	25	0	Abbremsen für Schaltung
2	Gang	-	-	8	-	25	0	SRS 8-1 in D leicht gebremst
3	Schaltablauf	-	0	1	-	25	0	Bis Schaltungs-ende

B Streudiagramme der Schaltqualitätsbewertung

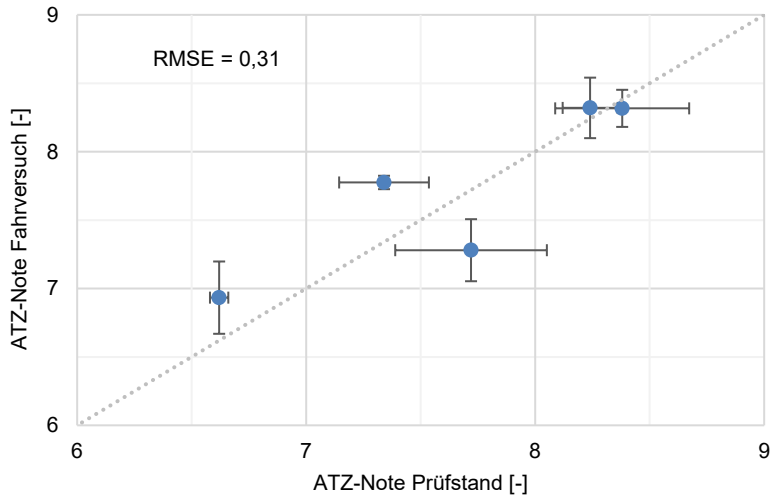


Abbildung B.1: Streudiagramm der Schaltqualitätsbewertungen diverser Zug-Rückschaltungen auf ViL und Fahrversuch

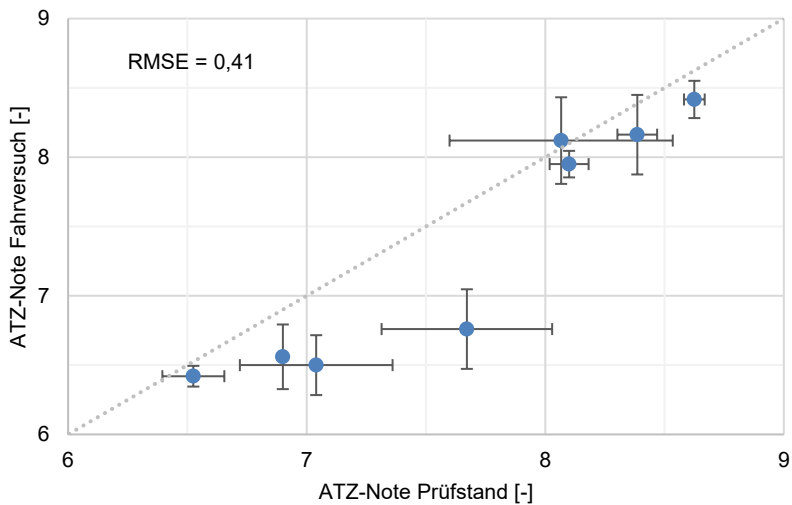


Abbildung B.2: Streudiagramm der Schaltqualitätsbewertungen diverser Schub-Hochschaltungen auf ViL und Fahrversuch

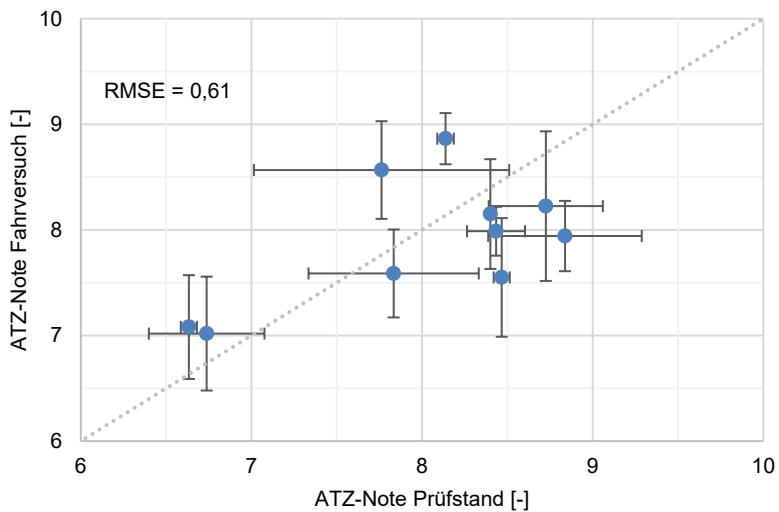


Abbildung B.3: Streudiagramm der Schaltqualitätsbewertungen diverser Schub-Rückschaltungen auf ViL und Fahrversuch

C Gewichtete Bewertung potenzieller Fragebogenmodelle

Tabelle C.1: Gewichtete Bewertung potenzieller Fragebogenmodelle
[Wertung: 1 – nicht erfüllt; 5 – voll erfüllt]

Kriterien	Gew.	Panava-Kurzskala		SAM-Kurzskala		Flow-Kurzskala	
		Wertung	Gew. Wertung	Wertung	Gew. Wertung	Wertung	Gew. Wertung
Zeitaufwand - Vor- und Nachbereitung	0,10	5	0,50	5	0,50	1	0,10
Nutzerfreundlichkeit - Bearbeitungszeit - Struktur der Messmethode	0,15	5	0,75	5	0,75	3	0,45
Objektivität - Unabhängigkeit des Ergebnis	0,20	4	0,80	4	0,80	4	0,80
Validität - Anwendbarkeit für die subjekte Wahrnehmung der Schaltstrategie	0,30	2	0,60	1	0,30	1	0,30
Reliabilität - Reproduzierbarkeit des Ergebnis	0,25	4	1,00	4	1	2	0,50
	1,00		3,65		3,35		4,05

D Fragebögen

D.1 Identifikation geeigneter Items

Inwieweit spiegeln die folgenden Begriffe die Kriterien Sportlichkeit und Komfort aus Ihrer Sicht wider?

Machen Sie bitte in jeder Zeile ein Kreuz und fügen Sie in den freien Kästchen Ihrer Meinung nach weitere passende Begriffe mit entsprechender Bewertung hinzu.

		verringert den Fahrspaß			kein Einfluss			vergrößert den Fahrspaß
Sportlichkeit								
1	leistungstark	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	fließend	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	direkt	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	träge	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5	dynamisch	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6	aufgeregt	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7	beschleunigend	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8	schnell	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9	körperlich beanspruchend	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10	ruckartig	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
12		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
13		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
14		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
15		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
16		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
17		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

		verringert den Fahrspaß			kein Einfluss			vergrößert den Fahrspaß
Komfort								
1	entspannt	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	stressfrei	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	erholsam							
4	ausgeglichen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5	passend	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6	vertraut	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7	sicher	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
13		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

D.2 Gewichtung der Items

Inwieweit beeinflussen/beschreiben die folgenden Begriffe die Kriterien Sportlichkeit und Komfort Ihrer Meinung nach?

Machen Sie bitte in jeder Zeile ein Kreuz.

Kriterium „Sportlichkeit“

	Kein Einfluss			Mäßiger Einfluss			Hoher Einfluss
Leistungsstark	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Dynamisch	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Aufgeregt	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Schnell	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Fließend	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ruckartig	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Beschleunigend	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Kriterium „Komfort“

	Kein Einfluss			Mäßiger Einfluss			Hoher Einfluss
Passend	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Entspannt	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ausgeglichen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Nervös	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Stressfrei	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Vertraut	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sicher	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Voraussagbar	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Hektisch	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

D.3 Probandenstudie

Vor der Probandenstudie einmalig auszufüllen:

Wie alt sind Sie?

Bitte kreuzen Sie an:

zwischen 20 und 30 Jahren	<input type="checkbox"/>
zwischen 30 und 40 Jahren	<input type="checkbox"/>
zwischen 40 und 50 Jahren	<input type="checkbox"/>

zwischen 50 und 60 Jahren	<input type="checkbox"/>
zwischen 60 und 70 Jahren	<input type="checkbox"/>

Wie viel Jahre Berufserfahrung haben Sie?

Bitte kreuzen Sie an:

zwischen 0 und 5 Jahren	<input type="checkbox"/>
zwischen 5 und 10 Jahren	<input type="checkbox"/>
zwischen 10 und 20 Jahren	<input type="checkbox"/>

zwischen 20 und 30 Jahren	<input type="checkbox"/>
zwischen 30 und 40 Jahren	<input type="checkbox"/>
zwischen 40 und 50 Jahren	<input type="checkbox"/>

Wie viel Jahre Berufserfahrung haben Sie in der Getriebe- bzw. Motorapplikation?

Bitte kreuzen Sie an:

zwischen 0 und 5 Jahren	<input type="checkbox"/>
zwischen 5 und 10 Jahren	<input type="checkbox"/>
zwischen 10 und 20 Jahren	<input type="checkbox"/>

zwischen 20 und 30 Jahren	<input type="checkbox"/>
zwischen 30 und 40 Jahren	<input type="checkbox"/>
zwischen 40 und 50 Jahren	<input type="checkbox"/>

Was sind Ihre Erwartungen an die Versuchsfahrt?

Nach jeder Fahrt auszufüllen:

Versuchsfahrt x

Bewerten Sie den während der Fahrt empfundenen Fahrspaß mit einem Kreuz auf der folgenden Skala.

Bitte kreuzen Sie an:

	hoch			weder noch			hoch	
Fahrspaß	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Spaßmangel

Die Versuchsfahrt war im Vergleich zur Versuchsfahrt mit Serierendatenstand:

Bitte kreuzen Sie an:

besser	<input type="checkbox"/>
schlechter	<input type="checkbox"/>
ähnlich	<input type="checkbox"/>

Was ist Ihnen *positiv* aufgefallen? Warum und Wo? (z. B. Landstraße, Ort, Kurvenfahrt...)

Was ist Ihnen *negativ* aufgefallen? Warum und Wo? (z. B. Landstraße, Ort, Kurvenfahrt...)

Gab es sonstige Auffälligkeiten oder Verbesserungspotential?

Ich habe die Versuchsfahrt n wie folgt empfunden:

Machen Sie bitte in jeder Zeile ein Kreuz.

	trifft nicht zu			teils- teils			trifft zu	k. A.
leistungsstark	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
dynamisch	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
aufgeregt	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
schnell	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
fließend	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
ruckartig	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
passend	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
beschleunigend	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
hektisch	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
entspannt	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
ausgeglichen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
nervös	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
stressfrei	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
vertraut	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
sicher	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
voraussagbar	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Welche Fahrweise haben Sie während der Versuchsfahrt verfolgt?

Bitte kreuzen Sie an:

überwiegend sportlich	<input type="checkbox"/>
überwiegend komfortabel	<input type="checkbox"/>
ausgeglichen	<input type="checkbox"/>

Wurden Sie während der Versuchsfahrt von äußeren Bedingungen beeinflusst, die Ihre Wahrnehmung beeinträchtigt haben könnten? (z. B. Sicht Einschränkungen, Wetter, Stau etc.)

Im Falle dessen, führen Sie diese bitte im folgenden Textfeld auf.

E Liste aller berücksichtigten Signale zur Modellbildung

Modell Komfort

ISP_M_ASG_Freigabe_Schub_aktiv
ISP_M_Anf2G_Anf_aktiv
ISP_M_Anf2G_warten_auf_WF_aktiv
ISP_M_AutoHS_aktiv
ISP_M_BR_Eco_aktiv
ISP_M_Eco_aktiv
ISP_M_FW_MFS_G
ISP_M_Gen_Gang_Wunsch
ISP_M_Gen_t_bis_RS_alle_01_
ISP_M_Gen_t_bis_RS_alle_03_
ISP_M_Gen_t_bis_RS_alle_04_
ISP_M_Gen_t_bis_RS_alle_05_
ISP_M_Gen_t_bis_RS_alle_06_
ISP_M_HSVerz_nach_HS_Ausstieg
ISP_M_HydrEco_Veto_aktiv
ISP_M_SRV_HM_SchluRegler_aktiv
ISP_M_SRV_Sollschlupf
ISP_M_SchaltSt_aktiv
ISP_M_Segeln_StStPlus_v_Freigabe
ISP_M_Segeln_Veto_RS_aktiv
ISP_M_StStPlus_aktiv
ISP_M_nSoll
ISP_M_tHSV_Faktor_S
ISP_M_tSyn_Grad_max

Modell Sportlichkeit

ISP_M_EcoHS_al_gef
ISP_M_Eco_LW_gef
ISP_M_FW_MFS2_roh
ISP_M_GAus_Gang_Schatten
ISP_M_GDisp_Gang_Display
ISP_M_Gen_Gang_Wunsch
ISP_M_HSVK_ay_Grenz
ISP_M_HSVSFS_ay_gef

ISP_M_HSVSchlupf_ay_gef
ISP_M_IFin_Gear_Driven
ISP_M_IFin_Gierrate
ISP_M_IFin_M_Ab_Dyn
ISP_M_IFin_Motormoment_begr_dyn
ISP_M_IFin_ay
ISP_M_IFin_nGetriebeEing_Praed
ISP_M_IFin_nMot
ISP_M_IFin_tHS
ISP_M_IFin_tHS_GBC
ISP_M_Plausi_Gang_Wunsch
ISP_M_SASAufb_Lastfaktor
ISP_M_SRV_RKZ_Schlupf_roh
ISP_M_SRV_Schlupfregler_aktiv
ISP_M_SRV_Sollschlupf
ISP_M_ST_adiff_korr
ISP_M_ST_adiff_roh
ISP_M_ST_grad_alaengs_roh
ISP_M_Segeln_Grund_aktiv
ISP_M_Segeln_Momentbed_aktiv
ISP_M_StStPlus_aktiv
ISP_M_Stau_Tal1_erkant
ISP_M_al_BR_al_Fakt_Steigung
ISP_M_axP_ax_Offset_Kurve
ISP_M_axP_ax_kor
ISP_M_ax_v_Ref
ISP_M_ayP_Gerade_aktiv
ISP_M_ayRef
ISP_M_ayRef_LW
ISP_M_ayRef_Rad
ISP_M_nSoll
ISP_M_tHSV_Faktor_G
ISP_M_tHSV_t_Grund
ISP_M_tSyn_Grad_max