

Jörg-Michael Birkhold

## **Komfortobjektivierung und funktionale Bewertung als Methoden zur Unterstützung der Entwicklung des Wiederstartsystems in parallelen Hybridantrieben**

Objectification of comfort and functional evaluation  
as methods to support the development of restarting  
systems in parallel hybrid drivetrains

Band 60

Systeme ■ Methoden ■ Prozesse

Hrsg.: o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers







Forschungsberichte

Jörg-Michael Birkhold

**Komfortobjektivierung und funktionale Bewertung als  
Methoden zur Unterstützung der Entwicklung des  
Wiederstartsystems in parallelen Hybridantrieben**

Objectification of comfort and functional evaluation  
as methods to support the development of restarting  
systems in parallel hybrid drivetrains

Band 60

Herausgeber: o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers

Copyright: IPEK ▪ Institut für Produktentwicklung, 2013  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Universität des Landes Baden-Württemberg und  
nationales Forschungszentrum in der Helmholtz-Gemeinschaft

Alle Rechte vorbehalten

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

ISSN 1615-8113

# **Komfortobjektivierung und funktionale Bewertung als Methoden zur Unterstützung der Entwicklung des Wiederstartsystems in parallelen Hybridantrieben**

Zur Erlangung des akademischen Grades  
**Doktor der Ingenieurwissenschaften**  
der Fakultät für Maschinenbau  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

genehmigte  
**Dissertation**

von

Dipl. Ing. Jörg-Michael Birkhold  
aus Bad Mergentheim

Tag der mündlichen Prüfung: 22. Februar 2013

Hauptreferent: o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers

Korreferent: Prof. Dr. rer. nat. F. Gauterin





## **Vorwort des Herausgebers**

Wissen ist einer der entscheidenden Faktoren in den Volkswirtschaften unserer Zeit. Der Unternehmenserfolg wird in der Zukunft 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 als eine Plattform zum Transfer und macht damit das Wissenspotenzial aus aktuellen Forschungsarbeiten am IPEK Institut für Produktentwicklung Karlsruhe (ehemals: Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau) verfügbar.

Die Forschungsfelder des Institutes sind die methodische Entwicklung und das Entwicklungsmanagement, die rechnergestützte Optimierung von hochbelasteten Strukturen und Systemen, die Antriebstechnik mit einem Schwerpunkt auf den Gebieten Antriebsstrang-Engineering und Tribologie von Lager- und Funktionsreibsystemen, die Mikrosystemtechnik mit dem Focus auf die zugehörigen Entwicklungsprozesse sowie die Mechatronik. Die Forschungsberichte werden aus allen diesen Gebieten Beiträge zur wissenschaftlichen Fortentwicklung des Wissens und der zugehörigen Anwendung – sowohl den auf diesen Gebieten tätigen Forschern als auch ganz besonders der anwendenden Industrie – zur Verfügung stellen. Ziel ist es, qualifizierte Beiträge zum Produktentwicklungsprozess zu leisten.

Albert Albers



## Vorwort zu Band 60

Die Entwicklung moderner Fahrzeuge wird ganz wesentlich von drei Trends beeinflusst. Zunächst ist durch den starken Wettbewerb auf den Käufermärkten für Personalfahrzeuge der Aspekt des Fahrkomforts und des insgesamt als positiv bewerteten NVH-Verhaltens von entscheidender Bedeutung für die Kaufentscheidung von Kunden. Ein zweiter Mega-Trend ist ein hoher Anspruch an Sicherheit und Zuverlässigkeit dieser technischen Systeme, die insbesondere durch die zunehmende Mechatronisierung im Fahrzeugbau durchaus als Herausforderung begriffen werden muss. So sind heute schon eine große Anzahl von Fahrzeugausfällen durch elektronische Störungen verursacht oder zumindest mit verursacht. Der dritte Mega-Trend ist die Optimierung des Antriebes unter dem Gesichtspunkt Performance bei gleichzeitiger hoher Energieeffizienz und damit geringem CO<sub>2</sub>-Ausstoß und niedrigen Kraftstoffverbräuchen.

Dabei ist klar festzustellen, dass die Fahrzeugkunden hier in überwiegender Anzahl nicht bereit sind, auf Leistung und Performance des Antriebs zu Gunsten eines niedrigeren Verbrauches zu verzichten. Die Herausforderung lautet also, Antriebslösungen zu entwickeln, die sowohl den Anspruch nach Agilität wie auch der Energieeffizienz nachkommen. Hierzu sind unterschiedlichste Ansätze in der Entwicklung. Aktuell sind dabei sog. Hybrid-Antriebslösungen als Kombination aus verbrennungsmotorischem und elektrischem Antrieb sicherlich die technische Lösung mit dem höchsten Zukunftspotenzial. Dies ist unabhängig von dem gleichzeitig zunehmenden Auftreten von rein elektrischen Lösungen, die allerdings noch unter großen Kostenproblemen und Reichweitenrestriktionen leiden. Moderne Hybrid-Antriebsstränge sind dabei äußerst komplex, da sie mindestens zwei Kraftmaschinen in einem Antriebsstrang in unterschiedlichster Art und Weise kombinieren. Eine der möglichen Lösungen sind dabei parallele Anordnungen. Diese hybriden Antriebsstränge haben ein komplexes Betriebsverhalten, da sie in unterschiedlichsten Modi betrieben werden können. Ein wichtiger Aspekt ist dabei der Übergang zwischen verbrennungsmotorischem Betrieb und rein elektrischem Betrieb, bzw. umgekehrt. Insbesondere dem Wechsel zwischen den Antriebsarten kommt vor dem Hintergrund des Komforts und des NVH-Verhaltens eine besondere Bedeutung zu. Eine zentrale Funktion ist dabei der sog. Wiederstart des Verbrennungsmotors. Sowohl das Wiederstartsystem als auch der definierte Wiederstartablauf stellen höchste Anforderungen bzgl. des vom Fahrer erlebten Fahrkomforts. Durch die große mögliche Anzahl von Varianten und Triebstrangtopologien ergibt sich insbesondere in der frühen Definitionsphase von Lösungskonzepten die Herausforderung, diese unter dem Gesichtspunkt eines sich später einstellenden Komforts in dem jeweiligen Potenzial beurteilen zu können. Nur

wenn dies bereits bei der Konzipierung des Antriebsstranges berücksichtigt werden kann, sind unnötige Entwicklungsiterationen oder auch Entwicklungsfehlentscheidungen zu vermeiden. Dabei stellt allerdings die Modellbildung größte Herausforderungen. An dieser Stelle setzt die Arbeit von Herrn Dr.-Ing. Jörg Michael Birkhold an. Er hat sich zum Ziel gesetzt, neue methodische Ansätze für die frühe Beurteilung des Wiederstartsystems und des Betriebsverhalten des Wiederstartsystems auf der Basis einer Modellbildung abzuleiten. Er untersucht die Thematik grundsätzlich und entwickelt eine Methodik, die es erlaubt, den Aspekt Wiederstartverhalten bei der Entwicklung von Hybrid-Antrieben systematisch und ganzheitlich zu berücksichtigen.

Februar 2013

Albert Albers



## Kurzfassung

Knapper werdende fossile Brennstoffvorräte und strengere Emissionsgesetze erfordern die Entwicklung alternativer Antriebssysteme für Kraftfahrzeuge. Ein von vielen Automobilherstellern eingeschlagener Weg stellt die Hybridisierung der Antriebe dar. Durch die Hybridisierung steigen die Anzahl mechatronischer Komponenten und Systeme im Fahrzeug sowie die Anzahl möglicher Betriebszustände und Funktionen des Antriebsstrangs. Auch beim Einsatz eines neuen Systems wie einem Hybridantrieb sind neben funktionalen Anforderungen stets Komfortanforderungen an das Fahrzeug zu erfüllen. Ziel dieser Arbeit ist es beide Aspekte mit geeigneten Methoden zu unterstützen.

Der empfundene Komfort beim Wiederstart des Verbrennungsmotors als neue Funktion im parallelen Vollhybrid soll zur zuverlässigen Fahrzeugbeurteilung objektiviert werden. Mit den Methoden der linearen Regression und der künstlichen neuronalen Netzen (KNN) werden Korrelationen zwischen im Fahrversuch gewonnenen subjektiven Noten, die von Experten vergeben wurden, und objektiven Kennwerten ermittelt. Dazu wurden neue Kennwerte definiert und rechnerisch aus den gewonnenen Messdaten bestimmt. Insbesondere die KNN zeigen bei der Korrelationsanalyse eine große Leistungsfähigkeit, wie sie auch schon in anderen Arbeiten<sup>1</sup> bestätigt werden konnte. Neben Gesamtnoten wird auch die Bewertung von Einzelkriterien modelliert. Hierbei zeigt sich, dass auch Experten bestimmte Einzelkriterien nur bedingt differenzieren können.

Zusätzlich wird eine Methode erarbeitet, die es dem Ingenieur ermöglichen soll, in frühen Phasen des Produktentstehungsprozesses (PEP) bewerten zu können, ob ein System seine Funktion erfüllen kann oder ob es funktionale Schwächen aufweist. Auf Basis einer umsatzorientierten Funktionsbeschreibung wird das Untersuchungssystem abstrahiert und mit Hilfe des Contact & Channel-Ansatzes in eine einheitliche Beschreibungsform überführt. Eine neu entwickelte Schnittstelle ermöglicht die Transformierung des Funktionsmodells in ein Rechenmodell, sodass eine rechnerische Bewertung implementiert werden kann. An einem Konzept eines hybriden Triebstrangs wird die Methode angewendet und funktionale Schwächen des Systems aufgezeigt. Die Auswirkung dieser Schwächen werden an einem numerischen Simulationsmodell des Systems vorgeführt.

---

<sup>1</sup> Albers Albrecht 2004, Albrecht 2005, Lerspalungsanti 2010



## **abstract**

Diminishing fossil fuel reserves and tightening emissions legislations have created a need for alternative propulsion systems, which has led many manufacturers to develop hybrid systems. However, hybrids have more mechatronic components and systems as well as more possible operation states and functions in the powertrain, while still meeting existing comfort requirements. The goal of this thesis is to support the fulfilment of all these requirements using appropriate methods.

The perceived comfort of the new function of restarting the engine in a parallel full-hybrid should be objectified in order to allow reliable vehicle evaluation. Using the methods of linear regression and artificial neural networks (ANN), correlations are established between objective measurements and subjective grades given by experts. To support this process, new parameters are defined and determined from the measured data. The ANN in particular are quite effective in correlation analysis, as has been already shown in other studies. In addition to overall evaluations, the evaluations of individual criteria were also modelled, revealing that even experts have difficulty differentiating between certain individual criteria.

In addition, a method was developed to help engineers determine early in the vehicle development process whether or not a system will be able to fulfill its functional requirements. Based on a transformation oriented description of functions, the investigated system is abstracted and put into a uniform description with the aid of the contact & channel approach. A newly developed interface allows the functional model to be transformed into a calculation model, which provides a means of numerical evaluation of the process. The method was used on a hybrid powertrain and revealed functional weaknesses of the system. The effects of these weaknesses are demonstrated in a numerical simulation model of the system.





## Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand am Institut für Produktentwicklung (IPEK) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) in enger Zusammenarbeit mit der Antriebsentwicklung Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Albert Albers, Leiter des IPEK, für die wissenschaftliche Begleitung dieser Arbeit. Die vielen Diskussionen und Gespräche sowie seine Erfahrung haben diese Arbeit entscheidend geprägt. Herrn Dipl.-Ing. Immo Stache, Leiter des Fachgebiets Hybridmodul und E-Antriebe der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, danke ich besonders herzlich für die jahrelange uneingeschränkte Unterstützung und das Vertrauen in meine Arbeit. Herrn Prof Dr. rer. nat. F. Gauterin, Leiter des Institut für Fahrzeugsystemtechnik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), danke ich für die Übernahme des Korreferats und das Interesse an dieser Arbeit.

Herrn Dipl.-Ing. Nils Sauvlet danke ich für die vielen Impulse und Anregungen während meiner Zeit als Doktorand bei der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, die zum Entstehen dieser Arbeit entscheidend beigetragen haben.

Ein Dank gilt ebenfalls allen Mitarbeitern des IPEK – Institut für Produktentwicklung für die offene und angenehme Arbeitsatmosphäre. Insbesondere danke ich Dipl.-Ing. Martin Geier, Dipl.-Ing. Adam Babik, Dipl.-Ing. Eike Sadowski, Dipl.-Ing. Friedrich Brezger, Dr.-ing. Matthias Behrendt und Dipl.-Ing. Sascha Ott für die vielseitige Unterstützung.

Zuletzt danke ich meiner Frau Sarah für die notwendigen Freiräume, um diese Arbeit abzuschließen. Sie hat viele Einschränkungen in unserem Privatleben akzeptiert und damit mit dazu beigetragen diese Arbeit überhaupt möglich zu machen.

Karlsruhe, den 22. Februar 2013

Jörg-Michael Birkhold



# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen und Stand der Forschung</b>	<b>3</b>
2.1	Parallele Vollhybrid-Antriebe für Kraftfahrzeuge	4
2.1.1	Triebstrangkonfigurationen	4
2.1.2	Parallele Vollhybride mit Momentenaddition	5
2.1.3	Anforderungen an parallele Hybridantriebe	8
2.2	Startverfahren für Verbrennungsmotoren	9
2.2.1	Konventioneller Start	10
2.2.2	Direktstart und Varianten	11
2.2.3	Wiederstart in parallelen Vollhybrid-Antriebssträngen	13
2.3	Das Wiederstartsystem	18
2.3.1	Begriffsabgrenzung	18
2.3.2	Begriffsdefinition	19
2.3.3	Anforderungen an das Wiederstartsystem in Hybridantrieben	19
2.3.4	Ablauf des Wiederstarts im untersuchten P2-Hybrid	28
2.4	Modellbildung	32
2.4.1	Vorstellung ausgewählter Metamodelle	36
2.4.2	Funktionsmodellierung	42
2.5	Komfort und Diskomfort	46
2.6	Subjektive Komfortbewertung	49
2.6.1	Grundlagen und Einflussfaktoren	50
2.6.2	Bewertungsmethoden und -skalen	52
2.7	Objektivierung der Komfortbewertung	57
2.7.1	Objektive Kennwerte	57
2.7.2	Planung von Versuchen zur Ermittlung objektiver Kennwerte	59
2.7.3	Modellierung des menschlichen Komfortempfindens	63
2.7.3.1	Lineare Regressionsmodelle	64
2.7.3.2	Künstliche Neuronale Netze	70
2.7.4	Komfortuntersuchung am IPEK	76
2.7.5	Objektivierung des Wiederstartkomforts	77
<b>3</b>	<b>Motivation und Zielsetzung</b>	<b>79</b>
<b>4</b>	<b>Methode zur Objektivierung des Wiederstartkomforts</b>	<b>82</b>
4.1	Beeinflussung des Wiederstarts im P2-Hybrid	82
4.2	Begriffsabgrenzung Wiederstartkomfort	88
4.3	Methodenentwicklung	89
4.3.1	Anforderungen an die Methode	90
4.3.2	Probanden-Befragung	90

4.3.3	Auswahl und Definition objektiver Kennwerte .....	93
4.3.4	Versuchsvorbereitung und -durchführung .....	98
4.3.5	Erfassung von Messdaten und Fahrerwertungen.....	107
4.3.6	Objektivierung der Wiederstart-Komfortbewertung .....	111
4.3.6.1	Objektivierung mit Regressionsanalysen.....	113
4.3.6.2	Objektivierung mit künstlichen neuronalen Netzen.....	122
4.3.6.3	Zusammenfassung der Objektivierungs-Ergebnisse .....	132
4.4	Implementierung der Methode .....	132
4.4.1	Erfassung von Fahrzeugdaten.....	133
4.4.2	Software-Module und GUI zur Versuchsdurchführung.....	134
<b>5</b>	<b>Methode zur funktionalen Bewertung paralleler Hybridantriebe.....</b>	<b>140</b>
5.1	Begriffsabgrenzungen .....	141
5.2	Zustände und Funktionen im Hybridantrieb .....	145
5.2.1	Ableitung notwendiger Funktionen des Systems.....	146
5.2.2	Funktionsbeschreibung.....	149
5.3	Funktionstabellen .....	153
5.4	Formulierung der Bewertungskriterien .....	157
5.5	Ansatz zur Implementierung der funktionalen Bewertung .....	158
5.5.1	Modellierung des Antriebsstrangs mit C&C <sup>2</sup> -M .....	161
5.5.2	Überführung von C&C <sup>2</sup> -M in Rechenmodelle .....	163
5.5.3	Ansatz zur rechnergestützten funktionalen Bewertung .....	168
5.6	Ableitung eines Vorgehensmodells.....	171
5.7	Exemplarische Anwendung der funktionalen Bewertung .....	174
5.7.1	Anwendung der Funktionstabellen .....	175
5.7.2	Numerische Simulation des Systems .....	179
5.7.2.1	Motormodell .....	180
5.7.2.2	Triebstrangmodell .....	186
5.7.2.3	Steuerungen.....	189
5.7.2.4	Simulationsergebnisse.....	191
5.7.3	Optimierungsansätze für das untersuchte System .....	194
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>195</b>
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>199</b>

## Formelzeichen und Abkürzungen

$a$	$m/s^2$	Beschleunigung
$a$	-	Regressionskoeffizient
$A$	$m^2$	Querschnittsfläche des Fahrzeugs
$C$		Connector (gemäß C&C <sup>2</sup> -Ansatz)
C&C <sup>2</sup> -A		Contact & Channel Ansatz
C&C <sup>2</sup> -M		Contact & Channel Modell
CSS		channel and support structure (engl. für Leitstützstruktur, LSS)
$c_w$		Luftwiderstandsbeiwert
DKG		Doppelkupplungsgetriebe
DoE		Design of Experiments
$e$	-	Massenfaktor
EM		E-Maschine
$f$	-	Rollwiderstandsbeiwert
$G$	-	Güte
$g$	$m/s^2$	Erdbeschleunigung
$H_0$		Nullhypothese
$H_1$		Einshypothese
$H_u$	$kJ/kg$	Heizwert
$i$	-	Übersetzungsverhältnis
$i$		Eingabevektor
K0		Trennkupplung
KNN		Künstliches neuronales Netz
LSS		Leitstützstruktur
$L_{st}$	-	Stöchiometrischer Luftbedarf
$m$	$kg$	Masse
$M_{EM}$	$Nm$	Drehmoment der E-Maschine
$M_{GE}$	$Nm$	Getriebeeingangsmoment

$M_{\text{ind, Zyl}}$	Nm	Indiziertes Zylindermoment
$M_{K0}$	Nm	Drehmomentkapazität der Trennkupplung
$m_{L, \text{Zyl}}$	kg	Luftmasse im Zylinder
N	-	Anzahl Messpunkte
n	$\text{min}^{-1}$	Drehzahl
$n_f$	-	Faktoranzahl
$n_i$	-	Stufenanzahl
$n_r$	-	Versuchsanzahl
OT		Oberer Totpunkt
PEP		Produktentstehungsprozess
$R^2$	-	Bestimmtheitsmaß
RMQ		root mean quad
RMS		root mean square
RSG		Riemen-Starter-Generator
s	-	Schwellwertvektor
v	km/h	Fahrzeuggeschwindigkeit
VDV	$\text{m/s}^{1,75}$	Vibration Dose Value
VKM		Verbrennungskraftmaschine
w		Gewichtsvektor
WF		Wirkfläche
WFP		Wirkflächenpaar
WS		working surface (engl. für Wirkfläche, WF)
WSP		working surface pair (engl. für Wirkflächenpaar, WFP)
WÜK		Wandler-Überbrückungskupplung
X		Designmatrix
XiL		X-in-the-Loop
y		Beobachtungsvektor
ZSB		Zusammenbau

$\alpha$	°	Fahrbahnsteigung
$\alpha_{\max}$	°	Kurbelwinkel maximalen Verbrennungsmoments
$\beta$	-	Modellkoeffizient
$\beta$	°	Schwimmwinkel
$\varepsilon$	-	Residuum
$\eta_{\text{ind}}$	-	Indizierter Wirkungsgrad
$\sigma$	-	Standardabweichung
$\dot{\psi}$	°/s	Giergeschwindigkeit
$\ddot{\psi}$	°/s <sup>2</sup>	Gierbeschleunigung
$\lambda$	-	Luftverhältnis





# 1 Einleitung

Knapper werdende fossile Brennstoffvorräte und strengere Emissionsgesetze erfordern den sparsamen und effizienten Einsatz dieser Ressourcen. Insbesondere im Bereich der Individualmobilität ist deshalb die Entwicklung von Technologien, die zur Effizienzsteigerung oder sogar zur vollständigen Unabhängigkeit von diesen Bodenschätzen beitragen heute und in der Zukunft unbedingt erforderlich. In den vergangenen Jahren präsentierte deshalb die Automobilindustrie zahlreiche Ansätze zur Entwicklung neuer Antriebskonzepte für Kraftfahrzeuge.

In aktuellen Studien wird dabei dem Hybridantrieb, also der Kombination aus verbrennungsmotorischem und elektrischem Antrieb, als einem dieser Ansätze ein besonders hohes Zukunftspotential bescheinigt. Die Studie „Car Innovation 2015“<sup>2</sup>, die mehr als dreihundert Innovationen in der Automobilindustrie auf Innovationsgrad und Zukunftspotential hin untersucht, prophezeit dieser Technologie bis zum Jahr 2015 ein durchschnittliches jährliches Wachstum von über 21 %. Der Hybridantrieb bietet eine große Vielfalt bei der technischen Realisierung und greift dabei auf bestehende Technologien wie z.B. den Verbrennungsmotor zurück und kann diese mit neuen innovativen Technologien verknüpfen. Architekturen hybrider Antriebe sind sehr wandlungsfähig und lassen sich damit universell einsetzen.

Um ein Fahrzeug mit hybridem Antrieb erfolgreich auf dem Markt einsetzen zu können, setzt ein neuartiges Antriebskonzept die Akzeptanz und Aufgeschlossenheit der Kunden voraus. Eine Umfrage<sup>3</sup> zeigt, dass im Jahr 2006 bereits fast 30 % der befragten Personen beim nächsten Autokauf den Erwerb eines Fahrzeugs mit hybridem Antrieb in Erwägung zogen.

Neben dem Kraftstoffverbrauch und der Alltagstauglichkeit ist der Fahrkomfort ein entscheidendes Kriterium für die Kaufentscheidung eines Kraftfahrzeugs. Hybridfahrzeuge schaffen aufgrund ihres veränderten (komplexeren) Antriebsstrangs andere Komfortvoraussetzungen wie konventionelle, rein verbrennungsmotorisch angetriebene Fahrzeuge. Die Ansprüche der Kunden müssen aber dennoch mindestens in gleichem Maße erfüllt werden.

Durch den zusätzlichen Betriebszustand „elektrisches Fahren“ in Voll-Hybridfahrzeugen ergeben sich auch zusätzliche Funktionen, um den Antrieb in

---

<sup>2</sup> Wymann 2007

<sup>3</sup> TEMA-Q 2006

andere Betriebsmodi wie beispielsweise das hybridische Fahren mit E-Maschine und Verbrennungsmotor zu überführen. Eine dieser Funktionen ist der Wiederstart des Verbrennungsmotors, der in beliebigen Fahrzuständen durch den Fahrer, die Betriebsstrategie oder durch Umweltbedingungen ausgelöst werden kann. Damit unterliegen Wiederstartablauf und -system jederzeit hohen Anforderungen bezüglich des erlebten Fahrkomforts.

Komfortanspruch und Komfortempfinden jedes Menschen sind jedoch individuell verschieden. Komfort ist zudem im Gegensatz zu physikalischen Größen wie Masse oder Geschwindigkeit nicht direkt messbar. Deshalb soll im Rahmen dieser Arbeit der Wiederstart als neuer komfortrelevanter Vorgang in Fahrzeugantrieben objektiv beschreibbar gemacht werden. Mit Hilfe verschiedener mathematischer Korrelationsverfahren werden Zusammenhänge zwischen im Fahrversuch gewonnenen Kennwerten und zugehörigen, von Probanden subjektiv vergebenen Bewertungen ermittelt. Dadurch sollen Ingenieure bei der Entwicklung des Wiederstart-Systems in parallelen Hybridantrieben unterstützt werden.

Aufgrund der Vielfalt möglicher Triebstrangtopologien und einsetzbarer Triebstrang-Komponenten in einem hybriden Antriebsstrangs stehen Ingenieure beim Beginn der Entwicklung eines solchen Antriebs vor der Aufgabe verschiedene Konzepte zu analysieren, zu bewerten und falls notwendig Optimierungen durchzuführen. Dabei ist stets zu beachten, dass alle geforderten Funktionen und Betriebszustände vom Antriebssystem so realisiert werden können, wie es die Vorgaben für die Entwickler erfordern. Durch ein frühes Erkennen von Schwächen und Optimierungspotentialen eines technischen Systems innerhalb des Produktentstehungs-Prozesses (PEP) kann das Entwicklungsrisiko reduziert sowie Entwicklungszeit und -kosten eingespart werden. Der Wiederstart als besonders komplexer Vorgang im Parallel-Hybrid<sup>4</sup> benötigt dabei ein besonderes Augenmerk bei der Entwicklung, da hier eine Vielzahl von Komponenten und deren funktionales Zusammenspiel Einfluss auf den Vorgang haben.

In dieser Arbeit wird deshalb ein Ansatz entwickelt, um in einem frühen Stadium des PEP funktionale Modelle hybrider Antriebssysteme zu bilden und Grenzen der Funktionserfüllung zu ermitteln und Optimierungen abzuleiten.

Die vorliegende Arbeit entstand während der Tätigkeit des Autors als Doktorand am IPEK – Institut für Produktentwicklung Karlsruhe – und als freier Mitarbeiter der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, weshalb sich viele der erwähnten Ausführungsbeispiele auf Entwicklungen der Firma Porsche beziehen.

---

<sup>4</sup> Spiegel et al. 2010

## 2 Grundlagen und Stand der Forschung

In diesem Abschnitt werden die Grundlagen sowie der Stand der Forschung und Technik erläutert, auf dem die vorliegende Arbeit aufbaut.

Zunächst werden parallele Hybridantriebe für Kraftfahrzeuge und mögliche Antriebsstrang-Topologien solcher Antriebssysteme vorgestellt und die Anforderungen an sie zusammengefasst.

Ausgehend vom Start des Verbrennungsmotors in konventionellen Fahrzeugen wird der Direktstart als alternatives Verfahren sowie die Start- und Wiederstartverfahren in parallelen Hybridantrieben diskutiert. Die dafür notwendigen Start-Systeme und -Einrichtungen werden miteinander verglichen und hinsichtlich ihrer Potentiale im hybriden Antriebssystem bewertet.

Um den Begriff „Wiederstartsystem“ besser fassen zu können wird er im Vergleich zu konventionellen Startsystemen für Verbrennungsmotoren im Abschnitt 2.3 abgegrenzt und beschrieben. Anschließend werden die Anforderungen an dieses Wiederstartsystem zusammengefasst.

Abschnitt 2.4 behandelt die Grundlagen verschiedener Modell-Ansätze, die zur Beschreibung technischer Systeme angewendet werden können. Neben signalfluss- und objektorientierter Modellbildung werden funktionsorientierte Modellbildung sowie der am IPEK entwickelte C&C<sup>2</sup>-Ansatz (C&C<sup>2</sup>-A) und die mit ihm erstellten Contact and Channel Models (C&C<sup>2</sup>-M) erläutert.

Da in dieser Arbeit eine Komfort-Objektivierung durchgeführt wird, findet eine Diskussion der in engem Zusammenhang stehenden Begriffe „Komfort“ und „Diskomfort“ statt, um später den Begriff des Wiederstartkomforts klar umreißen zu können. In den Kapiteln 2.5 und 2.6 werden darauf aufbauend Methoden zur subjektiven Komfortbewertung und deren Objektivierung vorgestellt.

## 2.1 Parallele Vollhybrid-Antriebe für Kraftfahrzeuge

### 2.1.1 Triebstrangkonfigurationen

Hybride Fahrzeugantriebe lassen sich in parallele, serielle und Mischhybride einteilen (Abbildung 2-1).

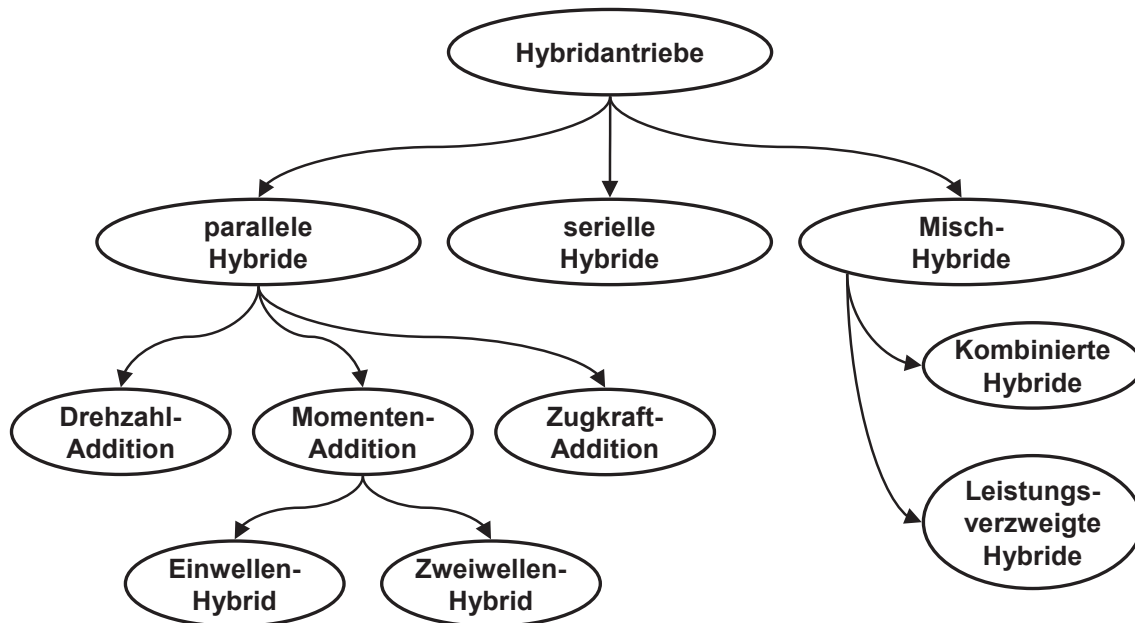


Abbildung 2-1: Einteilung hybrider Antriebe<sup>5</sup>

Serielle Hybridantriebe verfügen über keine mechanische Verbindung zwischen Verbrennungsmotor und angetriebenem Rad. Die von der Verbrennungskraftmaschine (VKM) abgegebene Leistung wird von einer E-Maschine in elektrische Leistung umgewandelt, die von einer oder mehreren weiteren E-Maschinen wieder in mechanische Arbeit umgewandelt, die dem Antrieb des Fahrzeugs dient.

Mischhybride stellen eine Kombination aus seriellem und parallelem Hybridantrieb dar. Die vom Verbrennungsmotor abgegebene mechanische Leistung wird teilweise direkt an die angetriebenen Räder abgegeben. Der übrige Teil wird mit Hilfe einer E-Maschine in elektrische Energie gewandelt, die in einer Batterie gespeichert oder mit Hilfe einer weiteren E-Maschine ebenfalls zum Antrieb des Fahrzeugs genutzt werden kann.

Bei parallelen Hybridantrieben sind sowohl Verbrennungsmotor als auch die E-Maschine(n) mechanisch mit mindestens einem der Antriebsräder des Fahrzeugs

gekoppelt oder koppelbar. Die mechanische Überlagerung der Leistungen von Elektro- und Verbrennungsmotor kann mittels Drehzahl-, Momenten- oder Zugkraftaddition realisiert werden. Bei der Drehzahladdition werden die Leistungen der Antriebseinheiten mit Hilfe eines Planetengetriebes zusammengeführt, wobei das Verhältnis der Antriebsmomente durch das Übersetzungsverhältnis des Additionsgetriebes bestimmt ist<sup>6</sup>. Bei der Momentenaddition lassen sich die Antriebsmomente frei wählen, während die Drehzahlen in einem festen Verhältnis zueinander stehen. Die Addition der Drehmomente erfolgt beispielsweise über eine Stirnradstufe oder eine Kette. Zur Entkoppelung beider Antriebsmaschinen kann eine Kupplung oder ein Freilauf eingesetzt werden. Wirken Verbrennungsmotor und E-Maschine auf verschiedene Antriebsachsen des Kraftfahrzeugs und es besteht dabei keine mechanische Verbindung zwischen den beiden Komponenten wird von Zugkraftaddition gesprochen. Die Addition der Zugkräfte geschieht durch die Fahrbahn, weshalb solche Konfigurationen auch als „Through-the-Road-Hybrid“<sup>7</sup> bezeichnet werden.

Da sich die vorliegende Arbeit auf Untersuchungen an parallelen Hybridantrieben konzentriert, sollen diese in den weiteren Kapiteln näher erläutert werden.

### **2.1.2 Parallele Vollhybride mit Momentenaddition**

Ein Ausführungsbeispiel eines parallelen Vollhybrid-Antriebsstrangs stellt der Porsche Cayenne S Hybrid dar, der im Jahr 2010 auf dem Markt erschien. Sein Triebstrang ist als paralleler Einwellen-Hybrid<sup>8</sup> ausgeführt. Eine Übersicht des Antriebs ist in Abbildung 2-2 zu sehen. Die für die Hybridisierung des Antriebsstrangs notwendigen Komponenten sind rot eingefärbt.

Dieser Antriebsstrang wurde gemeinsam von Porsche und Volkswagen entwickelt und kommt auch im VW Touareg zum Einsatz. An den aufgeladenen V6-Motor schließt sich das Hybridmodul an, welches die bauliche Einheit für die Trennkupplung und die E-Maschine mit 38 kW Leistung bildet. Die Kupplung ist verantwortlich für das Abkoppeln des Verbrennungsmotors und für die Durchführung von Übergängen zwischen verschiedenen Betriebszuständen, d.h. auch für den Wiederstart des Verbrennungsmotors. Während des Wiederstarts nehmen weitere Triebstrangkomponenten Einfluss auf den Vorgang und erfüllen dabei verschiedene

---

<sup>5</sup> nach Kirchner 2007

<sup>6</sup> Eckstein 2011

<sup>7</sup> Heise 2009

<sup>8</sup> Auch als P2-Hybrid bezeichnet, vgl. Noreikat 2010

Aufgaben. Insbesondere der Drehmomentwandler und die Wandlerüberbrückungskupplung (WÜK) spielen dabei eine entscheidende Rolle.

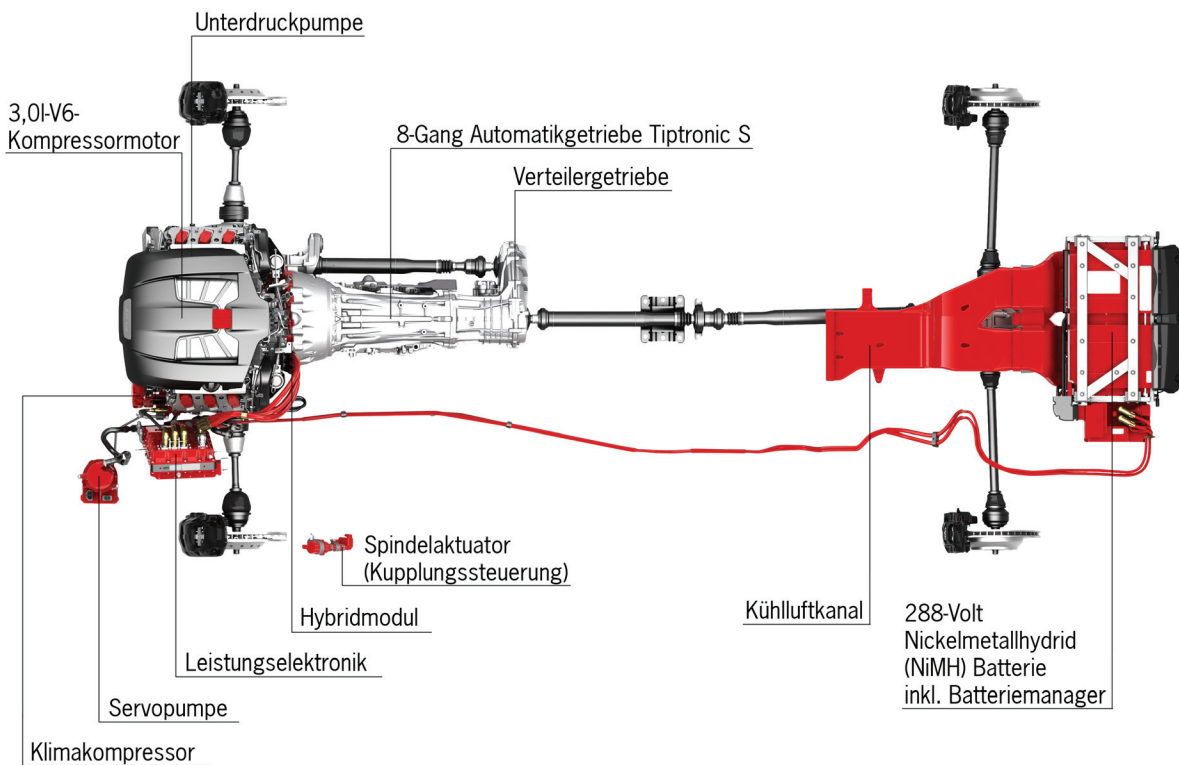


Abbildung 2-2: Paralleler Hybridantrieb mit Momentenaddition<sup>9</sup>

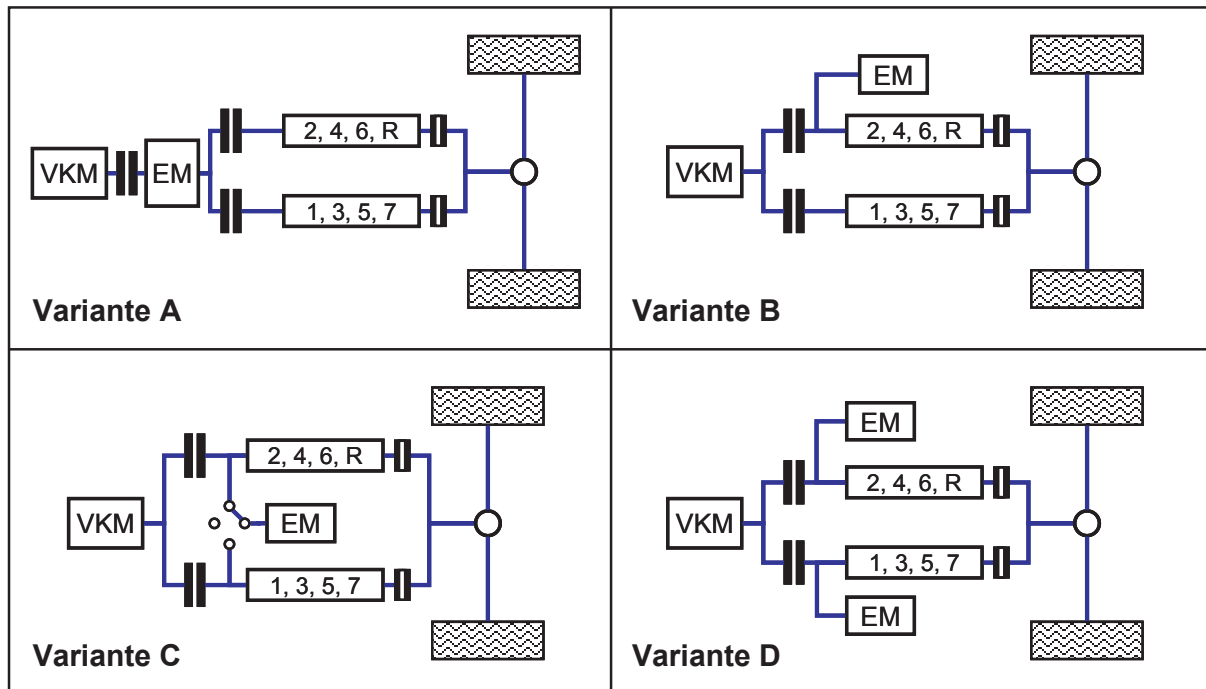
Die verschiedenen möglichen Wiederstartverfahren werden später detailliert beschrieben<sup>10</sup>. Die elektrische Energieversorgung stellt eine Nickel-Metallhydrid-Batterie (NiMH-Batterie) dar, die unter dem Kofferraumboden untergebracht ist. Sie wird mit Luft aus dem Fahrzeuginnenraum gekühlt, die über einen Kühlluftkanal angesaugt wird. Durch die modulare Bauweise lässt sich der Hybridantrieb gut in den bestehenden Baukasten integrieren. Das 8-Gang-Automatikgetriebe ist für die Anwendung im Hybridantrieb zusätzlich mit einer elektrischen Ölpumpe ausgerüstet, um während des rein elektrischen Fahrbetriebs mit hohen Antriebsmomenten und niedrigen Drehzahlen die Ölversorgung sicher zu stellen.

Mögliche Triebstrangkfigurationen in Verbindung mit einem Doppelkupplungsgetriebe (DKG) stellte z.B. die Firma Getrag<sup>11</sup> im Jahr 2009 vor (Abbildung 2-3).

<sup>9</sup> Porsche 2009

<sup>10</sup> siehe Abschnitt 2.2.3

<sup>11</sup> Getrag 2009

Abbildung 2-3: Schemata DKG-Hybride<sup>12</sup>

Eingesetzt wurde ein solcher Antrieb in einem Fahrzeug der Marke Mini. Mit diesem System sind verschiedene Typen paralleler Hybridantriebe mit Momentenaddition darstellbar:

- Einwellen-Ausführung (Variante A) mit koaxialer Anordnung von Verbrennungsmotor und E-Maschine.
- Zweiwellen-Ausführungen (Varianten B, C, D) mit Anordnung der Antriebsmaschinen an verschiedenen Getriebewellen.

Auch bei diesen Konfigurationen kann ein konventioneller Starter entfallen, wenn es gelingt, den Verbrennungsmotor in jeder Fahrsituation komfortabel und dem Fahrerwunsch entsprechend mit Hilfe des elektrischen Antriebs zu starten.

Die von Porsche 2010 vorgestellte Konzeptstudie 918 Spyder (Abbildung 2-4) kombiniert Momenten- und Zugkraftaddition in einem Fahrzeug.

<sup>12</sup> nach Blessing Roth-Stielow 2008



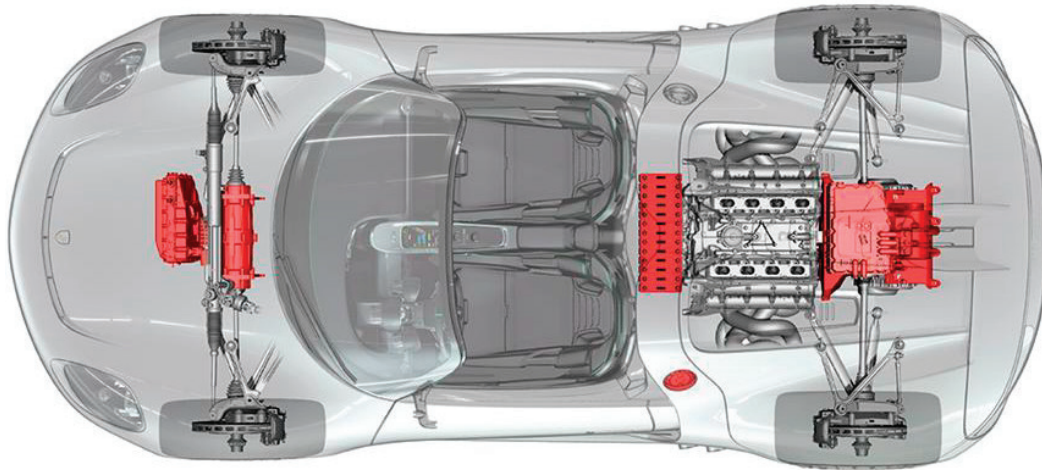


Abbildung 2-4: Porsche 918 Spyder als paralleler Hybrid mit Zugkraftaddition<sup>13</sup>

Die Momentenaddition erfolgt an der Hinterachse, die vom Verbrennungsmotor und einer E-Maschine jeweils separat oder gemeinsam angetrieben werden kann. Zusätzlich verfügt die Vorderachse über einen elektrischen Antrieb (rot eingefärbt), womit die Zugkraftaddition von Vorder- und Hinterachse „durch die Straße“ erfolgen kann. Triebstrangkfigurationen mit einer elektrisch angetriebenen Achse werden auch teilweise als Axle-Split-Hybrid<sup>14</sup> oder P4-Hybrid<sup>15</sup> bezeichnet. Der Wiederstart des Verbrennungsmotors erfolgt in diesem Fahrzeug ebenfalls über die am Hauptgetriebe angeordnete E-Maschine.

### 2.1.3 Anforderungen an parallele Hybridantriebe

Kirchner<sup>16</sup> formuliert eine Liste von Anforderungen an hybride Antriebe für Krafffahrzeuge und unterteilt sie in die beiden Kategorien

- Verbrauchs- und Emissions-getriebene Anforderungen und
- Komfort-getriebene Anforderungen.

Aus den Anforderungen der ersten Gruppe lassen sich die verschiedenen Betriebszustände eines Hybridantriebs ableiten. Während es für so genannte Mild-Hybride genügt ein Anfahren alleine mit dem elektrischen Antrieb darzustellen, wird von Voll-Hybriden zusätzlich ein emissionsfreier Antrieb zumindest für begrenzte Strecken gefordert. Dieses Kriterium beeinflusst direkt die Auslegung beider Antriebsaggregate und die Größe des elektrischen Energiespeichers. Zur

---

<sup>13</sup> Porsche 2010

<sup>14</sup> Blessing Roth-Stielow 2008

<sup>15</sup> Noreikat 2010

<sup>16</sup> Kirchner 2007

Vermeidung des Leerlaufverbrauchs des Verbrennungsmotors beim Fahrzeugstillstand wird dieser in den meisten hybriden Antriebssystemen abgeschaltet. Das dafür notwendige Startsystem kann in der Regel zur Anfahrunterstützung genutzt werden. Das Aufladen des elektrischen Energiespeichers soll bei Hybridantrieben vorzugsweise durch die Rückgewinnung kinetischer Energie beim Verzögern des Fahrzeugs erfolgen (Rekuperation). Bei konventionellen Fahrzeugen wird diese Energie in Form von Wärme vollständig an die Umgebung abgegeben (Dissipation).

Eine Unterstützungsfunktion (Boost) kann durch Nutzen der Drehmomente beider Antriebseinrichtungen eine zusätzliche Beschleunigungsleistung zur Verfügung stellen. Dies erfordert die mechanische Koppelung von Verbrennungs- und E-Motor<sup>17</sup>.

Als Vertreter der Anforderungen aus Komfort-Sicht führt Fesefeldt<sup>18</sup> den „möglichst unmerklichen“ Start des Verbrennungsmotors auf und nennt Impuls- und Schlepp- bzw. Schlupfstart als mögliche Startverfahren, die jeweils eine andere Auslegung der Massenträgheiten der Triebstrangkomponenten erfordern. Eine Differenzierung hinsichtlich der Fahrzeuggeschwindigkeit oder des Fahrerwunsches nimmt er dabei nicht vor. Zusätzlich zum Wiederstart des Verbrennungsmotors können weitere komfortrelevante Kriterien identifiziert werden. So kann auch das Abstellen des Verbrennungsmotors Schwingungen verursachen, wenn er beispielsweise Resonanzen durchfährt. Die Innenraumklimatisierung muss insbesondere bei Fahrzeugen im Premium-Segment auch beim Fahrzeugstillstand arbeiten können. Deshalb muss im Fahrzeugstillstand die elektrische Energieversorgung des Klimakompressors auch bei leerem elektrischem Energiespeicher gewährleistet sein, weshalb die Möglichkeit des Standladens vorgesehen werden sollte.

## 2.2 Startverfahren für Verbrennungsmotoren

Unter dem Wiederstart (auch als dynamischer Start bezeichnet) ist grundsätzlich der Start einer VKM während eines beliebigen Fahrzustands zu verstehen. Um die Unterschiede zu anderen Startvarianten zu verdeutlichen, wird im folgenden Abschnitt zunächst auf herkömmliche Startverfahren sowie auf den DI-Direktstart und dessen Varianten eingegangen, bevor Wiederstartverfahren für parallele Hybridantriebsstränge erläutert werden.

---

<sup>17</sup> Fleckner 2010

<sup>18</sup> Fesefeldt 2010

### 2.2.1 Konventioneller Start

Bei konventionell angetriebenen Fahrzeugen übernimmt ein elektrischer Motor die Verantwortung für den sicheren Start des Verbrennungsmotors. Über ein Stirnradgetriebe, das über ein hohes Übersetzungsverhältnis<sup>19</sup> von  $i = 10$  bis  $i = 20$  verfügt, wird das Drehmoment zum Start an die Kurbelwelle übertragen. Dieses Übersetzungsverhältnis wird durch eine am Schwungrad angebrachte Außenverzahnung und ein relativ kleines Ritzel auf dem Startermotor realisiert. Dieses Ritzel kann durch einen elektromagnetisch betätigten Mechanismus eingespurt werden, wodurch der Leistungsfluss vom Starter zum Verbrennungsmotor ermöglicht wird. Die Leistungen der eingesetzten Elektromotoren reichen in PKW bis etwa 2,5 kW für Ottomotoren und bis ca. 7,0 kW für größere Dieselmotoren<sup>19</sup> im Nutzfahrzeugbereich. Der Startablauf setzt sich aus folgenden Phasen zusammen:

- Starter einspuren
- Motor andrehen und beschleunigen
- Gemischbildung setzt ein
- Zündung freigeben
- Starter ausspuren und deaktivieren

Durch den geringen Durchmesser des Starter-Ritzels und den großen Durchmesser des Schwungrads ergibt sich ein geringer Überdeckungsgrad der Verzahnung, was zu starker Geräuschbildung führt. Begünstigt wird die Geräuschentwicklung dadurch, dass diese Verzahnung nicht in einem Ölbad läuft, sondern trocken ineinander kämmt. Zudem ist die Startdynamik durch den aufwändigen Ablauf und die relativ geringe Leistung des Startermotors eingeschränkt. Durch die hohe Marktdurchdringung und den großen Erfahrungsschatz, der bezüglich der Auslegung des Ritzelstarters existiert, ist er ein kostengünstiges Bauteil. Aufgrund des hohen Übersetzungsverhältnisses gelingt auch ein Start bei sehr niedrigen Temperaturen problemlos.

In der Vergangenheit wurden wiederholt Versuche unternommen, Nachteile des Ritzelstarters abzumildern oder zu eliminieren. So wurde der E-Motor beispielsweise in das Kurbelgehäuse integriert, wodurch die Verzahnung im Ölbad läuft und die zusätzliche Kapselung des Aggregats durch das Kurbelgehäuse eine Schallabstrahlung vermeidet<sup>20</sup>. Bei einem Defekt des Starters ist durch die

---

<sup>19</sup> Bosch 2007

<sup>20</sup> Ziegler 1984

Integration in den Verbrennungsmotor allerdings mit einem erhöhten Reparaturaufwand zu rechnen.

Eine inzwischen serienmäßig eingesetzte Weiterentwicklung des konventionellen Starters stellen Start-Stopp-Systeme dar. Sie sind auf die höhere Anzahl der Anlassvorgänge ausgelegt. Außerdem findet das Einspuren vor dem eigentlichen Start statt, sodass die dafür notwendige Zeitdauer nicht die Startdynamik mindert<sup>21</sup>. Bei Ausführung als Riemenstartergenerator (RSG) bieten sie neben akustischen Vorteilen weitere funktionale Möglichkeiten wie z.B. Rekuperation in Schubphasen und den Entfall der Lichtmaschine.

### **2.2.2 Direktstart und Varianten**

Unter dem konventionellen (DI-)Direktstart eines Verbrennungsmotors ist der Start ohne Fremdenergie - also ohne den Einsatz eines Startermotors - zu verstehen. Er soll allein durch den geschickten Einsatz von Einspritzung und Zündung erfolgen. Das Moment für den Motorhochlauf wird also nur aus der Verbrennungsenergie einzelner Zylinder bezogen. Grundvoraussetzung für dieses Startverfahren ist ein direkt einspritzender Ottomotor (DI-Ottomotor).

Mithilfe einer geeigneten Lage-Erkennung wird ein Zylinder identifiziert, der für den Direktstart geeignet ist. Bedingung dafür ist, dass seine Ein- und Auslass-Ventile geschlossen sind und der Kolben hinter dem oberen Totpunkt (OT) steht. In diesen Zylinder wird nun über das Hochdruckeinspritzventil Kraftstoff eingespritzt. Nach einer kurzen Zeitdauer für die Gemischbildung wird das Kraftstoff-Luft-Gemisch mit der Zündkerze entflammt. Der entstehende Verbrennungsdruck bewegt den Kolben nach unten und versetzt dadurch die Kurbelwelle in eine Drehbewegung. Der Motorhochlauf beginnt. Für den Starterfolg ist die Überwindung der beiden ersten Kompressionen ausschlaggebend<sup>22</sup>. Beim Startbeginn müssen die geschlossenen Brennräume mit ausreichend Frischluft gefüllt sein, um die notwendige Verbrennungsenergie bereitstellen zu können. Diese Füllung hängt von der Kolbenstellung und dem Restgasgehalt ab. Um dies zu gewährleisten, sorgt eine spezielle Steuerung während des Motorauslaufs für eine Spülung der Zylinder mit Frischluft und erfasst die exakte Auslaufposition. Während bei Motortemperaturen zwischen 5°C und 50°C eine hohe Starticherheit gewährleistet werden kann, nimmt diese mit höheren Temperaturen ab, bis ab ca. 70°C ein Start nicht zuverlässig möglich ist. Ursachen dafür sind die mit zunehmender Motortemperatur abnehmende

---

<sup>21</sup> Müller 2010

<sup>22</sup> Kulzer et al. 2003

Luftdichte im Brennraum und die abnehmende Qualität der Gemischbildung aufgrund der geringen Ladungsbewegung<sup>23</sup>.

Um diesem Nachteil zu begegnen wurde der erweiterte Direktstart entwickelt. Durch Einspritzung und Zündung in einem Zylinder, der vor dem Kompressions-OT steht, wird eine Rückdrehung des Motors bewirkt, die zu einer Vorverdichtung in einem anderen Zylinder führt. Dies erhöht die erzielbare Arbeit des Arbeitstaktes dieses Zylinders, womit der Motorhochlauf ermöglicht wird. Weitere Details zu dieser Variante sind bei Kulzer<sup>24</sup> zu finden.

Eine andere Erweiterungsmöglichkeit des Direktstartverfahrens ist der E-Maschinen-unterstützte oder anlasserunterstützte Direktstart<sup>25</sup>. Diese Variante unterscheidet sich vom konventionellen Direktstartverfahren dadurch, dass die Kurbelwelle nicht durch ein internes, aus einer Verbrennung resultierendes Moment, sondern durch ein extern erzeugtes Moment einer E-Maschine in Rotation versetzt wird. Die erste Kompression wird also immer mit Unterstützung des elektrischen Motors überwunden, der weitere Motorhochlauf erfolgt autark durch die Befuerung der Zylinder. Im Gegensatz zum konventionellen Start mit einem Ritzelstarter kann dabei die unterstützende E-Maschine nach Überwindung des ersten OT deaktiviert werden. Abbildung 2-5 zeigt den Ablauf des Verfahrens schematisch.

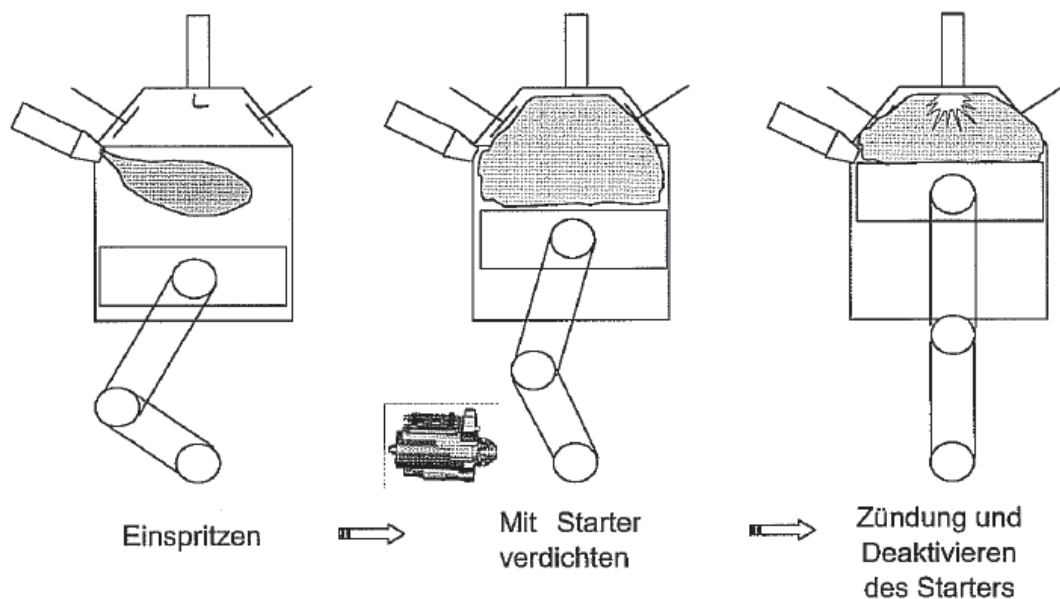


Abbildung 2-5: Ablauf des unterstützten Direktstarts<sup>26</sup>

<sup>23</sup> Gerhardt et al. 2003

<sup>24</sup> Kulzer et al. 2003

<sup>25</sup> Laubender 2005

<sup>26</sup> Laubender 2005

Auch für diese Variante wird eine Auslauferkennung benötigt, um den geeigneten Zylinder für die erste Einspritzung und Zündung zu identifizieren. Eine ausführlichere Beschreibung dieses Verfahrens ist z.B. bei Kulzer<sup>27</sup> zu finden.

Der Direktstart des Verbrennungsmotors erscheint gerade für Hybridantriebsstränge geeignet, da je nach Variante keine mechanische Arbeit aufgewendet werden muss, um den Start durchzuführen. Der elektrische Antrieb müsste kein Moment für den Wiederstart bereitstellen, wodurch der Betriebsbereich des rein elektrischen Fahrens bei gleicher installierter elektrischer Leistung erweitert werden könnte. Das Abstellen des Verbrennungsmotors während der Fahrt bzw. der rein elektrische Fahrbetrieb werden üblicherweise erst ab bestimmten Motortemperaturen zugelassen. Mit zunehmender Temperatur sinkt jedoch die Frischgasmasse im Zylinder während des Starts und damit die Startzuverlässigkeit<sup>28</sup>. Der erweiterte Direktstart verschlechtert die Startdynamik aufgrund der Rückdrehphase. Die beschriebenen Varianten von konventionellem und erweitertem Direktstart sind deshalb nicht als alleinige Möglichkeit zum Wiederstart in einem Voll-Hybridfahrzeug geeignet. Mit Unterstützung der E-Maschine(n) des Hybrid-Antriebsstrangs kann der Direktstart aber als unterstützter Start durchgeführt werden, womit die zum Wiederstart aufzubringende elektrische Energie verringert und die Startersicherheit gewährleistet werden kann.

### **2.2.3 Wiederstart in parallelen Vollhybrid-Antriebssträngen**

Unter dem Wiederstart ist der Start des (betriebswarmen) Verbrennungsmotors während eines beliebigen Fahrzustands zu verstehen. Zu welchem Zeitpunkt der Verbrennungsmotor gestartet wird, ist nicht durch das Startsystem vorgegeben, sondern hängt von der Gesamtauslegung des Systems sowie der Betriebsstrategie ab. Der Start kann in parallelen Vollhybrid-Antriebssträngen auf verschiedene Arten realisiert werden. Dazu sind verschiedene Starteinrichtungen erforderlich. Sie werden im Folgenden mit ihren jeweiligen Vorzügen und Nachteilen diskutiert.

#### **Start mit Ritzelstarter**

Der Wiederstart kann mit Hilfe eines konventionellen Ritzelstarters durchgeführt werden. Dabei wirken sich mangelnde akustische Eigenschaften und die schlechte Startdynamik negativ auf die Startqualität aus. Dies widerspricht auch den in Kapitel 2.3.3 formulierten Anforderungen an das hybride Antriebssystem. Aufgrund des hohen Übersetzungsverhältnisses zwischen Startermotor und Kurbelwelle nimmt

---

<sup>27</sup> Kulzer et al. 2003

<sup>28</sup> Zülch 2007

das vom Starter maximal stellbare Drehmoment schnell ab, wodurch der Hochlauf des Verbrennungsmotors nicht weiter unterstützt werden kann. Dies führt bei hohen Zieldrehzahlen zu langen Startdauern. Der Startermotor erhöht zudem die Fahrzeugmasse und nimmt zusätzlichen Bauraum ein.

Vor- und Nachteile des konventionellen Starters lassen sich folgendermaßen zusammenfassen<sup>29</sup>:

Vorteile des Ritzelstarters:

- Zuverlässig, robust, erprobt, ausgereift
- Hohes (Kalt-)Startdrehmoment durch große Übersetzung
- Sichere Drehmomentübertragung über Zahnräder
- kostengünstig (auch durch Skaleneffekte)

Nachteile des Ritzelstarters:

- Bauraumbedarf für den Anlasserzahnkranz und Startermotor
- zusätzliche Masse des Anlassermotors
- Charakteristisches Anlassergeräusch
- Lange Startdauer durch Einspurvorgang und Synchronisierung
- Durch nicht variierbaren Startablauf keine Möglichkeit der Anpassung des Starts an den Fahrerwunsch gegeben

### **Start mit RSG**

Zusätzlich zur Traktions-E-Maschine im Antriebsstrang kann eine weitere E-Maschine als Startaggregat eingesetzt werden. Eine bekannte Bauform ist der Riemen-Starter-Generator (RSG). Die E-Maschine ist dabei in den Riementrieb integriert und kann ein Moment an die Kurbelwelle übertragen oder im generatorischen Betrieb ein Moment aufnehmen. Die Höhe des E-Maschinen-Moments ist durch den Riemen begrenzt. Für hohe Momente sind große Riemenspannkraften notwendig, was zu erhöhten Reibungsverlusten und Verschleißwerten führen kann. Da die E-Maschine ständig mit der Kurbelwelle dreht, ist ein Einspurvorgang wie beim konventionellen Ritzelstarter nicht notwendig. Die dafür notwendige Zeitdauer entfällt, was der Startdynamik zugutekommt.

Die Vor- und Nachteile des RSG lassen sich folgendermaßen zusammenfassen<sup>30</sup>:

---

<sup>29</sup> Fesefeldt 2010

Vorteile des RSG:

- Flexibilität in der Positionierung im Riementrieb
- Anlasser und Lichtmaschine in einem Bauteil
- Übersetzungsverhältnis ermöglicht kleine Bauform
- Drehmomentbereitstellung ohne Verzögerung
- Höherer elektrischer Wirkungsgrad als Lichtmaschine und Anlasser
- Nahezu geräuschlos
- Hohe erreichbare Drehzahlen

Nachteile des RSG:

- Verluste durch Drehmomentübertragung über Riementrieb
- Grenzen der Kraftübertragung über den Riemen
- Verschleiß des Riemens
- keine Gewährleistung der Kaltstartfähigkeit
- Kosten für RSG und zweite Leistungselektronik
- evtl. separate (dritte) Spannungsebene notwendig

### **Start über Trenn- oder Anfahrlement**

In allen bekannten parallelen Voll-Hybridantrieben ist der Motor über ein entsprechend lastschaltbares Element vom Resttriebstrang abkoppelbar (z.B. VW Toaureg<sup>31</sup>, Porsche Cayenne<sup>32</sup>, Getrag DKG-Hybrid<sup>33</sup>). Dieses Trennelement ist bei diesen Systemen als nass oder trocken laufende Kupplung ausgeführt. Allen Antriebskonzepten ist das Ziel gemeinsam dieses Aggregat so zu gestalten und anzuordnen, dass die zum Start des Verbrennungsmotors notwendige Fremdenergie mit ihm übertragen werden kann. So kann eine zusätzliche Starteinrichtung (Ritzelstarter, RSG) entfallen, was Gewichtseinsparungen und Package-Vorteile mit sich bringt. Je nach Aufbau des Triebstrangs werden verschiedene Startabläufe und -verfahren eingesetzt, wodurch sich auch die Anforderungen an das Trennelement verändern.

---

<sup>30</sup> Fesefeldt 2010

<sup>31</sup> Philipp Scholz 2008

<sup>32</sup> Porsche 2009

<sup>33</sup> Blessing Roth-Stielow 2008, vgl. Abschnitt 2.1.1



Zum einen kann der Verbrennungsmotor über das schlupfende Trenn- oder Anfahrerelement angedreht werden, was eine präzise Steuerung oder Regelung dieser Komponente erfordert. Nach dem Start wird das Trennelement vollständig geschlossen und damit der Momentenfluss zum Triebstrang hergestellt. Das während des Starts aufgebrachte Kupplungsmoment muss durch die E-Maschine kompensiert werden, um Auswirkungen auf die Fahrzeuginnenbeschleunigung und damit das Komfortempfinden der Fahrzeuginsassen zu vermeiden. Das notwendige Startmoment muss somit jederzeit als Reserve vorgehalten werden und steht damit nicht für den Antrieb des Fahrzeugs während des elektrischen Fahrbetriebs zur Verfügung. Das Anfahrerelement ist mit dafür verantwortlich, dass sich das Getriebeeingangsmoment während des Wiederstarts nicht verändert bzw. dem Fahrerwunsch nachgeführt werden kann. Abbildung 2-6 zeigt schematisch den Ablauf eines Wiederstarts. Zu sehen sind unter anderem die Drehzahlen von E-Maschine ( $n_{EM}$ ), Getriebeeingang ( $n_{Turbine}$ ) und Verbrennungsmotor ( $n_{ICE}$ ), der Momentenverlauf an der Trennkupplung ( $M_{K0}$ ) sowie weitere Informationen die zwischen beteiligten Steuergeräten ausgetauscht werden (Solldrehzahlvorgabe bzw. Startfreigabe durch Getriebesteuergerät „GSG-desired speed“ bzw. „K0 release“). Der Startablauf wird im Abschnitt 2.3.4 genauer erläutert.

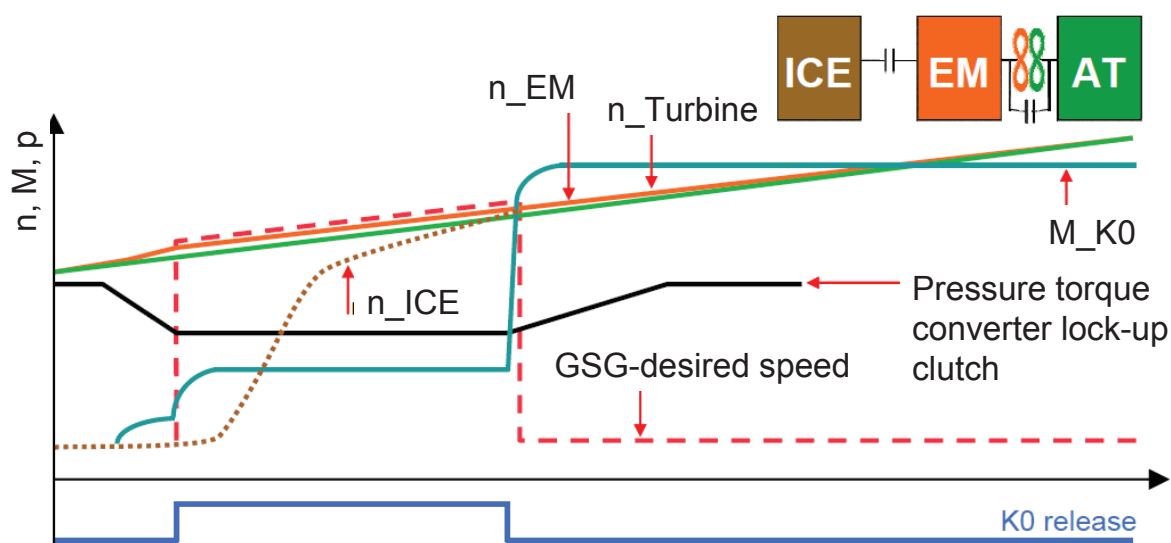


Abbildung 2-6: Ablauf des Schlupfstarts (schematisch)<sup>34</sup>

Zum anderen kann das Andrehen der VKM durch die Übertragung eines gespeicherten Drehimpulses erfolgen. Dazu wird zunächst in der Rotation einer Triebstrangkomponente bei vollständig geöffneter Trennkupplung kinetische Energie gespeichert. Diese drehende Masse stellt üblicherweise die Traktions-E-Maschine

dar. Sie wird auf eine bestimmte Drehzahl beschleunigt, bis der in ihr gespeicherte Drehimpuls ausreichend zum Start des Verbrennungsmotors ist. Dann wird die Trennkupplung sehr schnell geschlossen und der Motor dadurch angeschleppt<sup>35</sup>. Das Element, das die E-Maschine mit dem Antriebsstrang verbindet (Anfahrelement), muss während dieses Vorgangs so steuer- oder regelbar sein, dass für den Fahrer keine Änderungen der Fahrzeuglängsbeschleunigung spürbar sind. Während die Steuerung des Trennelements lediglich das sichere Trennen und Schließen des Momentenflusses zum und vom Verbrennungsmotor gewährleisten muss, wird für das Anfahrelement eine präzise Regelung benötigt.

Der Impulsstart ist bei Fahrzeugen, die über einen hydraulischen Drehmomentwandler als Anfahrelement verfügen nicht durchführbar, da die notwendige Drehzahldifferenz zwischen E-Maschine und Getriebeeingang nicht dargestellt werden kann<sup>36</sup>, ohne das notwendige Eingangs- und das resultierende Ausgangsmoment des Wandlers stark zu verändern. Der im Jahr 2004 vorgestellte VW Golf Eco-Power<sup>37</sup> führt den Wiederstart mittels Impulsstart durch. Dabei kommt ein Doppelkupplungsgetriebe zum Einsatz, dessen Kupplungen für die Steuerung des Momentenflusses von der E-Maschine zum Abtrieb verantwortlich sind.

Vor- und Nachteile des Wiederstarts mithilfe einer Anfahr- oder Trennkupplung lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Vorteile:

- keine zusätzliche Starteinrichtung notwendig
- keine zusätzliche Leistungselektronik notwendig
- hohe Startdynamik möglich

Nachteile:

- Momentenreserve muss vorgehalten werden
- aufwändige Steuerung von Trenn- und/oder Anfahrelement notwendig

---

<sup>34</sup> Philipp Scholz 2008

<sup>35</sup> Hofmann 2005

<sup>36</sup> Birkhold 2008

<sup>37</sup> Hack 2005

## 2.3 Das Wiederstartsystem

### 2.3.1 Begriffsabgrenzung

Da in der Literatur derzeit keine Abgrenzung oder Definition des Begriffs „Wiederstartsystem“ zu finden ist, soll dieser im Folgenden umrissen werden und die Unterschiede zu einem konventionellen Startsystem oder einem Start-Stopp-System dargestellt werden.

Im Sinne eines konventionellen Fahrzeugs wird das Startsystem von einem (elektrischen) Startermotor und dessen Energieversorgung gebildet<sup>38</sup>. Dabei sind verschiedene Bauarten bekannt, die sich nach Art ihrer Koppelung an den Verbrennungsmotor (Riemen, Zahnkranz, etc.) und ihres elektrischen/mechanischen Aufbaus unterscheiden. Konventionelle Startsysteme werden auf Starticherheit bei tiefen Temperaturen ausgelegt, Komfort- und Dynamikanforderungen treten dabei in den Hintergrund<sup>39</sup>. Das Startsystem hat keine direkte Auswirkung auf den Resttriebstrang, sondern ist lediglich in der Lage ein Moment an den Verbrennungsmotor abzugeben. Rückwirkungen auf den Antriebsstrang, die durch den Start verursacht werden, können durch einfache Maßnahmen verhindert werden. Dazu muss sichergestellt sein, dass der Momentenfluss von der Kurbelwelle zum Rad sicher unterbrochen ist. Dies kann durch Öffnen des Anfahrlements oder durch Maßnahmen im Hauptgetriebe (z.B. Neutralstellung wählen) erfolgen.

In Vollhybrid-Antriebssträngen erfolgt der Start des Verbrennungsmotors nicht nur bei Fahrzeugstillstand, sondern kann auch bei unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten während des elektrischen Fahrens oder während des Segelns stattfinden. Dabei übernimmt die Traktions-E-Maschine zusätzlich die Aufgabe, das für den Start notwendige Moment bereitzustellen. Durch die daraus resultierende Koppelung der Komponenten innerhalb des Antriebsstrangs hat eine Vielzahl weiterer Triebstrangkomponenten Einfluss auf den Startprozess. Da zwischen den Komponenten und dem gesamten Antriebsstrang bis zu den antreibenden Rädern Wechselwirkungen bestehen können, wirkt sich ihr Zusammenspiel auf die Längsdynamik des Fahrzeugs während des Wiederstarts aus.

Das zu betrachtende Wiederstartsystem schließt deshalb in parallelen Vollhybrid-Antriebssträngen mindestens die Komponenten Verbrennungsmotor, E-Maschine, Trennelement (Kupplung) und Anfahrlement ein. Je nach Anordnung des

---

<sup>38</sup> Bosch 2007

<sup>39</sup> Berkan 2006

elektrischen Antriebsaggregats müssen Teile des Getriebes und des Triebstrangs ebenfalls mit einbezogen werden. Die zugehörigen Steuerungen und Regelungen sowie die übergeordnete Gesamttriebstrang-Steuerung müssen mitbetrachtet werden. In Vollhybrid-Antriebssträngen sind Nebenaggregate wie Lenkhilfe, Bremskraftverstärkung und Klimakompressor vorzugsweise elektrisch angetrieben und besitzen deshalb im Gegensatz zum konventionellen Fahrzeug keinen direkten Einfluss auf den Startvorgang und das für den Wiederstart des Verbrennungsmotors aufzubringende Moment. Indirekte Rückwirkungen auf das Bordnetz sind allerdings nicht auszuschließen.

### 2.3.2 Begriffsdefinition

Auf den obigen Ausführungen aufbauend schlägt der Autor als neue Definition des Begriffs Wiederstartsystem Folgendes vor: Das Wiederstartsystem lässt sich als die Gesamtheit der technischen Einrichtungen in einem Hybridantriebsstrang beschreiben, die zum Starten und Ankoppeln des Verbrennungsmotors sowie zur anschließenden Verteilung der Drehmomente zwischen den antreibenden Aggregaten benötigt werden. Dies beinhaltet auch alle Teile des Triebstrangs, die der Momentenübertragung zwischen E-Maschine und VKM dienen und diejenigen Komponenten, die während des Wiederstarts den Momentenfluss von der E-Maschine zum angetriebenen Rad beeinflussen können.

### 2.3.3 Anforderungen an das Wiederstartsystem in Hybridantrieben

An das Wiederstartsystem bestehen verschiedene Anforderungen aus technisch-funktionaler Sicht und aus Kundensicht (Abbildung 2-7).

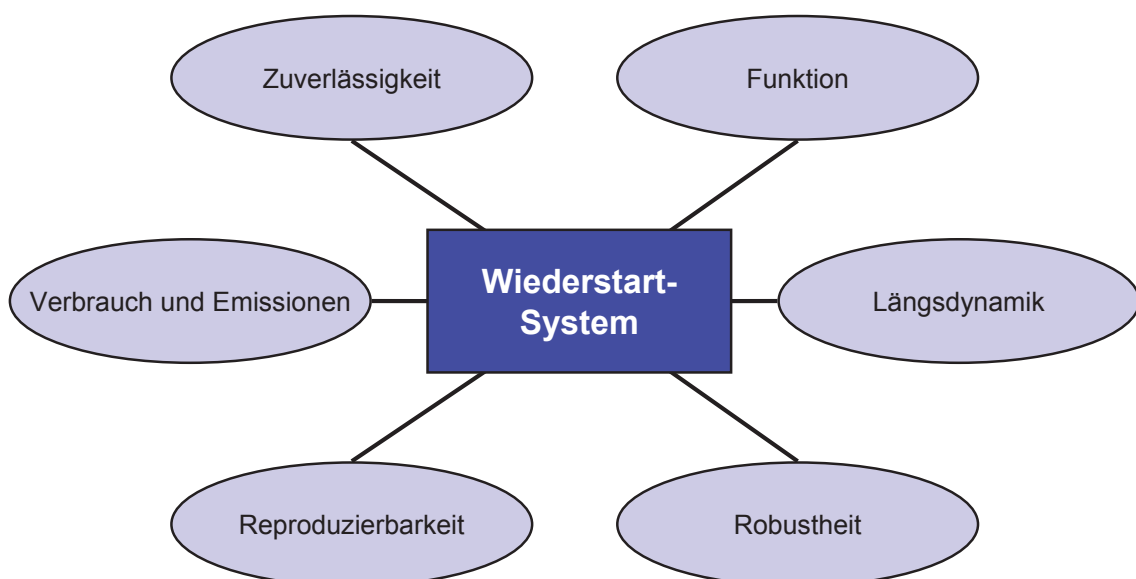


Abbildung 2-7: Anforderungen an das Wiederstartsystem

Die einzelnen Begriffe werden im Folgenden zunächst für sich erläutert und anschließend in den Zusammenhang mit dem Wiederstartsystem gebracht. Dabei ist zu beachten, dass die einzelnen Anforderungen nicht immer unabhängig voneinander zu betrachten sind.

### **Zuverlässigkeit**

Der Begriff der Zuverlässigkeit steht im Zusammenhang mit der Funktionsfähigkeit eines Produkts. Wird die geforderte Funktion vom Produkt jederzeit unter allen Bedingungen erfüllt, spricht man von einem sehr zuverlässigen Produkt<sup>40</sup>. Andere Definitionen sehen eine Erweiterung um den Begriff der Wahrscheinlichkeit vor. So ist die Zuverlässigkeit nach der VDI-Richtlinie 4001<sup>41</sup> die Wahrscheinlichkeit, dass ein Produkt in einer definierten Zeitdauer unter gegebenen Funktions- und Umgebungsbedingungen nicht ausfällt. Dies berücksichtigt, dass das Ausfallgeschehen von zufälligen, stochastisch verteilten Ursachen ausgeht und sich daher nur durch Wahrscheinlichkeiten quantitativ beschreiben lässt.

Die Zuverlässigkeit ist demnach keine direkt messbare Größe. Hiervon unterscheiden sich die so genannten deterministischen Eigenschaften (Merkmale) eines Produkts, welche direkt messbar sind (wie Gewicht, Abmessungen, Festigkeit, elektrische und thermische Leitfähigkeit). Das Merkmal Zuverlässigkeit ist allen technischen Produkten gemeinsam. Das bedeutet, dass kein technisches Produkt frei von der Möglichkeit ist, auszufallen.

Die Funktionszuverlässigkeit ist die Fähigkeit einer Betrachtungseinheit, eine geforderte Funktion unter gegebenen Bedingungen für ein gegebenes Zeitintervall zu erfüllen. Die Funktionszuverlässigkeit kann einerseits qualitativ beschrieben oder andererseits quantitativ als Überlebenswahrscheinlichkeit ermittelt werden<sup>42</sup>.

Zur Erhöhung der Zuverlässigkeit können verschiedene Maßnahmen ergriffen werden. Diese sind beispielsweise:

- Einsatz betriebsbewährter und qualifizierter Komponenten
- Einsatz redundanter und diversitärer Komponenten
- Maßnahmen der Fehlerselbsterkennung
- Anwendung des Prinzips „Fail-Safe“

---

<sup>40</sup> Bertsche 2010

<sup>41</sup> VDI 2006

<sup>42</sup> VDI 2007

- Prüfbarkeit der Komponenten und Systemkomplexe

Im Wiederstartsystem können diese Maßnahmen nur teilweise angewendet werden. Aufgrund des hohen Neuigkeitsgrades paralleler Hybridantriebsstränge existieren wenige Erfahrungen aus dem Betrieb der eingesetzten Komponenten für diesen Anwendungsfall. Redundanzen werden im Fahrzeugbau nach Möglichkeit vermieden, um die Systemkosten möglichst gering zu halten und Package- sowie Gewichtsprobleme zu vermeiden. Deshalb müssen die Steuerungssysteme die Zuverlässigkeit gewährleisten können. Auf das Wiederstartsystem bezogen bedeutet dies, dass der Wiederstart unter allen Randbedingungen durchgeführt werden kann. Wird der Wiederstart nicht erfolgreich abgeschlossen, kann dies im Extremfall zum Liegenbleiben des Fahrzeugs führen, da die weitere Energieversorgung des Antriebs und eventuell der Nebenaggregate nicht weiter gewährleistet werden kann. In der Steuerung müssen entsprechende Sicherheitsfunktionen zur Gewährleistung des Fail-Safe-Prinzips vorgesehen werden. Die Prüfbarkeit von Komponenten und Systemkomplexen ist durch die OBD-Gesetzgebung<sup>43</sup> fester Bestandteil vieler Steuerungen von Fahrzeugantrieben und damit auch des Wiederstartsystems. Fehler müssen erkannt und auf ihre Auswirkungen muss reagiert werden.

### **Robustheit**

Der Begriff Robustheit leitet sich vom lateinischen „robur“ (Hart-, oder Eichenholz) ab. Ins Deutsche übersetzen lässt er sich allgemein mit „Unempfindlichkeit“ oder „Widerstandsfähigkeit“<sup>44</sup>. In den verschiedenen Disziplinen kommen dem Begriff verschiedene Bedeutungen zu, die im Folgenden erläutert werden sollen. Anschließend wird der Begriff auf das Wiederstartsystem übertragen.

In der Produktion wird der Begriff „Robuster Produktionsprozess“ verwendet. Für die Automobilindustrie existiert hierzu der VDA-Band „Robuster Produktionsprozess Produktherstellung und -lieferung“<sup>45</sup> aus der Reihe „Das gemeinsame Qualitätsmanagement in der Lieferkette“. Danach ist ein robuster Produktionsprozess so gestaltet, dass er gegen unerwünschte Einflussgrößen unempfindlich ist und eine termin- und abaufgerechte Produktion mit ausgezeichneter Qualität unter Einhaltung des geplanten wirtschaftlichen Aufwandes sicherstellt.

In der Statistik ist die Robustheit eine Eigenschaft von Verfahren (z.B. Punktschätzung, Intervallschätzung, statistischen Testverfahren). Erfüllen diese trotz

---

<sup>43</sup> <http://www.arb.ca.gov/msprog/obdprog/obdprog.htm>; Bosch 2007

<sup>44</sup> Duden 2006

<sup>45</sup> VDA 2007

Verletzung dem Verfahren zugrunde liegender Voraussetzungen gewisse Gütekriterien, werden sie als robust bezeichnet. Je nach den diskutierten Voraussetzungen sind verschiedene Arten von Robustheit (z.B. Robustheit gegen die Annahme der Normalverteilung) zu unterscheiden<sup>46</sup>.

In der Wirtschaftsinformatik ist die Robustheit ein Merkmal der Softwarequalität. Sie stellt die Fähigkeit eines Softwareprodukts dar, fehlerhaftes Verhalten seiner Umwelt, wie beispielsweise fehlerhafte Eingaben, durch geeignete definierte Behandlung (Plausibilitätsprüfungen, o. ä.) zu erkennen und damit keine unvorhergesehenen Programmreaktionen zu verursachen. Die Robustheit ist damit eine Voraussetzung für die Bedienerfreundlichkeit insbesondere für ungeübte Benutzer<sup>47</sup>.

Taguchi<sup>48</sup> liefert eine Definition der Robustheit, die sich im Umfeld der Ingenieurwissenschaften etabliert hat. Ein robustes Produkt verhält sich nach seiner Auffassung gegenüber streuenden Eingangsgrößen wenig empfindlich oder sensitiv. Abweichungen einer Eigenschaft von vorab beschriebenen, erwünschten Zielen werden als Verlust bezeichnet, die mit Hilfe einer Verlustfunktion quantifiziert werden können. Die am IPEK - Institut für Produktentwicklung Karlsruhe - entwickelte Definition<sup>49</sup> des Begriffs „robust design“ weitet Taguchis Definition auf den Entwicklungsprozess aus:

*Robust Design beinhaltet die Berücksichtigung der (bekannten, unbeeinflussbaren) Streuungen von Eingangsgrößen im Entwicklungsprozess mit dem Ziel, die Streuungen interessierender Zielgrößen zum minimieren bzw. zu beschränken. Streuende Eingangsgrößen und Designparameter werden dabei üblicherweise als disjunkt angesehen.*

Unter der Robustheit des Wiederstartsystems ist im Rahmen dieser Arbeit die Fehlertoleranz des Gesamtsystems gegenüber Stellfehlern und Störeinflüssen einzelner Triebstrangkomponenten zu verstehen. Dabei muss das System sicherstellen, dass es möglichst nicht gegen andere Anforderungen verstößt. Nur wenn der Wiederstart unter allen Randbedingungen zuverlässig und den längsdynamischen Ansprüchen genügend durchgeführt wird, kann das Wiederstartsystem als robust bezeichnet werden.

---

<sup>46</sup> Gabler 2010

<sup>47</sup> Gabler 2010

<sup>48</sup> Taguchi 2004

<sup>49</sup> IPEK-Glossar, abgerufen am 26.01.2012

## **Reproduzierbarkeit**

Reproduzierbarkeit bedeutet allgemein die Möglichkeit etwas zu wiederholen, etwas wiederholt herstellen zu können oder einen bestimmten Ablauf erneut durchführen zu können. Zudem wird die Reproduzierbarkeit oft gleichgesetzt mit Verständlichkeit, Objektivität oder Verfügbarkeit, was oft zu Verwechslungen führen kann.

In der Naturwissenschaft wird die Reproduzierbarkeit gleichbedeutend mit der Replizierbarkeit verwendet. Sie bezeichnet die Wiederholbarkeit von Forschungsmethoden und stellt eine Grundanforderung an wissenschaftliche Experimente und Analysen dar. Unter gleichen Bedingungen müssen gleiche Ergebnisse erzielt werden. Dabei müssen zu erwartende Messfehler berücksichtigt werden.

In der Produktion ist unter Reproduzierbarkeit die Fähigkeit zu verstehen, ein Bauteil oder ein Produkt wiederholt innerhalb der festgelegten Toleranzen und unter Einhaltung der spezifischen Eigenschaften herzustellen.

Das Wiederstartsystem eines Hybrid-Antriebsstrangs arbeitet dann reproduzierbar, wenn es in der Lage ist, den Wiederstart unter ähnlichen Randbedingungen so durchzuführen, dass der Fahrer den Vorgang gleich wahrnimmt. Die Randbedingungen sind dabei im Wesentlichen durch den aktuellen Betriebszustand, die Fahrsituation und den Fahrerwunsch bestimmt. Umweltbedingungen (z.B. Außentemperatur) dürfen den Vorgang nicht beeinflussen.

## **Verbrauch und Emissionen**

Der Start-Stopp-Betrieb des Verbrennungsmotors soll in hybriden Antrieben CO<sub>2</sub>- und Schadstoff-Emissionen in verschiedenen Betriebszuständen reduzieren. Das Abschalten des Verbrennungsmotors im Fahrzeugstillstand soll den Leerlaufverbrauch des Motors einsparen. Das Einsparpotential hängt dabei von Anzahl und Dauer der Stoppphasen sowie der Höhe des Leerlaufverbrauchs ab. Müller<sup>50</sup> untersucht in seiner Arbeit, ab welchen Stoppdauern die eingesparten Energiemengen die notwendige Energie zum Wiederstart kompensiert und den Start-Stopp-Betrieb damit überhaupt lohnenswert machen.

---

<sup>50</sup> Müller 2010



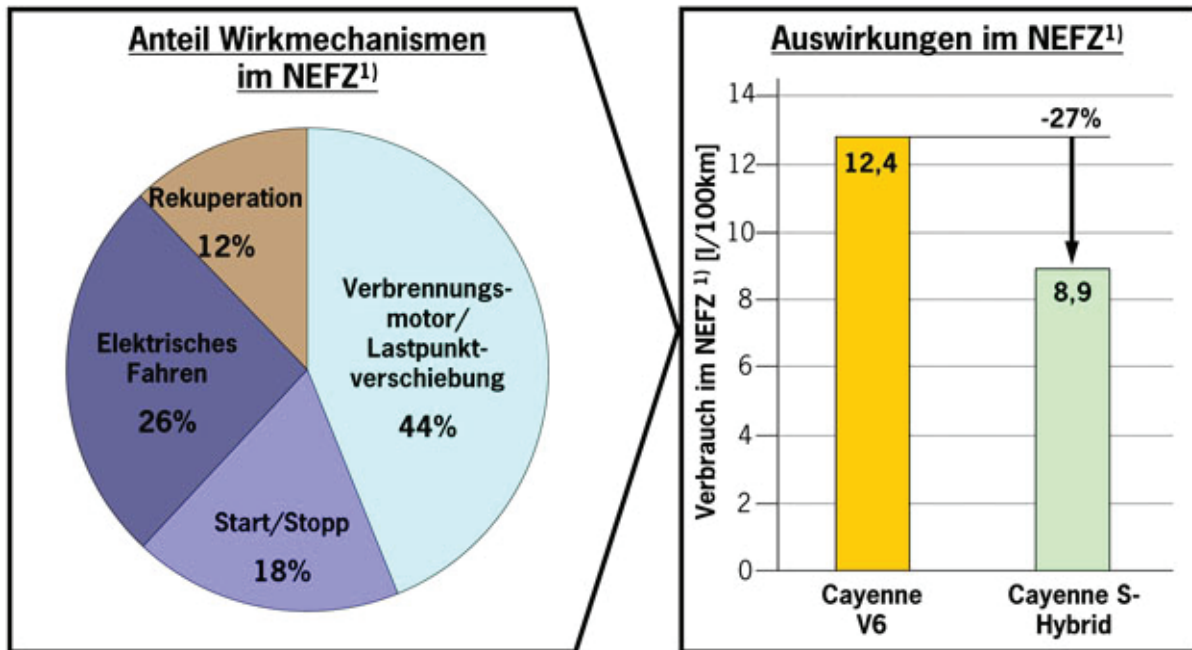
Abbildung 2-8: Wirkmechanismen zur Verbrauchseinsparung<sup>51</sup>

Abbildung 2-8 zeigt die Zeitanteile, in denen während des NEFZ<sup>52</sup> der Verbrennungsmotor in einem Hybrid-Fahrzeug abgeschaltet ist und weitere Betriebszustände, die zur Verbrauchseinsparung in einem Fahrzeug beitragen. Wird der Verbrennungsmotor während der Fahrt abgeschaltet und abgekoppelt, kann das Fahrzeug frei vom Schlepptomment des Verbrennungsmotors rollen. Dieser Fahrzustand wird als Segeln bezeichnet. Die Energieeinsparung resultiert also aus einer reduzierten Dissipation kinetischer und potentieller Energie. Auch hier hängt das Einsparpotential von der Zeitdauer der Motor-Stillstandsphase ab. Beim Segeln an Gefällen können sehr lange Stoppdauern erreicht werden, womit die zum Wiederstart benötigte Energie leicht überkompensiert wird.

Idealerweise sollten neben der reinen Energie- bzw. CO<sub>2</sub>-Einsparung auch die gesetzlich limitierten Abgasbestandteile Kohlenmonoxid (CO), Stickoxide (NO<sub>x</sub>) und unverbrannte Kohlenwasserstoffe (HC) durch den Start-Stopp-Betrieb reduziert werden<sup>53</sup>. Eine Erhöhung dieser Emissionen muss aber auf jeden Fall vermieden werden. Hierzu müssen insbesondere die Startvorgänge und Stillstandsphasen der VKM, in denen die Katalysatoren auskühlen können, betrachtet werden. Temperaturen von Systemen zur Abgasnachbehandlung müssen immer im

<sup>51</sup> Porsche 2009

<sup>52</sup> Neuer Europäischer Fahrzyklus

<sup>53</sup> Müller 2010

zulässigen Arbeitsbereich gehalten werden. Rücker<sup>54</sup> zeigt, dass das Abgasnachbehandlungssystem bei Benzinmotoren in Mikrohybriden den Start-Stopp-Betrieb problemlos darstellen kann. Trotz fallender Eingangstemperaturen am Katalysator blieb die Konvertierungsfähigkeit erhalten, da aufgrund der hohen Wärmekapazität des Monolithen das Temperaturniveau im Katalysator nahezu unverändert blieb. Diese Ergebnisse lassen sich auch auf die Abgasnachbehandlungssysteme von Dieselmotoren übertragen, sofern diese ein ähnliches Abkühlverhalten aufweisen und damit ebenfalls in einer Motor-Stillstandsphase ihre Konvertierungsfähigkeit nicht verlieren.

Durch den intermittierenden Betrieb der VKM wird die Abgaszusammensetzung beeinflusst. Während der Stopp- und Startvorgänge wird immer wieder ein kleiner Anteil Luft durch das Abgassystem geführt, wodurch eine Sauerstoff-Übersättigung des Katalysators vorliegen kann. Beim nächsten Motorstart kann dies zu einer NO<sub>x</sub>-Konzentrationspitze führen, was beim Motorstart durch eine Anreicherung des Gemisches kompensiert werden kann. Diese Anfettung ist exakt so einzustellen, dass es zu keinem NO<sub>x</sub>-Peak aber auch zu keiner Erhöhung der CO- und HC-Emission kommt. Hohenberg<sup>55</sup> untersucht dieses Verhalten an einem leistungsverzweigten Vollhybrid-Fahrzeug und kommt zu dem Ergebnis, dass eine zusätzliche Erhöhung der Emissionen vermieden und die beschriebene Problematik der Abgaszusammensetzung gelöst werden konnte.

Im Gegensatz zu konventionellen Fahrzeugen wird im Schubetrieb der Verbrennungsmotor abgekoppelt. Dadurch wird keine Luft mehr durch das Abgassystem gepumpt und eine starke Auskühlung vermieden. Demnach ist damit zu rechnen, dass der Start-Stopp-Betrieb bei entsprechender Applikation der Abgasnachbehandlung nicht zu einer Erhöhung der Schadstoff-Emissionen führt.

## **Funktion**

Der Begriff „Funktion“ unterliegt verschiedenen Auffassungen. Alink<sup>56</sup> diskutiert die verschiedenen Bedeutungen im Kontext der Produktentwicklung in seiner Arbeit und stellt verschiedene Sichtweisen auf Funktionen von Produktentwicklern zusammen. In seinen Untersuchungen zeigt sich, dass viele Menschen individuell sehr verschiedene Sichtweisen auf den Begriff Funktion besitzen. Die Auffassungen der von ihm untersuchten Probanden variieren zwischen:

---

<sup>54</sup> Rücker 2008

<sup>55</sup> Hohenberg Indra 2006

<sup>56</sup> Alink 2010

„Funktion im Sinne von Zweck sowie Funktion als Beziehung zwischen Input und Output, der Transformation von Material, Energie und Information als eine Beschreibung des Verhaltens<sup>57</sup>“.

Dies zeigt auch, dass es nicht den einen Funktionsbegriff gibt, sondern dass verschiedene Interpretationen zur Anwendung kommen. Diese sind beispielsweise:

- Transformation von Flussgrößen
- Funktion als Zustandsänderung
- Funktion als passive Reaktion
- Funktion als substantiviertes Verb ohne Zuordnung

Die Anforderung der Funktion an das Wiederstartsystem ist im Rahmen dieser Arbeit als stark zweckorientiert einzuordnen, denn das Wiederstartsystem muss jederzeit in der Lage sein, seinen Zweck – den sicheren und zuverlässigen Start des Verbrennungsmotors - zu erfüllen.

In Abbildung 2-9 sind die grundsätzlichen Betriebszustände eines Hybridantriebs dargestellt. Zwischen den Funktionen elektrischer, VKM- und hybridischer Betrieb kann nur über einen transienten Zwischenzustand oder eine weitere Funktion gewechselt werden.

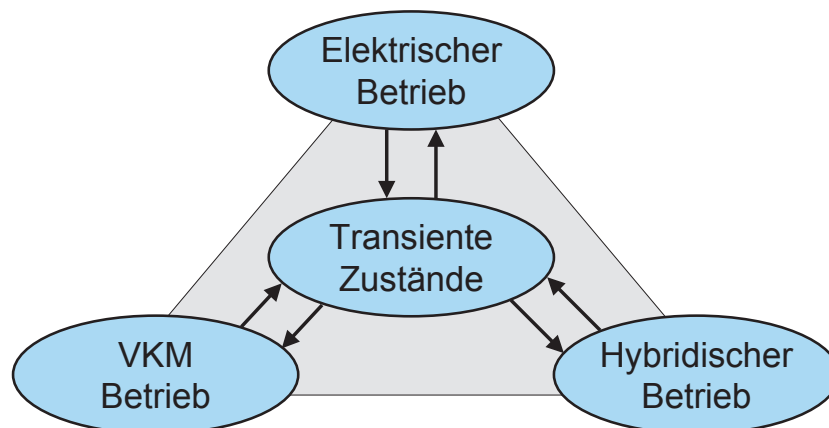


Abbildung 2-9: Funktionen eines Hybridantriebs

Der Wiederstart des Verbrennungsmotors ist eine dieser Funktionen. Er muss in der Lage sein den Antriebsstrang sicher vom elektrischen Betrieb in einen der anderen beiden Betriebsarten zu überführen. Dies muss unabhängig von sonstigen

<sup>57</sup> Alink 2010, S. 132

Eingangsbedingungen und den Zielzuständen der Triebstrangkomponenten geschehen.

Dieser zweckorientierten Art der Funktionsbeschreibung liegt häufig eine verbale Beschreibungsform zugrunde. Um eine Algorithmisierung funktionaler Beschreibungen zu ermöglichen eignen sich andere Beschreibungsformen besser. So ermöglicht die Funktionsbeschreibung nach Pahl und Beitz<sup>58</sup> als „Transformation von Zustandsgrößen“ auch die zahlenmäßige Beschreibung, da Zustandsgrößen messbar und in Zahlenwerten ausdrückbar sind. In Verbindung mit dem C&C<sup>2</sup>-Ansatz<sup>59</sup> tritt diese Art der Funktionsbeschreibung ebenfalls häufig auf<sup>60</sup>.

### **Längsdynamik**

Wie oben dargestellt kann der Wiederstart grundsätzlich Einfluss auf die Längsdynamik des Fahrzeugs haben. Stellfehler der beteiligten Komponenten im Triebstrang können Längsschwingungen des Fahrzeugs verursachen, die dann das Komfortempfinden der Insassen beeinträchtigen können.

In hybriden Antriebssträngen für Kraftfahrzeuge ist die elektrische Antriebsleistung üblicherweise kleiner als die Leistung des Verbrennungsmotors. Deshalb muss die VKM gestartet werden, sobald der Fahrerwunsch die aktuell verfügbare elektrische Antriebsleistung überschreitet. Nach dem eigentlichen Start des Verbrennungsmotors wird das geforderte Antriebsmoment auf die beiden antreibenden Antriebseinheiten E-Maschine und VKM aufgeteilt. Die jeweiligen Anteile am Antriebsmoment werden vom Energiemanagement festgelegt. Wird der Wiederstart durch einen großen Sprung im Fahrerwunsch ausgelöst, muss zur Erfüllung dieses Wunsches grundsätzlich der Verbrennungsmotor ein hohes Moment bereitstellen. Dieses Drehmoment kann aufgrund der dynamischen Eigenschaften von Verbrennungsmotoren zum einen nicht sofort bereitgestellt werden. Zum anderen können sehr steile Momentengradienten zu Schwingungsanregungen im Fahrzeug führen<sup>61</sup>, was das Komfortempfinden des Fahrers unter Umständen negativ beeinflusst. Ein zu langsamer oder gar verzögerter Momentenaufbau kann vom Fahrer ebenfalls als störend wahrgenommen werden, da die Korrelation zum Fahrerwunsch und zur Fahrererwartung nicht mehr gegeben ist.

Das Wiederstartsystem muss den Wiederstart also so durchführen, dass jegliche Störung vermieden wird und der Fahrerwunsch und die Erwartungshaltung des

---

<sup>58</sup> Pahl Beitz 2005

<sup>59</sup> siehe Abschnitt 2.4.1

<sup>60</sup> Albers Matthiesen 2002, Matthiesen 2002, Alink 2010

Fahrers möglichst gut erfüllt werden. Die mit diesem Sachverhalt in engem Zusammenhang stehenden Begriffe Komfort und Diskomfort werden anschließend ausführlich diskutiert.

### 2.3.4 Ablauf des Wiederstarts im untersuchten P2-Hybrid

Der Wiederstart des Verbrennungsmotors im P2-Hybrid<sup>62</sup> ist einer der komplexesten Abläufe im Antriebsstrang<sup>63</sup>.

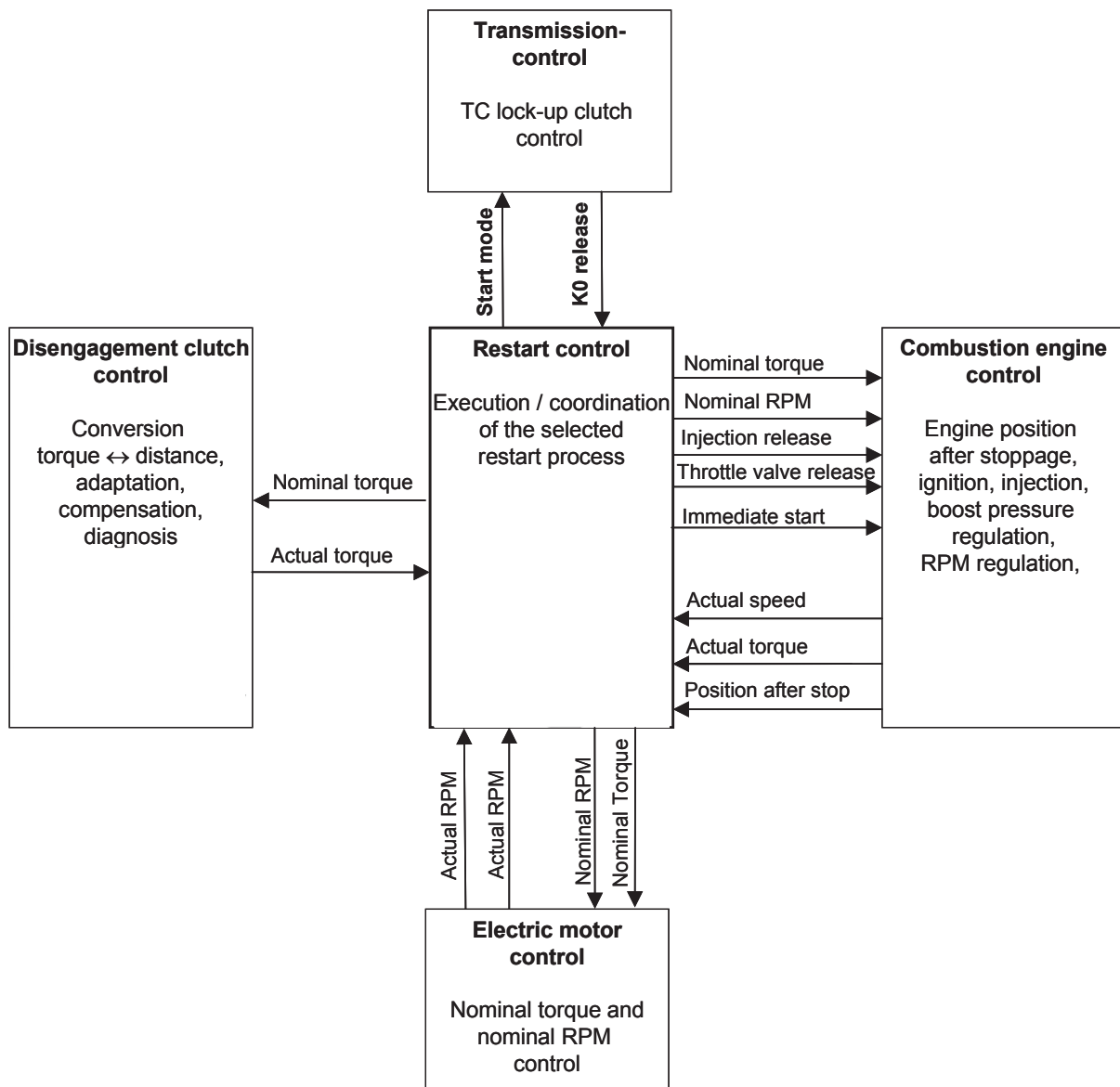


Abbildung 2-10: Informationsflüsse beim Wiederstart (schematisch)<sup>63</sup>

<sup>61</sup> Webersinke 2008

<sup>62</sup> vgl. Kapitel 2.1.2

<sup>63</sup> Spiegel et al. 2010

Hierbei müssen alle beteiligten Aggregate des Wiederstartsystems präzise angesteuert werden. Abbildung 2-10 zeigt schematisch die Steuerungen dieser Triebstrangkomponenten im später untersuchten Fahrzeug. Die Wiederstart-Ablaufsteuerung liest Informationen und den aktuellen Betriebszustand von Verbrennungsmotor, E-Maschine, Trennkupplung und Getriebe ein, um den gesamten Vorgang zu koordinieren und die Aggregate abhängig vom Zielzustand zu regeln. Zum Öffnen der Wandler-Überbrückungskupplung (WÜK) wird mit dem Getriebe-Steuergerät ein Hand-Shake durchgeführt: In Abhängigkeit von der dem Getriebe übermittelten Wiederstart-Art wird die WÜK geöffnet. Anschließend erteilt das Getriebesteuergerät die Freigabe zum Schließen der Trennkupplung, sobald alle Bedingungen dafür erfüllt sind.

Zum besseren Verständnis des Wiederstartvorgangs wird er in verschiedene Phasen eingeteilt, mit denen der Verbrennungsmotor vom Stillstand in den aktiven Betrieb überführt wird. Die verschiedenen Komponenten des Triebstrangs übernehmen dabei im Zusammenspiel unterschiedliche Funktionen.

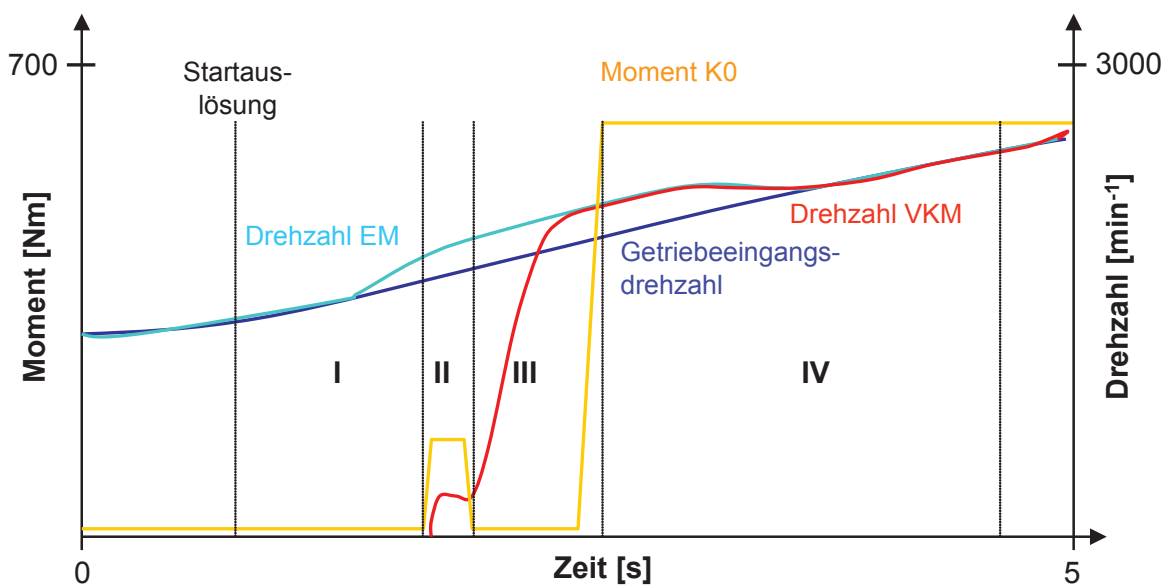


Abbildung 2-11: Wiederstart (schematisch)

Abbildung 2-11 zeigt schematisch die Drehzahlverläufe während eines Wiederstarts in einem P2-Hybrid. Dargestellt sind die Drehzahlen des Getriebeeingangs, der E-Maschine (EM) und des Verbrennungsmotors (VKM) sowie das Moment der Trennkupplung (K0). Ausgehend von dieser Darstellung werden die einzelnen Phasen (nummeriert mit den römischen Zahlen eins bis vier) im Folgenden erläutert.

### **Phase I Vorbereitung des Wiederstarts**

Wird ein Start des Verbrennungsmotors angefordert müssen vor dem eigentlichen Startablauf alle Bedingungen geprüft werden, die für die Freigabe des Wiederstarts erfüllt sein müssen. Um Rückwirkungen des Wiederstarts auf die Längsdynamik des Fahrzeugs zu vermeiden, sollte das Wiederstartsystem während des Vorgangs vom Resttriebstrang entkoppelt werden, sofern ein dafür geeignetes Element vorhanden ist. Bei automatisierten Schaltgetrieben oder Automatik-Getrieben kann diese Funktion durch das Anfahrlement, also durch den hydraulischen Drehmomentwandler in Verbindung mit dessen Überbrückungskupplung realisiert werden. Im Audi Q5 Hybrid findet die Entkoppelung über eines der Schaltelemente innerhalb des Getriebes (Integriertes Anfahrlement<sup>64</sup>) statt. Die Entkoppelung wird erreicht, indem das Anfahrlement durch eine geeignete Steuerung oder Regelung in einen schlupfenden Zustand überführt wird. Dabei muss gewährleistet sein, dass sich das Getriebeeingangsmoment nicht verändert bzw. dem Fahrerwunsch nachgeführt werden kann. Das in den folgenden Kapiteln untersuchte Fahrzeug verfügt über einen hydraulischen Drehmomentwandler mit Wandlerüberbrückungskupplung (WÜK), weshalb sich die folgenden Aussagen auf dieses System beziehen. Sie lassen sich aber größten Teils auch auf Reibkupplungen als Anfahrlemente übertragen.

Um die Entkoppelung durchzuführen wird der oben erwähnte Hand-Shake zwischen Ablaufsteuerung und Getriebesteuergerät durchgeführt. Durch Absenken des Betriebsdrucks an der WÜK wird ihre Momentenkapazität reduziert. Sobald das Antriebsmoment der E-Maschine diese Kapazität überschreitet, wird zwischen Wandler-Pumpenrad und -Turbinenrad eine Drehzahldifferenz aufgebaut. Durch die nun veränderten Drehzahlverhältnisse am Wandler wird der Momentenfluss von der E-Maschine zum Getriebeeingang auf mechanischen Pfad und hydraulischen Pfad des Wandlers aufgeteilt. Drehmomentspitzen, die im Wiederstartsystem entstehen können, werden dann durch die dämpfende Wirkung des hydraulischen Wandlers gedämpft. Erst nach Abschluss der Vorbereitungsphase wird die Freigabe zum Schließen der Trennkupplung und damit dem Andrehen der VKM erteilt.

Das Entkoppeln ist in Fahrzuständen, in denen die WÜK kein Drehmoment überträgt bzw. das Anfahrlement mit hohen Differenzdrehzahlen betrieben wird (z.B. beim Anfahren in niedrigen Getriebe-Gängen), nicht notwendig, womit sich die Vorbereitungsphase auf die Überprüfung der zum Start notwendigen Bedingungen reduziert.

---

<sup>64</sup> ZF 2009

## **Phase II Andrehen und Zünden des Motors**

Nach dem Abschluss der Vorbereitungsphase kann der eigentliche Start des Verbrennungsmotors durchgeführt werden. Durch Einstellen eines definierten Drehmoments an der Trennkupplung wird der Verbrennungsmotor angedreht. Die Höhe dieses Moments ist durch verschiedene motorische Parameter bestimmt, auf die weiter unten eingegangen wird. Das Andrehen des Verbrennungsmotors kann dabei grundsätzlich auch über eine zusätzliche Starteinrichtung wie einem Ritzelstarter oder einem Riemen-Starter-Generator erfolgen. In solchen Fällen findet der Wiederstart ohne Rückwirkungen auf den Momentenfluss im Resttriebstrang statt. Das untersuchte System und andere bekannte P2-Hybride verfügen jedoch nicht über eine derartige Starteinrichtung oder nutzen sie nicht in allen Betriebspunkten für den Start des Verbrennungsmotors, weshalb im Weiteren nicht auf diese Variante eingegangen wird.

Wann Einspritzung und Zündung freigegeben werden und der Motor damit in den befeuerten Betrieb übergeht, kann von verschiedenen Parametern abhängig gemacht werden. Verfügen der Motor und die Motorsteuerung über eine Direktstartfähigkeit, kann dies geschehen, sobald der erste Zylinder als zündfähig erkannt wird (unterstützter Direktstart<sup>65</sup>). Der Verbrennungsmotor ist dann in der Lage den weiteren Hochlauf ohne ein externes Drehmoment selbst zu bewältigen. Damit kann die für den Start durch die E-Maschine bereitgestellte Antriebsenergie reduziert werden. Auch die Reibarbeit an der Trennkupplung kann dadurch verringert werden, da sie nach dem Andrehen des Motors wieder vollständig geöffnet werden kann. Diese Startvariante wird als angerissener Start oder Anreißstart bezeichnet. Ohne Direktstartfähigkeiten muss der Motor solange geschleppt werden, bis ein zündfähiges Gemisch vorliegt (Schlupfstart).

## **Phase III Synchronisation und Ankoppeln des Verbrennungsmotors**

Um den Motor an den Triebstrang ankoppeln zu können, muss er mit der Drehzahl der E-Maschine synchronisiert werden. Diese Synchronisierung kann auf zwei verschiedene Arten durchgeführt werden.

Durch eine Drehzahlregelung des Verbrennungsmotors kann er auf die gewünschte Zieldrehzahl gebracht werden. Dabei können sowohl der Luft- als auch der Zündungspfad des Verbrennungsmotors beeinflusst werden. Zusätzlich kann die Synchronisation durch ein definiertes Moment der Trennkupplung unterstützt werden.

---

<sup>65</sup> vgl. Abschnitt 2.2.2



Läuft der Verbrennungsmotor synchron mit der E-Maschine kann die Trennkupplung geschlossen werden.

Die Synchronisierung kann alternativ mit der Trennkupplung alleine durchgeführt werden. Dabei wird sie solange kontinuierlich schlupfend betrieben bis der Motor seine Zieldrehzahl erreicht hat und dann vollständig geschlossen. Einspritzung und Zündung werden erst danach freigegeben.

#### **Phase IV Umverteilung der Antriebsmomente**

Befindet sich die VKM im gefeuerten Betrieb und ist an den Triebstrang angekoppelt, kann das notwendige Antriebsmoment auf die beiden Antriebsaggregate aufgeteilt werden. Welche Drehmomente die Aggregate bereitstellen oder im Falle der E-Maschine aufnehmen, wird von der Betriebsstrategie (Energiemanagement) festgelegt. Die Aufteilung erfolgt dabei meist rampenförmig, um Sprünge im Antriebsmoment und damit in der Fahrzeuglängsbeschleunigung zu verhindern. Die Verrampung muss so gesteuert sein, dass das Summen-Antriebsmoment möglichst gut dem aktuellen Fahrerwunsch entspricht.

Sollte in der Vorbereitungsphase das Anfahrerelement in einen schlupfenden Zustand überführt worden sein, muss die an ihm herrschende Drehzahldifferenz nach dem Wiederstart abgebaut werden. Im Falle der WÜK wird der Arbeitsdruck so weit erhöht, bis sie wieder vollständig geschlossen ist und das Antriebsmoment ausschließlich über den mechanischen Pfad des Wandlers übertragen wird.

## **2.4 Modellbildung**

Der Begriff „Modell“ wird in vielen Bereichen verwendet und besitzt verschiedene Ausprägungen und unterliegt vielfältigen Vorstellungen. Deshalb soll hier eine klare Definition des Begriffs vergegenwärtigt werden. Die DIN 19226<sup>66</sup> definiert ihn folgendermaßen:

*„Ein Modell ist die Abbildung eines Systems oder Prozesses in ein anderes begriffliches oder gegenständliches System, das aufgrund der Anwendung bekannter Gesetzmäßigkeiten, einer Identifikation oder auch getroffener Annahmen gewonnen wird und das System oder den Prozess bezüglich interessierender Fragestellungen hinreichend genau abbildet.“*

---

<sup>66</sup> DIN 19226

Bretthauer<sup>67</sup> beschreibt ein Modell als „eine Darstellung der wesentlichen Aspekte des betrachteten Systems, das die Information in solch einer Form enthält, dass weitere Schlussfolgerungen daraus gezogen werden können.“ Ein wesentliches Ziel der Erstellung eines Modells ist es, die Komplexität der Realität so zu reduzieren, dass sie erfassbar und die relevanten Informationen für die weitere Verarbeitung zur Verfügung gestellt werden. Die Art der Informationsaufbereitung und -bereitstellung stellt hierbei einen zentralen Aspekt dar. Insbesondere bei der Zusammenarbeit innerhalb eines Projektteams nimmt die Modellbildung großen Einfluss auf die Effizienz eines komplexen und interdisziplinären Entwicklungsprozesses.

Für den zweckmäßigen Einsatz von Modellen und deren Klassifikation fordert Albers<sup>68</sup> Kenntnis über

- die Abbildung,
- die Verkürzung,
- den Pragmatismus und
- die Modellbildung

eines Modells.

Die Abbildung eines Modells gibt grundlegende Auskunft darüber, was das Modell repräsentieren soll. Das Kriterium der Verkürzung geht der Frage nach, welche Eigenschaften des Originals im Modell abgebildet werden und welche nicht. Das Pragmatismus-Kriterium gibt den eigentlichen Zweck an, dem ein Modell dienen soll. Schließlich muss die Art und Weise, auf die ein Modell erstellt wurde, durch die gewählte Modellbildung bekannt sein<sup>69</sup>.

Wegen der individuell verschiedenen Wahrnehmung und Subjektivität der Menschen ist es wichtig für einen Entwicklungsprozess ein einheitliches Verständnis, also eine gemeinsame Objektivität für die Realität zu schaffen. In diesem Zusammenhang nimmt Popper<sup>70</sup> eine gedankliche Aufteilung der Welt in drei Bereiche vor, womit das so genannte „3-Welten-Modell“ (Abbildung 2-12) entsteht. Die drei Bereiche sind:

- Welt 1: Die physische Welt oder Außenwelt
- Welt 2: Die Welt der individuellen Wahrnehmung und des Bewusstseins

---

<sup>67</sup> Bretthauer 2008

<sup>68</sup> Albers 2008

<sup>69</sup> Rüdener 2010

<sup>70</sup> Popper 1995

- Welt 3: Die Welt der geistigen und kulturellen Gehalte, die unabhängig vom Einzelbewusstsein existieren können - die objektive Erkenntnis

Die Existenz dieser Welten begründet Popper mit der Beobachtbarkeit von kausalen Wechselwirkungen zwischen den Welten. Dabei korrespondieren Welt 1 und Welt 3 nie direkt miteinander, sondern immer über Welt 2.

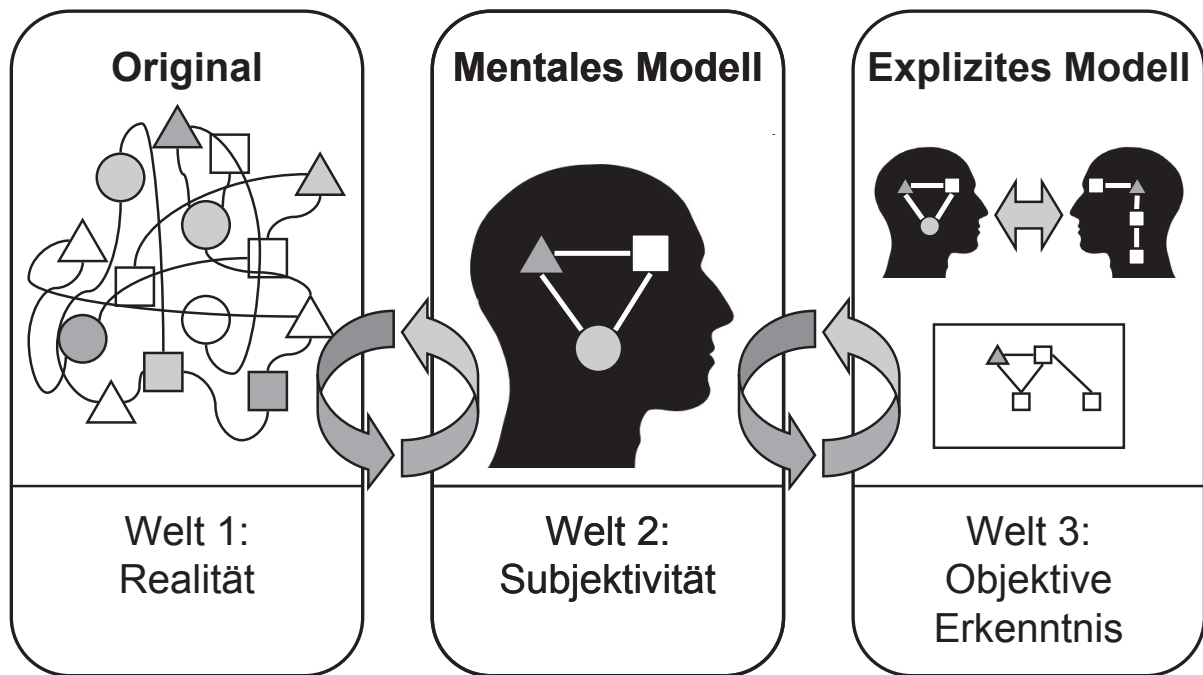


Abbildung 2-12: Das 3-Welten-Modell von Popper<sup>71</sup>

Zur Herstellung eines gemeinsamen Verständnisses zwischen einem in Welt 1 vorhandenen System oder Prozess und einem expliziten Modell in Welt 3, ist deshalb ein einheitliches mentales Modell notwendig. Dadurch werden nicht nur Prozessabläufe verbessert und transparenter, sondern auch die Wiederverwendbarkeit des Wissens erleichtert.

Wie oben erwähnt, existiert eine große Vielzahl an Modellen, die sich sehr stark in ihrem Abstraktionsgrad und der gewählten Beschreibungsform unterscheiden können. Bretthauer<sup>72</sup> teilt sie ein in:

- konzeptionelle oder phänomenologische Modelle,
- physikalische oder empirische Modelle und
- mathematische oder analytische Modelle.

<sup>71</sup> nach Albers 2008

<sup>72</sup> Bretthauer 2008

Die erste Gruppe beschreibt die wesentlichen Phänomene des betrachteten Systems, die beispielsweise durch gedankliche Vorstellungen des Bearbeiters oder durch ein Schema auf dem Papier dargestellt werden können. Ein physikalisches Modell ist entweder eine stark verkleinerte Nachbildung des Prozesses, beispielsweise eine Pilotanlage, oder ein Simulationsmodell in einem Rechner. Die dritte Modellgruppe beschreibt die interessierenden Eigenschaften eines Systems in einer geeigneten mathematischen Form, die es erlaubt Schlussfolgerungen über das zukünftige Verhalten zu ziehen. In den Ingenieurwissenschaften ist dies stets Ziel und zentraler Bestandteil der Modellbildung.

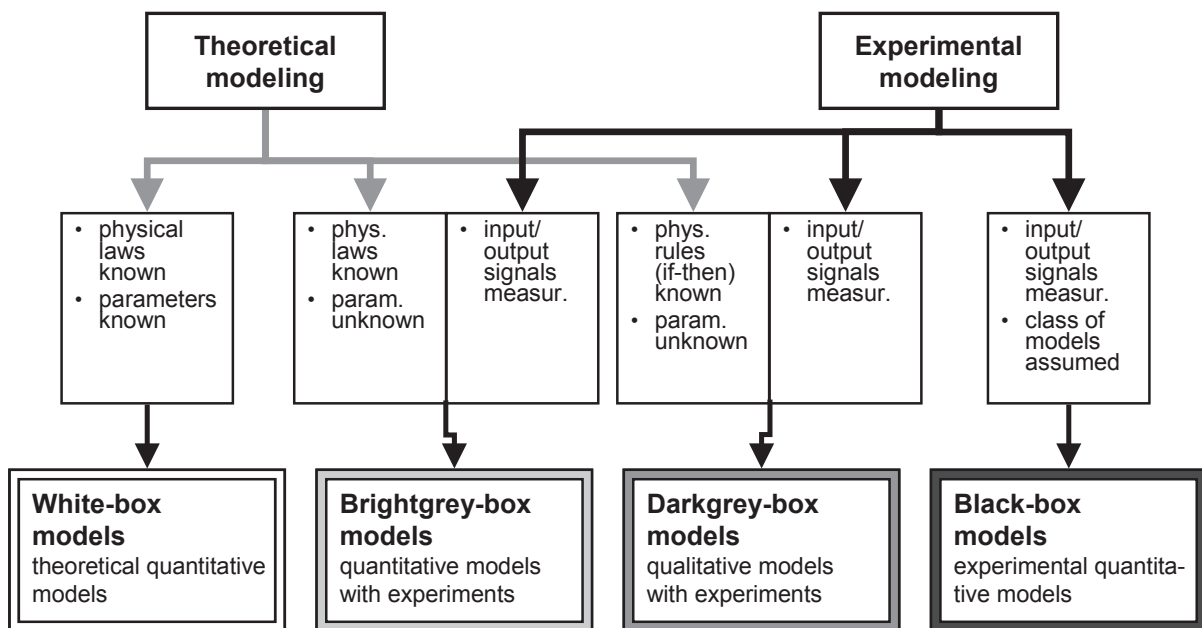


Abbildung 2-13: Methoden zur Modellbildung dynamischer Prozesse<sup>73</sup>

Zur Ermittlung mathematischer Modelle wird nach Vorgehen zwischen theoretischer und experimenteller Modellbildung unterschieden. Bei der theoretischen Modellbildung werden Modelle auf Basis mathematisch formulierter Grundgesetze aufgestellt, wobei zunächst Prozesselemente betrachtet werden und später darauf aufbauend die Darstellung von Teil- und Gesamtprozessen erfolgt. Das theoretische Modell („White-Box Model“) enthält somit den funktionalen Zusammenhang zwischen den physikalischen Daten des Prozesses und seinen Parametern. Das experimentelle Modell („Black-Box Model“) als Gegenstück dazu enthält als Parameter nur Zahlenwerte, deren exakter funktionaler Zusammenhang mit den physikalischen Grunddaten des Prozesses unbekannt bleibt. Diese Art der Modellbildung, die auf experimenteller Versuchsdurchführung basiert, wird auch als

„Identifikation“ bezeichnet. Zwischen diesen beiden Extremen existieren Varianten, die verschiedene Verhältnisse von theoretischer und experimenteller Information bilden. Diese Zwischenstufe werden als „Grey-Box Models“ bezeichnet (Abbildung 2-13).

Zur Identifizierung und Analyse funktionaler Anforderungen in parallelen Hybrid-Antriebssträngen wird im Rahmen dieser Arbeit eine Modellbildung vorgenommen. Hierzu findet eine Kombination aus physikalischer und mathematischer Modellbildung Anwendung, wobei zunächst ein physikalisches Modell erstellt werden soll, das Funktionsstrukturen von Hybrid-Antriebssträngen abbildet. Dieses Modell soll anschließend um mathematisch-theoretische Modelle zur Bewertbarkeit der Funktionsmodelle erweitert werden. Dabei ist die Auswahl eines geeigneten Modells zur Modellbildung, eines so genannten „Metamodells“, wichtig für den weiteren Verlauf und die erzielbaren Ergebnisse des Projekts. Eine Vorstellung geeigneter Metamodelle findet in den folgenden Abschnitten statt.

#### **2.4.1 Vorstellung ausgewählter Metamodelle**

##### **Prozesselemente für konzentrierte Parameter**

Die Prozesselemente für konzentrierte Parameter beruhen auf der grafischen Einteilung der Elemente des technischen Prozesses in idealisierter Form. An dieser Stelle sei besonders auf die Arbeiten von Crandall et al.<sup>74</sup>, Karnopp<sup>75</sup> oder Karnopp und Rosenberg<sup>76</sup> hingewiesen. Nach der Aufteilung des Prozesses in Prozesselemente und somit der Zuordnung bestimmter physikalischer Eigenschaften wird bei den erstellten mathematischen Gleichungen im Fall der Energieübertragung nach verschiedenen Arten von Gleichungen vorgegangen, die bestimmte physikalische Gesetzmäßigkeiten beschreiben.

Bilanzgleichungen beschreiben je nach Anwendungsfall das physikalische Verhalten des betrachteten Systems mit Hilfe der Gesetze zur Erhaltung der Masse, Energie oder des Impulses. Konstitutive Gleichungen bilden den Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsgrößen der Prozesselemente ab, der oft durch spezielle physikalische Gesetze in analytischer Form oder durch Kennlinien aus Experimenten angegeben werden kann. Phänomenologischen Gleichungen beschreiben

---

<sup>73</sup> nach Isermann 2008

<sup>74</sup> Crandall et al. 1968

<sup>75</sup> Karnopp Rosenberg 1975

<sup>76</sup> Karnopp et al. 1990

irreversible Ausgleichsvorgänge, die bei dissipativen Systemen bei einigen Wandlern oder Übertragern auftreten können.

Die Menge der Grundelemente sieht eine Abstrahierung der zu betrachtenden Komponenten in die Elemente Quelle, Speicher, Übertrager, Wandler und Senke vor. Mit diesen kann ein technisches System durch Kombination verschiedener Elemente zusammengesetzt werden. Die Verknüpfung geschieht mit Hilfe von Verbindungslinien, die den zwischen den Elementen fließenden Strom in Form von Quantität pro Zeiteinheit darstellen. Sie lassen sich in ideale und reale Elemente einteilen, wobei letztere meist als Kombination zweier Elemente dargestellt werden. Zudem lassen sich aktive und passive Elemente unterscheiden, wodurch Elemente hinsichtlich ihrer Steuerbarkeit durch den Einsatz zusätzlicher Hilfsenergie klassifiziert werden können.

Häufig finden konstitutive Gleichungen bei Prozessen mit Energieströmen Anwendung. Bei diesen technischen Prozessen muss bei Vernachlässigung von Speichern die Leistung (übertragene Energie pro Zeiteinheit)

$$P = \frac{dE}{dt}$$

zwischen den Prozesselementen zu jedem Zeitpunkt gleich sein. Wie bei elektrischen Übertragungsgliedern wird die Schnittstelle als Klemmenpaar festgelegt. Diese sind entsprechend Abbildung 2-14 als Zweipol (a), Vierpol (b) oder auch als Mehrpol darstellbar.

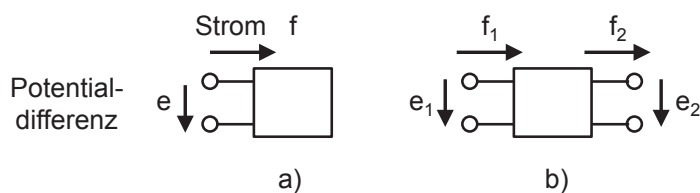


Abbildung 2-14: Zweipol- und Vierpol-Darstellung für Prozesselemente mit Leistungsvariablen

Die an den Klemmenpaaren befindlichen Größen, Strom  $f$  und Potentialdifferenz  $e$ , sind einander zugeordnete Kovariablen und werden so definiert, dass deren Produkt der übertragenen Leistung entspricht. Deshalb werden diese auch als „verallgemeinerte Leistungsvariablen“ bezeichnet. Zur Unterscheidung dieser Größen existieren zwei Ansätze:

- Die „Potential-Strom-Darstellung“, die maßgeblich von Karnopp und Rosenberg<sup>77</sup> beeinflusst wurde und
- die „Quer- und Durchgrößen-Darstellung“, die von Firestone<sup>78</sup>, Crandall et al.<sup>79</sup> und MacFarlane<sup>80</sup> behandelt wurde.

Beide Ansätze orientieren sich an der Erhaltung der Energie im System. Die Unterschiede bestehen in der Definition der verallgemeinerten Leistungsvariablen.

### Bond-Graphen

Die Methode der Bond-Graphen wurde unter anderem von Paynter<sup>81</sup> und Karnopp et al.<sup>82</sup> entwickelt. Sie basiert auf dem oben vorgestellten Ansatz der Potentialdifferenz-Strom-Darstellung und dient der Veranschaulichung von Prozessen mit Energieströmen in Zweipol-, Vierpol- und Mehrpol-Darstellung. Mit Hilfe einer grafischen Darstellung wird ein technisches System in Einzelemente aufgeteilt, die über Bindungen (englisch: bonds) Energie beziehungsweise Leistung austauschen. Das Bond-Graphen-Modell ordnet sich somit auch in die Gruppe der simultanen Diagramme ein (im Gegensatz zu den Signalfluss-orientierten). Abbildung 2-15 zeigt schematisch die Darstellung eines Vierpols als Energie-Bondgraph.

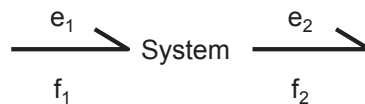


Abbildung 2-15: Darstellung eines Vierpols als Energie-Bondgraph<sup>83</sup>

Auch hier sind die oben erwähnten verallgemeinerten Leistungsvariablen integriert, weshalb auch hier das Prinzip der Energieerhaltung im System, beziehungsweise das Prinzip der Leistungskonstanz zwischen den Elementen, gilt. Das Vorgehen bei diesem Modell sieht zu Beginn eine akausale Systemkonzeption vor, die dann durch gezielte Wahl der Wirkrichtungen in ein kausales System überführt wird.

<sup>77</sup> Karnopp et al. 1990

<sup>78</sup> Gray 1957

<sup>79</sup> Crandall et al. 1968

<sup>80</sup> MacFarlane 1964, MacFarlane 1970

<sup>81</sup> Paynter 1961

<sup>82</sup> Karnopp et al. 1990

<sup>83</sup> Isermann 2008

Bei der Erstellung eines Bondgraphen-Modells findet ein erster Abstraktionsschritt statt, in dem die eigentlichen Systemkomponenten durch die bereits oben erwähnten Prozesselemente substituiert werden. Anschließend werden die meist als Zwei- oder Vierpole dargestellten Elemente durch Energie-Bonds ersetzt. Die Verknüpfung der Elemente findet zuletzt durch so genannte p- oder s-Verknüpfungen statt, die gemäß ihrem Anfangsbuchstaben entweder einer Parallel- oder einer Serienschaltung entsprechen. In manchen Fällen wird eine p-Verknüpfung auch als Null-Verknüpfung und eine s-Verknüpfung als Eins-Verknüpfung bezeichnet.

### **C&C<sup>2</sup>-Ansatz und Contact and Channel Model**

Der Contact and Channel-Connector-Ansatz (C&C<sup>2</sup>-A) nach Albers<sup>84</sup> bietet Entwicklern eine systematische Unterstützung bei der Analyse und Synthese technischer Systeme.

Ihm liegt der Ansatz zugrunde, dass die Erfüllung einer Funktion stets die Interaktion zwischen Systemkomponente und seiner Umwelt benötigt. Zur Beschreibung dieser Interaktion sieht der C&C<sup>2</sup>-A die Erstellung eines Contact and Channel Models (C&C<sup>2</sup>-M) vor. Ursprünglich wurde der Ansatz ebenfalls als C&C<sup>2</sup>-M bezeichnet. Um eine exakte Unterscheidung zwischen dem allgemeingültigen Ansatz und dem Modell eines bestimmten Systems zu ermöglichen, unterscheidet die Gruppe um Albers in aktuellen Forschungsarbeiten am IPEK<sup>85</sup> jedoch nach C&C<sup>2</sup>-A als Metamodell und einem konkreten C&C<sup>2</sup>-Modell eines bestimmten Systems. Ein C&C<sup>2</sup>-M ermöglicht es, sowohl Funktion als auch Gestalt eines beliebigen technischen Systems auf eine abstrakte Weise zu beschreiben und miteinander zu verknüpfen.

Es kann dabei als Werkzeug zur Analyse aber auch zur Synthese bei der Produktentwicklung eingesetzt werden. Die wesentlichen Bausteine, die der C&C<sup>2</sup>-A zur Verfügung stellt, (vgl. Abbildung 2-16) sind:

- Wirkfläche (WF),
- Wirkflächenpaar (WFP),
- Leitstützstruktur (LSS) und
- Connector (C).

---

<sup>84</sup> Albers et al. 2009

<sup>85</sup> IPEK - Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)







Grundelement	Symbol/ Abkürzung	Definition
Wirkflächen	 WF	Wirkflächen (WF) sind feste Oberflächen von Körpern oder generalisierte Grenzflächen von Flüssigkeiten, Gasen oder Feldern, die dauernd oder zeitweise im Kontakt zu einer weiteren Wirkfläche stehen und am Energie-, Stoff- und Informationsaustausch des technischen Systems beteiligt sind.
Wirkflächenpaar	 WFP	Wirkflächenpaare (WFP) werden aus genau zwei Wirkflächen gebildet, die zeitweise, ganz oder teilweise, in Kontakt stehen und zwischen denen Energie, Stoff und Information übertragen wird. Der Funktionskontakt ist der Teil des Wirkflächenpaars, in dem aktuell die Wechselwirkung stattfindet
Leitstützstruktur	 LSS	Leitstützstrukturen (LSS) sind Volumina von Körpern, Flüssigkeiten, Gasen oder felddurchsetzte Räume, die genau zwei Wirkflächenpaare verbinden und dauernd oder zeitweise eine Leitung von Energie, Stoff oder Information zwischen den Wirkflächen eines Körpers, einer Flüssigkeit, eines Gases oder eines Feldes ermöglichen.
Connector	 C	Connectoren (C) integrieren die wirkungsrelevanten Eigenschaften, die außerhalb des Betrachtungsbereichs liegen, in die Systembetrachtung. Sie stellen eine für die Beschreibung der betrachteten Funktion relevante Abstraktion der Systemumgebung dar.
Tragstruktur	TS	Tragstruktur ist die Menge aller möglichen Leitstützstruktur
Reststruktur	RS	Reststruktur sind Volumina von Körpern, Flüssigkeiten Gasen oder felderfüllten Räumen, die nie Tragstruktur werden
Gesamtstruktur	GS	Die Menge aller möglichen Leitstützstrukturen, als auch die Reststruktur

Abbildung 2-16: Symbole und Definitionen der Grundelemente des C&C<sup>2</sup>-A nach Albers<sup>86</sup>

Wirkflächen werden durch feste Oberflächen von Festkörpern oder durch Grenzflächen von Flüssigkeiten, Gasen oder Feldern gebildet, die dauernd oder zeitweise mit einer weiteren WF in Kontakt stehen. Sie tauschen dabei Energie, Stoffe oder Informationen miteinander aus. Diese beiden Wirkflächen bilden dann ein Wirkflächenpaar (WFP). Funktionskontakt ist derjenige Teil des WFPs, in dem zum Betrachtungszeitpunkt die Wechselwirkung stattfindet.

Leitstützstrukturen (LSS) sind diejenigen Volumina von Körpern, Flüssigkeiten, Gasen oder felddurchsetzten Räumen, die genau zwei Wirkflächenpaare verbinden. Sie gewährleisten damit zeitweise oder dauernd eine Übertragung von Energie, Stoff oder Information zwischen den Wirkflächen eines Körpers, einer Flüssigkeit, eines

Gases oder eines Feldes. Weitere Elemente dienen der Modellierung anderer Strukturen eines Systems.

Connectoren (C) sind nicht Bestandteil des Gestaltungsraums des betrachtenden Systems. Sie stellen eine Beschreibung der Systemumwelt dar und beschreiben wirkungsrelevante Eigenschaften, die außerhalb des Betrachtungsraums liegen. Damit dienen sie dem Anspruch nach Pragmatismus und Verkürzung. Sie sind so zu definieren, dass mit dem C&C<sup>2</sup>-Modell die tatsächliche Funktion des Systems im Betrachtungsraum in Wechselwirkung mit seiner Umgebung gezeigt werden kann.

Die Funktion eines technischen Systems oder Teilsystems wird grundsätzlich über mindestens zwei WFP und eine sie verbindende LSS realisiert. Ein System, das über kein Wirkflächenpaar mit der Umwelt verfügt, kann keine Funktion erfüllen<sup>87</sup>.

Bei der Analyse eines technischen Systems ist je nach Anforderung eine geeignete Detaillierungsstufe („Zoomfaktor“) für die Festlegung der WFP und LSS zu wählen. Albers<sup>88</sup> zeigt dies am Beispiel eines Portalkrans, der in verschiedenen mikroskopischen und makroskopischen Ebenen untersucht wird.

Als Kernbestandteil der Forschung am IPEK – Institut für Produktentwicklung Karlsruhe – wird der C&C<sup>2</sup>-A und seine Anwendungsmöglichkeiten ständig weiterentwickelt.

Ein Ansatz zur Umsetzung des C&C<sup>2</sup>-A in einer Simulationsumgebung stellt das Erweiterte Elementmodell von Schyr<sup>89</sup> dar. Er verbindet die Stärken des C&C<sup>2</sup>-A mit der Simulationssprache Modelica und erzeugt so genannte Behavioural Mock-Ups (BMU). Ein BMU kann funktionale Beschreibungen, geometrische Eigenschaften und System-Eigenschaften aus dem Bereich Mechanik, Thermodynamik, Hydraulik, Elektrik und Elektronik enthalten.

Sedchaicharn<sup>90</sup> entwickelte auf Basis des C&C<sup>2</sup>-A eine Methode zur Festlegung von Produktarchitekturen, wobei vom Beginn des Produktentstehungsprozesses an Gestaltinformationen berücksichtigt werden. Mit Hilfe einer C&C<sup>2</sup>-M-Dependency-Matrix wird ein Vorschlag für eine optimierte Produktentstehung abgeleitet.

---

<sup>86</sup> nach Enkler 2010, Alink 2010

<sup>87</sup> Albers 2010

<sup>88</sup> Albers et al. 2005

<sup>89</sup> Schyr 2006

<sup>90</sup> Sedchaicharn 2010

Otnad<sup>91</sup> stellt auf Basis des generalisierten C&C<sup>2</sup>-A (Abbildung 2-17) einen neuen Prozess zur Strukturoptimierung von Bauteilen in dynamischen und geregelten Systemen vor.

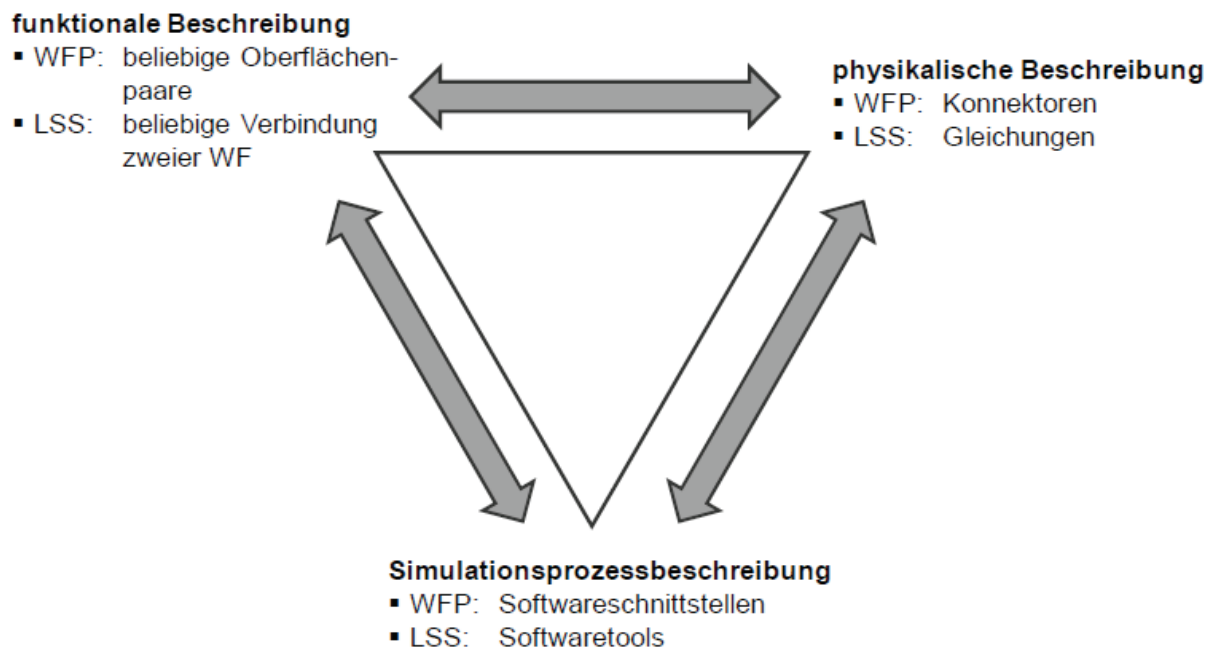


Abbildung 2-17: Schema des generalisierten C&C<sup>2</sup>-A<sup>92</sup>

Er erweitert diesen grundlegenden Ansatz um den Aspekt der Ableitung von Simulationskonzepten aus C&C<sup>2</sup>-M-Strukturen eines technischen Systems.

Düser<sup>93</sup> entwickelt mit Hilfe des C&C<sup>2</sup>-A ein neues Validierungs-Framework für die Anwendung in der Fahrzeugentwicklung. Das X-in-the-Loop-Konzept (XiL) stellt dabei einen Ansatz zur ganzheitlichen Entwicklung moderner mechatronischer Fahrzeugantriebskonzepte dar.

## 2.4.2 Funktionsmodellierung

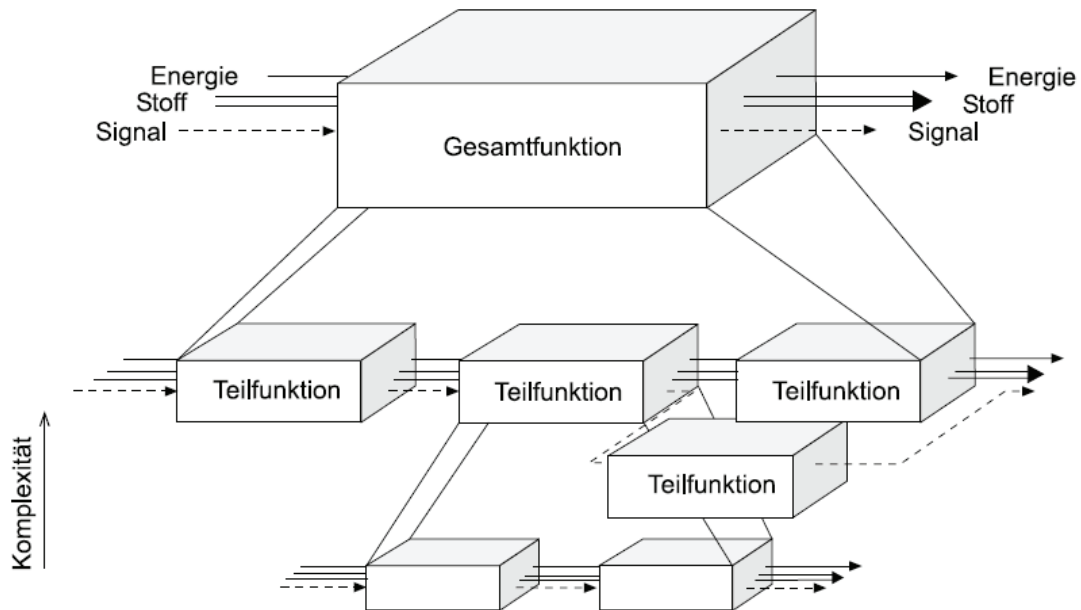
Nach Ponn und Lindemann<sup>94</sup> wird die modellhafte Beschreibung und Abbildung der Funktionen eines Systems Funktionsmodell genannt. Häufig werden Funktionsmodelle eingesetzt, um bestehende technische Systeme zu analysieren und in ihrer Funktionsweise zu durchdringen. Besonders bei komplexen Systemen ist die Funktionsmodellierung ein leistungsfähiges Werkzeug zur schrittweisen Zergliederung des Systems in seine Teilfunktionen (Abbildung 2-18).

<sup>91</sup> Otnad 2009

<sup>92</sup> Albers Enkler et al. 2009

<sup>93</sup> Düser 2010

<sup>94</sup> Ponn Lindemann 2008



**Abb. 3-5.** Zergliederung von Funktionen [nach Pahl et al. 2005]  
 Abbildung 2-18. Zergliederung von Funktionen<sup>95</sup>

Die Darstellung zeigt den Austausch von Energie, Stoff und Signal zwischen Funktionen und Teilfunktionen. Der Begriff „Signal“ stellt im Sinne des C&C<sup>2</sup>-A eine Mischung aus Energie und Information dar, weshalb der Ansatz den Austausch von Energie, Stoff und Information vorsieht. Bei der Analyse eines Systems kann die Funktionsmodellierung dabei unterstützende Verbesserungspotentiale und Zielkonflikte zu identifizieren.

Bevor ein Funktionsmodell erstellt werden kann, müssen funktionale Anforderungen an das System gesammelt werden. Diese können sich aus Lastenheft, Pflichtenheft oder aus einer anderen Anforderungsliste ergeben. Diese Sammlung von Anforderungen ist im Sinne des ZHO-Modells<sup>96</sup> als ein Bestandteil des inertialen Zielsystems bei der Produktentstehung anzusehen. Das Zielsystem wird im Verlauf des Produktentstehungsprozesses immer weiter konkretisiert und weiter mit Informationen gefüllt. Es beschreibt alle relevanten Ziele und ihre (gegenseitigen) Abhängigkeiten, enthält jedoch nicht die Lösungen zur Erfüllung dieser Ziele. Das Handlungssystem beschreibt sämtliche Komponenten, die das Ziel- in das Objektsystem überführen, sowie alle Aktivitäten, Prozesse und Vorgehensweisen die dafür benötigt werden.

In Funktionsmodellen kann der funktionale Aufbau des Systems analysiert und das Funktionskonzept dokumentiert werden. Darauf aufbauend werden Wirkprinzipien

<sup>95</sup> Pahl Beitz 2005

<sup>96</sup> Z - Zielsystem, H - Handlungssystem, O - Objektsystem; siehe auch Meboldt 2008

zur Realisierung der Teilfunktionen ermittelt und ausgewählt. Diese Wirkprinzipien bilden zusammen mit der Wirkgeometrie das Wirkmodell, das die entsprechende Funktion realisiert<sup>97</sup>.

Ponn und Lindemann<sup>97</sup> weisen darauf hin, dass die Funktionsmodellierung besonders sorgfältig durchgeführt werden sollte, da Defizite bei der Modellierung durch nachfolgende Entwicklungsschritte kaum oder nur mit sehr hohem Aufwand kompensiert werden können. Die Funktionsmodellierung kann neben der reinen Systemanalyse auch die Suche nach alternativen Lösungen unterstützen. Eine abstrakte Darstellung eines Systems auf Funktionsebene hilft eingefahrene Denkmuster aufzubrechen und damit Produktinnovationen voranzutreiben. Außerdem führen die beiden Autoren an, dass die Erstellung eines Funktionsmodells im Team das gemeinsame Verständnis des Systems fördere. Damit stelle die einheitliche abstrakte Beschreibungsform eine Arbeitsgrundlage dar, die insbesondere in interdisziplinären Teams die Kommunikation und Abstimmung erleichtere. Dieser Aspekt einer einheitlichen Beschreibungsform wird im Rahmen dieser Arbeit aufgegriffen und soll durch die später vorgestellte Methode zur funktionalen Bewertung von Systemen Berücksichtigung finden.

Die oben beschriebene Art der Funktions-Modellierung trennt allerdings Gestalt und Funktion klar voneinander. Der C&C<sup>2</sup>-Ansatz legt jedoch zugrunde, dass die Funktion eines Systems nicht grundsätzlich losgelöst von der Gestalt betrachtet werden soll. Gerade durch die Variation von Gestalt kann die Funktion eines Systems maßgeblich bestimmt werden. So kann beispielsweise das Package eines Fahrzeugs den Einsatz bestimmter Komponenten erzwingen und damit die Funktion des Systems Antriebsstrang stark prägen. Auch dieser Gesichtspunkt wird später durch die Anwendung des C&C<sup>2</sup>-A berücksichtigt.

### **Funktionsbasis nach Hirtz<sup>98</sup>**

Die Funktionsbasis nach Hirtz bietet einen Ansatz Funktionen basierend auf dem „Black-Box“-Prinzip zu beschreiben. Sie ermöglicht eine einheitliche und vergleichbare Funktionsbeschreibung. Die Funktionsbasis enthält insgesamt 53 Funktionen, die in acht Kategorien aufgeteilt sind und sich über die drei Ebenen Material, Energie und Information erstrecken.

Zusätzlich zur Funktionsbasis wird in der Arbeit von Hirtz eine Sammlung von 64 elementaren Flussarten vorgestellt, die wiederum nach den drei Ebenen Material,

---

<sup>97</sup> Ponn Lindemann 2008

<sup>98</sup> Hirtz et al. 2002

Energie und Information unterteilt sind. Diese stellen die Eingangs- und Ausgangsgrößen für die Black-Box-Darstellung dar.

#### Appendix A: Flow Definitions

##### 1) Material

- a) **Human.** All or part of a person who crosses the device boundary. Example: Most coffee makers require the flow of a *human hand* to actuate (or start) the electricity and thus heat the water.
- b) **Gas.** Any collection of molecules characterized by random motion and the absence of bonds between the molecules. Example: An oscillating fan moves air by rotating blades. The air is transformed as *gas* flow.
- c) **Liquid.** A readily flowing fluid, specifically having its molecules moving freely with respect to each other, but because of cohesive forces, not expanding indefinitely. Example: The flow of water through a coffee maker is a *liquid*.
- d) **Solid.** Any object with mass having a definite, firm shape. Example: The flow of sandpaper into a hand sander is transformed into a *solid* entering the sander.

Abbildung 2-19: Auszug aus den elementaren Flussarten nach Hirtz

Die eigentliche Beschreibung von Funktionen erfolgt durch die Kombination von Funktionstermen mit diesen Flussarten, wobei ausdrücklich nicht jede Funktion mit jeder Flussart gepaart werden kann. Außerdem werden ausführliche Definitionen aller Funktions- und Fluss-Begriffe, die eine eindeutige Differenzierung, Vergleichbarkeit und Verständlichkeit sicherstellen, aufgeführt. Dieser Ansatz der Funktionsbeschreibung konnte sich aufgrund dieser Restriktionen auf festgelegte Größen und Vielseitigkeit der Beschreibungsmöglichkeiten bereits in verschiedenen anderen Arbeiten etablieren. Zum Beispiel etabliert sich die Funktionsbeschreibung laut Hirtz seit einigen Jahren im Bereich der Qualitätssicherung der Ford Motor Company bei der eindeutigen Abstimmung der Zielerfüllung von entwickelten Produkten mit den funktionalen Anforderungen.

Ähnliche Ansätze wurden bereits in der Vergangenheit von anderen Autoren beschrieben. So beschreibt beispielsweise Koller<sup>99</sup> in sechs so genannten Prinzip-Katalogen das Wandeln, Verbinden und Trennen von Stoffen, physikalischen Größen und Signalen<sup>100</sup>.

---

<sup>99</sup> Koller 1985

<sup>100</sup> Eine Trennung des Signals in Energie und Information nimmt Koller nicht vor.

## 2.5 Komfort und Diskomfort

Im Rahmen dieser Arbeit sollen die Begriffe Komfort und Diskomfort in Bezug auf den Wiederstart des Verbrennungsmotors in parallelen Hybridantriebssträngen untersucht werden. Um geeignete Bewertungsmethoden entwickeln zu können, ist es notwendig, die Begriffe zu analysieren.

Der Duden<sup>101</sup> beschreibt den Komfort mit „Annehmlichkeit, Behaglichkeit“. Wird der Begriff Diskomfort als das Gegenteil von Komfort interpretiert, wäre er entsprechend mit „Unannehmlichkeit, Unbehagen“ zu übersetzen. Die Ursprünge des Worts Komfort lassen sich weit zurückverfolgen. Eine ausführliche Diskussion des Begriffs findet sich in Dyllas<sup>102</sup> Arbeit. Hier werden insbesondere die unterschiedlichen Beziehungen von Komfort und Diskomfort hervorgehoben.

Die Annahme, dass Eigenschaften technischer Systeme den empfundenen Komfort beeinflussen können, ist allen Autoren gemeinsam. Sie beurteilen aber die Art und Weise der Empfindung bzw. die Komfortwahrnehmung unterschiedlich. Einige Autoren (z.B. Schöggel<sup>103</sup>, Bönning<sup>104</sup>, Goto<sup>105</sup>) gehen von einem eindimensionalen Komfortzustand aus (Einkanalthorie, Abbildung 2-20). Dabei addieren sich positive und negative Eindrücke zu einer Gesamtbewertung, was einer skalaren Größe zur Komfortbeschreibung entspricht. Komfort stellt demnach das Gegenteil von Diskomfort dar.

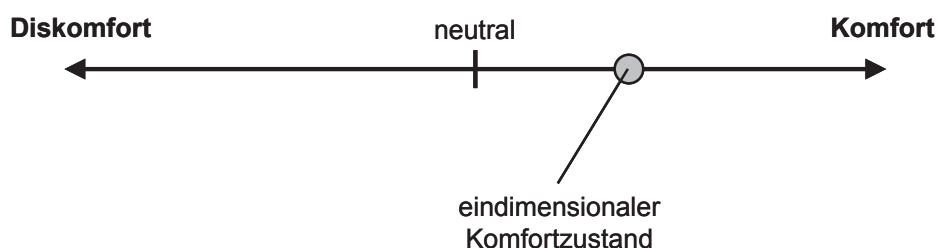


Abbildung 2-20: Komfortwahrnehmung laut Einkanaltheorie

Bei sehr komplexen Untersuchungssystemen und vielen einzelnen Bewertungskriterien führt die Anwendung dieser Wahrnehmungstheorie in vielen Fällen zu Problemen, da die Verrechnung dieser Kriterien zu einem

<sup>101</sup> Duden 2006

<sup>102</sup> Albers Dylla 2006, Dylla 2010

<sup>103</sup> Schöggel 2003

<sup>104</sup> Bönning Krake 2004

<sup>105</sup> Goto et al. 1988

eindimensionalen Wert notwendig ist<sup>106</sup>. Außerdem lassen sich negative Erfahrungen (Diskomfort) nicht durch eine hohe Anzahl positiver Erlebnisse ausgleichen. Zudem löst ein System ohne spürbare Störungen, also ein diskomfortfreies System, nicht notwendigerweise Gefallen aus. Dies legt die Vermutung nahe, dass dieses Gefallen unabhängig vom erlebten Diskomfort entsprechend den Erwartungen und Befindlichkeiten des Nutzers entsteht.

Zhang<sup>107</sup> untersucht Einflüsse auf den Sitzkomfort von Bürostühlen. Es wird festgestellt, dass scheinbar zwei grundsätzliche Achsen der Komfortwahrnehmung existieren. Nach dieser als Zweikanaltheorie bezeichneten Wahrnehmung werden positive Empfindungen auf der Achse des Gefallens, negative Erfahrungen auf der Achse des Erleidens dargestellt (Abbildung 2-21). Zhang betont, dass es keine Verknüpfung zwischen den beiden Achsen zu geben scheint. Ein bestimmter Komfortzustand besitzt damit immer mindestens zwei Dimensionen.

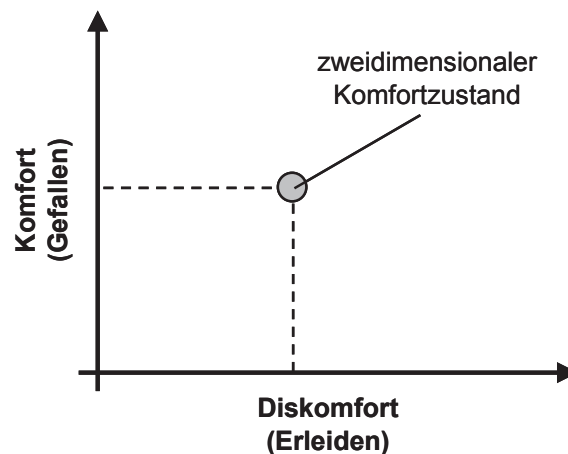


Abbildung 2-21: Komfortwahrnehmung laut Zweikanaltheorie

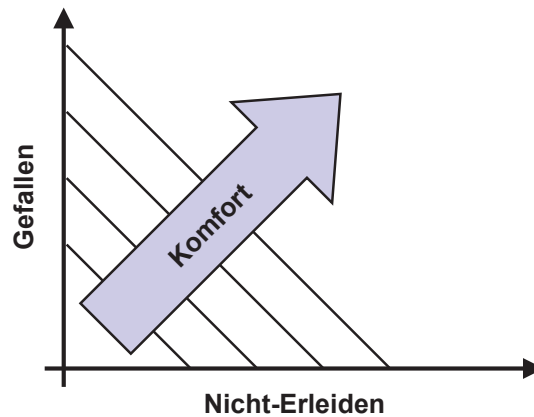
Knoll<sup>108</sup> entwickelt dieses Modell weiter, indem er den Komfortbegriff als Resultat der beiden Variablen Gefallen und Nicht-Erleiden definiert. Je höher Gefallen und Nicht-Erleiden bewertet werden, desto größer ist nach diesem Modell der empfundene Komfort. Das Modell zeigt, dass ein hohes Maß an Gefallen empfundene Nachteile durch erlebte Störungen nur zu einem bestimmten Teil kompensieren kann. Andererseits lässt sich der Komfort bei konstantem Erleiden durch Gefallen weiter steigern (Abbildung 2-22).

<sup>106</sup> Dylla 2010

<sup>107</sup> Zhang et al. 1996

<sup>108</sup> Knoll 2006



Abbildung 2-22: Komfort als Ergebnis aus Gefallen und Nicht-Erleiden<sup>108</sup>

Es ist davon auszugehen, dass der Diskomfort allgemein durch physikalische Aspekte beschrieben wird, wodurch er sich messtechnisch greifen lässt. Dagegen wird der Charakter vor allem durch psychologische Gesichtspunkte beeinflusst. Daraus leitet er ab, dass eine Vermischung der beiden Wahrnehmungen unweigerlich zu einer Messverfälschung führt. Auch Bitter<sup>109</sup> unterscheidet die verschiedenen Kanäle nach psychologischer und physikalischer Wahrnehmung. Besonders persönliche Vorlieben prägen den Aspekt des Gefallens, wodurch er sich einer messtechnischen Analyse entziehe. Dylla<sup>110</sup> verwendet die Zweikanaltheorie und unterteilt die Kanäle nach dem Optimierungsziel: Während die Diskomfortgrößen grundsätzlich zu minimieren sind, gibt es für Charaktergrößen ein individuell zu definierendes Ziel. Für ein Gesamtsystem sind hier die Zielwerte in Form eines Vektors festzulegen, um der Multidimensionalität gerecht zu werden. Dieser Vektor kann nach Bubb<sup>111</sup> nur entsprechend einer „globalen Firmenphilosophie“ definiert werden. Dabei wird diese Definition auf Grund der interindividuellen Varianz immer nur einen Teil der Nutzer zufrieden stellen.

Der Fahrkomfort wird von Heißing<sup>112</sup> als „das Wohlbefinden der Insassen während der Fahrt“ definiert. Der empfundene Komfort hängt dabei von einer Vielzahl verschiedener Faktoren ab. Sowohl Ausstattung und Innenraumgeräusche als auch Anregungen durch Triebstrangkomponenten oder Fahrbahnunebenheiten spielen dabei eine Rolle. Die von Bubb<sup>113</sup> im Jahr 2003 vorgestellte Komfortpyramide (Abbildung 2-23) fasst die zur Erfüllung des individuellen Komfortempfindens ausschlaggebenden Bedürfnisse zusammen.

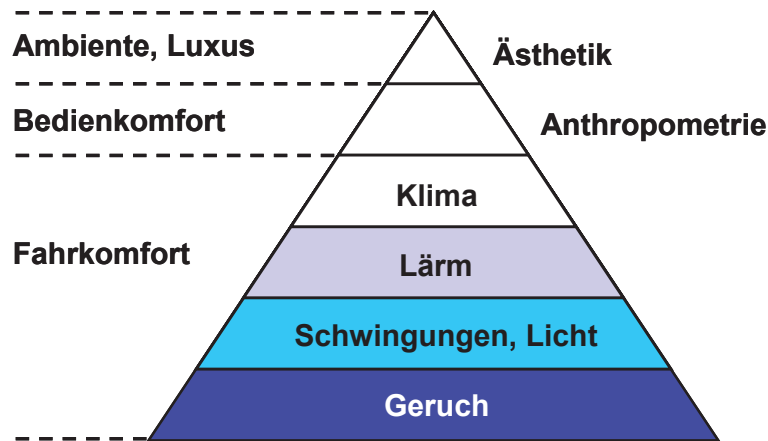
---

<sup>109</sup> Bitter 2005

<sup>110</sup> Dylla 2010

<sup>111</sup> Bubb 2001

<sup>112</sup> Heißing 2008

Abbildung 2-23: Komfortpyramide nach Bubb<sup>113</sup>

Die hierarchische Darstellung soll vermitteln, dass Komfortmängel durch die Insassen erst dann bewusst wahrgenommen werden, wenn die darunter liegenden Bedürfnisse erfüllt sind. Damit stellt die Pyramide gleichzeitig eine Wertung der einzelnen Faktoren dar. Dem Geruch kommt die höchste Bedeutung zu, dem Ambiente bzw. dem Luxus die geringste.

Somit kommt auch beim Wiederstart der Bewertung von Schwingungen die höchste Bedeutung zu, wenn eine Geruchsbelastung ausgeschlossen werden kann. Lärm oder Geräusche spielen eine untergeordnete Rolle.

## 2.6 Subjektive Komfortbewertung

Nach wie vor stellt die subjektive Bewertung von Fahrzeugeigenschaften im Fahrversuch den Stand der Technik dar. Zudem ist sie die Grundlage jedes Ansatzes zur Objektivierung der Bewertung durch den Versuch mit einer geeigneten Verknüpfung objektiver Kenngrößen subjektive Urteile abzubilden. Zur Durchführung subjektiver Bewertungen in einem Probandenversuch ist die Kenntnis der Grundlagen und Einflussfaktoren auf die menschliche Wahrnehmung und Urteilsfähigkeit eine Voraussetzung für die anschließende Objektivierung. Im Folgenden werden deshalb Grundlagen und Einflussfaktoren auf Subjektivurteile diskutiert. Anschließend werden verschiedene Bewertungsskalen, die zur subjektiven Beurteilung vorgesehen sind, vorgestellt.

<sup>113</sup> Bubb 2003

### 2.6.1 Grundlagen und Einflussfaktoren

In der Regel findet die subjektive Beurteilung von Fahrzeugeigenschaften im Probandenversuch statt. Dabei übernimmt der Proband sowohl die Aufgabe der Bewertung als auch die Führung des Fahrzeugs, um den zu bewertenden Betriebspunkt anzufahren. Die beurteilende Person ist somit unmittelbar in den Regelkreis Fahrer-Fahrzeug-Umwelt eingebunden<sup>114</sup>. Deshalb werden die Versuchsergebnisse durch Unterschiede zwischen den Fahrern/Beurteilern, durch Unterschiede zwischen den Fahrzeugvarianten und durch sich ändernde Umweltbedingungen beeinflusst, was zu einer unvermeidlichen Versuchsvarianz führt. Üblicherweise sollen im Fahrversuch Unterschiede in der Fahrzeugvarianz ermittelt werden. Diese unterschiedlichen Fahrzeugvarianten werden durch bewusst geänderte Systemparameter (z.B. Applikationsparameter in Steuerungen) sowie durch unkontrollierte Änderungen im Systemverhalten durch sich verändernde Umweltbedingungen beeinflusst. Sie wird zudem mit der Fahrer- und Betriebspunktvarianz vermischt<sup>115</sup>. Um eine hohe Trennschärfe erreichen zu können, müssen also unerwünschte Anteile der Varianz minimiert werden oder die Zahl der Beurteiler stark erhöht werden<sup>116</sup>. Umwelteinflüsse wie Verkehr, Witterung und Fahrstrecke wirken sich sowohl auf das Systemverhalten des Fahrzeugs als auch auf Wahrnehmung des Beurteilers und damit auf die Urteilsbildung aus (intraindividuelle Varianz). Dadurch sind vorgenommene Bewertungen eines Fahrzeugs von einem Beurteiler nur eingeschränkt reproduzierbar. Deshalb sollten Fahrversuche möglichst auf abgesperrten Strecken unter vergleichbaren Wetterbedingungen durchgeführt werden. Eine Beeinflussung der zu bewertenden Eigenschaften sollte durch die Beschaffenheit der Versuchsstrecke vermieden werden. Die Bewertung von Wiederstartvorgängen unter längsdynamischen Gesichtspunkten erfordert deshalb eine ebene und gerade Strecke, um überlagerte Einflüsse aus Vertikal- und Querdynamik auszuschließen. Die genannten Einflüsse auf die subjektive Urteilsbildung sind in Abbildung 2-24 zusammengefasst. Die Fahrervarianz ist dabei bezüglich Experten und Normalfahrern oder Laien zu unterscheiden. Unter den Experten sind Entwicklungs- und Versuchsingenieure einzuordnen, die alltäglich oder zumindest mit regelmäßiger Häufigkeit Fahrzeugbeurteilungen durchführen. Im Gegensatz zu Laien verfügen sie über entsprechende Systemkenntnis und Fahrzeugbeherrschung. Ihnen sind zudem Abläufe subjektiver Bewertungen, relevante Kriterien und Fachbegriffe sowie Bewertungsmethoden vertraut. Außerdem

---

<sup>114</sup> vgl. Kudritzki 2000

<sup>115</sup> vgl. Neukum 2002

<sup>116</sup> vgl. Aigner 1982

kann davon ausgegangen werden, dass Experten im Vergleich zu Normalfahrern besser in der Lage sind die zu beurteilenden Systemeigenschaften aus den Fahrzeugreaktionen zu extrahieren und unabhängig von störenden Einflüssen zu bewerten.

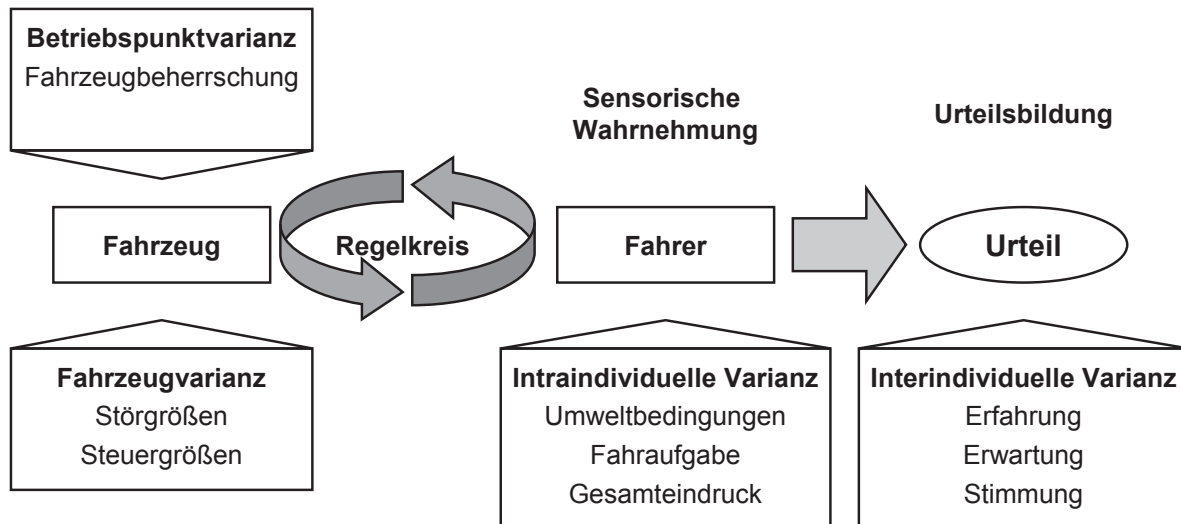


Abbildung 2-24: Grundprinzip und Einflussfaktoren auf die subjektive Urteilsbildung

Die Urteilsbildung wird auch durch die interindividuelle Varianz beeinflusst. Darunter ist zu verstehen, dass die Bewerter aufgrund unterschiedlicher Erfahrung, Erwartung und Vorlieben die gefilterten Sinneseindrücke unterschiedlich gewichten, was zu eingeschränkter Vergleichbarkeit der Ergebnisse führt. Bei Untersuchungen mit Experten und Laien kommen Riedel und Arbiger<sup>117</sup> zu dem Schluss, dass Expertenurteile besser zu reproduzieren sind. Auswertungen zur Beurteilung automatisierter Anfahrten ergeben in Albrechts<sup>118</sup> Arbeit, dass bei vergleichbaren Betriebspunkten die Bewertungen von Normalfahrern etwa doppelt so stark streuen wie die Expertenbewertungen.

In der Fahrzeugentwicklung finden Expertenbewertungen häufiger statt als Laienbewertungen. Dies liegt zum einen daran, dass repräsentative Probandengruppen nur in den wenigsten Fällen zur Verfügung stehen. Zum anderen sind Versuche mit Laien aus den angeführten Gründen aufwändiger und weniger aussagekräftig.

In Abhängigkeit von der Fahraufgabe wird die Einbindung des Fahrers in open-loop und closed-loop unterschieden. Bei open-loop-Manövern liegt eine

<sup>117</sup> Riedel Arbiger 1997

<sup>118</sup> Albrecht 2005

Steuerungsaufgabe vor (z.B. Lenkwinkelsprung). Bei closed-loop-Manövern muss der Fahrer die Fahrzeugreaktionen ständig beobachten, Abweichungen von der Fahraufgabe erfassen und entsprechende korrigierende Eingriffe vornehmen. Er führt dabei eine Regelungsaufgabe aus. Ein bekanntes Beispiel für ein solches Manöver für querdynamische Untersuchungen ist der doppelte Fahrspurwechsel. Closed-loop-Manöver bei der Beurteilung der Querdynamik erfordern ein hohes Maß an Fahrzeugbeherrschung, da erst nahe dem oder im Grenzbereich relevante Betriebspunkte erreicht werden. Normalfahrer sind hier häufig überfordert. Aus diesen Überlegungen ist abzuleiten, dass bei closed-loop-Manövern von einer höheren Varianz in der Einhaltung der Betriebspunkte als auch in den Urteilen ausgegangen werden muss. Deshalb können durch den Einsatz von Hilfsmitteln oder durch Systemmanipulationen (Eingriffe in Steuerungen) closed- in open-loop-Aufgaben überführt und der Fahrer somit entlastet sowie die Betriebspunktvarianz reduziert werden.

Closed-loop-Manöver können aufgrund der Abhängigkeit von Bewertung und Fahrereingabe sowie dem notwendigen Regelaufwand nur vom Fahrer selbst geführt und bewertet werden. Nach Hagerodt<sup>119</sup> ist zunächst davon auszugehen, dass passive Fahrzeugeigenschaften (z.B. Schaltkomfort bei Automatikgetrieben) auch von Bei- oder Mitfahrer beurteilt werden können. Die Wiederstartbeurteilung kann wie oben für andere Fahraufgaben beschrieben in eine open-loop-Aufgabe überführt werden. Dennoch kann der Wiederstartkomfort nur vom Fahrer selbst bewertet werden. Ein Bei- oder Mitfahrer kann zwar den Diskomfort und Teile des Charakters bewerten, eine vollständige Beurteilung des Charakters in jeder Fahrsituation ist jedoch nur dem Fahrer möglich, da er die Schnittstellen zum Fahrzeug bedient und somit in der Lage ist, seinen Wunsch und seine Erwartungen mit der Fahrzeugreaktion zu vergleichen. Dieser Sachverhalt wird später ausführlich diskutiert.

### **2.6.2 Bewertungsmethoden und -skalen**

Bewertungsmethoden werden in indirekte und direkte Verfahren unterteilt. Indirekte Methoden bewerten die Auswirkungen von Störungen anhand der Leistungsfähigkeit des Probanden in einer Nebenaufgabe und bieten dabei den Vorteil der geringen Anfälligkeit gegenüber Manipulationen durch den Probanden. Zudem müssen die Probanden keine Kenntnisse oder Erfahrungen mit Bewertungsskalen besitzen. In Laborversuchen (z.B. Ganzkörperschwingungen, psychologische Untersuchungen)

---

<sup>119</sup> Hagerodt 2003

sind diese Verfahren gut einsetzbar. Ihr Einsatz in Fahrzeugversuchen erscheint weniger geeignet, da der Bewerter bereits mit der Fahraufgabe beschäftigt ist.

Direkte Bewertungsmethoden verlangen von der Versuchsperson eine explizite Beschreibung ihrer Empfindungen oder ihres Komforturteils. Eine verbale Beschreibungsform erlaubt den Probanden die Verwendung von ihnen geläufigen Begriffen und Formulierungen. Dies erfordert aber sowohl für die Befragung als auch bei der späteren Auswertung und Verarbeitung der Bewertungen einen hohen Aufwand. Außerdem können die damit gewonnenen Ergebnisse nicht direkt mit statistischen Methoden weiterverarbeitet werden. Hierzu notwendige Klassierungen bergen die Gefahr von Verfälschungen. Durch die Vorgabe fester Begriffe zur Bewertung kann das Verfahren so erweitert werden, dass Nominalskalenniveau erreicht wird. Insbesondere bei Versuchen mit Laien besteht aber weiterhin die Gefahr der Fehlinterpretation von Begrifflichkeiten. Um dies zu vermeiden werden zur subjektiven Bewertung von Eigenschaften verschiedene Skalen verwendet, die den Skalenstufen feste Zahlenwerte zuordnet.

**Likert-Skala**

Bei der Anwendung dieser Skalen-Art werden zunächst die zu bewertenden Eigenschaften verbal beschrieben. Dabei ist eine strikt positive oder strikt negative Formulierung zu wählen. Diese Beschreibungen werden als „Items“ bezeichnet. Der Skala liegt die Überlegung zugrunde, dass Versuchspersonen die Aussage eines Items mit größer werdender Abweichung von ihrer persönlichen Einstellung zunehmend ablehnend bewerten.

Der Kontrast des Bildschirms ist hoch

trifft zu	trifft eher zu	weder noch	trifft eher nicht zu	trifft nicht zu
1	2	3	4	5

Abbildung 2-25: Likert-Skala (beispielhaft)

Im dargestellten Beispiel (Abbildung 2-25) bilden die Antwortmöglichkeiten den Grad der Zustimmung eines Probanden ab. Die möglichen Antworten sind in der Likert-Skala auf- oder absteigend angeordnet. Die Anzahl der Antwortmöglichkeiten kann dabei gerade oder ungerade sein. Eine ungerade Zahl ermöglicht es eine neutrale Bewertung abzugeben, verleitet aber den Bewerter zu wiederholt neutralen Bewertungen bei Unsicherheiten (zentrale Tendenz). Eine gerade Anzahl erzwingt eine Entscheidung hin zu einer Seite der Skala und vermeidet neutrale Antworten. Die Items auf einer Likert-Skala werden üblicherweise als ordinal- oder rangskaliert

betrachtet. Da nicht notwendigerweise angenommen werden kann, dass die Testteilnehmer die verschiedenen Antwortmöglichkeiten als äquidistant wahrnehmen, ist sie zunächst nicht als intervallskaliert anzusehen. Bei symmetrischer Formulierung und eventuell äquidistanter Visualisierung können Likert-Skalen teilweise auch als Intervallskalen verwendet werden.

### Zwei-Ebenen-Intensitäts-Skala

Die Zwei-Ebenen-Intensitäts-Skala (ZEIS) fordert in der ersten Ebene eine grobe Einordnung des Testergebnisses, während in der zweiten Ebene eine weitere Differenzierung des Urteils erfolgt. Die ZEIS geht zurück auf ein auf Funktionalität ausgelegtes Beurteilungsschema, das zur Beurteilung der Handling-Eigenschaften von Verkehrsflugzeugen eingesetzt wird (Abbildung 2-26).

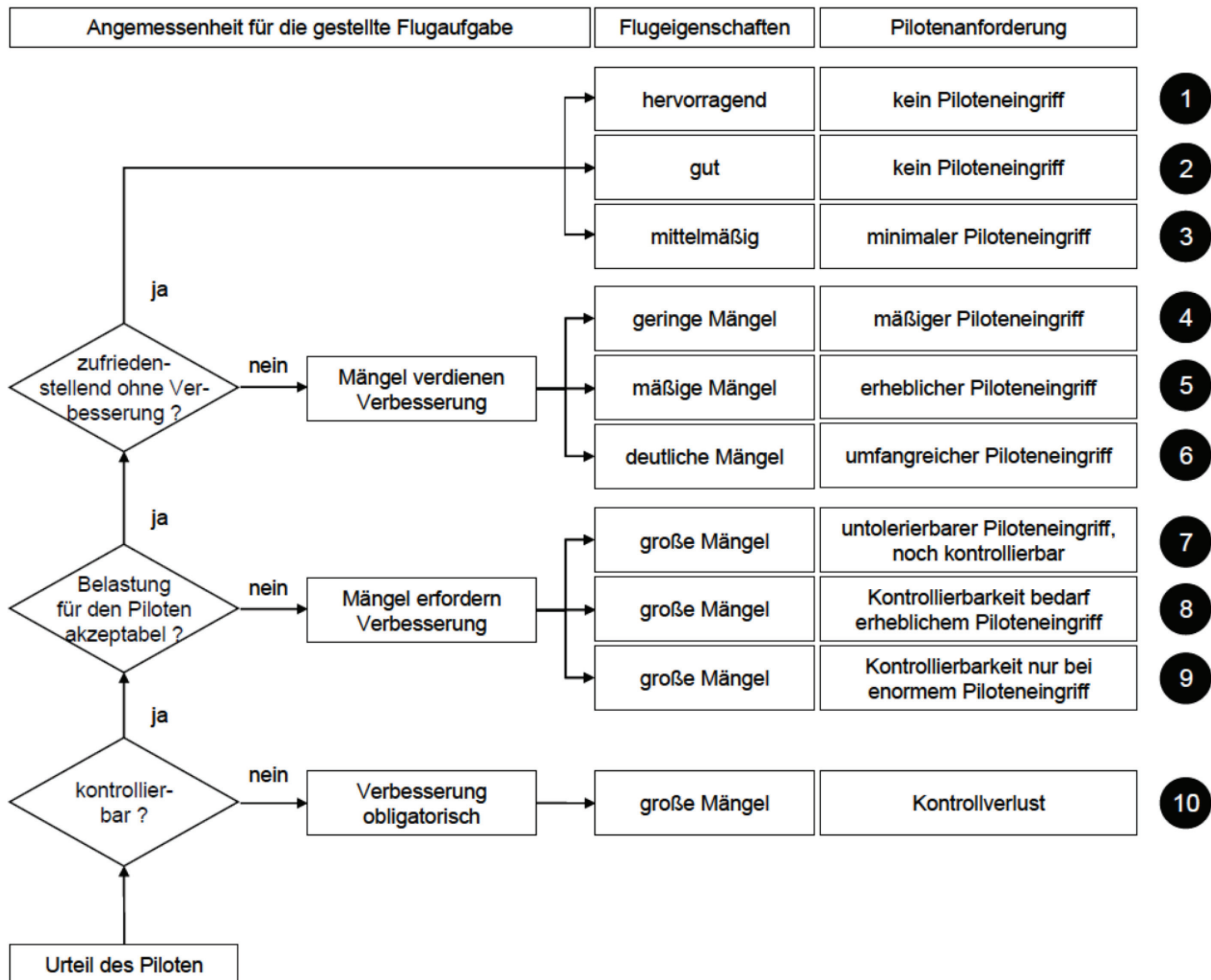


Abbildung 2-26: Bewertungssystem zur Flugzeugbeurteilung<sup>120</sup>

<sup>120</sup> Cooper Harper 1969

Die Bewertung erfolgt hier über mehrere Stufen, wobei immer eine Ja-Nein-Abfrage erfolgt, die dann im nächsten Schritt konkretisiert wird. Auffällig ist hier, dass die niedrigste Punktzahl das Optimum markiert. Ein Vorteil der ZEIS ist in der guten Differenzierung der Urteile zu sehen. Allerdings erfordert das Bewertungsschema einen hohen Zeitaufwand zur Durchführung. Insbesondere wenn mehrere Kriterien zu einem Versuch abgefragt werden sollen, erscheint ein Aufbau des Beurteilungsschemas nach der ZEIS zu aufwändig.

### **ATZ-Skala**

In der Automobilentwicklung haben sich zur Bewertung von Komforteigenschaften unipolare Skalen mit zehn Ankern zum Quasi-Standard etabliert. Bereits 1973 wurde von der SAE<sup>121</sup> eine solche Skala zur Bewertung von Lärm und Diskomfort vorgestellt, die mehrstufig aufgebaut ist. Nach einer Entscheidung, ob die Störung noch akzeptabel ist und der damit verbundenen Auswahl eines Notenbereichs, muss der Bewerter durch Zuordnung von Kundenreaktionen eine weitere Einschränkung treffen. Im dritten Schritt erfolgt die abschließende Bewertung durch Vergabe einer verbalen Beschreibung. Ist keine Störung zu spüren, muss laut Vorschrift eine Zehn als Bestnote vergeben werden, wodurch die Skala absolut verankert ist, was in der Theorie die Ergebnisse verschiedener Befragungen vergleichbar macht. Die Richtlinie weist aber darauf hin, dass aufgrund der Subjektivität der Probanden eine statistische Absicherung mit mehreren Bewertern notwendig ist.

---

<sup>121</sup> SAE 1973



Bewertungsindex	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
<b>Verhalten und Funktion der Aggregate</b>	übertrifft Erwartungen	sehr gut	gut	befriedigend	gerade noch ausreichend	unbefriedigend	mangelhaft	ungenügend	Panne	Sicherheitsmangel
<b>Störungen</b>	keine	kaum wahrnehmbar	sehr gering	leicht	gerade noch akzeptabel	unangenehm	deutlich störend	nicht mehr akzeptabel	Fahrzeug nicht gebrauchsfähig	
<b>Wahrnehmbarkeit</b>	-	Profis		kritische Kunden		alle Kunden	mit Sicherheit alle Kunden			

Abbildung 2-27: Auszug aus dem Porsche-Bewertungs-Index<sup>122</sup>

Aigner stellt vermutlich darauf aufbauend im Jahr 1982 eine ähnliche Skala vor. Sie stellt in der Automobilindustrie die am häufigsten verwendete Bewertungsmethode dar und wird teilweise auf spezifische Anforderungen der unterschiedlichen Firmen angepasst (z.B. Porsche-Bewertungs-Index, PBI<sup>122</sup>). Da ihre erste Vorstellung in der automobiltechnischen Zeitschrift<sup>123</sup> erfolgte, ist sie unter dem Namen ATZ-Skala bekannt. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird sie leicht modifiziert zur Gesamtbewertung von Wiederstarts eingesetzt. Die Skala ist durch die Beschreibung „nicht spürbar“ des Bestwerts absolut verankert. Dennoch herrscht Uneinigkeit über die Gültigkeit dieser Beschreibung. So kann entweder z.B. bei einer Getriebeschaltung oder einem Wiederstart keine Beschleunigungsveränderung gefordert werden, oder aber keine Störung des zu erwartenden Beschleunigungsverlaufs. Ein zu erwartender oder typischer Beschleunigungsverlauf ist dabei abhängig vom betrachteten System. Deshalb erscheint eine Anwendung der Skala bei Versuchen mit Normalfahrer/Laien nicht angebracht, da bei ihnen keine entsprechenden Kenntnisse über das System und vor allem Erfahrungen mit verschiedenen Ausprägungen des zu bewertenden Ereignisses vorausgesetzt werden kann. Die geforderte Absolutbewertung wird durch sie deshalb nicht

<sup>122</sup> Porsche 2007<sup>123</sup> Aigner 1982

abgegeben werden können. Gerade der Wiederstart in parallelen Voll-Hybrid-Antriebssträngen ist den meisten Normalfahrern völlig unbekannt, da die Marktdurchdringung mit hybriden Fahrzeugen bisher relativ gering ist. Bei strenger Interpretation der ATZ-Skala sind Bewertungen besser als ATZ-Note 7 durch Normalfahrer ausgeschlossen. Um dies zu umgehen, gibt Hagerodt<sup>124</sup> extreme Ausprägungen von Schaltereignissen mit zugehörigem Expertenurteil als Referenz vor und wiederholt diese auf Wunsch des Bewerter beliebig oft. Dadurch wird eine Überführung der absoluten in relative Urteile herbeigeführt, was jedoch die Gefahr birgt, dass nicht die Einschätzung der Fahrer abgefragt, sondern die antrainierte Bewertung wiedergegeben wird. Es findet also eine „Kalibrierung“ des Probanden statt.

## 2.7 Objektivierung der Komfortbewertung

Um eine Komfortobjektivierung durchführen zu können, müssen zunächst statistisch signifikante Kenngrößen definiert werden, die das untersuchte Phänomen objektiv beschreiben sollen. Die nächste Aufgabe ist dann, einen Zusammenhang zwischen diesen im Versuch direkt messbaren Größen und den aufgezeichneten Bewertungen der Probanden abzuleiten, womit der subjektive Komforteindruck objektiv beschrieben werden kann. Dabei können nur diejenigen Anteile des Komforteindrucks beschrieben werden, die durch die am physikalischen System messbaren Größen beeinflusst werden, erfasst werden. Aus Sicht der Modellbildung wird ein Modell eines Fahrers erstellt. Diese Modellierung des menschlichen Komfortempfindens kann mit verschiedenen mathematischen Methoden durchgeführt werden, die in diesem Abschnitt erläutert werden.

### 2.7.1 Objektive Kennwerte

Die in der Literatur genannten Kennparameter zur Bewertung zeitlicher Verläufe (z.B. Längsbeschleunigung, Drehzahlen) lassen sich allgemein in zwei Kategorien einteilen<sup>125</sup>:

- Kennwerte, die über die Gesamtzeit des zu betrachtenden Ereignisses gebildet werden und somit einen gewissen Durchschnittswert der betrachteten Größe wiedergeben
- Kennwerte, die charakteristische Stellen im zeitlichen Verlauf der betrachteten Größe beschreiben (z.B. Gradienten, Differenzen)

---

<sup>124</sup> Hagerodt 2003

<sup>125</sup> Fackelmann 2009

Der Effektivwert (RMS, root mean square) als Vertreter der ersten Gruppe wird aus Praktikabilitätsgründen am häufigsten verwendet, dabei liefert er jedoch nicht die beste Beschreibung der Wirkung auf den Menschen<sup>126</sup>. Eine Erweiterung des RMS-Wertes ist der RMQ (root mean quad), der aus der vierten Potenz der Längsbeschleunigung berechnet wird. Beckmann und Biermann<sup>127</sup> stellen eine hohe Empfindlichkeit der Wahrnehmung fühlbarer Schwingungen in Längsrichtung im Bereich zwischen 2 und 8 Hz fest. Um der Frequenzabhängigkeit der menschlichen Wahrnehmung in Längsrichtung gerecht zu werden beschreiben verschiedene Normen und Richtlinien<sup>128</sup> frequenzabhängige Gewichtungen für Beschleunigungen in Abhängigkeit der Einwirkungsrichtung, der Einwirkungsstelle und der Körperhaltung des Menschen. Aus der gewichteten Beschleunigung können dann Kennwerte wie der VDV (Vibration Dose Value) berechnet werden, der auch die Dauer einer Schwingung berücksichtigt. Seine Berechnungsvorschrift ist auf einzelne oder mehrere Anregungen oder auf Schwingungseinwirkungen während einer bestimmten Zeitdauer anzuwenden<sup>129</sup>. Statt der frequenzabhängigen Gewichtung der Beschleunigung und anschließender integraler Betrachtung berechnen Albers und Albrecht<sup>130</sup> für einzelne Frequenzbänder spektrale Leistungsdichten. Griffin<sup>131</sup> schlägt weitere Kennwerte vor, die die Beschleunigung in einem bestimmten Betrachtungszeitraum erfassen. Neben dem Mittelwert und der Standardabweichung der Beschleunigung sind dies Skewness (Schiefe) und Kurtosis (Wölbung). Beide geben Auskunft über die Verteilung aller Messwerte im Betrachtungszeitraum um den Mittelwert. Sie berechnen sich aus der Beschleunigung  $a$  mit Hilfe der Standardabweichung  $\sigma$  und der Anzahl der Messpunkte  $N$  gemäß Formel 2-1 und Formel 2-2.

$$\text{Skewness} = \frac{1}{N \cdot \sigma^3} * \sum_i (a(i) - \bar{a})^3 \quad \text{mit } i = 1 \dots N \quad \text{Formel 2-1}$$

$$\text{Kurtosis} = \frac{1}{N \cdot \sigma^4} * \sum_i (a(i) - \bar{a})^4 \quad \text{mit } i = 1 \dots N \quad \text{Formel 2-2}$$

Das Drehzahlintegral (DZI)<sup>132</sup> bewertet ebenfalls eine physikalische Größe über die Gesamtzeit der Beobachtung und zwar einen Drehzahlverlauf. Aus einem Vergleich

---

<sup>126</sup> Fackelmann 2009

<sup>127</sup> Beckmann Biermann 2003

<sup>128</sup> ISO 1997, VDI 2002

<sup>129</sup> Horste 1995, Kirschstein et al. 2009

<sup>130</sup> Albers Albrecht 2005, Albrecht 2005

<sup>131</sup> Griffin 1990

<sup>132</sup> Birkhold 2008

der Getriebeeingangsdrehzahl mit einer idealisierten Drehzahl ergibt sich anschaulich eine Fläche zwischen beiden Verläufen, die als das DZI bezeichnet wird (Abbildung 2-28).

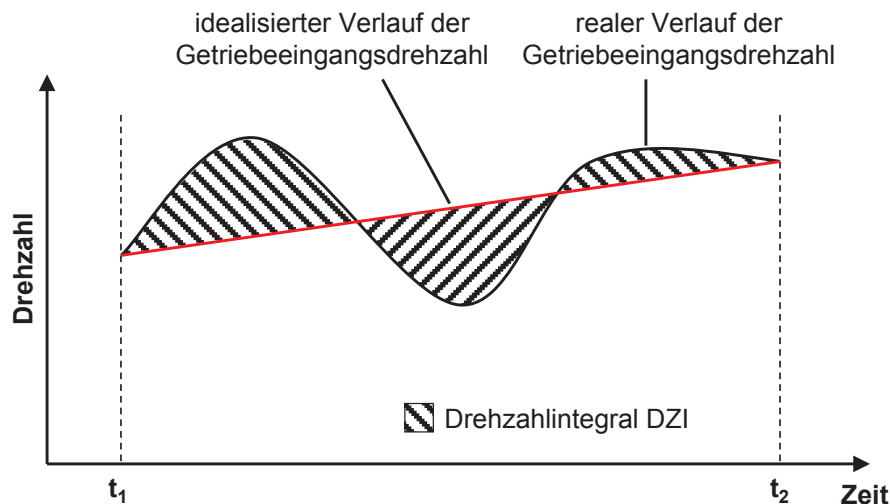


Abbildung 2-28: Berechnung des Drehzahlintegrals

Bei stark stoßhaltigen Schwingungen sind Effektivwert und andere integrale Kennwerte schwache Maße<sup>133</sup>. Diese sollen durch die zweite Gruppe der Kennwerte erfasst werden. Bei starken Stößen beispielsweise während einer Getriebebeschaltung ist die Amplitude des Schlags von Bedeutung. Bei kleinen Stößen ist die Betrachtung der gesamten Schwingung mit Hilfe integraler Kennwerte wichtiger<sup>134</sup>. Da der Mensch generell in der Lage ist, relative Veränderungen einer Beobachtungsgröße besser erkennen zu können als den absoluten Wert der Größe vergleichen zu können, spielen Gradienten und Differenzen als Kennparameter eine wichtige Rolle. Küçükay<sup>135</sup> beachtet insbesondere negative Beschleunigungsgradienten zur Bewertung der Schaltvorgänge von Automatikgetrieben. Hoffmann<sup>136</sup> identifiziert unter anderem Spitze-Spitze-Werte der Längsschwingung als relevante Kennparameter.

### 2.7.2 Planung von Versuchen zur Ermittlung objektiver Kennwerte

In Fahrversuchen werden häufig diverse Parameterkombinationen in verschiedenen Manövern untersucht. Bei der Variation mehrerer Parameter resultiert daraus ein

<sup>133</sup> Griffin 2007

<sup>134</sup> Griffin 1990

<sup>135</sup> Küçükay 2001

<sup>136</sup> Hoffmann 1999

hoher Versuchsaufwand, sofern alle möglichen Kombinationen analysiert werden sollen.

Zur Reduzierung der Versuchsanzahl eignen sich die Mittel der statistischen Versuchsplanung (engl. Design of Experiments, DoE). Sie wurde als Methode zur effizienten Planung und Auswertung von Versuchsreihen schon in den 20er Jahren des 20. Jahrhunderts entwickelt. Bei der Durchführung von Versuchsreihen besteht eine Zwiespältigkeit zwischen der Genauigkeit und Zuverlässigkeit seiner erwarteten Ergebnisse sowie dem dazu notwendigen Aufwand. Ziel der statistischen Versuchsplanung ist es, mit möglichst wenigen Einzelexperimenten den Wirkungszusammenhang zwischen Einflussfaktoren (unabhängige Variablen) und Zielgrößen (abhängige Variablen) möglichst genau zu ermitteln. Die statistische Versuchsplanung hat eine weltweit standardisierte Vorgehensweise und ein festgeschriebenes Vokabular<sup>137</sup>. Einige der Grundlagen und -begriffe sollen im Folgenden kurz erläutert werden.

Ein zu untersuchendes System hat eine oder mehrere Funktionen. Werden diese erfüllt, so ergeben sich messbare Ergebnisse, die Vergleiche zwischen einem guten und einem schlechten System zulassen, weshalb hier auch von Qualitätsmerkmalen gesprochen wird. Die Qualitätsmerkmale müssen kontinuierliche Größen sein, sonst gelingt keine Effektberechnung. Zusammen mit den Systemgrenzen hängt die richtige Festlegung der Merkmale automatisch mit dem Erfolg der gesamten Untersuchung zusammen. Werden beispielsweise zu wenige Qualitätskriterien ausgewählt, so lässt sich die Systemleistung nicht ausreichend abbilden und jeder aufgestellte Versuchsplan wäre ergebnislos.

Die Menge aller Eingangsgrößen eines Systems werden Parameter genannt. Faktoren sind die im Versuchsplan enthaltenen Parameter. Sie sind also eine ausgewählte Teilmenge der Parameter. Es bietet sich an, in einem Versuchsplan zunächst die Faktoren zu untersuchen, die nach den verfügbaren Informationen den größten Einfluss auf das System haben. Die Faktoren müssen gezielt und reproduzierbar eingestellt werden, da der Versuchsplan verschiedene Einstellungskombinationen vorsieht, wobei sich Faktoren nicht gegenseitig ausschließen sollten. Die Versuchspläne müssen vollständig und lückenlos abgearbeitet werden. Mit der Zahl der Faktoren wächst auch der Umfang eines solchen Planes, weshalb eine geschickte Auswahl der Faktoren sich hier doppelt auszahlt.

---

<sup>137</sup> Bandemer Bellmann 1994; Petersen 1991

Die Wirkung eines Faktors auf das System wird als Effekt gekennzeichnet. Zur Abgrenzung zum Wechselwirkungseffekt wird dieser auch Haupteffekt genannt. Hängt der Effekt eines Faktors von der Einstellung eines anderen Faktors ab, wird dies Wechselwirkung oder Wechselwirkungseffekt genannt. Es werden sowohl einfache als auch mehrfache Wechselwirkungen unterschieden.

Die Einstellung eines Faktors wird als Stufe oder Level bezeichnet. Jeder Faktor muss auf mindestens zwei unterschiedlichen Stufen getestet werden. Stufen sind also festgelegte Zustände für die jeweilige Faktoreinstellung. Wie stark sich ein Effekt eines Faktors auswirkt, hängt von dem Stufenabstand ab. Jeder einzelne Faktor muss in einem realistischen Einstellbereich bleiben. Werden bei Versuchsplänen mehrere Faktoren gleichzeitig verändert, so wirkt sich das unter Umständen drastisch auf das System aus. In Vorversuchen kann geklärt werden, ob das zu untersuchende System bei allen Kombinationen auch wirklich funktioniert. Dies wurde bei der Auswahl der Parameter zur Systemmanipulation bereits beachtet<sup>138</sup>.

Orthogonalität bezeichnet die Unabhängigkeit von Faktoren. Werden orthogonale Faktoren gleichzeitig verändert, beeinflussen sich die Effekte der Faktoren nicht gegenseitig.

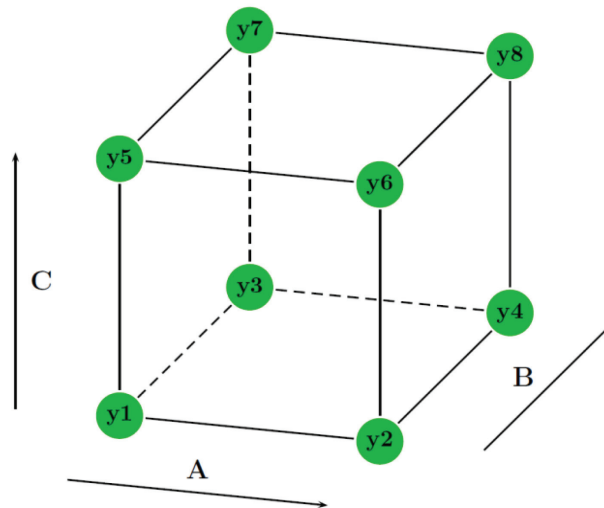
Grundsätzlich kommen verschieden Versuchspläne zum Einsatz. Bei einem vollfaktoriellen Versuchsplan (auch Vollfaktorplan genannt) wird jede mögliche Faktoren-Kombination getestet. Es kann also die Anzahl der Versuche bzw. der Versuchsaufwand  $n_r$ , aus der Zahl der Faktoren  $n_f$  und der Zahl der Stufen  $n_i$  berechnet werden:

$$n_r = n_i^{n_f} .$$

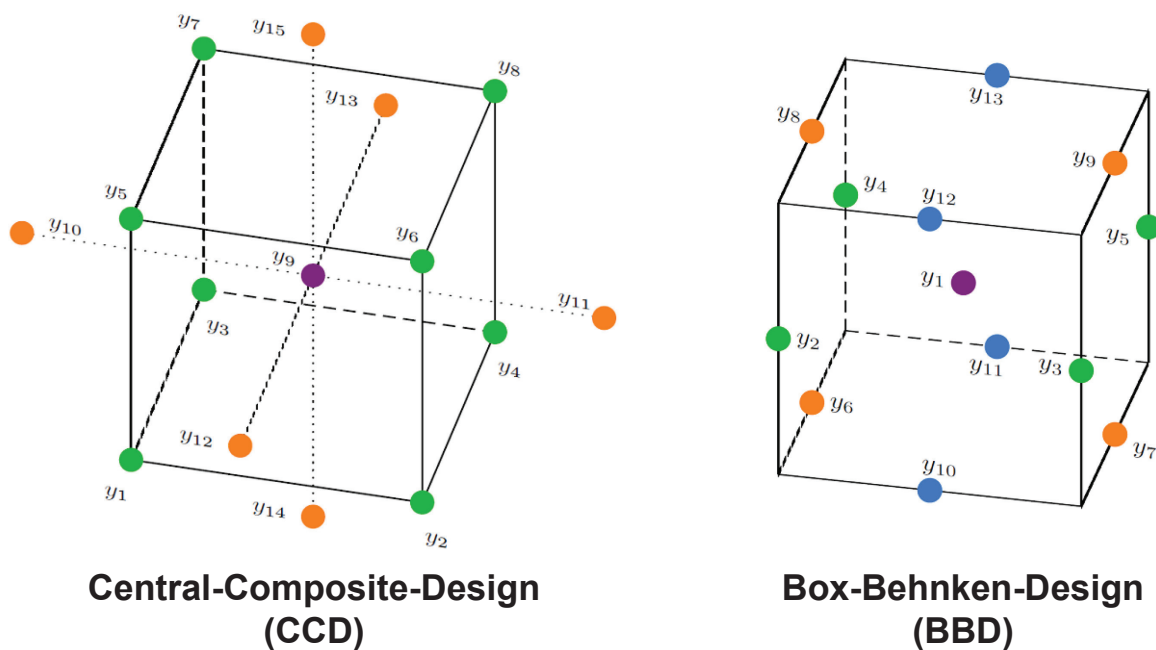
Der Faktorraum eines  $2^3$ -Versuchsplans lässt sich anschaulich als Würfel darstellen (Abbildung 2-29). Die Faktor-Kombinationen werden durch die Ecken des Würfels repräsentiert, jede Achse stellt eine Verstellstufe dar.

---

<sup>138</sup> siehe oben

Abbildung 2-29: Faktorraum eines  $2^3$ -Versuchsplans<sup>139</sup>

Bei steigender Anzahl von Faktoren sind Vollfaktorpläne nicht mehr wirtschaftlich durchführbar. Teilfaktorpläne sollen deshalb bei minimalem Informationsverlust mit möglichst geringer Versuchsanzahl auskommen. Zur weiteren Optimierung von Versuchsplänen existieren einige Methoden wie z.B. die Feldkonstruktion nach Plackett und Burman. Ein bekannter Anwender dieser Methode ist der japanische Statistiker und Experte für Qualitätsverbesserung Taguchi Gen'ichi.

Abbildung 2-30: Central-Composite- und Box-Behnken-Design<sup>140</sup>

<sup>139</sup> Siebertz et al. 2010

Weitere Möglichkeiten zur Erstellung von Versuchsplänen sind beispielsweise das Central-Composite-Design (CCP) oder das Box-Behnken-Design (BBD). Sie erweitern den Würfel aus Abbildung 2-29 zu anderen Darstellungsformen, indem nicht nur die Ecken, sondern auch Punkte, die auf den Würfelflächen oder auf den Kanten des Würfels liegen, genutzt werden. Weitere Einzelheiten und Grundlagen zur statistischen Versuchsplanung sind einschlägiger Literatur<sup>141</sup> zu entnehmen und sollen hier nicht ausführlicher behandelt werden.

In der Praxis kann es hin und wieder vorkommen, dass von den vorgefertigten Versuchsplänen abgewichen werden muss. Das ist der Fall, wenn Faktoren eine unterschiedliche Zahl von Stufen aufweisen. Hier kommen die „optimalen“ Versuchspläne zum Einsatz. Mit Hilfe von Computern wird mit bestimmten Rechenalgorithmen die optimale Kombination aus Vollfaktorplan und weiteren Versuchsplänen errechnet. Hier wird anschaulich gesprochen ein Faktorraum eines Vollfaktorplanes zusätzlich individuell mit Einstellungen wie einer Flächen-Mitte oder Kantenmitten besetzt. Die Verwendung eines optimalen Versuchsplanes setzt voraus, dass der Anwender sein System gut kennt. Ein Versuchsplan, der das berücksichtigt und der eine gängige Verbreitung hat, ist das D-optimale Design. Bei dieser Versuchsart wird über einen Algorithmus die ideale Zahl an Modellkonstanten berechnet. Dabei ist stets zu berücksichtigen, dass dem jeweiligen Versuchsplan eine bestimmte Modellvorstellung zwischen Parameter und Parameterwirkung zugrunde liegt. Wird der Versuch diesem Modell nicht gerecht, können die Versuchsergebnisse stark verfälscht werden.

### **2.7.3 Modellierung des menschlichen Komfortempfindens**

Zur Nachbildung des menschlichen Komfortempfindens müssen Modelle entwickelt werden, die den Zusammenhang zwischen subjektiver Note und gemessenen oder berechneten objektiven Kennwerten wiedergeben. In der Vergangenheit wurden verschiedene Modelle entwickelt und angewendet. Die bekanntesten sind Regressionsmodelle, die mit Methoden der deskriptiven Statistik Korrelationen ableiten, und künstliche neuronale Netze, die versuchen menschliches Empfinden mit Hilfe von Verfahren der künstlichen Intelligenz abzubilden. Beide Modellarten werden im Folgenden diskutiert.

---

<sup>140</sup> Siebertz et al. 2010

<sup>141</sup> Siebertz et al. 2010



### 2.7.3.1 Lineare Regressionsmodelle

Ein lineares Regressionsmodell versucht eine Zielgröße (abhängige Variable) durch eine Linearkombination mehrerer Parameter (unabhängige Variablen) näherungsweise zu beschreiben. Da üblicherweise nicht nur eine Beobachtung der Zielgröße sondern eine Vielzahl davon im Modell berücksichtigt werden muss, entsteht ein lineares Gleichungssystem der Form

$$y = X * \beta + \varepsilon \quad \text{Formel 2-3}$$

Der Beobachtungsvektor  $y$  enthält alle Werte der Zielgröße, die beispielsweise bei einer Versuchsreihe ermittelt wurden, die Designmatrix  $X$  spaltenweise die Werte der unabhängigen Variablen. Der Vektor  $\varepsilon$  repräsentiert die Residuen der Annäherung durch das lineare Modell. Zur Berechnung der Modellkoeffizienten  $\beta$  wird die Methode zur Minimierung der Summe der Fehlerquadrate (Least Square) angewendet.

Die Summe der Residuenquadrate  $L$  ergibt sich zu

$$L(\beta) = \sum_i \varepsilon_i^2 = \sum_i (y_i - \beta_i * x_i)^2 \quad \text{Formel 2-4}$$

sodass  $\beta$  Lösung des Minimierungsproblems

$$L(\beta) = \min \{ L(\beta) : \beta \in \mathbb{R}^n \} \quad \text{Formel 2-5}$$

ist.

Der Ansatz der multiplen linearen Regression setzt die Unabhängigkeit der einzelnen Variablen voraus<sup>142</sup>. Besonders bei der Objektivierung des menschlichen Empfindens ist dies aufgrund der verwendeten Messgrößen nicht generell gegeben. Diese als Interaktionen bezeichneten Abhängigkeiten sollten deshalb als neue unabhängige Variablen im Regressionsmodell berücksichtigt werden. Vor der Erstellung eines Regressionsmodells muss deshalb der verwendete Datensatz auf vorhandene Interaktionen untersucht werden. Zur Identifikation linearer Abhängigkeiten lässt sich das Verfahren der linearen Regression einsetzen. Dazu muss jede mögliche Kombination der unabhängigen Variablen in einem separaten Regressionsmodell untersucht werden. Über die Aufnahme einer Interaktion in das eigentliche Regressionsmodell kann z.B. mit Hilfe eines minimalen Bestimmtheitsmaßes entschieden werden<sup>143</sup>. Abbildung 2-31 zeigt beispielhaft zwei

---

<sup>142</sup> Kössler 2009

<sup>143</sup> Hörig 2010

der später verwendeten Kennwerte aus einem Datensatz. Das hohe Bestimmtheitsmaß  $R^2$  der linearen Regression mit einem Wert von 0,96 lässt eine starke lineare Abhängigkeit der beiden Kennwerte vermuten.

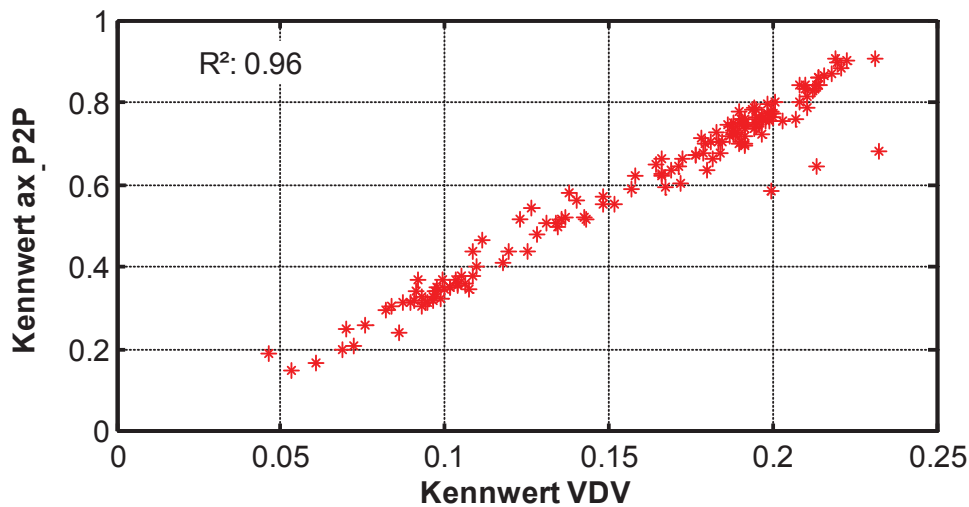


Abbildung 2-31: Zusammenhang zwischen den Kennwerten VDV und ax\_P2P (beispielhaft)

Grundsätzlich kann eine Vielzahl von Interaktionen auch durchaus mehrdimensional auftreten. Um jedoch den Komplexitätsgrad weiterhin überschaubar zu halten, werden im Folgenden ausschließlich lineare Abhängigkeiten betrachtet.

Die Überprüfung der Signifikanz des durch das Regressionsmodell beschriebenen linearen Zusammenhangs wird mit Hilfe des so genannten F-Tests durchgeführt. Es kann somit festgestellt werden, ob der Unterschied zwischen den Varianzen zweier Stichproben A und B nicht nur durch Zufallsschwankungen entstanden, sondern signifikant ist. Beide Möglichkeiten werden zunächst als Nullhypothese  $H_0$  und als Alternativhypothese  $H_1$  formuliert<sup>144</sup>:

Nullhypothese:  $H_0 : \sigma_A^2 = \sigma_B^2$

Alternativhypothese:  $H_1 : \sigma_A^2 \neq \sigma_B^2$  (bzw.  $\sigma_A^2 < \sigma_B^2$  oder  $\sigma_A^2 > \sigma_B^2$ )

Hierbei wird die Relevanz des Gesamtmodells mit Hilfe der Nullhypothese  $H_0$  ermittelt. Basierend auf dem Ergebnis der Nullhypothese wird entschieden, ob eine Alternativhypothese  $H_1$  akzeptiert werden kann oder nicht. Im Folgenden wird die Wahrscheinlichkeit ermittelt, mit der die Nullhypothese zutrifft. Ist diese zu gering, wird die Nullhypothese zugunsten einer Alternativhypothese verworfen. Die alternative Hypothese entspricht in diesem Fall der modifizierten Modellgleichung. Numerisch wird hierfür ein Signifikanzniveau  $\alpha$  (üblich ist  $\alpha = 5\%$ ) gewählt, gegen

welches die maximale Irrtumswahrscheinlichkeit für die Gültigkeit der Nullhypothese geprüft wird. Ist diese Wahrscheinlichkeit, die häufig auch als p-Wert bezeichnet wird, kleiner als  $\alpha$ , so wird die Nullhypothese aufgegeben. Eine explizite Berechnung der Wahrscheinlichkeit der Alternativhypothese ist jedoch nicht möglich<sup>145</sup>. Ihr Wert kann im Bereich zwischen 100 % und  $\alpha$  liegen. Der F-Test berechnet sich für die Regressionsfunktion nach folgender Vorschrift zu

$$F = \frac{\frac{R^2}{n_P}}{\frac{(1-R^2)}{(n_D - n_P - 1)}} \quad \text{Formel 2-6}$$

wobei  $R^2$  das Bestimmtheitsmaß,  $n_P$  die Anzahl der unabhängigen Variablen und  $n_D$  die Anzahl der unabhängigen Datensätze ist.

Zur Überprüfung einzelner Prädiktorvariablen auf ihre Relevanz für das Gesamtmodell wird der t-Test herangezogen. Die zu überprüfenden Kriterien entsprechen denen des F-Tests, mit der Spezifizierung auf jeweils eine unabhängige Variable. Der p-Wert dieses Tests gibt die Wahrscheinlichkeit an, mit der das Regressionsmodell das Kriterium vorhersagen kann, wenn der zugehörige Regressionskoeffizient den Wert Null annimmt. Ist diese Wahrscheinlichkeit kleiner als ein vorgegebenes Signifikanzniveau  $\alpha$  (z.B. 5 %), so liegt für diese Variable ein signifikanter Einfluss vor. Sie sollte nicht aus dem Modell ausgeschlossen werden<sup>146</sup>. Die t-Werte der Prädiktorvariablen berechnen sich nach folgender Gleichung zu

$$t = \frac{\beta_j}{S_j} \quad \text{Formel 2-7}$$

wobei  $\beta_j$  dem j-en Regressionskoeffizient und  $S_j$  dessen geschätztem Standardfehler entsprechen. Die Signifikanzprüfung der einzelnen Prädiktorvariablen wird verwendet, um die statistische Wertigkeit der Messgrößen für das Gesamtmodell zu ermitteln. Es lässt sich jedoch nicht zwangsweise auch eine Relevanz für die praktische Anwendung aus der ermittelten statistischen Signifikanz ableiten. So kann durchaus eine Variable, deren p-Wert größer als das vorgegebene Signifikanzniveau  $\alpha$  ist und sie somit als nicht signifikant eingestuft würde, dennoch von Bedeutung sein, wenn zwischen ihr und anderen Variablen eine lineare Abhängigkeit besteht. Einen solchen Datensatz bezeichnet man als multikollinear<sup>147</sup>. „Die Entscheidung

<sup>144</sup> Oberguggenberger 2005

<sup>145</sup> Albers Skiera 1998

<sup>146</sup> Cleff 2008

<sup>147</sup> Bender Lange 2007

darüber, welche Teilmenge an Prädiktorvariablen als die Beste anzusehen ist, wird häufig vom Zufall bestimmt. Die Bedeutung einer Prädiktorvariablen bzw. ihre Nützlichkeit ist bei hoher Multikollinearität in starkem Maße davon abhängig, welche Prädiktorvariablen schon (Vorwärtsselektion) oder noch (Rückwärtselimination) im Regressionsmodell enthalten sind.<sup>148</sup>

Die Auswirkungen der Multikollinearität sind also unerwünscht und sollten durch geeignete Schritte auf ein akzeptables Maß reduziert werden. Deshalb wird bei der Auswahl der Prädiktorvariablen schrittweise vorgegangen, um eventuelle Abhängigkeiten rechtzeitig zu erkennen und bei der Entscheidung zu berücksichtigen. Insbesondere kann der Vorgang der schrittweisen Selektion durch die Aufnahme im Voraus detektierter Interaktionen zwischen den Messgrößen in das Regressionsmodell unterstützt werden. Dies geschieht, wie in Abschnitt 5.2 beschrieben, durch eine grafische und rechnerische Auswertung mit anschließender Verknüpfung zu einem quasilinearen Modell.

Ferner lassen sich mit auftretenden Multikollinearitäten auch die Unterschiede in der Variablenauswahl durch die einzelnen Selektionsmethoden erklären. Hierbei ist die Wahrscheinlichkeit einer unterschiedlichen Auswahl an Messgrößen, die von den verschiedenen Selektionsverfahren als signifikant eingestuft werden und somit im Regressionsmodell enthalten sind, erheblich größer als bei linearer Unabhängigkeit der Prädiktorvariablen.

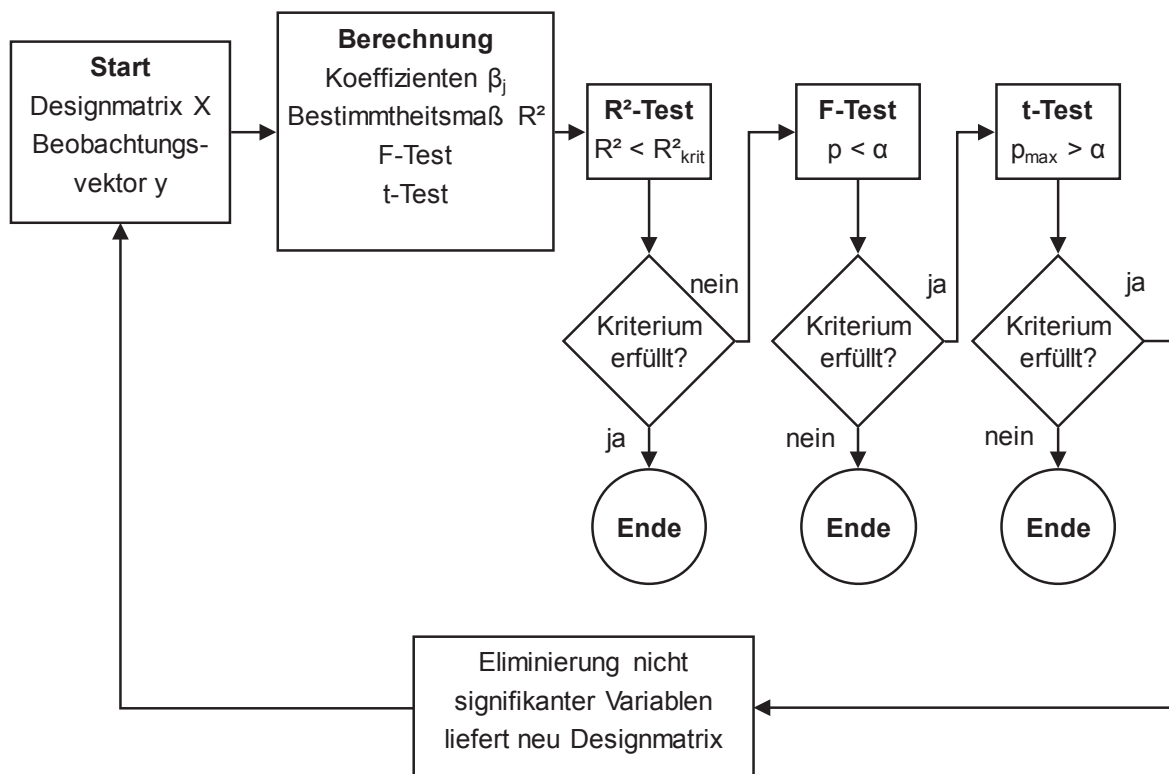
### **Rückwärtselimination**

Das Auswahlverfahren der Rückwärtselimination beginnt mit der Berücksichtigung aller  $n$  Parameter. Für jede dieser Variablen werden im ersten Schritt sowohl die einzelnen Regressions-Koeffizienten als auch die zur Signifikanzprüfung benötigten Werte und die aktuelle Modellgüte ermittelt. Der Eliminationsprozess einer Variablen durchläuft hierbei drei Stationen. Bevor mit der Signifikanzanalyse begonnen werden kann, wird die aktuelle Modellgüte gegen eine vorgegebene Schwelle verglichen, um eine vorher gewählte Aussagekraft des Gesamtmodells nicht zu unterschreiten. Nach erfolgreicher Güteprüfung wird anhand des für das gesamte Regressionsmodell berechneten  $p$ -Werts der oben beschriebene  $F$ -Test durchgeführt. Hierbei wird der  $p$ -Wert mit dem vorgegebenen Signifikanzniveau  $\alpha$  verglichen. Der Eliminationsprozess wird fortgesetzt, sofern  $p$  kleiner ist, als  $\alpha$  und somit die Nullhypothese zugunsten der Alternativhypothese verworfen werden kann. Anschließend werden mittels  $t$ -Tests die Nützlichkeiten der einzelnen Prädiktorvariablen überprüft. Hierfür ist jeweils der

---

<sup>148</sup> Bortz 1993

größte aller p-Werte von Bedeutung, der wie beim F-Test mit dem Signifikanzniveau  $\alpha$  verglichen wird. Liegt der maximale p-Wert  $p_{\max}$  über dem Schwellwert  $\alpha$ , ist für diese Messgröße kein signifikanter Einfluss gegeben und sie kann endgültig aus dem Regressionsmodell entfernt werden<sup>149</sup>. Für die nächste Iteration ergibt sich somit eine neue Designmatrix mit nur noch  $n-1$  Messgrößen. An dieser Stelle wiederholt sich der Ablauf nach beschriebenem Schema solange, bis entweder die kritische Modellgüte unterschritten oder einer der Signifikanztests nicht mehr bestanden wird. Das endgültige Regressionsmodell benutzt die Koeffizienten, die in der letzten vollständig durchlaufenen Iteration ermittelt wurden. Abbildung 2-32 zeigt das Verfahren der Rückwärtselimination in schematischer Darstellung.

Abbildung 2-32: Ablauf der Rückwärtselimination<sup>150</sup>

### Vorwärtsselektion

Im Unterschied zur Rückwärtselimination beginnt der Selektionsprozess bei diesem Verfahren mit einem komplett leeren Modell. Im ersten Iterationsschritt wird als Ausgangsterm der arithmetische Mittelwert  $y_m$  aller Beobachtungen  $y$  herangezogen. Im Folgenden werden durch Hinzufügen jeweils einer weiteren, unabhängigen

<sup>149</sup> Knobelspies 2008

<sup>150</sup> nach Hörig 2010

Variablen neue Designmatrizen erstellt, für die wiederum sowohl einzelne Koeffizienten als auch die zur Signifikanzprüfung benötigten Werte und die Modellgüten ermittelt werden. Anschließend findet ein Vergleich aller Modellgüten statt, wobei das Modell, welches das größte Bestimmtheitsmaß  $R^2_{\max}$  liefert, für die weiteren Prüfungen verwendet wird. Bevor die Signifikanzanalyse beginnt, wird bei der Vorwärtsselektion der Zuwachs der Modellgüte  $\Delta R^2$  mit einer Schwelle  $\Delta R^2_{\min}$  verglichen. Der Anstieg berechnet sich aus der Differenz zwischen der aktuellen Modellgüte und jener der vorausgegangenen Iteration. Im darauf folgenden Schritt wird, wie im Fall der Rückwärtselimination, basierend auf dem zuvor ermittelten p-Wert, der F-Test durchgeführt, indem dieser mit dem vorgegebenen Signifikanzniveau  $\alpha$  verglichen wird. Die Signifikanzanalyse wird fortgesetzt, sofern p kleiner ist als  $\alpha$ . Abschließend wird mit dem t-Test die Wertigkeit der hinzugefügten Prädiktorvariablen überprüft. Liegt der betrachtete p-Wert unter dem Schwellwert  $\alpha$ , so liegt für diese Messgröße ein signifikanter Einfluss vor und sie kann endgültig dem Modell hinzugefügt werden<sup>151</sup>. An diesem Punkt wiederholt sich der Prozess mit den neuen Designmatrizen solange, bis entweder der minimale Modellgütenzuwachs unterschritten oder einer der Signifikanztests nicht mehr bestanden wird. Auch dieses Verfahren benutzt für das endgültige Regressionsmodell diejenigen Koeffizienten, die in der letzten vollständig durchlaufenen Iteration ermittelt wurden.

### **Schrittweise Regression**

Die schrittweise Regression ist eine Kombination aus den beiden zuvor beschriebenen Verfahren der Rückwärtselimination und der Vorwärtsselektion. Der Ausgangspunkt ist wiederum ein leeres Modell, welches im ersten Schritt mit der Variablen startet, welche die höchste Korrelation zwischen allen unabhängigen Variablen  $x_i$  und den Beobachtungen  $y$  liefert. Im Folgenden wird, gemäß der Vorwärtsselektion, diejenige Größe hinzugefügt, die bezüglich der Signifikanzanalyse als optimal verifiziert wurde. Der Unterschied zur Vorwärtsselektion liegt darin, dass nach erfolgtem Hinzufügen einer neuen Variablen zusätzlich das gesamte Regressionsmodell entsprechend dem Vorgehen der Rückwärtselimination erneut einer Signifikanzprüfung unterzogen wird. So kann es durchaus vorkommen, dass durch die Aufnahme einer neuen Messgröße eine bereits verwendete Variable als nicht mehr signifikant angesehen wird und somit wieder aus dem Modell entfernt werden muss.

---

<sup>151</sup> Knobelspies 2008

## 2.7.3.2 Künstliche Neuronale Netze

Die Forschung im Bereich der künstlichen Intelligenz hatte zu Beginn das Ziel nicht mathematisch beschreibbare Probleme durch Abbildung des menschlichen Gehirns zu lösen. Wegen seiner Komplexität ist jedoch nicht ein exaktes Abbild anzustreben, sondern ein Modell, das die wesentlichen Funktionsweisen biologischer Neuronen simuliert. Aufgrund der Analogiebildung zum menschlichen Gehirn entstand der Begriff des „Künstlichen Neurons“. Wie das biologische ist das formale künstliche Neuron durch folgende Elemente charakterisiert:

- Eingänge (Dendriten)
- Verbindungen (Synapsen)
- Aktivierung (Zellkörper) und
- Ausgang (Axon)

Einen direkten Vergleich der Bestandteile biologischer und künstlicher formaler Neuronen zeigt Abbildung 2-33.

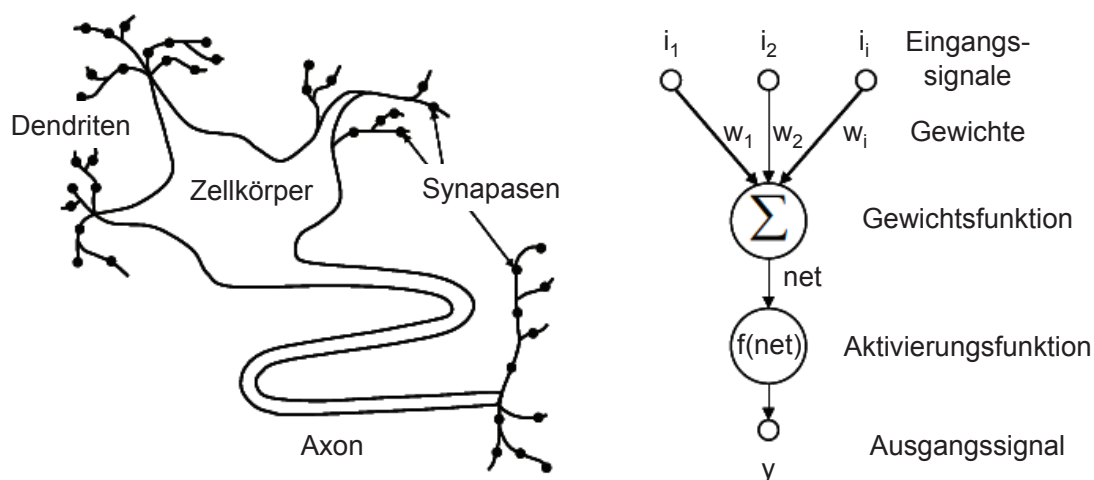


Abbildung 2-33: Biologisches (links) und künstliches Neuron (rechts)<sup>152</sup>

Ähnlich seinem realen Vorbild sind auch Künstliche Neuronale Netze (KNN) aus einer bestimmten Anzahl (künstlicher) Neuronen aufgebaut. Ein KNN ist im weitesten Sinne ein „informationsverarbeitendes System“, das aus einer Vielzahl einfacher Einheiten (Zellen, Neuronen) zusammengesetzt ist. Informationen werden durch die Aktivierung der Zellen und gewichtete Verbindungen zwischen den einzelnen Neuronen übertragen<sup>153</sup>. Eingangssignale eines Neurons können von der Umgebung

<sup>152</sup> vgl. Albers Albrecht 2002

<sup>153</sup> Brause 1995

oder von vom Ausgang eines anderen künstlichen Neurons stammen. Jeder einzelnen Verbindung innerhalb eines KNN ist eine reelle Zahl als Gewicht  $w_i$  zugeordnet, das die Stärke der Verbindung beschreibt. Die Summe der gewichteten Eingangssignale  $i_i$  wird als Netto-Input  $net$  bezeichnet.

$$net = \sum_i w_i * i_i . \tag{Formel 2-8}$$

Abhängig vom Netto-Input bestimmt die Aktivierungsfunktion  $f(net)$  deren Output  $y$  des Neurons, der entweder an ein weiteres Neuron oder einen Ausgang des KNN übermittelt wird. Brause<sup>154</sup> beschreibt die Arbeitsweise eines künstlichen Neurons anschaulich wie folgt:

*„Die Verbindungen eines Neurons nehmen Aktivierungen  $x_i$  mit bestimmten Verstärkungen  $w_i$  auf, summieren diese und lassen am Ausgang  $y$  des Neurons eine Aktivität entstehen, sofern die Summe vorher einen Schwellwert überschritten hat.“*

Streng genommen gilt diese Aussage nur für binäre Neuronen, die sich analog zum biologischen Neuron wie eine Sprungfunktion verhalten. Da die Sprungfunktion jedoch nicht stetig und damit nicht differenzierbar ist, was beim späteren Training zu Problemen führen kann, werden üblicherweise sigmoide Funktionen als Aktivierungsfunktion künstlicher Neuronen verwendet.

Die Eingangsaktivitäten  $i_1 \dots i_j$  lassen sich zum Eingabevektor  $i$

$$i = (i_1, \dots, i_j)^T \tag{Formel 2-9}$$

und die Gewichte  $w_1 \dots w_j$  zum Gewichtsvektor  $w$

$$w = (w_1, \dots, w_j)^T \tag{Formel 2-10}$$

zusammenfassen. Die Propagierungsfunktion  $z$  eines einfachen linearen Neurons lässt sich unter Berücksichtigung des Schwellwertes (Bias)  $s$  als Skalarprodukt beider Spaltenvektoren darstellen

$$z(w, i, s) = \sum_n w_n * i_n - s = w^T * x - s , \tag{Formel 2-11}$$

wobei  $n$  die Anzahl der Eingänge des Neurons ist. Die Aktivität  $y$  am Ausgang des Neurons wird durch  $z$  und die Aktivierungsfunktion  $S$  ermittelt:

---

<sup>154</sup> Brause 1995



$$y = S(z(w, i, s)).$$

Formel 2-12

Durch die Verknüpfung einzelner Neuronen untereinander entsteht ein KNN. Seine Struktur kann in Schichten beschrieben werden. Die Eingangsschicht dient der Übergabe von Eingangswerten in das KNN, die Ausgangsschicht gibt den oder die berechneten Werte zurück an die Umgebung. Zwischen diesen beiden Schichten können beliebig viele verdeckte Schichten angeordnet sein, die über keine Verbindungen zur Umgebung verfügen. Bei Feed-Forward-Netzen besitzen Neuronen einer Schicht keine Verbindungen untereinander sondern nur „vorwärts gerichtete“ Verbindungen zu Neuronen der nächsten Schicht bzw. die Ausgangsschicht zur Umgebung. Innerhalb anderer Netztypen können auch Verbindungen zwischen Neuronen derselben Schicht bestehen.

Für die Definition der endgültigen Struktur des KNN (z.B. der Gewichtsvektor  $w$  oder der Schwellwert  $s$ ) wird ein Training durchgeführt. Im Lernprozess sind die grundsätzlichen Schritte

- Entwicklung neuer Verbindungen oder neuer Neuronen
- Eliminieren bestehender Verbindungen oder Neuronen
- Modifikation der Aktivierungs- bzw. Ausgabefunktion
- Modifikation des Gewichtsvektors und/oder des Schwellwertes

möglich. Am Häufigsten wird das Verändern von Gewichten genutzt, wobei verschiedene Rechenverfahren angewandt werden können. Der Algorithmus sucht dann eine bestmögliche Verknüpfung zwischen Ein- und Ausgangsgrößen, so dass das Netz bei gegebenen Eingangswerten den erwarteten Ausgangswert möglichst genau wiedergibt. In der vorliegenden Arbeit wird der Levenberg-Marquardt-Algorithmus verwendet, der an das Newton-Verfahren zur Bestimmung von Nullstellen angelehnt ist. Ein aufwändiges Berechnen der Hesse-Matrix, die generell bei der Suche eines globalen Minimums erforderlich ist, kann dabei vermieden werden. Ein zusätzlicher Additionsterm verleiht dem Algorithmus bei der Minimumssuche einen zusätzlichen Freiheitsgrad und ermöglicht es unter Umständen lokale Minima zu überspringen.

Weiter bekannte Trainingsalgorithmen sind

- das konjugierte Gradientenabstiegsverfahren,
- der Backpropagation Algorithmus,
- die Bayesian Regularisation Backpropagation und
- die Resilient Backpropagation.

Erklärungen und Erläuterungen zu diesen Rechenverfahren sind den Arbeiten von Lerspalungsanti<sup>155</sup> oder Zell<sup>156</sup> sowie der MATLAB-Dokumentation<sup>157</sup> zu entnehmen.

Zur Steigerung der Approximationsfähigkeit eines KNN wird oft versucht die Neuronenanzahl in den verdeckten Schichten sowie die Anzahl verdeckter Schichten zu erhöhen, da mit jedem zusätzlichen Neuron und jeder neuen Verbindung die Anzahl möglicher Kombinationen gesteigert wird und somit eine höhere Genauigkeit erzielt werden kann. In der Literatur<sup>158</sup> wird jedoch darauf hingewiesen, dass sehr häufig eine verdeckte Schicht für die Approximation nichtlinearer Funktionen genügt, weshalb in der vorliegenden Arbeit auch ausschließlich KNN mit einer verdeckten Schicht eingesetzt werden. Zudem besteht bei großer Neuronenanzahl in den verdeckten Schichten die Gefahr des „Auswendiglernens“ (auch als Overfitting bezeichnet). Das bedeutet, dass die aus dem Training bekannten Daten zwar sehr genau modelliert werden, dem Netz unbekannte Datensätze jedoch nicht, da erstere in den Gewichten abgebildet und damit auch Ausreißer und Varianzen der Trainingsdatensätze im Netz gespeichert sind<sup>159</sup>. Um das Overfitting zu vermeiden empfiehlt Brause<sup>160</sup> eine Faustregel zur Festlegung der Neuronenanzahl in der verdeckten Schicht  $N_V$  (Formel 2-13), wobei  $N_T$  die Anzahl der Trainingsdatensätze und  $N_E$  die Anzahl der Eingangsgrößen ist.

$$N_V = \frac{N_T - 1}{N_E + 2} \quad \text{Formel 2-13}$$

Eine weitere Möglichkeit zur Vermeidung des Auswendiglernens ist die Anwendung des Early-Stopping-Verfahrens. Zusätzlich wird die Trainingsdauer reduziert, da überflüssige Lernepochen vermieden werden. Nach jeder Trainingsepoche wird der Lernfortschritt kontrolliert und das Training beendet, falls eine Fortführung nicht sinnvoll erscheint. Die vorhandenen Datensätze - bestehend aus Eingangsvektoren und zugehörigen Zielwerten - werden dazu in einen Trainings- und einen Validierungs-Datensatz aufgeteilt (Abbildung 2-34).

---

<sup>155</sup> Lerspalungsanti 2010,

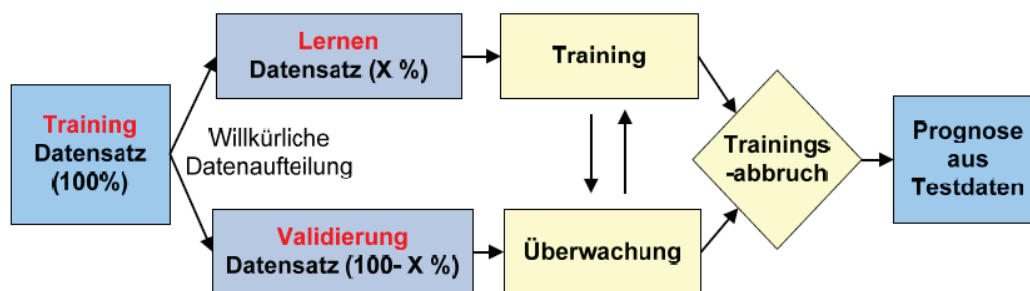
<sup>156</sup> Zell 2003

<sup>157</sup> Demuth et al. 2010

<sup>158</sup> Hornik 1989

<sup>159</sup> Nørgaard 2003

<sup>160</sup> Brause 1995

Abbildung 2-34: Early-Stopping-Verfahren für das Training von KNN<sup>161</sup>

Nach Abschluss jeder Trainingsepoche wird das KNN mit den Validierungsdaten simuliert, um die durch das Training erreichte Performance zu ermitteln, indem die Abweichung zwischen gegebenen Ausgangsdaten und durch das Netz berechneten Daten bestimmt wird. Nimmt die Performance über eine bestimmte Anzahl von Trainingsepochen nicht mehr zu oder verschlechtert sie sich sogar, wird das Training rückwirkend an der Trainingsepoche abgebrochen, an der das Performance-Maximum erreicht wurde. Ausschlaggebendes Kriterium für den Abbruch ist ein so genannter minimaler Verbesserungsgrad. Bei einer Performance-Verbesserung kleiner als dieser Faktor wird angenommen, dass durch weiteres Training keine weiteren Verbesserungen erzielt werden können und der Lernvorgang wird beendet. Es ist dabei sinnvoll die Epochenanzahl, die über das Erreichen des Performance-Maximums hinaus weiter trainiert werden soll, nicht zu klein zu wählen, um zu vermeiden, dass das Training beim Erreichen eines lokalen Minimums vorzeitig beendet wird.

Im Folgenden sollen die wichtigsten Eigenschaften von KNN in Anlehnung an Fanghänel<sup>162</sup> kurz zusammengefasst werden:

- **Modellfreiheit**  
KNN benötigen im Gegensatz zu analytischen Verfahren keine Angabe eines Modellansatzes zur Problemlösung. Dies ist von Vorteil, wenn entweder kein Wissen existiert, um einen modellbasierten Lösungsansatz zu erstellen, oder wenn ein verfügbares Modell zu kompliziert oder rechenaufwendig ist. Nachteilig wirkt sich aus, dass trainierten KNN im Allgemeinen keine Regel entnommen werden kann, um Rückschlüsse auf ein mögliches Modell zu ziehen.
- **Lernen anhand von Beispielen bzw. Mustern**  
In einem Trainingsvorgang wird ein KNN an das zu lösende Problem

<sup>161</sup> vgl. Albers et al. 2008a

angepasst, wobei dem Netz in jedem Schritt ein Mustervektor präsentiert wird. Grundsätzlich werden zwei verschiedene Typen von Lernverfahren unterschieden. Beim überwachten Lernen (Supervised Learning) wird zusätzlich zum Mustervektor ein zugehöriger Zielvektor, der die Soll-Ausgabe des Netzes angibt und zur Korrektur der internen Netzparameter eingesetzt wird, vorgegeben. Beim unüberwachten Lernen (Unsupervised Learning) sucht das Netz selbständig nach Ähnlichkeiten innerhalb der Menge von Mustervektoren.

- **Adaption und Generalisierungsfähigkeit**  
KNN bieten nicht nur die Möglichkeit trainierte Muster wieder zu erkennen, sondern auch die Fähigkeit der Generalisierung, d.h. Muster zu erkennen und zu klassifizieren, die den Trainingsmustern ähnlich sind.
- **Langsame Lern- aber schnelle Arbeitsphase**  
Als Folge des notwendigen Trainings ergibt sich ein meist sehr rechen- und zeitintensiver Lernvorgang. Die Arbeitsphase, in der das trainierte Netz auf unbekannte Eingangsvektoren angewendet wird, ist im Gegensatz dazu typischerweise um Größenordnungen schneller.
- **Implementierung**  
Riemschneider<sup>163</sup> weist darauf hin, dass eine Hardwareimplementierung die eigentlich bessere und schnellere Lösung darstellt. Dennoch wird in der Praxis vorwiegend der klassische Universalrechner (PC) eingesetzt, obwohl seine Architektur nicht auf die Simulation neuronaler Netze optimiert ist. Allerdings geben ihm die zur Verfügung gestellte Rechenleistung, der hohe Verbreitungsgrad und nicht zuletzt die Flexibilität bei der Realisierung unterschiedlicher Arten von neuronalen Netzen häufig den Vorzug gegenüber speziellen Hardwareimplementierungen.
- **Trial and Error**  
Ein universelles Vorgehen für die Anwendung neuronaler Netzen existiert nicht. Je nach Aufgabenstellung muss eine problemangepasste Lösung gesucht werden.

---

<sup>162</sup> Fanghänel 2001

<sup>163</sup> Riemschneider 1996

### 2.7.4 Komfortuntersuchung am IPEK

Der X-in-the-Loop-Ansatz<sup>164</sup> wurde am IPEK von Albers und Mitarbeitern als Synthese- und Validierungsmethode für die ganzheitliche Entwicklung technischer Systeme entwickelt. Mit seiner Hilfe können physikalische und charakteristische Eigenschaften eines Produkts durch eine durchgängige Entwicklungsumgebung über alle Systemebenen vom Element bis zum Gesamtsystemversuch beschrieben werden. Dabei kann eine beliebige Kombination realer und virtueller Systeme oder Teilsysteme zum Einsatz kommen. Das interessierende (Teil-)System kann damit in der Wechselwirkung mit seiner Umgebung untersucht und entwickelt werden. Bei der Validierung wird nicht zwischen rechnerischer Simulation und einem Versuch mit realer Hardware getrennt und unterschieden. Vielmehr können Simulation und Versuch parallel auf sämtlichen Systemebenen angewendet werden.

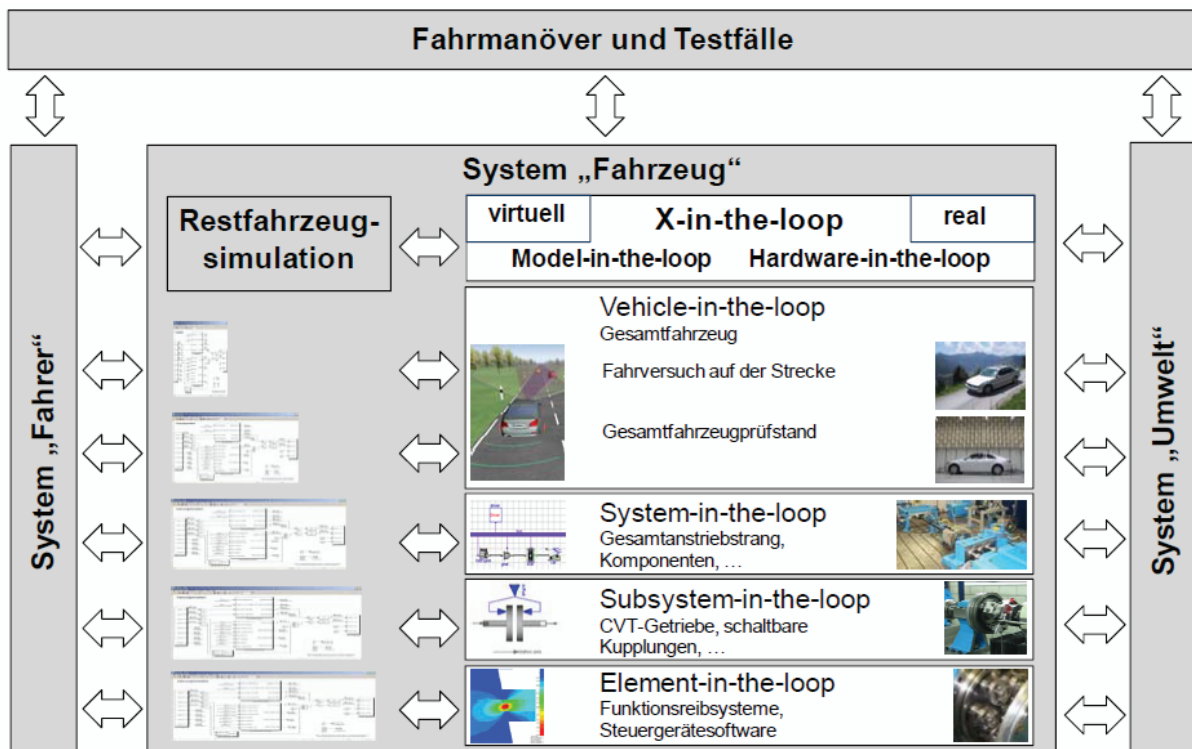


Abbildung 2-35: IPEK X-in-the-loop-Ansatz für Antriebssysteme (XiL)<sup>165</sup>

Abbildung 2-35 stellt die Anwendung des XiL-Ansatzes exemplarisch bei der Fahrzeugentwicklung dar. Die zu untersuchende Komponente (Unit-under Test, kurz UuT), kann als reales oder virtuelles System zur Verfügung stehen. Durch angepasste Restfahrzeugsimulationen können die Komponenten auf sämtlichen Ebenen untersucht werden.

<sup>164</sup> Albers et al. 2008c, Albers et al. 2009b

Darüber hinaus kann auf jeder Ebene der Regelkreis über die Systeme „Fahrer“ und „Umwelt“ geschlossen werden, die ebenfalls als reale oder virtuelle Systeme vorhanden sein können, womit die Wechselwirkungen mit anderen beteiligten Systemen abgebildet werden. Bei Komfort-Untersuchungen in der Antriebsstrangentwicklung wird das Fahrzeug als Gesamtsystem betrachtet, das in Teilsysteme unterteilt werden kann.

Albers und Mitarbeiter<sup>166</sup> untersuchten am IPEK die Modellierung des menschlichen Komfortempfindens mit Hilfe künstlicher neuronaler Netze (KNN). Sie untersuchten dabei insbesondere das Komfortempfinden aus Kundensicht beim automatisierten Anfahren eines Kraftfahrzeugs. Die Methode soll es ermöglichen, die im Allgemeinen notwendigen Fahrzeugprototypen für Komfortuntersuchungen einzusparen. Die Erzeugung des Komfort-Modells geschieht durch das Training von KNN mit aus Fahrversuchen gewonnenen subjektiven Beurteilungen von Probanden und objektiven Kennwerten, die aus verschiedenen Messgrößen gebildet werden. Die beiden Autoren stellen fest, dass KNN geeignete Werkzeuge zur Nachbildung des menschlichen Komfortempfindens sind.

Auf Basis des XiL-Ansatzes wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Thematik des Wiederstarts des Verbrennungsmotors in parallelen Hybridantrieben untersucht.

### **2.7.5 Objektivierung des Wiederstartkomforts**

Der Wiederstart des Verbrennungsmotors in einem Hybridfahrzeug kann ein schwingungsbehafteter Vorgang sein. Entstehende Schwingungen werden vorwiegend über Sitze und Sitzlehnen auf die Fahrzeuginsassen übertragen und können so das Komfortempfinden der Fahrzeuginsassen beeinträchtigen.

Im FVA-Vorhaben 530<sup>167</sup> wurde der Wiederstartvorgang in einem leistungsverzweigten Hybridantrieb untersucht. Hier war das Ziel Maßnahmen zur aktiven Schwingungsdämpfung zu untersuchen. Dabei werden sowohl Messungen am realen Fahrzeug als auch rechnerische Simulationen durchgeführt und die Wirkungsweise verschiedener Steuerungs- und Regelungssysteme zur aktiven Schwingungsdämpfung dargestellt. Eine Bewertung des Wiederstartkomforts oder dessen Objektivierung werden dabei nicht durchgeführt.

---

<sup>165</sup> Albers Düser 2009

<sup>166</sup> Albers et al. 2008a, Albrecht 2005, Lerspalungsanti 2010

<sup>167</sup> FVA 2008

Müller<sup>168</sup> untersucht den Startvorgang von Ottomotoren, die mit Start-Stopp-Systemen ausgerüstet sind. Er ermittelt am Prüfstand die Aggregatebewegung und überführt sie in resultierende Lagerkräfte, die sich am Fahrzeug abstützen. An einem Simulationsmodell des Prüfstands finden weitere Untersuchungen und anschließende Optimierungen des Startvorgangs statt. Dabei sind fahrerinitiierte und fahrzeugsysteminitiierten Starts im Fokus. Eine Definition oder Objektivierung des Wiederstartkomforts nimmt auch er nicht vor.

In der Literatur konnten keine Untersuchungen zum Wiederstartkomfort in parallelen Vollhybrid-Fahrzeugen gefunden werden. Somit existiert auch keine Erfahrung bezüglich relevanter objektiver Kennwerte und zu verwendender Bewertungsskalen für die Untersuchung des Wiederstarts.

---

<sup>168</sup> Müller 2010

### 3 Motivation und Zielsetzung

Im Kapitel 2 der vorliegenden Arbeit wurden die sich aus der Hybridisierung von Kraftfahrzeugen ergebenden Herausforderungen durch den Stand von Forschung und Technik beschrieben. Um das primäre Ziel der Verbrauchsreduzierung erreichen zu können, ergeben sich neue Betriebszustände, in denen die Verbrennungskraftmaschine und elektrische Antriebseinrichtung(en) separat oder kombiniert den Antrieb des Fahrzeugs übernehmen. So müssen parallele Hybridfahrzeuge beispielsweise rein elektrisch und rein verbrennungsmotorisch angetrieben werden können sowie die Rückgewinnung kinetischer Energie (Rekuperation) ermöglichen. Zusätzlich müssen die Übergänge zwischen diesen Zuständen gewährleistet werden ohne das Komfortempfinden der Fahrzeuginsassen zu beeinträchtigen. Eine dieser Übergangs-Funktionen ist der Wiederstart des Verbrennungsmotors, der die Längsdynamik des Fahrzeugs stark beeinflussen kann.

Am Beispiel des parallelen Hybridantriebs zeigt sich also, dass bei der Entwicklung komplexer technischer Systeme funktionale Anforderungen und das funktionale Zusammenspiel der System-Komponenten negative Auswirkungen auf den Anwender beim Betrieb des Systems haben können. Deshalb sind in verschiedenen Phasen des Produktentstehungsprozesses (PEP) Methoden zur Bewertung und Optimierung des Systems notwendig, die dies berücksichtigen und damit dazu beitragen, Nachteile oder Einschränkungen des Systems zu vermeiden. Im Rahmen dieser Arbeit werden deshalb zwei verschiedene Methoden der Modellbildung vorgestellt, die die Entwicklungsingenieure dabei unterstützen.

Bereits in der frühen Phase des PEP finden in der Fahrzeugentwicklung Bewertungen verschiedener Konzepte statt. Neben Verbrauch und Fahrleistungen sind bei der Entwicklung hybrider Antriebe und des notwendigen Wiederstartsystems verschiedene funktionale Anforderungen zu bewerten. Die Hybridisierung des Triebstrangs führt zwangsweise zu einer Erhöhung der Anzahl der Antriebsmaschinen. Der Verbrennungsmotor wird üblicherweise durch mindestens eine E-Maschine ergänzt. Im Zusammenspiel mit modernen Getriebekonzepten (z.B. Doppelkupplungsgetriebe) ergeben sich neue Möglichkeiten der Komponentenanzahl und damit andere und zusätzlich mögliche Leistungspfade im Antriebsstrang. So kann die E-Maschine beispielsweise an einer der Getriebeeingangswellen oder am Achstrieb angebunden werden. Jede Triebstrangtopologie muss dabei gewährleisten, dass sämtliche Betriebszustände sowie transiente Übergangszustände eingenommen werden können. Die Bewertung, ob ein neues Antriebssystem alle geforderten Funktionen erfüllen kann, erfolgt häufig



durch Entwicklungsingenieure ohne die Unterstützung durch entsprechende Werkzeuge. Sie sind dabei auf ihr eigenes Erfahrungswissen angewiesen. Ingenieuren, die zunächst nicht an diesem Bewertungsprozess beteiligt sind, ist dieses Erfahrungswissen nicht zugänglich.

Daraus lassen sich die folgende Hypothese 1 und Forschungsfragen ableiten:

**Hypothese 1:**

Die funktionalen Analysen von Hybridantrieben sind häufig intuitive Prozesse. Oft besitzen auch Ingenieure innerhalb eines Entwicklungsteams unterschiedliches Systemverständnis. Ein systematischer Ansatz zur funktionalen Bewertung kann dazu beitragen, das gewonnene Wissen transparent darzustellen und damit wieder verwendbar zu machen.

Forschungsfragen:

Wie können hybride Antriebsstränge mit methodischer Unterstützung funktional analysiert und bewertet werden?

Wie können funktionale Einschränkungen eines Hybridantriebs erkannt werden?

Wie kann das gewonnene Systemverständnis transparent dargestellt, vereinheitlicht und weiter gegeben werden?

Um diesen Fragen zu begegnen, wird im Verlauf der Arbeit eine Methode entwickelt, die zum einen eine einheitliche Wissensbasis schafft, um das Systemverständnis unter den Entwicklern zu verbessern. Zum anderen soll die Bewertung von neuen Triebstrangkonzepthen unterstützt werden. Grundlage dieser Methode ist eine Modellbildung, die eine funktionale Beschreibung der Konzepte zugrunde liegt. Durch die Methode wird eine frühe Validierung hybrider Antriebskonzepte ermöglicht, wodurch funktionale Schwächen und Optimierungspotentiale früh erkannt und damit das Entwicklungsrisiko minimiert werden kann. An einem Beispiel eines parallelen Hybridantriebs wird die Methode angewandt. Eine Abbildung des betrachteten Systems in einer numerischen Simulation soll die analysierten Betriebspunkte veranschaulichen.

Die Komforteigenschaften von Kraftfahrzeugen werden sehr häufig von Menschen im Fahrversuch beurteilt. So auch der Widerstart des Verbrennungsmotors als neues Phänomen in einem Hybrid-Antriebsstrang. Die Qualität der Beurteilungen hängt

aber in starkem Maße von den beurteilenden Personen ab<sup>169</sup>. Zur Erzielung einer gleich bleibend hohen Bewertungsgüte bei der Validierung des Wiederstartsystems müssen Ungenauigkeiten in den Bewertungen vermieden werden und deshalb der Mensch als alleiniges Messinstrument durch objektive Methoden zumindest unterstützt werden.

Der Autor leitet daraus die folgende Hypothese 2 und die zugehörigen Forschungsfragen ab:

**Hypothese 2:**

Der Mensch als Bewerter unterliegt verschiedenen Varianzen, die sein Komfort-Urteil beeinflussen. Zur Validierung des Wiederstartsystems in hybriden Antrieben sind deshalb objektive Methoden notwendig, um den Entwicklungsingenieur bei dieser Tätigkeit zu unterstützen.

Forschungsfragen:

Welche Kriterien sind relevant für die Bewertung des Wiederstart-Komforts?

Welche Methoden sind geeignet um den Wiederstart-Komfort objektiv zu bewerten?

Um die Komforteigenschaften des Wiederstartsystems innerhalb des Entwicklungsprozesses validieren zu können, wird in der vorliegenden Arbeit eine Fahrer-Modellierung mit dem Ziel der Objektivierung des Komfortempfindens auf Basis mathematischer Modelle entwickelt. Zur Ermittlung relevanter Bewertungskriterien, sollen zunächst Entwicklungsingenieure befragt werden, die über Erfahrungen bei der Entwicklung von und im Umgang mit Hybridfahrzeugen verfügen. Daraus wird auch eine Definition des Begriffs Wiederstartkomfort abgeleitet. Nach der Analyse des Wiederstartsystems und des Startablaufs im zur Verfügung stehenden Versuchsfahrzeug werden Parameter identifiziert, um den Wiederstartkomfort während der durchgeführten Fahrversuche gezielt zu verändern.

---

<sup>169</sup> vgl. Kapitel 2

## 4 Methode zur Objektivierung des Wiederstartkomforts

In diesem Abschnitt wird die Entwicklung einer Methode zur Objektivierung der Wiederstartqualität in einem parallelen Vollhybrid-Antriebsstrang vorgestellt und beschrieben. Aufbauend auf der oben erläuterten Analyse des Wiederstartablaufs und -systems<sup>170</sup> werden die Aufgaben der einzelnen Triebstrangkomponenten sowie Möglichkeiten der Einflussnahme auf den Wiederstart diskutiert. Anschließend wird der Begriff Wiederstartkomfort abgegrenzt, bevor das Vorgehen zur Objektivierung beschrieben wird. Die Ergebnisse der Objektivierung mit linearen Regressionsmodellen und künstlichen neuronalen Netzen werden dargestellt. Abschließend wird die entwickelte Tool Chain erläutert.

### 4.1 Beeinflussung des Wiederstarts im P2-Hybrid

Bei Schlupf- und Anreißstart kann gezielt Einfluss auf die Charakteristik des Wiederstarts genommen werden. Jeder Start kann damit individuell dem Fahrerwunsch angepasst werden. Durch entsprechende Wahl der ersten Einspritzung und Zündung sowie weiterer Parameter können komfort- oder dynamikorientierte Starts realisiert werden.

Die Auswahl der Startart und deren Charakteristik unterliegen wiederum einer Vielzahl von Kriterien wie Fahrpedalgradient, Fahrpedalwinkel und Getriebeeingangsdrehzahl und kann entsprechend des Fahrerwunschs angepasst werden.

Auf den Wiederstartvorgang können neben den Umwelteinflüssen auch Störungen aus den beteiligten Systemkomponenten einwirken. Diese werden in diesem Abschnitt für einen parallelen Vollhybrid erläutert.

---

<sup>170</sup> vgl. Abschnitt 2.3.4

## **Einfluss des Verbrennungsmotors**

Das Kurbelwellenmoment setzt sich aus den folgenden Anteilen zusammen:

- Kompressions- und Expansionsmomente der Zylinderladung
- Massenmomente der oszillierenden Massen
- Indiziertes Moment durch die Verbrennung
- Reibmomente

Für den Startvorgang sind zunächst die Momente ausschlaggebend, die von der Starteinrichtung aufgebracht werden müssen, um den unbefeuerten Motor anzudrehen. Dazu zählen neben Reibungsanteilen und den für die Beschleunigung der Motormechanik notwendigen Momenten die Kompressionsmomente. Letztere sind maßgeblich vom effektiven Kompressionsverhältnis, der Kurbel- und Zylindergeometrie sowie dem Zylinderdruck beim Schließen der Einlassventile abhängig. Ein geringes Kompressionsverhältnis reduziert die maximalen Verdichtungsendrücke und damit das Startmoment. Deshalb erscheinen generell Downsizing-Konzepte mit aufgeladenen Ottomotoren günstig für den Einsatz in Fahrzeugen mit parallelem Voll-Hybrid-Antriebsstrang. Kleinere Hubvolumina im Vergleich zu leistungsidealsten, großvolumigen Saugmotoren bieten in Verbindung mit einem niedrigeren Verdichtungsverhältnis die besten Voraussetzungen für ein vermindertes Startmoment<sup>171</sup>. Dieselmotoren besitzen grundsätzlich höhere Verdichtungsverhältnisse als Otto-Motoren. Zudem muss ihre Konstruktion höhere Verbrennungs-Spitzendrücke ertragen, was in einem höheren Massenträgheitsmoment resultiert. Beide Aspekte führen dazu, dass für einen Wiederstart eines Dieselmotors ein höheres Startmoment aufgebracht werden muss, als für einen gleichvolumigen Ottomotor.

Die Reibungsanteile von Verbrennungsmotoren werden von den verschiedenen Motorbauteilen bestimmt. Neben den Verlustleistungen der Lagerstellen, des Ventiltriebs und der Kolbengruppe sind die Antriebsleistungen für verschiedene Hilfsaggregate relevant. Die meisten Nebenaggregate entfallen allerdings bei Anwendungen in hybriden Antrieben oder werden elektrifiziert, wodurch die für sie benötigten Antriebsleistungen beim Anschleppen des Motors in einem Hybridantrieb nicht aufgebracht werden müssen. Zu diesen zählen insbesondere die Lenk- und Bremskraftunterstützung sowie der Generator (Lichtmaschine). Die Reibungsanteile des Verbrennungsmotors werden stark durch die Temperatur des Schmiermittels

(Motoröl) beeinflusst, was insbesondere auf seine mit niedrigeren Temperaturen zunehmende Zähigkeit zurückzuführen ist.

Sobald der Motor eine bestimmte Drehzahl erreicht hat, kann er in den gefeuerten Betrieb übergehen. Nach dem Einsetzen von Einspritzung und Zündung erfolgt ein Vorzeichenwechsel des Kurbelwellenmoments. Die Dynamik des Motorhochlaufs wird maßgeblich vom Energieumsatz der ersten Verbrennungen und dem Massenträgheitsmoment bestimmt. Der Energieumsatz ist bei Ottomotoren stark von der Zylinderfüllung und damit vom Saugrohrdruck abhängig, woraus sich die Forderung nach einer hohen Füllung der Zylinder ergibt. Diese steht der oben genannten Reduzierung des effektiven Kompressionsverhältnisses entgegen.

### **Einfluss der E-Maschine und ihrer Energieversorgung**

Die E-Maschine stellt im betrachteten parallelen Hybrid-Antrieb die Quelle sowohl für das Antriebsmoment des Fahrzeugs bei elektrischer Fahrt als auch für das Startmoment dar. Deshalb kann nicht das maximal mögliche Drehmoment für den Antrieb zur Verfügung gestellt werden, sondern es muss eine Momentenreserve im gesamten Drehzahlbereich für den Wiederstart vorgehalten werden. Durch ihre charakteristische Kennung wird deshalb die maximale Drehzahl und damit die maximale Fahrzeuggeschwindigkeit, bei der elektrisches Fahren zugelassen werden kann, durch die E-Maschine limitiert. Bei höheren Geschwindigkeiten würde sonst die Gefahr bestehen, dass das zur Verfügung stehende Drehmoment nicht mehr für den sicheren Start der VKM ausreicht.

---

<sup>171</sup> Warnke 2009

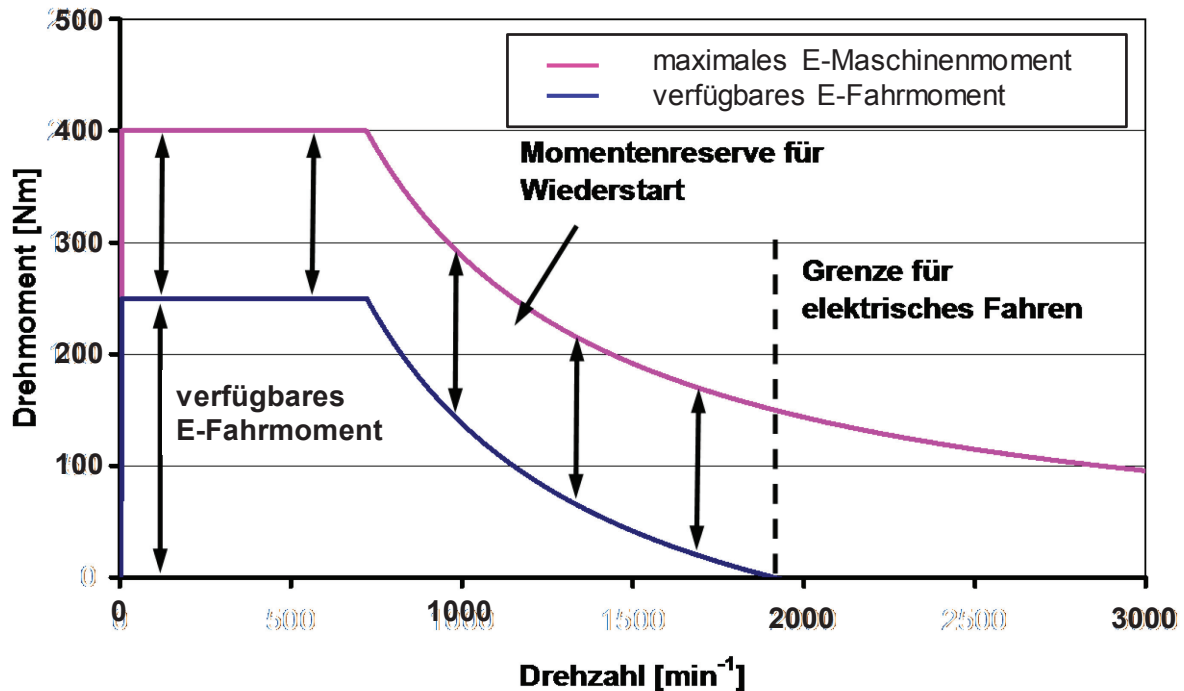


Abbildung 4-1: E-Maschinenkennfeld mit Momentenreserve (schematisch)

In Abbildung 4-1 ist das Kennfeld einer E-Maschine schematisch dargestellt. Durch die konstant vorzuhaltende Momentenreserve erreicht das zur Verfügung stehende Antriebsmoment bei der Grenzdrehzahl den Wert Null. Der Wiederstart muss also spätestens bei Erreichen dieser Drehzahl gestartet werden.

Um die E-Maschine vor Beschädigungen zu schützen, muss sie neben einer leistungsfähigen Kühlung über ein entsprechendes Überwachungskonzept verfügen. Während die Temperatur des Stators mit Hilfe einfacher Messmittel bestimmt werden kann, erfolgt die Bestimmung der Temperatur des Rotors rechnerisch mit Hilfe eines Temperaturmodells. Zu hohe Temperaturen führen dann zu einer Leistungsreduzierung der elektrischen Komponenten, was sich auf das Wiederstartsystem auswirken kann.

Die von der E-Maschine abgebbare mechanische Leistung ist direkt von ihrer Energieversorgung abhängig. Die Leistungsfähigkeit einer Batterie wird im Wesentlichen durch folgende Größen beeinflusst:

- Ladezustand (engl. state of charge, kurz: SOC)
- Temperatur
- Alterungszustand
- Innenwiderstand

Wird die Leistung der Batterie eingeschränkt, hat dies direkten Einfluss auf die E-Maschine und damit auf das Wiederstartsystem.

### Einfluss des Trennelements

Das Trennelement ist wie bereits oben erwähnt für die Leistungsübertragung zur VKM während des Wiederstarts verantwortlich. In Abbildung 4-2 sind Verbrennungsmotor, E-Maschine und Kupplung sowie das Getriebe im Triebstrang dargestellt.

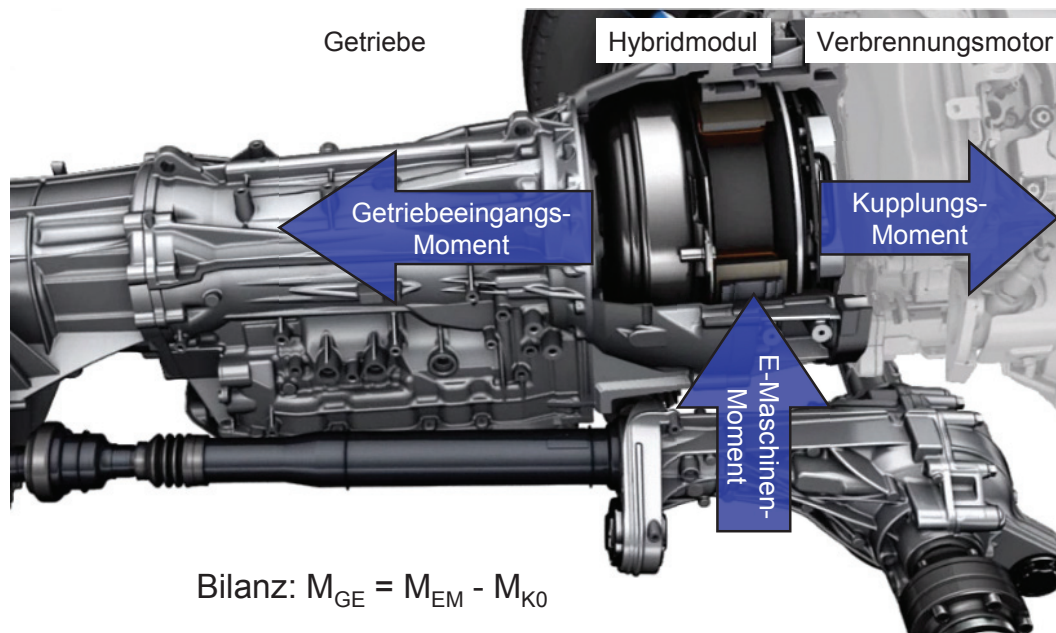


Abbildung 4-2: Momentenbilanz am Getriebeeingang beim Wiederstart

Beim Wiederstart muss das Getriebeeingangsmoment  $M_{GE}$  konstant gehalten bzw. dem Fahrerwunsch nachgeführt werden. Das zum Start notwendige Kupplungsmoment  $M_{K0}$  ist durch den eingesetzten Verbrennungsmotor bestimmt. Das E-Maschinen-Moment  $M_{EM}$  muss dieses Moment ausgleichen, d.h. das Moment der E-Maschine muss entsprechend dem von der Kupplung gestellten Moment erhöht werden. Um die Momentenbilanz auszugleichen, ist es deshalb unbedingt erforderlich, dass beide Komponenten eine hohe Stellgenauigkeit aufweisen. Durch heute verfügbare Rechenmodelle ist es möglich das gestellte Moment der E-Maschine aus Spannungen und Strömen mit hoher Genauigkeit zu berechnen. Das von der Kupplung übertragene Moment lässt sich in einer Fahrzeugserienanwendung dagegen nicht direkt messen. Deshalb wird es in der Kupplungssteuerung ebenfalls mit Hilfe eines Modells berechnet. Insbesondere trocken laufende Reibkupplungen unterliegen jedoch einer Vielzahl von Einflussparametern. Diese sind beispielsweise:

- Temperatur
- Schwankungen des Reibwerts

- Luftfeuchtigkeit
- Veränderungen des Betätigungsmechanismus
- Betriebspunkt (Drehzahleinflüsse)

Einige der Einflüsse sind nicht durch einfache Modelle abzubilden oder unterliegen stochastischen Veränderungen. Es ist deshalb erforderlich den aktuellen Zustand und das Übertragungsverhalten des Trennelements exakt zu erfassen. Dies kann durch eine möglichst genaue Modellierung des Systems und seiner Teilsysteme erfolgen, oder durch wiederholtes Adaptieren seines Verhaltens und eine Black-Box-Betrachtung des Systems. Im betrachteten Fahrzeug<sup>172</sup> ist die gesamte Kupplungssteuerung in das Motorsteuergerät integriert. Es kommuniziert über einen CAN-Bus mit der Aktuatorik der Kupplung. Das Kupplungs-Management beinhaltet neben der eigentlichen Ansteuerung des Aktuators weitere Funktionen, die im Wesentlichen die Aufgabe haben, ein sicheres, reproduzierbares und einwandfreies Systemverhalten der Trennkupplung unter alle äußeren Bedingungen und über die Lebensdauer sicher zu stellen<sup>173</sup>. Funktionen zur Kompensation eliminieren äußere Einflüsse, die durch Temperaturen beziehungsweise Temperaturschwankungen oder durch hohe Drehzahlen verursacht werden. Adaptionfunktionen erfassen Veränderungen des Systems wie z.B. Alterung und Verschleiß aber auch Bauteilstreuungen. Im regulären Fahrbetrieb überwachen Diagnosen permanent den Systemzustand, das übertragene Moment sowie die Systemdynamik.

Bei nicht ausreichender Stellgenauigkeit des Trennelements würde das Getriebeeingangsmoment ungewollt verändert. Dies könnte zu für den Fahrer spürbaren, unerwünschten Beschleunigungsveränderungen des Fahrzeugs führen, was das Komfortempfinden stören kann.

### **Einfluss des Anfahrlements**

Das Anfahrlement hat die Verantwortung die Vorbereitung des Wiederstarts durch eine Entkoppelung des Wiederstartsystems vom Resttriebstrang durchzuführen. Der Aufbau der notwendigen Differenzdrehzahl geschieht durch rampenförmige Reduzierung des übertragbaren Moments. Ein hoher Momentengradient verkürzt die Vorbereitungszeit, kann aber dazu führen, dass die Fahrzeuglängsbeschleunigung kurzzeitig abnimmt, da ein Teil des Antriebsmoments zur Beschleunigung der mit der Primärseite verbundenen rotierenden Komponenten des Triebstrangs benötigt wird. Dies könnte sich als Ruck für die Fahrzeuginsassen bemerkbar machen. Hier gilt es,

---

<sup>172</sup> siehe Abschnitt 2.1.1



einen geeigneten Kompromiss zwischen notwendiger Dynamik und zu tolerierendem Diskomfort zu finden.

Um während des Wiederstarts das Getriebeeingangsmoment konstant zu halten, muss eine Regelung die Betätigungseinrichtung des Anfahrlements entsprechend ansteuern. Bei einer Wandlerüberbrückungskupplung kann dazu der Arbeitsdruck an der WÜK konstant gehalten werden (vgl. Abbildung 2-6). Außerdem muss vermieden werden, dass ein kleiner Stellfehler des Trennelements dazu führt, dass die Drehzahl der Primärseite des Anfahrlements unter die Getriebeeingangsdrehzahl absinkt, da sonst ein Zug-Schub-Wechsel stattfindet und das Fahrzeug so zu Schwingungen in Längsrichtung angeregt werden kann.

## 4.2 Begriffsabgrenzung Wiederstartkomfort

Gegenstand vieler Arbeiten ist die Untersuchung des Schaltkomforts von Automatikgetrieben. Gebert<sup>174</sup> versteht unter Schaltqualität „das subjektive Qualitätsurteil eines Fahrzeuginsassen, in dem alle Einzeleindrücke, die er während einer Schaltung erfährt, zusammengefasst sind“. Er geht dabei nach der Einkanaltheorie<sup>175</sup> vor. Küçükay et al.<sup>176</sup> geben für die Beurteilung des Schaltkomforts von PKW-Automatikgetrieben eine auf Erfahrungswissen basierende Gewichtung der verschiedenen Einflussfaktoren an. Sie schreiben dem Verlauf der Fahrzeuglängsbeschleunigung während des Gangwechsels mit 50 % den Hauptanteil zu. Als weitere Einflussgrößen werden die Akustik (30 %), die Schalthäufigkeit und das Ansprechverhalten (je 10 %) identifiziert.

Die Akustik des Wiederstarts wird stark von der Auslegung des Gesamtfahrzeugs geprägt. Je nach Philosophie des Herstellers soll eine Unterscheidung zwischen elektrischem und verbrennungsmotorischem Fahren für den Fahrer besonders leicht möglich sein oder möglichst vermieden werden. Eine Gewichtung der akustischen Bewertung des Wiederstartsystems lässt sich also nicht verallgemeinern. Deshalb wird in der Modellierung der Komfortbeurteilung im Rahmen dieser Arbeit keine Wertung der Akustik vorgenommen. Sie basiert ausschließlich auf objektiven Kennwerten zur Charakterisierung von Fahrerwunsch, Fahrzeuglängsbeschleunigung und Drehzahlverläufen im Antriebssystem.

Die Häufigkeit des Wiederstarts ist primär nicht durch das Wiederstartsystem selbst, sondern durch die gesamte Auslegung des Antriebsstrangs und der Betriebsstrategie

---

<sup>173</sup> Spiegel et al. 2010

<sup>174</sup> Gebert 2000

<sup>175</sup> vgl. Kapitel 0

<sup>176</sup> Küçükay 1997

bestimmt. Wie oft der Verbrennungsmotor zugeschaltet werden muss, ist unter anderem abhängig vom Fahrprofil, der Dimensionierung des elektrischen Antriebssystems und dem Fahrer. So wird bei großer verfügbarer elektrischer Leistung ein ruhiger Fahrer im Stadtverkehr seltener einen Wiederstart anfordern als ein Fahrer auf der Autobahn mit häufigen Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgängen. Solange der Wiederstart als Einzelereignis nicht störend vom Fahrzeuginsassen wahrgenommen wird, ist auch die Häufigkeit dieses Ereignisses nicht für seine Bewertung des Gesamtkomforts ausschlaggebend. Deshalb wird die Häufigkeit des Wiederstarts nicht mit in die Komfortbetrachtung mit einbezogen.

Grundsätzlich verändert sich während eines Schalt- oder Anfahrvorgangs die Fahrzeuglängsbeschleunigung, was durch den Stufensprung des Getriebes bzw. den Fahrerwunsch beim Anfahren bedingt ist. Fahrer und Fahrzeuginsassen erwarten diese Änderung. Beim Wiederstart erwartet der Fahrer nicht in jedem Fahrzustand eine Änderung der Längsbeschleunigung. Als Beispiel sei hier ein Wiederstart während des Kriechens genannt. Dabei wünscht und erwartet der Fahrer keine Änderung der Fahrzeugbeschleunigung bzw. gar keine Beschleunigung, da er das Fahrpedal nicht betätigt, und wird deshalb auch auf kleine Schwingungen sensibel reagieren. Wird der Wiederstart dagegen explizit durch den Fahrerwunsch ausgelöst, wird auch eine Beschleunigungsänderung erwartet. Diese Beschleunigungsänderung muss dann möglichst störungsfrei ablaufen und dem Fahrerwunsch sowie der Fahrererwartung entsprechen. Der Fahrerwunsch ist dabei der mit Hilfe des Gaspedals an das Fahrzeug übermittelte Beschleunigungswunsch und damit eine messbare Größe. Die Fahrererwartung ist eine vom Bewerter individuell abhängige Größe und vor allem eine durch psychologische Faktoren beeinflusste Größe. Sie ist daher praktisch nicht durch die Erfassung physikalischer Größen am Fahrzeug direkt messbar. Der Wiederstartkomfort setzt sich demzufolge aus einer nach Möglichkeit zu minimierenden Diskomfort-Komponente und Charakter-Anteilen zusammen, welche individuell zu definieren sind. Dies entspricht der Zustandsbeschreibung nach der 2-Kanal-Theorie.

### **4.3 Methodenentwicklung**

In den folgenden Abschnitten wird das Vorgehen zur Objektivierung des Wiederstartkomforts näher beschrieben. Zunächst sollen die Anforderungen und Randbedingungen geklärt werden. Anschließend werden in einer Probanden-Befragung relevante Einzelkriterien zur Beschreibung des Wiederstartkomforts gesammelt. Befragt wurden dabei ausschließlich Personen, die Erfahrungen mit dem Umgang mit hybriden Fahrzeugen sowie bei der Entwicklung von Fahrzeugantrieben verfügen. Vor der Durchführung von Fahrversuchen zur Ermittlung von subjektiven

Bewertungen und zugehörigen objektiven Kennwerten, wird eine Auswahl aus der Literatur bekannter und eine Definition zusätzlicher objektiver Kennwerte vorgenommen. Als Grundlage dafür dienen die in der Befragung ermittelten Komfort-Kriterien. Abschließend wird die Erfassung von Messdaten im Fahrzeug sowie der subjektiven Komfort-Urteile erläutert.

#### **4.3.1 Anforderungen an die Methode**

Um die Bewertungsgüte möglichst hoch zu halten sollen als Grundlage der Objektivierung ausschließlich Experten-Bewertungen verwendet werden. Komfortbewertungen von Laien weisen höhere inter- als auch intraindividuelle Varianzen auf, was zu einer geringeren Güte der Ergebnisse führt. Da Laien generell nicht über Erfahrung bei der subjektiven Bewertung von Komforteigenschaften eines Kraftfahrzeugs verfügen und nicht darin geübt sind bei der Beurteilung störende Einflüsse von den wahrgenommenen Phänomenen zu separieren, streuen die Bewertungen und führen zu einer mangelhaften Reproduzierbarkeit<sup>177</sup>. Da die Objektivierung vorrangig zur Unterstützung von Entwicklungsingenieuren beispielsweise bei der Parametrierung und Validierung von Steuergeräte-Algorithmen innerhalb der Wiederstartsteuerung dienen soll, sollen für diese auch ausschließlich Experten-Bewertungen in die Objektivierung einfließen, um die Streuung der Ergebnisse möglichst gering zu halten. Die Versuchsprobanden dienen dabei gewissermaßen als Messinstrumente für den Komfort, weshalb hier kundige und erfahrene Personen gefragt sind. Die Validierung der einzelnen Systeme des Fahrzeugs geschieht, um der Erwartung des Endkunden gerecht zu werden, der in sein Gesamturteil über das Fahrzeug auch den Wiederstart miteinbezieht.

Die Objektivierung wird mit dem primären Ziel durchgeführt, Kriterien und objektive Kennwerte zu ermitteln, die von Experten mit dem Wiederstartkomfort in direkten Zusammenhang gebracht werden. Aus diesen Kennwerten sollen diejenigen mit der höchsten Relevanz ermittelt werden, um für später mögliche Bewertungen online im Fahrzeug den Berechnungsaufwand gering zu halten.

Auch die Modellierung von Gesamtnoten soll vorgenommen werden. Dabei wird aber der Fokus auf der Zusammensetzung dieser Note aus Einzelkriterien liegen.

#### **4.3.2 Probanden-Befragung**

Vor der Durchführung der Fahrversuche wurde eine Befragung<sup>178</sup> durchgeführt, um die notwendigen Bewertungskriterien für den Wiederstartkomfort zu ermitteln. Befragt

---

<sup>177</sup> Lerspalungsanti 2010

<sup>178</sup> Cortès 2010

wurden dabei ausschließlich Personen, die über fundiertes Wissen im Bereich hybrider Antriebe und Erfahrung im Umgang mit Hybrid-Fahrzeugen verfügen. Die befragten Personen sollten dabei ihr Vorgehen zur Bewertung des Wiederstarts und die von Ihnen erfassten Phänomene beschreiben. Die genannten Begriffe wurden kategorisiert und nach evtl. vorhandener Ausprägung sortiert.

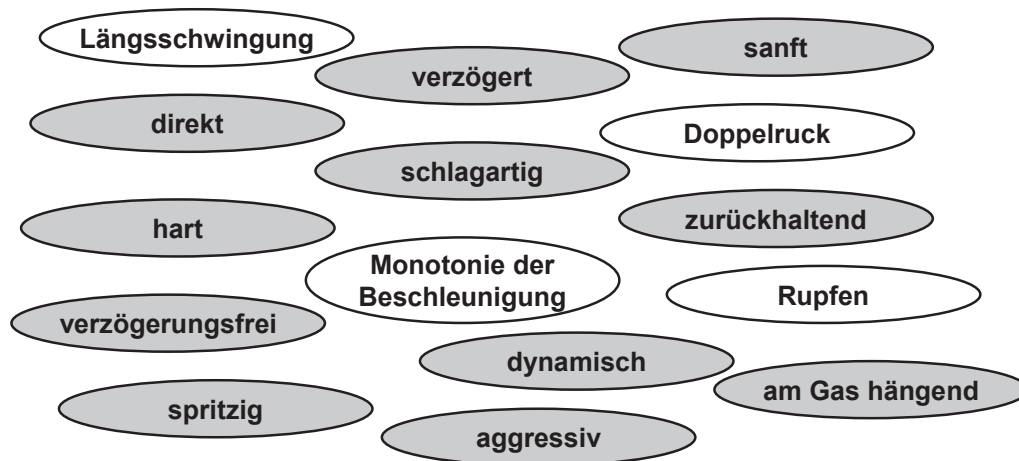
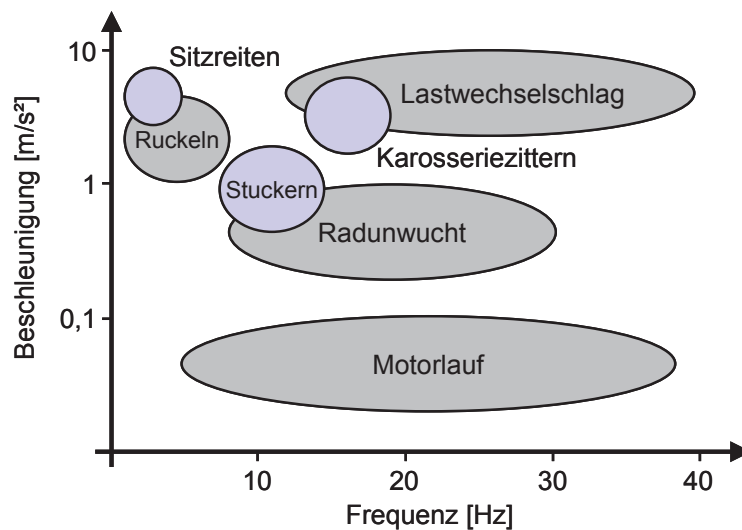


Abbildung 4-3: In der Befragung genannte Begriffe (beispielhaft)

Alle zehn befragten Personen gaben an, eine Bewertung des Wiederstarts nach der bekannten ATZ-Skala zu verwenden. Dies ist durch ihren Bekanntheitsgrad und die häufige Anwendung dieser Skala im Bereich der Fahrzeugentwicklung zur Bewertung von NVH-Phänomenen begründet. Gleichzeitig werden verschiedene Einzelkriterien erfasst und bewertet. Einige der genannten Begriffe sind in Abbildung 4-3 dargestellt. Sie lassen sich entsprechend der 2-Kanal-Theorie zunächst in zwei Kategorien unterteilen, wie es in der Darstellung durch die Markierung verdeutlicht ist. Die eine Gruppe repräsentiert dem Diskomfort zugeordnete Begriffe (weiß), die grau hinterlegten Worte beschreiben Charaktereigenschaften eines Wiederstarts. Wie bei vielen dynamischen Vorgängen (z.B. Getriebeschaltung, Anfahren) wird eine Wertung des Schwingungskomforts vorgenommen. Die befragten Personen erfassen dabei Schwingungsphänomene in verschiedenen Frequenzlagen, denen Begriffe wie Ruckeln, Einzel- und Mehrfachschwingung oder Rupfen zugeordnet werden. Abbildung 4-4 zeigt eine Einteilung solcher Erscheinungen nach ihrer Frequenz und Amplitude.

Abbildung 4-4: Schwingungsphänomene im Fahrzeug<sup>179</sup>

Die vorwiegend vom Antriebsstrang ausgelösten Phänomene wie Ruckeln oder Lastwechselschläge werden einem Frequenzbereich bis etwa 40 Hz zugeordnet. Dabei treten nach Löffler<sup>179</sup> Schwingungsamplituden bis zu 10 m/s<sup>2</sup> auf.

Neben dem Schwingungskomfort wird das Ansprechverhalten des Fahrzeugs beim Wiederstart bewertet. Dieses wird weiter unterteilt in eine Verzugszeit zwischen Momenten-Anforderung und -Aufbau sowie in den Charakter des Beschleunigungsaufbaus. Die Verzugszeit besteht wiederum aus zwei wesentlichen Komponenten. Sowohl die Vorbereitungsphase des Wiederstarts als auch der Motorhochlauf benötigen eine gewisse Zeitdauer, die sich nicht eliminieren lässt. Sie ist abhängig vom Aufbau des Wiederstartsystems, der Zieldrehzahl des Verbrennungsmotors sowie den Eigenschaften des Verbrennungsmotors. Der zweite Anteil wird durch die Umverteilung der Antriebsmomente beeinflusst. Dabei werden üblicherweise Fahrbarkeitsfilter eingesetzt, die hohe Momentengradienten und damit Triebstranganregungen vermeiden sollen. Je höher ihre Zeitkonstanten sind, desto höher wird auch die Verzugszeit. Von den befragten Personen wurde die gesamte Verzugszeit oft mit dem englischen Begriff „Hesitation“ bezeichnet. Der Momentenaufbau wird im Wesentlichen durch seinen maximalen Gradienten beschrieben. Ein nicht harmonischer, also ein durch Störungen überlagerter Momentenaufbau, ist dem Diskomfort zuzuordnen.

<sup>179</sup> Löffler 2000

Die Wahrnehmung des Ansprechverhaltens unterscheidet sich von Person zu Person. Damit sind sowohl Ansprechzeit als auch der Momentenaufbau individuell zu optimierende Größen. Beispielsweise wünscht sich ein sportlich orientierter Fahrer einen steileren Momentengradienten, als ein komfortorientierter. Schwingungen oder Störungen des Beschleunigungsverlaufs während des Wiederstarts sind aber grundsätzlich zu vermeiden bzw. gegen Null zu optimieren. Die befragten Personen bewerten den Wiederstart also intuitiv nach der 2-Kanal-Theorie, da sie sowohl Kriterien auf einer Achse des Gefallens als auch Wertungen auf einer Erleidens-Achse vornehmen. Trotzdem wird generell ein Komforturteil nach der ATZ-Skala abgegeben. Wie sie ihre Einzelwertungen zu dieser globalen Gesamtnote verknüpfen bleibt zunächst unbekannt.

### 4.3.3 Auswahl und Definition objektiver Kennwerte

Um eine Objektivierung der Komfortbewertung durchführen zu können, müssen geeignete Kennwerte erfasst werden, die die von den Probanden erfassten Phänomene wiedergeben. Für die Wiederstartkomfortbewertung müssen deshalb Kennwerte gebildet werden, die den Diskomfort und den Charakter des Wiederstarts beschreiben. Zusätzlich muss der Fahrerwunsch und Fahrzustand analysiert werden, um Aussagen über die Erwartungshaltung des Fahrers treffen zu können. Welche Kennwerte verwendet werden, ist in den folgenden Abschnitten zusammengefasst. Die Berechnung der Kennwerte erfolgt vollständig in MATLAB, so dass eine Nutzung zu anderen Zwecken (z.B. in der Simulation) problemlos möglich ist. Die Algorithmen für einige der Kennwerte sind bereits in MATLAB enthalten, andere mussten neu implementiert werden.

#### Kennwerte zur Beschreibung des Diskomforts

Ein bekannter Wert für die Beschreibung von Schwingungsbelastungen ist der Vibration Dose Value (VDV). Er ist in der Norm ISO 2631-1<sup>180</sup> beschrieben und berechnet sich aus der vierten Potenz der frequenzbewerteten Beschleunigung  $a_w$  zu:

$$VDV = \sqrt[4]{\int_{t=0}^{t=T} a_w^4(t) dt} . \tag{Formel 4-1}$$

Je nach Einwirkungsrichtung und Einwirkungsort der Beschleunigung sowie der Körperhaltung der Person kommen verschiedene Bewertungskurven zum Einsatz, die ebenfalls in den genannten Normen zu finden sind. In Abbildung 4-5 ist die

---

<sup>180</sup> ISO 1997

Bewertungskurve  $w_c$  für die Beschleunigung einer sitzenden Person in Längsrichtung dargestellt. Die Berechnung der frequenzbewerteten Beschleunigung kann zum einem mit Hilfe einer Transformation vom Zeitbereich in den Frequenzbereich (Fourier-Transformation), einer Gewichtung der Frequenzanteile und der anschließenden Rücktransformation in den Zeitbereich erfolgen. Zum anderen beschreibt Griffin<sup>181</sup> auch Übertragungsfunktionen, mit denen die Frequenzbewertung mit Hilfe kontinuierlicher Filter implementiert werden kann.

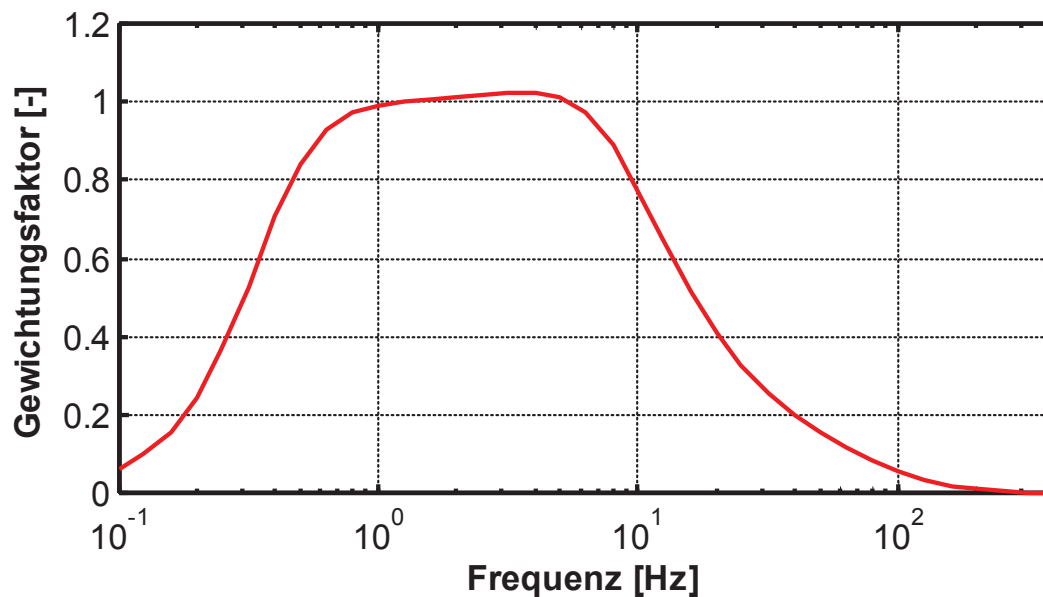


Abbildung 4-5: Frequenzgewichtungskurve  $w_c$

Zur Beurteilung von Getriebeschaltungen und anderer NVH-relevanter Vorgänge im Fahrzeug wird der VDV beispielsweise im Werkzeug FEVos<sup>182</sup> der FEV GmbH eingesetzt. Mithilfe von diesem und zwei weiteren Kennwerten werden Getriebeschaltungen objektiviert und in Streubänder eingeordnet. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Verlauf der Fahrzeug-Längsbeschleunigung mit Hilfe des VDV bewertet.

Albers und Albrecht<sup>183</sup> nutzen für die Objektivierung des Anfahrkomforts modifizierte spektrale Leistungsdichten in bestimmten Frequenzintervallen als Kennwerte. Zur Reduktion der Datenmenge werden im Frequenzbereich oberhalb von 10 Hz Spektren mit einer Breite von 5 Hz bzw. 10 Hz verwendet, unterhalb mit Breiten von 1 Hz. Die Berechnung wurde in MATLAB neu implementiert. Die Begrenzung des Frequenzbandes wird dabei mit Hilfe einer FFT durchgeführt.

<sup>181</sup> Griffin 1990

<sup>182</sup> Kirschstein et al. 2009

Während eines Beschleunigungsvorgangs werden insbesondere gegenläufige Flanken im Beschleunigungsverlauf<sup>184</sup> störend wahrgenommen. Da im Falle des Wiederstarts vom Fahrer eine nicht negative Beschleunigungsänderung gewünscht ist, sind also negative Beschleunigungen besonders störend. Ein weiterer in den durchgeführten Untersuchungen verwendeter Kennwert ist deshalb der minimale Gradient der Fahrzeug-Längsbeschleunigung.

Griffin<sup>185</sup> schlägt unter anderem folgende Kennwerte vor:

- Spitze-Spitze-Wert der Längsbeschleunigung
- Krümmung der Längsbeschleunigung (engl. Kurtosis)
- Schiefe der Längsbeschleunigung (engl. Skewness)
- Standardabweichung und Mittelwert der Längsbeschleunigung
- RMS (root mean square) und RMQ (root mean quad) der Längsbeschleunigung

Diese Kennwerte werden ebenfalls in den Fahrversuchen ausgewertet.

Neben der Längsbeschleunigung werden auch Drehzahlverläufe bewertet. Dazu werden die von Birkhold<sup>186</sup> und El Wardani<sup>187</sup> vorgestellten Drehzahlintegrale (DZI) verwendet. Sie vergleichen einen idealisierten mit dem realen Drehzahlverlauf des Getriebeeingangs. Berechnet werden die Flächeninhalte zwischen den beiden Verläufen. Längsschwingungen des Fahrzeugs sind auch im Drehzahlverlauf des Getriebeeingangs sichtbar. Je stärker Schwingungen ausgeprägt sind, desto größer sind Ungleichförmigkeiten des Drehzahlverlaufs, womit sich auch größere Drehzahlintegrale ergeben. Das DZI berechnet sich zu:

$$DZI = \int_{t_1}^{t_2} |n_{ideal}(t) - n_{real}(t)| dt \qquad \text{Formel 4-2}$$

### **Kennwerte zur Beschreibung des Charakters**

Zur Beschreibung des Charakters des Wiederstarts werden verschiedene Kennwerte verwendet, deren Ermittlung in Abbildung 4-6 dargestellt ist.

---

<sup>183</sup> Albers Albrecht 2005

<sup>184</sup> Gebert 2000

<sup>185</sup> Griffin 1990

<sup>186</sup> Birkhold 2008

<sup>187</sup> El Wardani 2010



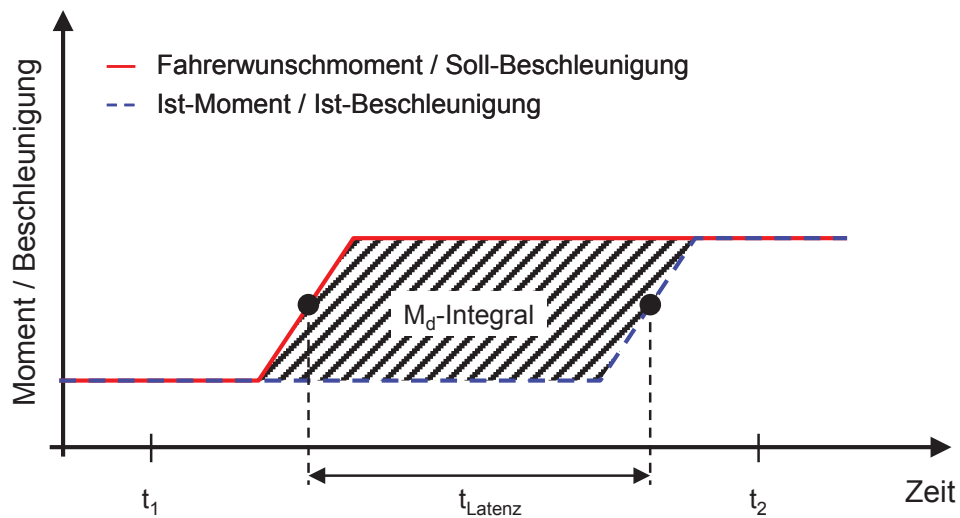


Abbildung 4-6: Kennwerte zur Charakter-Beschreibung

Das  $M_d$ -Integral stellt die Fläche zwischen Fahrerwunschemoment und Ist-Moment bezogen auf den Getriebeeingang innerhalb der Grenzen  $t_1$  und  $t_2$  des Betrachtungszeitraums dar. Je größer die Differenz zwischen Soll- und Ist-Moment und je länger das Antriebssystem benötigt, um die Fahrerforderung zu erfüllen, desto größer wird diese Fläche. Sie ist damit Maß sowohl für die Verzögerung der Umsetzung des Fahrerwunsches als auch für die Differenz zwischen Fahrerwunschemoment und vom Triebstrang bereitgestelltem Drehmoment.

Die Zeit  $t_{\text{Latenz}}$  zwischen Anforderung des Fahrers und Umsetzung durch das System wird zusätzlich separat berechnet. Dazu wird ein Minimierungsproblem formuliert (Formel 4-3) und numerisch gelöst.

$$M(t_{\text{Latenz}}) = \min_{t_{\text{Latenz}}} \left\{ \int_{t_1}^{t_2} a_{\text{soll}}(t) - a_{\text{ist}}(t - t_{\text{Latenz}}) dt, \quad t_{\text{Latenz}} \geq 0 \right\} \quad \text{Formel 4-3}$$

Anschaulich bedeutet dies eine Verschiebung des Ist-Verlaufes so weit nach links, dass die von Soll- und Ist-Verlauf eingeschlossene Fläche minimal wird. Die Latenz wird aus Fahrerwunschemoment und Getriebeeingangsmoment (bezeichnet als LatenzM) sowie aus Soll- und Ist-Beschleunigung (bezeichnet als LatenzA) berechnet.

Außerdem werden maximale und minimale Beschleunigungsgradienten (auch als Ruck bezeichnet) ausgewertet und in die spätere Modellierung des Komfortempfindens miteinbezogen.

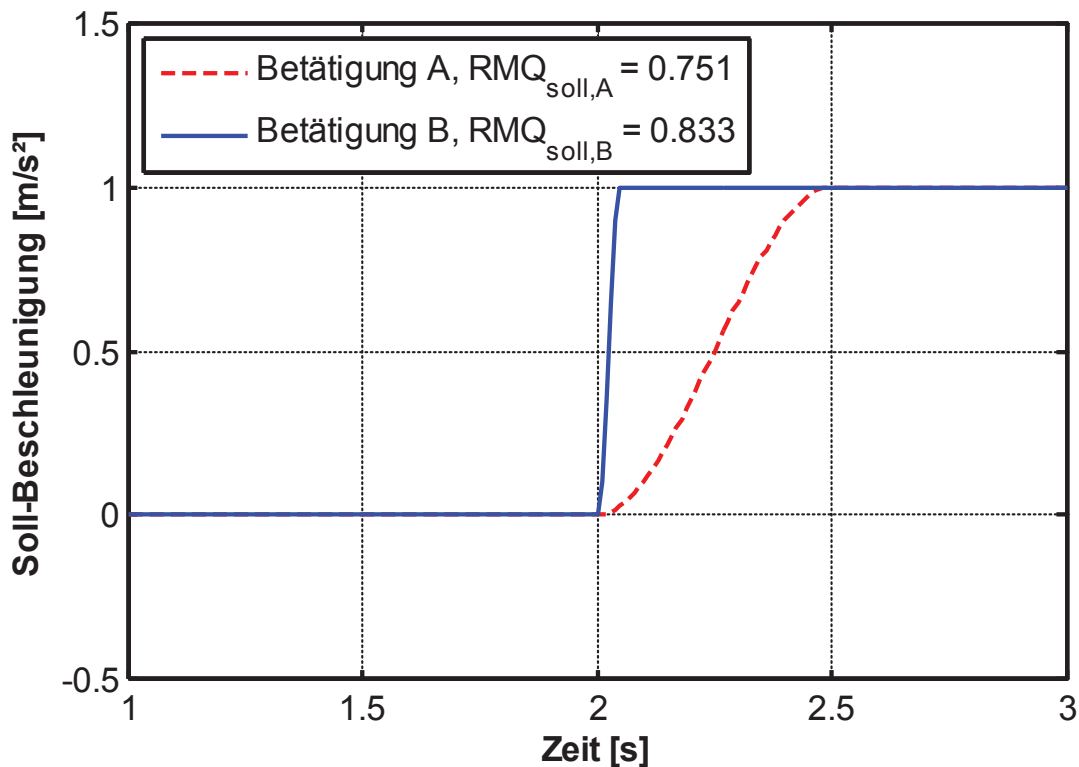
### **Kennwerte zur Beschreibung von Fahrerwunsch und Fahrzustand**

Wie bereits oben erwähnt, ist eine Erwartungshaltung nicht direkt messtechnisch zu erfassen. Bei einer Betätigung des Fahrpedals ist aber davon auszugehen, dass eine erwartete Fahrzeuglängsbeschleunigung mit der Art und Weise der Pedalbetätigung verknüpft ist. Neben der absoluten Pedalstellung und dem damit an das System Fahrzeug übermittelten Beschleunigungswunsch enthält auch die Betätigungsgeschwindigkeit, also der Pedalwertgradient, Informationen über die Fahrererwartung. Eine sehr langsame Betätigung fordert einen langsamen Beschleunigungsaufbau, eine sprungförmige Betätigung einen sehr schnellen Momentenaufbau. Da die Erwartungshaltung mit in die Objektivierung einfließen soll, gelingt dies nur über eine Charakterisierung des Fahrerwunsches durch objektive Kennwerte. Da die Erwartungshaltung dabei zusätzlich im Zusammenhang mit dem Fahrzustand steht, muss er ebenfalls erfasst werden.

Aus der Fahrpedalstellung wird innerhalb der Fahrzeugsteuerung ein radbezogenes Wunschmoment ermittelt, das sich mit Hilfe der fahrzeugspezifischen Daten (Masse, Getriebeübersetzung, etc.) in eine Soll-Beschleunigung umrechnen lässt. Diese kann dann anstelle des Pedalwertverlaufs ausgewertet werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Soll-Beschleunigung durch ähnliche Kennwerte beschrieben wie die Ist-Beschleunigung, da sie sowohl absolute Werte als auch Gradienten berücksichtigen. Mit Hilfe der Berechnungsvorschriften für VDV und  $RMQ^{188}$  werden aus der berechneten Soll-Beschleunigung die Kennwerte  $VDV_{soll}$  und  $RMQ_{soll}$  bestimmt, die sowohl absolute Änderungen als auch Gradienten erfassen. In Abbildung 4-7 ist der Wert  $RMQ_{soll}$  für zwei verschiedene Soll-Beschleunigungsverläufe beispielhaft dargestellt. In beiden Fällen wird derselbe Maximalwert erreicht, allerdings mit unterschiedlichen Gradienten. Der höhere Gradient der Betätigung B hat einen höheren Wert  $RMQ_{soll,B}$  zur Folge.

---

<sup>188</sup> vgl. Abschnitt 2.7.1

Abbildung 4-7: Kennwert  $RMQ_{soll}$ 

Zusätzlich werden die maximale Pedalstellung, die Fahrzeuggeschwindigkeit und die Getriebeeingangsdrehzahl beim Wiederstartbeginn zur Charakterisierung des Fahrzustands ausgewertet.

#### 4.3.4 Versuchsvorbereitung und -durchführung

Zur Modellierung des Komfortempfindens beim Wiederstart des Verbrennungsmotors ist es notwendig, Probandenversuche zur Datengewinnung durchzuführen. Um ein breites Spektrum an Fahrerwertungen zu erhalten, müssen Manipulationen am bestehenden System - in diesem Fall dem Serienfahrzeug - vorgenommen werden. Dabei sollen insbesondere die von den befragten Personen genannten Phänomene (siehe Kapitel 4.3.2) gezielt beeinflusst werden. In diesem Abschnitt werden die gewählten Parameter und ihre Auswirkungen auf das System sowie die Erstellung eines Versuchsplans mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung dargestellt. Die Randbedingungen, die während der Versuche galten werden anschließend erläutert.

#### Systemmanipulationen

Zwei wesentliche in der Befragung genannte Kriterien zur Bewertung des Wiederstartkomforts sind der Schwingungskomfort und die zeitliche Verzögerung (engl. Hesitation) zwischen Beschleunigungsanforderung und -umsetzung durch das System Fahrzeug. Deshalb werden für die Fahrversuche Verstellmöglichkeiten



restlichen Fahrzeugsteuerung bleibt dieser Stellfehler unbekannt. Dadurch wird er während des Starts nicht ausgeglichen und die E-Maschine mit dem Moment  $\Delta M$  abgebremst. Dies wirkt sich entsprechend der Getriebeübersetzung, dem Fahrzeuggewicht und weiteren Fahrzeug-Parametern auf die Fahrzeuglängsbeschleunigung aus. Für die Fahrversuche sollen ausschließlich  $\Delta x$  eingestellt werden, die  $M_0$  erhöhen. Bei  $x \gg x_0$  kann das Kupplungsmoment so weit absinken, dass es nicht ausreicht um das Schleppmoment des Motors für einen Start zu überwinden. Die Systemsteuerung würde dies erkennen und einen Sicherheitsmechanismus aktivieren, um den Wiederstart durch Schließen der Trennkupplung zu erzwingen (Fail-Safe-Prinzip<sup>192</sup>). Dadurch können sich mehrere Effekte überlagern, die dann unter Umständen vom Fahrer nicht mehr getrennt werden können, womit die Bewertung von Einzelkriterien erschwert oder sogar unmöglich gemacht wird. Diese Beschränkung der Parameter ist bei der späteren Auswahl der Versuchsplanart wichtig, wenn die einzelnen Faktoren keine Wechselwirkungen aufweisen sollen.

Zur Manipulation der Verzögerungszeit zwischen Fahrerwunsch und seiner Umsetzung konnte ebenfalls ein Parameter im Steuergerät identifiziert werden. Zwischen Startanforderung und Start-Freigabe kann eine variable Totzeit  $\Delta t$  eingestellt werden. Abbildung 4-9 zeigt die Auswirkungen schematisch.

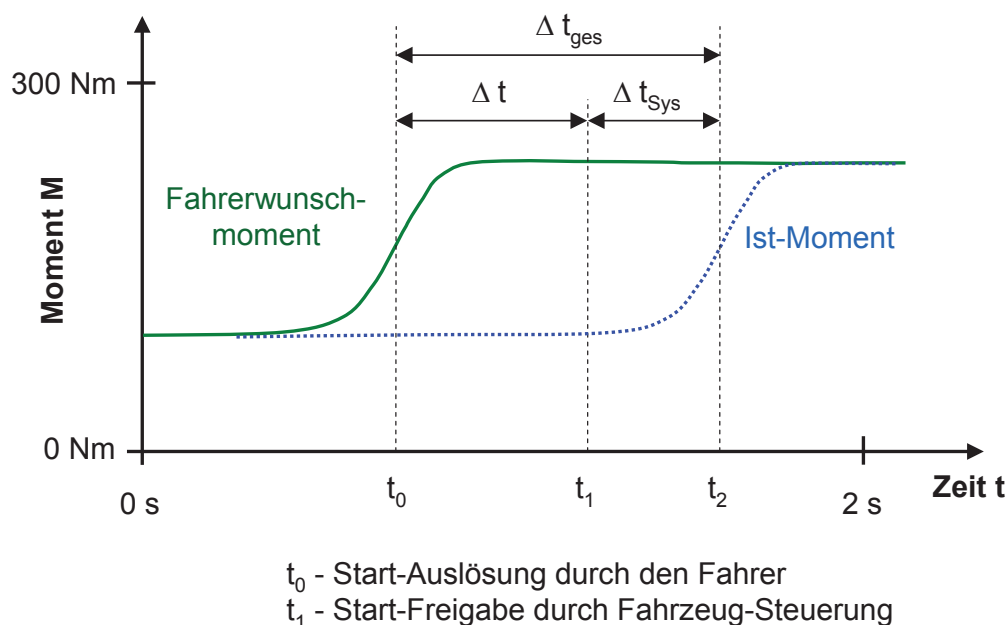


Abbildung 4-9: Fahrerwunschk-moment mit zeitlicher Verzögerung

<sup>192</sup> vgl. Kapitel 2.3.3

Fordert der Fahrer über das Fahrpedal einen Wiederstart (Zeitpunkt  $t_0$ ) an, wird diese Anforderung in der Steuerung weiterverarbeitet. Erst nach Ablauf der applizierten Totzeit wird die Startfreigabe erteilt (Zeitpunkt  $t_1$ ), sodass anschließend der herkömmliche Startablauf durchgeführt werden kann. Künstlich erzeugte Totzeit  $\Delta t$  und systembedingte Verzögerungszeit  $\Delta t_{\text{sys}}$  addieren sich zur für den Fahrer insgesamt spürbaren Verzögerung  $\Delta t_{\text{ges}}$ . Der systembedingte Zeitanteil ist von weiteren Parametern abhängig, die nicht gezielt beeinflussbar sind und deshalb im Rahmen dieser Arbeit nicht verändert werden.

In Abbildung 4-10 sind Messgrößen eines Wiederstarts dargestellt, der vom Probanden mit der ATZ-Note 8 bewertet wurde. Im Verlauf der Getriebe-Eingangsdrehzahl sind nur leicht Schwingungen zu erkennen, was auf eine geringe Schwingungsbelastung des Fahrzeuginsassen schließen lässt. Außerdem folgt das Ist-Moment dem Fahrerwunschloment mit nur geringer zeitlicher Verzögerung.

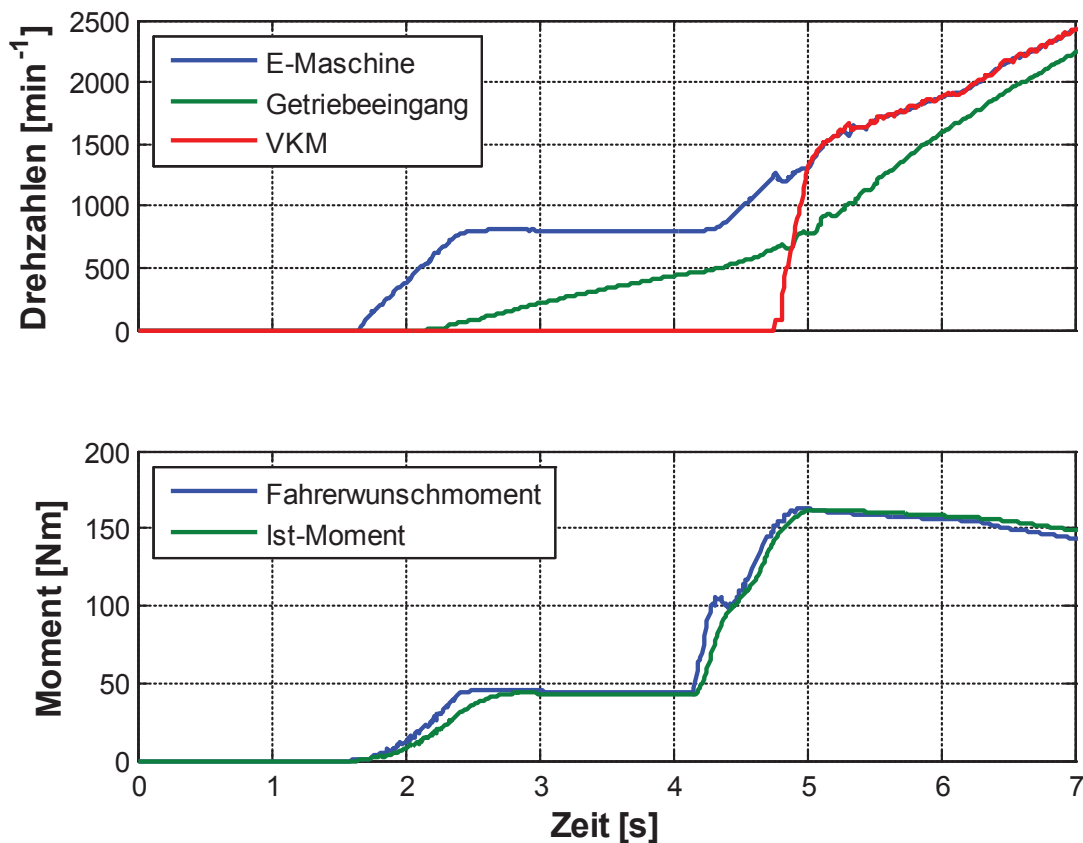


Abbildung 4-10: Vom Probanden mit ATZ-Note 8 bewerteter Start

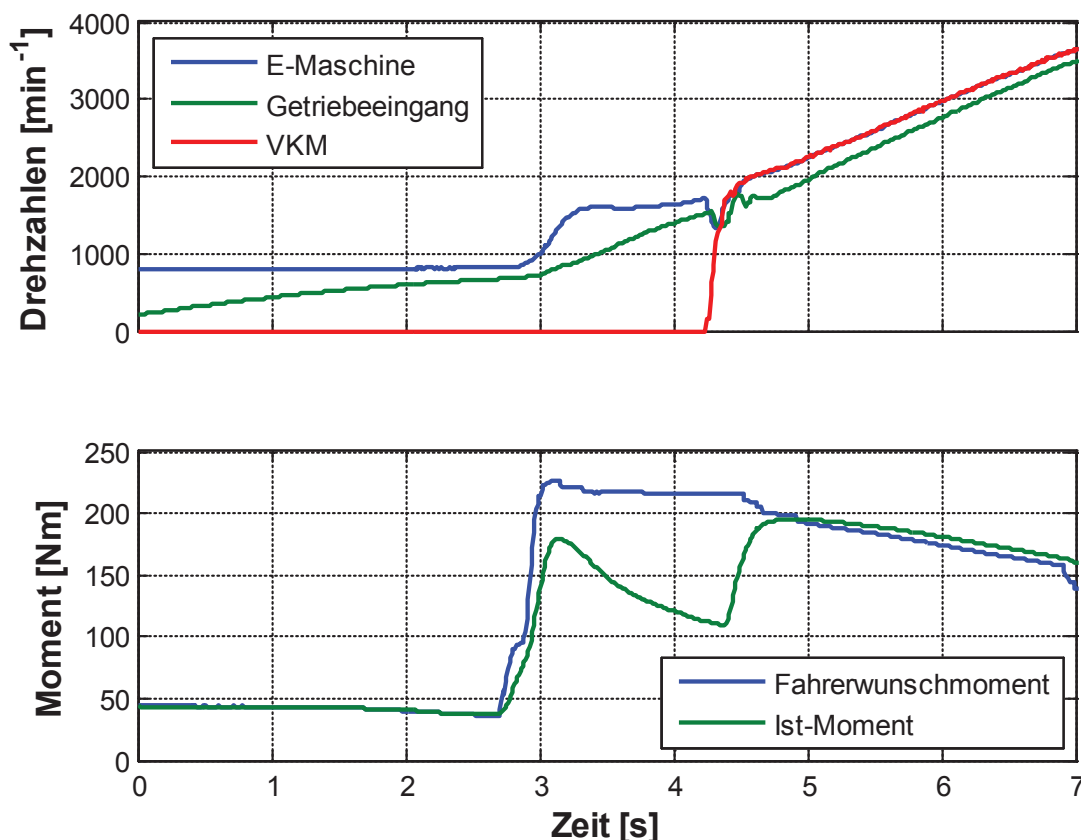


Abbildung 4-11: Vom Probanden mit ATZ-Note 3 bewerteter Start

Im Gegensatz dazu zeigt Abbildung 4-11 die gleichen Signale für einen Wiederstart, der mit der ATZ-Note 3 bewertet wurde. Hier sind sowohl größere Schwingungen der Getriebeeingangsdrehzahl als auch eine große zeitliche Verzögerung zwischen Fahrerwunschmoment und Ist-Moment zu erkennen. Deshalb ist in diesem Fall davon auszugehen, dass der Fahrer eine deutlich höhere Schwingungsbelastung erfährt als im ersten Fall und auch die zeitliche Verzögerung als unangenehm empfindet.

### Versuchsplanung

Da der Wiederstart im realen Fahrzeugbetrieb in sehr unterschiedlichen Fahrsituationen ausgelöst werden kann, sollen im Fahrversuch auch verschiedene Fahrmanöver untersucht werden. In Vorversuchen<sup>193</sup> wurden bereits zwei dieser Manöver durchgeführt, bei denen Wiederstarts besonders differenziert wahrgenommen werden können. Beim Kriechen und Anfahren mit kleinen Pedalwerten sind aufgrund der geringen Fahrzeuggeschwindigkeit Anregungen

durch Fahrbahnunebenheiten sowie Geräusche durch Fahrtwind sehr gering, weshalb auch schwach ausgeprägte triebstrangerregte NVH-Phänomene besonders kritisch beobachtet werden können. Bei ersterem wird der Wiederstart nicht durch den Fahrerwunsch ausgelöst, sondern durch eine andere Zwangsbedingung, die z.B. vom Energiemanagement aufgrund eines zu niedrigen Ladestands des elektrischen Energiespeichers gesetzt wird. Beim Anfahren kriecht das Fahrzeug zunächst und wird dann mit einer definierten Fahrervorgabe beschleunigt. Um das später zu erstellende Modell des Komfortempfindens auch für weitere Fahrsituationen nutzbar zu machen, wurden im Rahmen dieser Arbeit zusätzlich zu den erwähnten Manövern noch so genannte Wiederaufnahmestarts durchgeführt. Das bedeutet, dass der Fahrer über seine Pedalvorgabe den Wiederstart im Segeln (Schub) auslöst und damit das Fahrzeug von einer negativen in eine positive Beschleunigung überführt. Damit ergeben sich zunächst drei grundsätzliche Fahrsituationen zur Untersuchung und Bewertung im Probandenversuch.

Da davon ausgegangen wird, dass die Erwartungshaltung des Fahrers einen großen Einfluss auf seine Bewertung eines Wiederstarts hat, müssen die Manöver mit verschiedenen Fahreranforderungen, die mit unterschiedlichen Erwartungshaltungen verknüpft sind, durchgeführt werden. Deshalb werden Anfahr-Starts und Wiederaufnahmestarts mit unterschiedlichen Pedalwinkelvorgaben gefahren. Beim Kriechen kann per Definition keine Pedalvorgabe erfolgen. Hierbei darf der Fahrer das Fahrpedal nicht betätigen.

Fahrmanöver		
Kriechen	Anfahren	Wiederaufnahme
Soll-Pedalwert: 0 %	Soll-Pedalwert: 30 % und 90 %	Soll-Pedalwert: 30 % und 90 %

Abbildung 4-12: Übersicht der durchgeführten Fahrmanöver

In Kombination ergeben sich daraus fünf zu untersuchende Fahrsituationen. Zusätzlich werden die oben erläuterten Parameter zur Manipulation des Wiederstarts in verschiedenen Stufen verändert. Für den Stellfehler des Kupplungsaktuators werden sieben, für die künstliche Verzögerungszeit fünf äquidistante Stufen gewählt. Die oben erläuterte Begrenzung der Parameter gilt dabei weiterhin. Sollte jetzt jede Parameter-Variation von der Versuchsperson bewertet werden, ergäben sich pro Proband 175 Versuche. Aufgrund des hohen Zeitaufwands und der zu erwartenden

<sup>193</sup> El Wardani 2009



abnehmenden Bewertungsgüte des Fahrers mit der Versuchsdauer wegen Ermüdungserscheinungen muss diese Anzahl reduziert werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Versuche nach einem D-optimalen Plan<sup>194</sup> durchgeführt. Damit ergaben sich pro Proband 98 Versuche zur Bewertung aller fünf Fahrmanöver. Die beiden oben erläuterten Parameter Totzeit und Kupplungsstellfehler sind linear unabhängig in Ursache und Wirkung und erfüllen damit die Anforderungen der linearen DOE.

### **Durchführung der Fahrversuche**

Die Fahrversuche wurden mit einem Fahrzeug vom Typ Porsche Cayenne S Hybrid (siehe Abschnitt 2.1.1) auf einem abgesperrten Teil des Testgeländes der Dr. Ing h.c. F. Porsche AG in Weissach durchgeführt. Als Probanden standen acht Personen zur Verfügung, die über Erfahrung im Umgang mit hybriden Antrieben sowie in der Applikation von Antriebs-Systemen und -Komponenten verfügen. Während der Versuche wurden die Fahrzeugeinstellungen möglichst konstant gehalten. So wurde das Fahrzeug vor den Versuchen von einer weiteren Person kontrolliert warm gefahren, um alle Komponenten zu konditionieren. Die Klimaanlage wurde auf 22°C im Automatikmodus eingestellt, Radio und Bildschirm des Navigationssystems deaktiviert. Zur Vermeidung weiterer Einflüsse auf die Fahrerurteile wurde die Tachoscheibe abgedeckt (Abbildung 4-13), sodass der Fahrer nur noch den eingelegten Gang und die aktuelle Fahrzeuggeschwindigkeit sehen kann. Dies verhindert, dass der Fahrer durch die Bewegungen der Drehzahlmessernadel beim Start abgelenkt wird. Insbesondere der Zeitpunkt des Momentenaufbaus durch die VKM soll nicht optisch am Drehzahlanstieg erkennbar sein, sondern anhand der Längsbeschleunigung durch den Fahrer erfasst und anschließend bewertet wird.

---

<sup>194</sup> vgl. Abschnitt 2.7.2



Abbildung 4-13: Tacho-Scheibe im Versuchsfahrzeug

Weitere Störeinflüsse wurden durch den Einsatz eines Gehörschutzes, den die Probanden während der Versuche trugen, eliminiert. Damit sollten Geräusche, die nicht im oder durch das Versuchsfahrzeug entstehen, gedämpft werden, um die fehlerhafte Zuordnung akustischer Phänomene zu vermeiden. Als Beispiel seien hier Geräusche anderer Versuchsfahrzeuge genannt, die sich zeitgleich in anderen Bereichen des Testgeländes aufhielten. Durch diese Maßnahme werden auch Geräusche, die während des zu bewertenden Wiederstarts auftreten können, ebenfalls gedämpft, wodurch die Beurteilung des Startvorgangs beeinflusst werden kann.

Jede Versuchsperson wurde in einem Vorgespräch über den gesamten Testablauf sowie die abzugebenden Bewertungen für die Wiederstarts informiert. Zusätzlich wurde vor der Durchführung einer Manöverart jede Fahraufgabe noch einmal erläutert

Zur Steigerung der Reproduzierbarkeit haben in der Vergangenheit verschiedene Autoren (z.B. Albrecht<sup>195</sup>) mit mechanischen Pedalanschlägen gearbeitet, um das mögliche Fahrerwunschmoment zu begrenzen. Außerdem wird dadurch die Fahraufgabe erleichtert, da sich die Versuchsperson nicht darauf konzentrieren muss, den gewünschten Pedalwert einzustellen. Allerdings kann eine mechanische Begrenzung des Pedalwegs lediglich den absoluten Pedalwert nicht aber die Betätigungsgeschwindigkeit begrenzen. Bei der Betätigung wird der Proband evtl. unerwartet in seiner Bewegung gehemmt, was zu einer Veränderung seiner Erwartungshaltung gegenüber der Fahrzeuglängsbeschleunigung führen kann, wenn er nicht seiner vorgesehenen Bewegung folgen kann.

---

<sup>195</sup> Albrecht 2005

Die Anwendung einer automatisierten Vorgabe des Pedalwerts vollständig unabhängig vom Fahrer ist ebenso denkbar. Dabei wird der Pedalwert von einem Rechner simuliert und in Form eines elektrischen Signals an die Motorsteuerung übermittelt. Dies nimmt dem Fahrer die gesamte Verantwortung für den Soll-Beschleunigungsverlauf des Fahrzeugs. Damit ist die beste Wiederholgenauigkeit sowohl bezüglich des absoluten Beschleunigungswunschs als auch des Beschleunigungsgradienten zu erwarten. Eine direkte Bedienschnittstelle zwischen Fahrer und Fahrzeug zur Übermittlung des Beschleunigungswunschs existiert damit nicht mehr. Sofern dem Fahrer der Verlauf der automatisiert vorgegebenen Steuergröße nicht übermittelt wird (z.B. grafisch) wird er nicht in der Lage sein einen differenzierten Vergleich zwischen Sollvorgabe und Fahrzeugantwort durchzuführen. Somit ist es dem Probanden nicht unbedingt möglich alle Einzelkriterien einer Bewertung zu unterziehen. Insbesondere die Erfassung und Beurteilung einer zeitlichen Verzögerung zwischen Soll-Beschleunigung und Umsetzung der Wunschbeschleunigung würde bei einer automatisierten Vorgabe des Pedalwerts nicht mehr möglich sein.

Um den Fahrer nicht in seiner Pedalbetätigung zu hemmen und ihm das Vergleichen zwischen Betätigung und Fahrzeugreaktion zu ermöglichen, wurde deshalb sowohl auf einen Pedalanschlag als auch auf eine automatisierte Pedalwertvorgabe verzichtet.

Da ausschließlich Experten an den Versuchen teilnahmen, ist aber davon auszugehen, dass die Probanden in der Lage sind, einen vorgegebenen Pedalwert relativ genau einzustellen. Zusätzlich wurde den Fahrern zwischen den einzelnen Manövern die Möglichkeit gegeben, das Einstellen des Pedalwerts zu üben und ihre Fertigkeit durch Anzeige auf einem Computer-Bildschirm zu überprüfen.

Die untersuchten Fahrmanöver sind als open-Loop-Manöver zu betrachten, da vom Fahrer ein fester Pedalwert einzustellen ist und er nicht auf Fahrzeugreaktionen mit Eingriffen reagieren muss, um die Fahraufgabe zu erfüllen. Dies kommt der Bewertungsgüte zu Gute<sup>196</sup>.

Alle Versuche wurden in der manuellen Schaltgasse des Getriebes gefahren, um zu verhindern, dass sich ein Wiederstart mit einer Getriebebeschaltung zeitlich überschneidet. Beide Ereignisse wären sonst vom Probanden nicht zu trennen und würden unter Umständen die Bewertungen stark verfälschen. Die Manöver Kriechen und Anfahren wurden im ersten Gang, das Manöver Wiederaufnahme im dritten Gang durchgeführt.

---

<sup>196</sup> vgl. Abschnitt 2.6

#### 4.3.5 Erfassung von Messdaten und Fahrerwertungen

Für die Berechnung der für die Komfort-Objektivierung notwendigen Kennwerte sowie die Beschreibung des Fahrzustandes müssen entsprechende Signale aus dem Fahrzeug erfasst und aufgezeichnet werden. In heutigen Kraftfahrzeugen stehen dafür grundsätzlich verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung. Zum einen kann auf Bus-Systeme (CAN<sup>197</sup>, LIN<sup>198</sup>, FlexRay<sup>199</sup>, etc.), die zur Kommunikation zwischen verschiedenen Steuergeräten und Systemkomponenten genutzt werden, zugegriffen werden. Sie arbeiten meistens mit genormten Protokollen, weshalb hier nicht näher auf Einzelheiten eingegangen werden soll. Details sind der einschlägigen Literatur<sup>200</sup> zu entnehmen

Mit Entwicklungswerkzeugen ist es außerdem möglich auch Daten direkt aus einzelnen Steuergeräten abzurufen und aufzuzeichnen. Die dafür notwendigen Schnittstellen und Kommunikationsprotokolle sind häufig ebenfalls genormt (z.B. CCP<sup>201</sup>, ETK<sup>202</sup>). Eine Organisation zur Standardisierung von Schnittstellen und Protokollen in der Automobilindustrie ist die ASAM<sup>203</sup>.

#### Signale aus Fahrzeug und Steuergeräten

Während der Fahrversuche wurden verschiedene kontinuierliche Messgrößen sowie diskrete Statusinformationen aufgezeichnet. Eine schematische Darstellung der verwendeten Messtechnik ist in Abbildung 4-14 zu sehen.

Das Motorsteuergerät (ECU) ist über eine ETK-Schnittstelle mit einem Schnittstellen-Modul des Typs ETAS ES591<sup>204</sup> verbunden. Dadurch können Daten sowohl direkt aus dem Steuergerät aufgezeichnet und verarbeitet als auch Parametrierungen von Steuergeräte-Algorithmen verändert werden. Außerdem werden Daten aus den mit dem Steuergerät verbundenen CAN-Bussen erfasst. Der an der Fahrersitzschiene montierte triaxiale Beschleunigungssensor ist mit einem elektronischen Signal-Umsetzer verbunden, der die gemessenen Beschleunigungen in allen drei Raumrichtungen ( $a_x$ ,  $a_y$  und  $a_z$ ) in Daten gemäß dem CAN-Protokoll übersetzt und an das Schnittstellenmodul weiterleitet.

---

<sup>197</sup> Controller Area Network; asynchrones, serielles Feldbussystem

<sup>198</sup> Local Interconnect Network; Spezifikation für ein serielles Kommunikationssystem

<sup>199</sup> serielles, deterministisches und fehlertolerantes Feldbussystem

<sup>200</sup> z.B. Bosch 2007

<sup>201</sup> CAN Calibration Protocol; Standardprotokoll für die Datenapplikation via CAN

<sup>202</sup> Emulator-Tastkopf; Speicheremulator für Steuergeräte, [www.etas.com](http://www.etas.com)

<sup>203</sup> Association for Standardization of Automation and Measuring Systems, [www.asam.net](http://www.asam.net)

<sup>204</sup> [www.etas.com](http://www.etas.com)

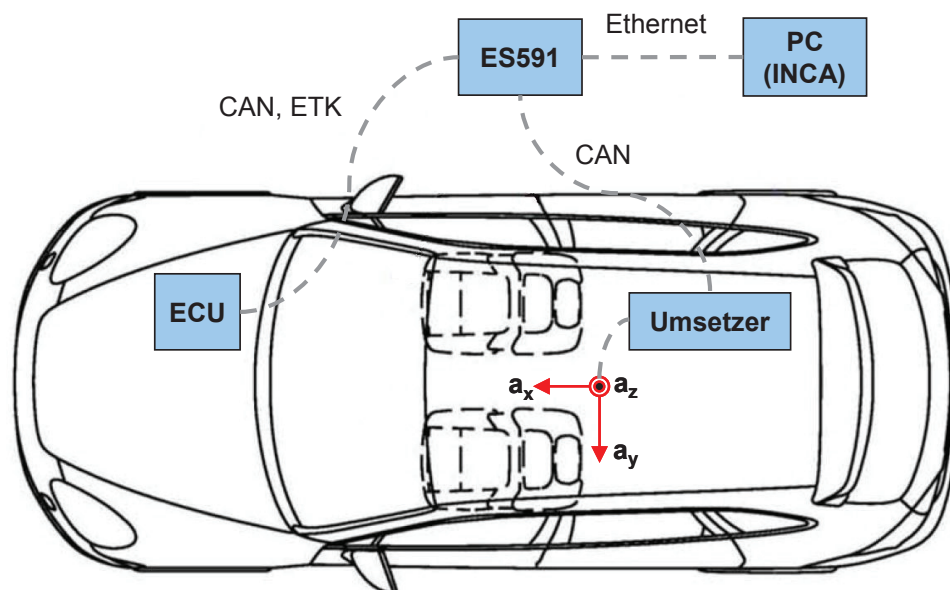


Abbildung 4-14: Ausrüstung des Versuchsfahrzeugs

Die Beschleunigungswerte werden mit einer Frequenz von 200 Hz erfasst, sodass gemäß dem Nyquist-Shannon-Abtasttheorem Anteile des Beschleunigungsverlaufs bis 100 Hz ohne Informationsverlust aufgezeichnet werden können. Ein Anti-Aliasing-Filter kam nicht zum Einsatz, da Voruntersuchungen ergaben, dass das betrachtete Signal keine nennenswerten Anteile im Frequenzbereich oberhalb 100 Hz besaß. Zudem liegt der für die untersuchten NVH-Phänomene relevante Frequenzbereich<sup>205</sup> unter dieser Frequenz. Am Beschleunigungssensor ist eine Dosenlibelle angebracht, um seine korrekte räumliche Ausrichtung zu erleichtern. Vor jedem Fahrversuch wurde die Ausrichtung kontrolliert und gegebenenfalls korrigiert.

Alle erfassten Messdaten werden vom Schnittstellenmodul gemeinsam über eine Ethernet-Schnittstelle an einen Messrechner (PC) übertragen. Auf dem Rechner ist die Mess- und Applikations-Software INCA<sup>204</sup> der Firma ETAS installiert, die die grafische Darstellung und Aufzeichnung der Messdaten übernimmt.

### Abfrage der Fahrerwertungen und Bewertungsskalen

Im Fahrversuch wird nach jeder Variation der Systemmanipulation eine Beurteilung des Wiederstartkomforts vom jeweiligen Probanden abgefragt. Dafür müssen geeignete Bewertungsskalen angewendet werden, die sowohl eine differenzierte

<sup>205</sup> vgl. Abbildung 4-4

Bewertung erlauben als auch das durch die Befragung gewonnene Vokabular zur Beschreibung der zu bewertenden Kriterien beinhalten.

Von den Fahrern wurden vier Wertungen gefordert:

- Gesamtnote
- Störungen durch Schwingungen (Diskomfort)
- Zeitliche Verzögerung zwischen Pedalbetätigung und Fahrzeugreaktion (Hesitation)
- Momentenaufbau

Zur Beschreibung der Gesamtnote kommt die unter Experten sehr geläufige ATZ-Skala zum Einsatz. Durch den Erfahrungsschatz jedes Experten im Umgang mit dieser Bewertungsskala wird sichergestellt, dass die globale Beurteilung eines Wiederstarts eine hohe Genauigkeit hat. Zudem hat sich die ATZ-Skala seit ihrer Veröffentlichung<sup>206</sup> durch ihre vielseitigen Verwendungsmöglichkeiten bewährt.

Für die Bewertung der Schwingungsbelastung wird ebenfalls eine unipolare 10-Anker-Skala eingesetzt, deren Zahlenwerte allerdings mit leicht veränderten Begriffen beschrieben werden. Auch hier sind die Endpunkte der Skala nicht gegensätzlich definiert, sondern es wird die Ausprägung erlebter Störungen durch Skalenwert bewertet.

Die während der Probandenbefragung gesammelten Begriffe zur Bewertung von Hesitation und Momentenaufbau lassen sich nicht direkt in einer Skala verwenden. Dennoch müssen sie bei der Markierung der Skalenteile berücksichtigt werden. Es dürfen keine Begrifflichkeiten verwendet werden, die unter den Experten eine konträre Bewertung hervorrufen würden. Nach Vorversuchen wurde entschieden für beide Kriterien bipolare Skalen mit jeweils neun Ankern zu verwenden. Der Mittelwert Null beider Skalen repräsentiert dabei die Wertung „entspricht der Erwartungshaltung“.

Die ungerade Ankerzahl erlaubt es damit, den Idealzustand der erfüllten Erwartungshaltung des Fahrers abzubilden. In Abbildung 4-15 wird für große Verzögerungszeiten ein defensives Verhalten definiert, während ein zu spontanes und unerwartet schnelles Ansprechen des Fahrzeugs mit Aggressivität verbunden wird.

---

<sup>206</sup> Aigner 1982



Schwingungsanregungen leicht zu erkennen und von Experten auch gut in ihrer Ausprägung differenzierbar sind, wird das Ausmaß der Störungen durch Schwingungen als drittes Kriterium abgefragt. Für die übrigen beiden abzufragenden Bewertungen kann keine eindeutige bevorzugte Reihenfolge festgelegt werden. Die Abfolge der Notenabfrage wird deshalb folgendermaßen festgelegt:

- Momentenaufbau
- Hesitation
- Störungen durch Schwingungen
- Gesamtbewertung

Die Aufzeichnung der Wertungen erfolgt nach jedem vom Probanden bewerteten Wiederstart. Ihm stehen dabei für jede Skala sowohl die Zahlenwerte der Anker als auch die entsprechenden Begriffe zur Verfügung.

#### **4.3.6 Objektivierung der Wiederstart-Komfortbewertung**

Die durchgeführten Fahrversuche wurden mit den oben erläuterten Verfahren der deskriptiven Statistik analysiert. Dabei kam ausschließlich die schrittweise Regression zum Einsatz, da sie im Vergleich zu den Verfahren der Vorwärts-Selektion und Rückwärts-Elimination in Voruntersuchungen<sup>208</sup> das höchste Potential aufwies. Aufgrund der relativ geringen Datenmenge pro Proband (98 Datensätze pro Fahrer), eignet sich beispielsweise eine Rückwärtselimination unter Verwendung von Interaktionstermen nicht, da dann aufgrund der hohen Parameteranzahl unterbestimmte Gleichungssysteme entstehen können. Diese lassen sich dann nicht mehr mit den bekannten numerischen Verfahren lösen.

Die Verarbeitung der Daten erfolgte vollständig in MATLAB. Die Statistics Toolbox bietet bereits viele Möglichkeiten der statistischen Analyse, dennoch war es notwendig einige Algorithmen und Funktionen selbst zu implementieren. Insbesondere die Erzeugung der Interaktionsterme wurde neu implementiert, um einen flexiblen Einsatz zu gewährleisten. Für die Erkennung von Kollinearitäten zwischen zwei objektiven Kennwerten wurde ein minimales Bestimmtheitsmaß von 0,5 festgelegt. Neben fahrer- werden auch fahrmanöverspezifische Analysen durchgeführt, um sowohl Unterschiede zwischen einzelnen Fahrern als auch zwischen den Fahrmanövern zu erläutern. Für die Approximation und Verifikation mittels linearer multipler Regressionsmodelle werden die Datensätze in

---

<sup>207</sup> vgl. Abschnitt 2.6.1

<sup>208</sup> Hörig 2010



Approximations- und Prognosedaten im Verhältnis 80:20 (im Folgenden als A80-P20 bezeichnet) aufgeteilt. Die Aufteilung erfolgt dabei nach der v-Methode, d.h. jeder fünfte Datensatz wird ausschließlich zur Verifikation verwendet. Dadurch werden sowohl die Berechnungen der Approximation als auch der Prognose mit Datensätzen durchgeführt, die unterschiedliche Fahrmanöver und Ausprägungen des Wiederstarts repräsentieren. Als Gütemaße für die Bewertung der Approximation werden sowohl das Bestimmtheitsmaß der linearen Regression als auch das von Albers und Albrecht<sup>209</sup> vorgeschlagene Gütekriterium G (Formel 4-4) herangezogen.

$$G = \begin{cases} \frac{1}{2}(a + R^2 - \Delta_M) & 0 \leq a \leq 1 \\ \frac{1}{2}(2 - a + R^2 - \Delta_M) & 1 < a \leq 2 \\ 0 & a < 0, a > 2 \end{cases} \quad \text{Formel 4-4}$$

Es verknüpft das Bestimmtheitsmaß  $R^2$ , den Regressionskoeffizienten  $a$  und den Mittelwert der Abweichungen zwischen berechneter objektiver Bewertung und vom Probanden vergebener subjektiver Bewertung.

Das Gütekriterium G ist ursprünglich für einen Notenbereich zwischen Null und Eins vorgesehen. Um es für andere Bewertungsskalen nutzen zu können, muss deshalb die mittlere Abweichung entsprechend der verwendeten Bewertungsskala auf dieses Intervall normiert werden.

Die Analysen werden anschließend ebenfalls mit Hilfe von künstlichen neuronalen Netzen (KNN) durchgeführt. Dabei kommt ein von Lerspalungsanti<sup>210</sup> entwickeltes Tool zum Training von KNN zum Einsatz, das im Rahmen dieser Arbeit weiterentwickelt wurde. Es basiert ebenfalls auf MATLAB und nutzt die Neural Network Toolbox, die in der Version 5.1 zur Verfügung stand. Als Netze werden ausschließlich Feed-Forward-Back-Propagation-Netze mit einer verdeckten Schicht eingesetzt. Die Neuronenanzahl in dieser Schicht wird nach der Empfehlung von Brause<sup>211</sup> gewählt. Für das Training der KNN wurden die Datensätze im Verhältnis 60:20:20 in Trainings-, Validierungs- und Testdatensätze aufgeteilt (im Folgenden als T60-V20-P20 bezeichnet). Die Validierungsdaten werden dabei ausschließlich zur Überwachung des Trainings mit dem Early-Stopping-Verfahren eingesetzt. Die Überprüfung der Netz-Qualität erfolgt mit Hilfe separater Test-Datensätze.

<sup>209</sup> Albers Albrecht 2004

<sup>210</sup> Lerspalungsanti 2010

<sup>211</sup> vgl. Kapitel 2.7.3.2

4.3.6.1 Objektivierung mit Regressionsanalysen

**Modellierung der Gesamtnote (Fahrer-spezifisch)**

Abbildung 4-17 zeigt Approximation und Prognose für alle von Fahrer A durchgeführten Fahrmanöver. Sowohl Bestimmtheitsmaß als auch die berechnete Güte G sind bei der Prognose etwas höher als bei der Modellanpassung. Dies ist durch die zufällige Aufteilung der Datensätze statistisch begründet. Die Prognosedaten unterliegen offenbar einer kleineren Varianz als die zur Modellerstellung genutzten Datensätze. Trotz der sehr unterschiedlichen Fahrmanöver gelingt die Modellierung des Komfortempfindens des Probanden mit einer Güte G von über 60 %.

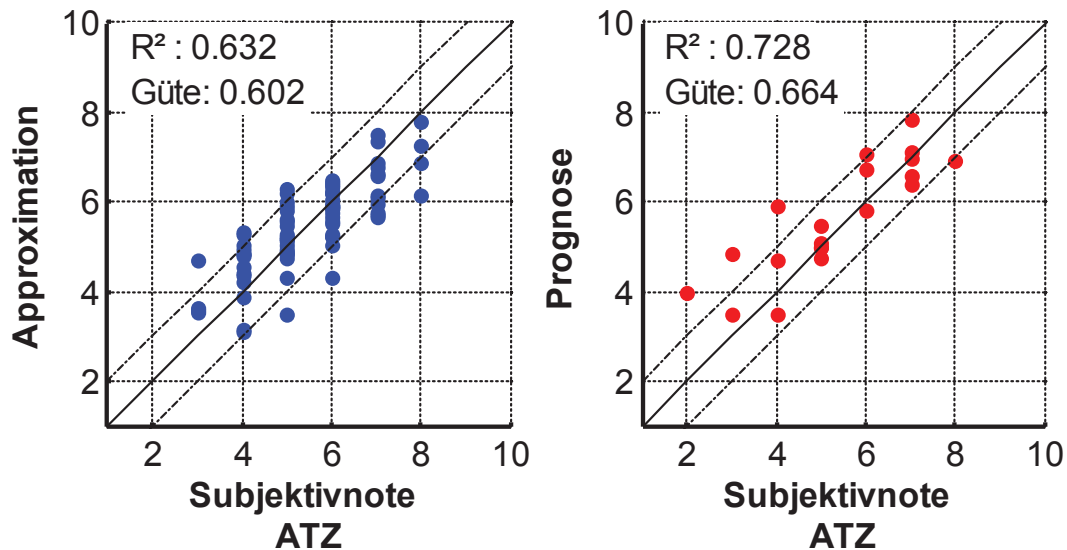


Abbildung 4-17: Fahrer A, alle Fahrmanöver (A80-P20)

Im Bereich schlechter Bewertungen (kleine Subjektivnoten) zeigt sich eine etwas höhere Streuung als bei guten Noten. Dies deutet daraufhin, dass die Differenzierungsfähigkeit von Fahrer A in diesem Notenbereich abnimmt, d.h. die Unterscheidung zwischen schlechten und sehr schlechten Wiederstarts fällt ihm schwerer.

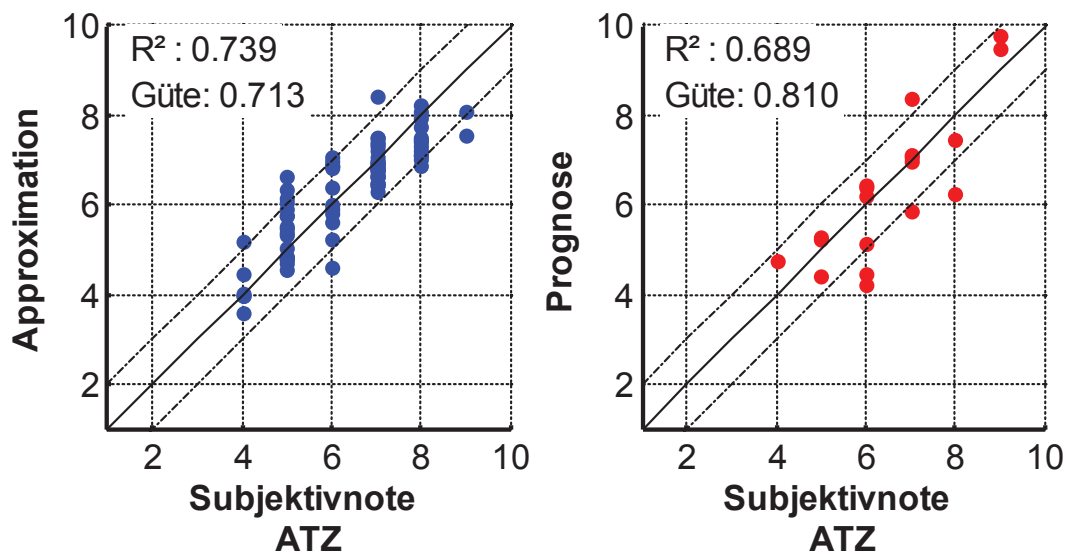


Abbildung 4-18: Fahrer E, alle Fahrmanöver (A80-P20)

Für Fahrer E zeigt sich ein ähnliches Bild (Abbildung 4-18). Sein genutztes Notenspektrum ist im Vergleich zu Fahrer A etwas zu besseren Noten hin verschoben. Zudem fallen bei ihm sowohl Approximations- als auch Prognosegüte etwas besser aus, was auf den größeren Erfahrungsschatz dieses Bewerter und die damit geringere intraindividuelle Varianz zurückzuführen ist.

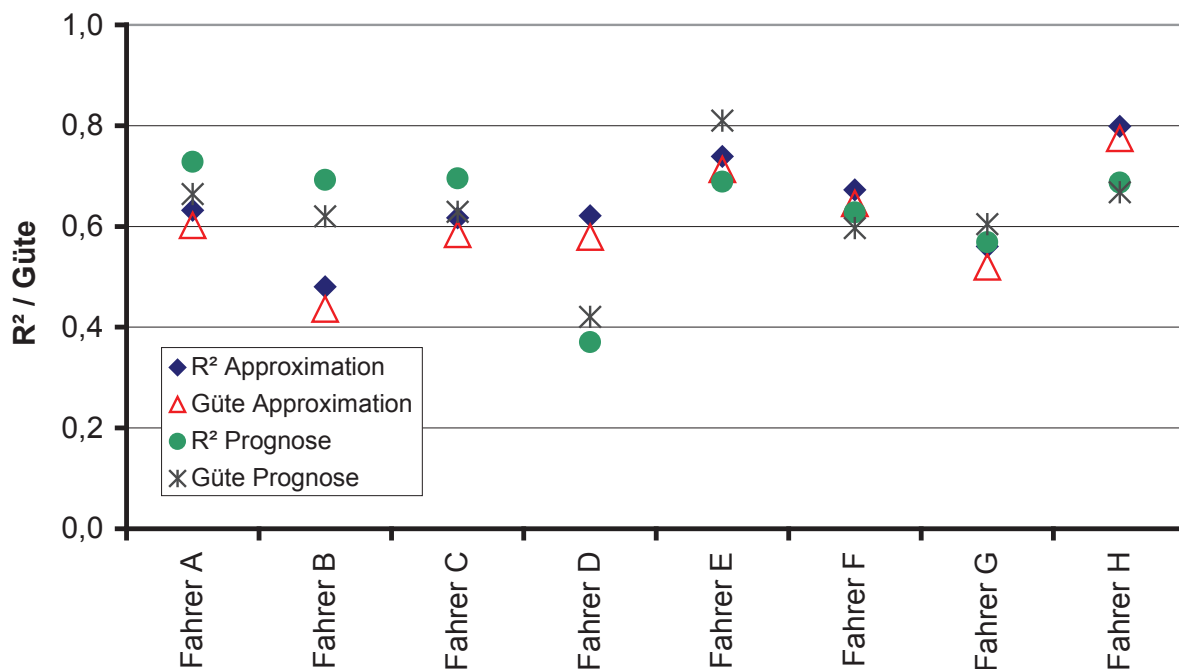


Abbildung 4-19: R² und Güten der Fahrermodellierung mit linearer Regression

Die Ergebnisse der Modellierung aller Fahrer ist in Abbildung 4-19 zusammengefasst. Bei den Fahrern B und D weichen Approximation und Prognose

vergleichsweise stark voneinander ab. Dies deutet auf eine starke intraindividuelle Varianz beider Probanden hin.

Fahrer	VDV	DZI	LatenzA	LatenzM	VDVsoll	DynK	ax_P2P	ax_mean	aMaxGradient	aMinGradient	Skewness	Kurtosis	RMS	RMQ	RMQsoll	nStart	vStart	PSD_0_1	PSD_1_2	PSD_2_3	PSD_3_4	PSD_4_5	PSD_5_6	PSD_6_7	PSD_7_8	PSD_8_9	PSD_9_10	PSD_10_15	PSD_15_20	PSD_20_30	PSD_30_40	PSD_40_50	wPedMinMax		
A																																			
B																																			
C																																			
D																																			
E																																			
F																																			
G																																			
H																																			

Abbildung 4-20: Relevante Kennwerte, fahrerspezifisch (lin. Regressionsmodell)

Die Fahrermodellierung zeigt, dass für die verschiedenen Fahrer unterschiedliche Kennwerte als relevant eingestuft werden (Abbildung 4-20). Einige Gemeinsamkeiten lassen sich dennoch erkennen. Der minimale Beschleunigungsgradient „aMinGradient“ wird in die meisten Fahrermodelle aufgenommen. Ein Beschleunigungseinbruch hat demzufolge für die meisten Fahrer eine hohe Bedeutung. Ebenso scheinen Größen, die einen Zeitverlauf integral betrachten (VDV, DZI, Kurtosis) eine hohe Relevanz zu besitzen. Die aus Soll- und Ist-Beschleunigung berechnete Latenz wird für einige Fahrer ebenfalls ins Modell übernommen, die aus Soll- und Ist-Moment berechnete Latenz dagegen bei keinem Fahrer. Kennwerte, die die spektralen Leistungsdichten der Längsbeschleunigung im Frequenzbereich über 9 Hertz repräsentieren, spielen praktisch keine Rolle für die Fahrermodellierung, was durch die besondere Empfindlichkeit des Menschen gegenüber Schwingungen im Frequenzbereich bis etwa 10 Hertz begründet ist. Diese Empfindlichkeit spiegelt sich beispielsweise auch in den oben erwähnten Bewertungskurven für Beschleunigungen wieder<sup>212</sup>.

### Modellierung der Gesamtnote (Fahrmanöver-spezifisch)

Werden Objektiv-Daten verschiedener Fahrer zur Erstellung eines Modells verwendet, sind grundsätzlich große Streuungen zu erwarten, da hier die interindividuelle Varianz der Probanden zum Tragen kommt. Deshalb werden üblicherweise nur Datensätze eines Fahrers zur Erstellung eines Komfortmodells verwendet. Im Folgenden sollen dennoch Versuche unternommen werden Fahrmanöver-spezifische Modelle zu erstellen.

<sup>212</sup> vgl. Kapitel 4.3.3

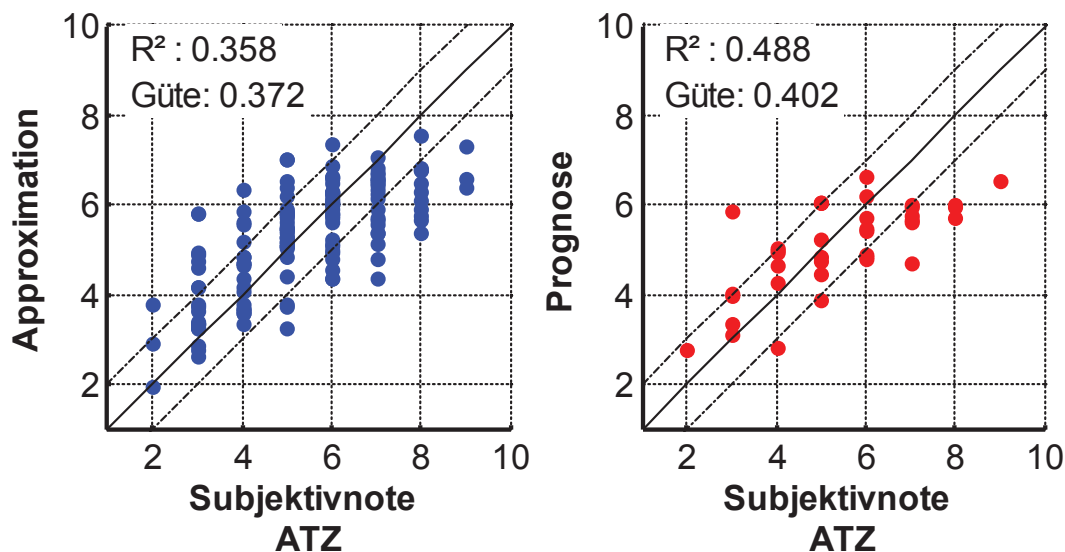


Abbildung 4-21: Alle Fahrer, Manöver Wiederaufnahme 90 % (A80-P20)

Abbildung 4-21 zeigt das Ergebnis einer Modellierung für das Manöver Wiederaufnahme mit einem Soll-Pedalwert von 90 %. Wie zu erwarten liegen Approximations- und Prognosegüten mit etwa 40 % deutlich unter den Werten, die erreicht werden, wenn einzelne Fahrer modelliert werden. Sowohl in der Approximation als auch in der Prognose treten Ergebnisse auf, die bis zu drei Noten von ihrem Soll-Wert abweichen.

Bei Starts, die bei kriechendem Fahrzeug ausgelöst wurden, zeigt sich allerdings ein anderer Zusammenhang (Abbildung 4-22).

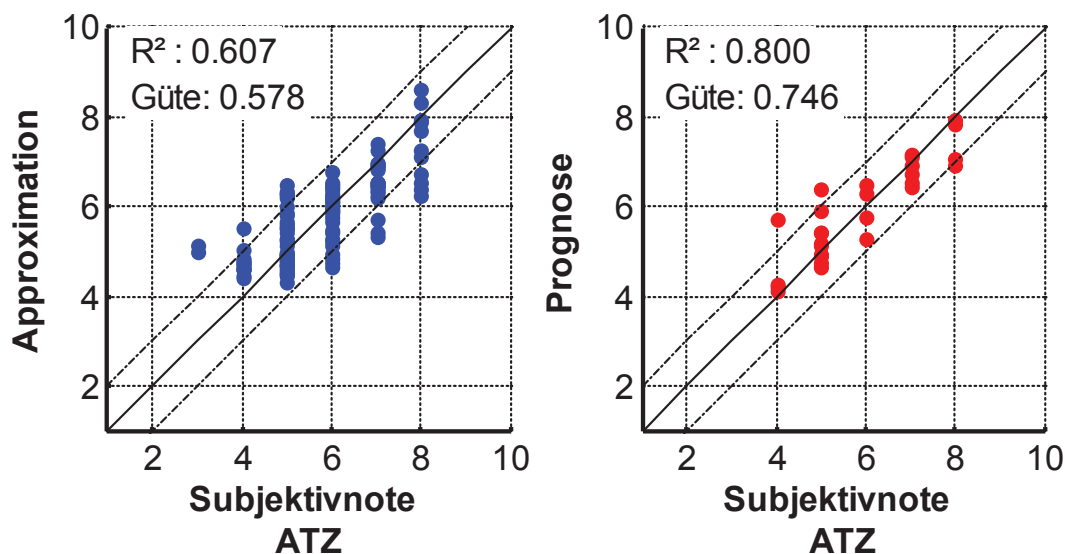


Abbildung 4-22: Alle Fahrer, Manöver Kriechen (A80-P20)

Obwohl die Datensätze aller acht Fahrer zur Modellierung genutzt wurden, konnten Güten wie bei der Modellierung einzelner Fahrer erreicht werden. Da das

durchgeführte Manöver keine Betätigung des Fahrpedals verlangte, ist in diesem Fall davon auszugehen, dass die Erwartungshaltung der Fahrer sehr einfach zu beschreiben ist:

- Keine Veränderung der Fahrzeuglängsbeschleunigung
- Keine Veränderung der momentanen Fahrzeuggeschwindigkeit

Außerdem ist eine verzögerte Umsetzung des Fahrerwunschs per Definition des Fahrmanövers ebenfalls nicht zu bewerten. Sämtliche mess- und vom Fahrer spürbaren Beschleunigungen des Fahrzeugs sind deshalb dem Diskomfort-Anteil des Wiederstartkomforts zuzuordnen. Der eigentlich mindestens zweidimensionale Komfort-Zustand wird um eine Dimension (die zeitliche Verzögerung zwischen Fahrerwunsch und Fahrzeugantwort) reduziert. Die relativ hohen Modellgüten lassen auch darauf schließen, dass alle Probanden den Diskomfort bei diesem Fahrmanöver sehr ähnlich bewerten.

Das Fahrmanöver Kriechen besitzt zudem die höchste Reproduzierbarkeit. Auf ebener Fahrbahn wird sich immer die gleiche Fahrgeschwindigkeit einstellen. Da der Fahrer keine aktiven Eingriffe vornehmen muss, ist auch die Ablenkung des Fahrers so gering wie möglich.

Auch das Manöver Anfahren 90 % zeigt vergleichsweise hohe Approximations- und Prognosegüten (Abbildung 4-23)

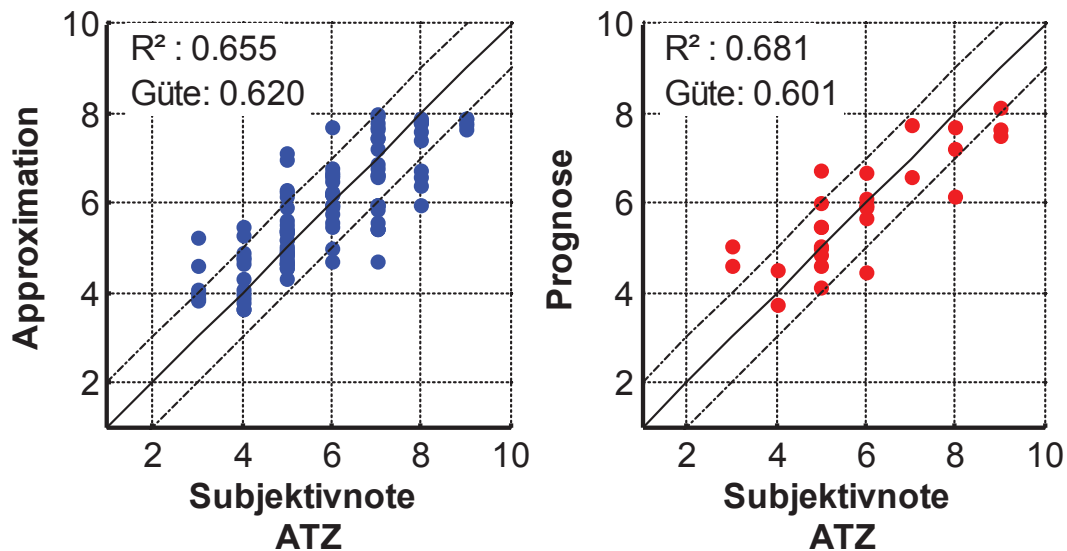


Abbildung 4-23: Alle Fahrer, Manöver Anfahren 90 % (A80-P20)

Auch hier ist aufgrund der Modellgüte davon auszugehen, dass die Fahrer eine ähnliche Erwartungshaltung besitzen. Sie werden eine maximal mögliche Beschleunigung und eine schnelle Umsetzung des Fahrerwunschs erwarten.

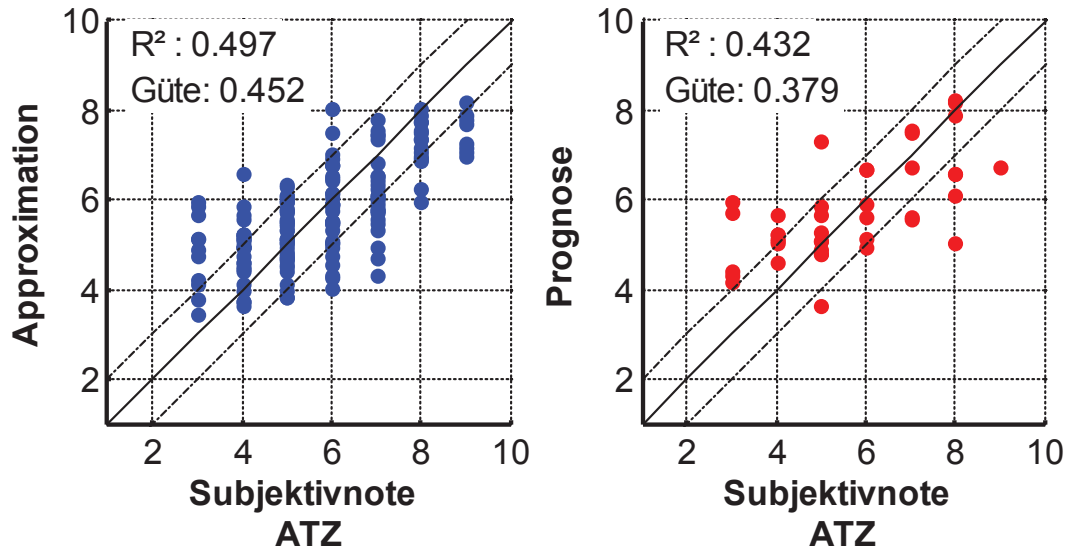


Abbildung 4-24: Alle Fahrer, Manöver Anfahren 30 % (A80-P20)

Beim Anfahren mit 30 % Pedalwert nimmt die Modellgüte wieder deutlich ab (Abbildung 4-24).

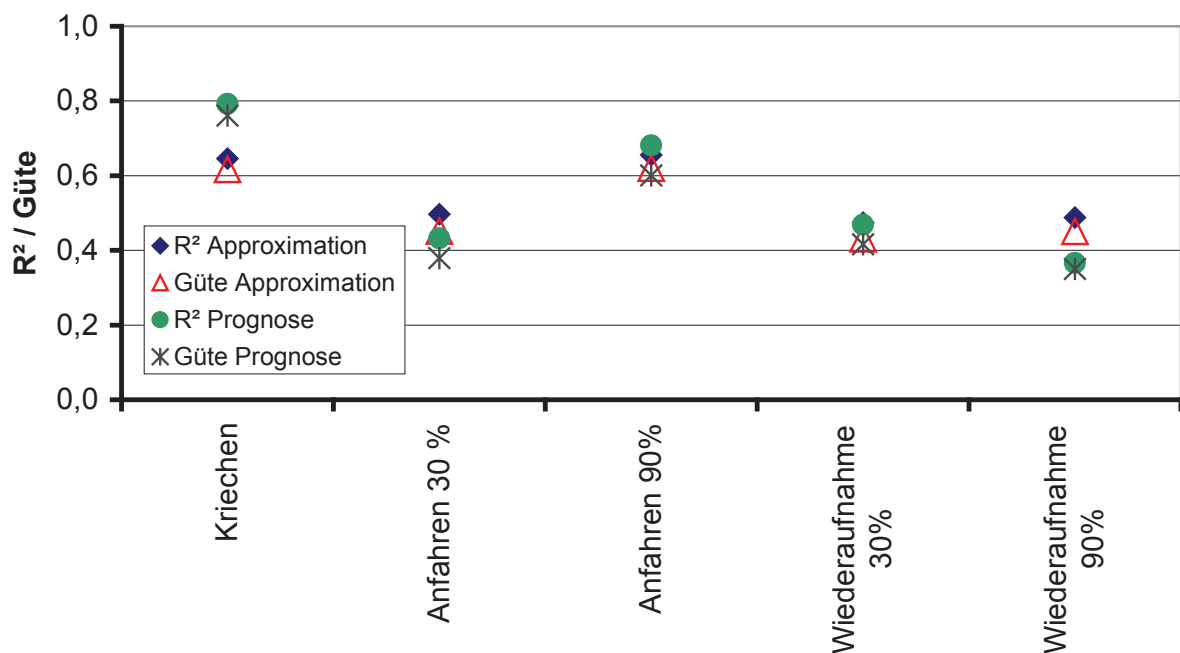


Abbildung 4-25: Fahrmanöver-spezifische Modellierung (lin. Regressionsmodell)

Wird die Modellierung des Manövers Kriechen zugrunde gelegt, besitzen alle für den Fahrversuch zur Verfügung stehenden Probanden eine sehr ähnliche Wahrnehmung des Diskomforts. Dies ist auf einen ähnlichen Erfahrungsschatz und den gewohnten Umgang mit dem untersuchten Fahrzeugtyp zurückzuführen. Bei anderen Fahrmanövern nimmt die Bewertung von Charakter-Anteilen des Komforts eine stärkere Rolle ein. Hier kommen interindividuelle Unterschiede zum Tragen.

	VDV	DZI	LatenzA	LatenzM	VDVsoil	DynK	ax_P2P	ax_mean	aMaxGradient	aMinGradient	Skewness	Kurtosis	RMS	RMQ	RMQsoil	nStart	vStart	PSD_0_1	PSD_1_2	PSD_2_3	PSD_3_4	PSD_4_5	PSD_5_6	PSD_6_7	PSD_7_8	PSD_8_9	PSD_9_10	PSD_10_15	PSD_15_20	PSD_20_30	PSD_30_40	PSD_40_50	wPedMinMax	
Kriechen																																		
Anfahren 30 %																																		
Anfahren 90 %																																		
Wiederaufnahme 30 %																																		
Wiederaufnahme 90 %																																		

Abbildung 4-26: Relevante Kennwerte, fahrmanöverspezifisch (lin. Regressionsmodell)

In Abbildung 4-26 sind die in den einzelnen Modellen nach der durchgeführten Parameter-Selektion mit Hilfe der schrittweisen Regression enthaltenen Kennwerte zusammengefasst. Wie aufgrund der Manöverdefinition zu erwarten ist, ist im Modell für das Manöver Kriechen kein Kennwert enthalten, der explizit eine Verzögerung zwischen Fahrerwunsch und Fahrzeugantwort beschreibt. Da sich auch beim Manöver Wiederaufnahme 30 % wie oben beschrieben die Fahrer sehr stark bei der Bewertung von Charaktereigenschaften des Wiederstarts - insbesondere bei der Erfassung der Hesitation - unterscheiden, was sich an der geringeren Modellgüte zeigt (Abbildung 4-25), wird hier ebenfalls keiner der beiden Kennwerte LatenzA oder LatenzM ins Modell aufgenommen.

**Modellierung von Einzelkriterien (Fahrer-spezifisch)**

Neben der Modellierung der von Probanden vergebenen Gesamtnote (z.B. nach der ATZ-Skala) sind Einzelkriterien der Komfortbewertung von Interesse, wenn Optimierungen an einem zu entwickelnden Wiederstartsystem durchgeführt werden sollen. Deshalb werden im Folgenden Modellierungen der im Fahrversuch erfassten Kriterien durchgeführt.

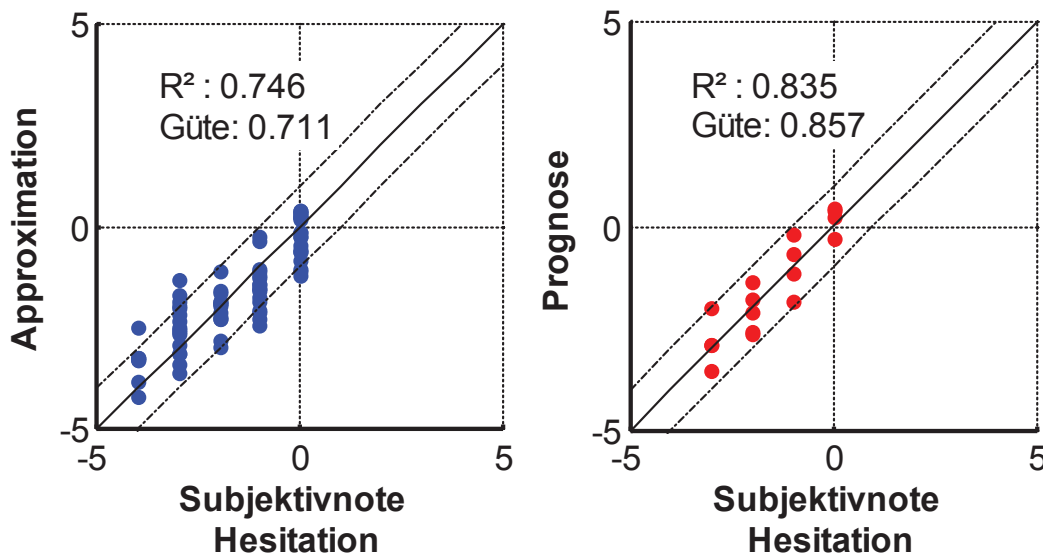


Abbildung 4-27: Fahrer A, Einzelkriterium „Hesitation“ (A80-P20)



Abbildung 4-27 zeigt die Modellierung der „Hesitation“ für Fahrer A. Dieses Kriterium ist vom Fahrer scheinbar besonders gut zu differenzieren und mit entsprechender Güte zu modellieren. Zudem unterstreicht die hohe Modellgüte die Relevanz dieses Kriteriums, da davon auszugehen ist, dass es in ungünstiger Ausprägung das Komfortempfinden beim Wiederstart besonders negativ beeinflusst.

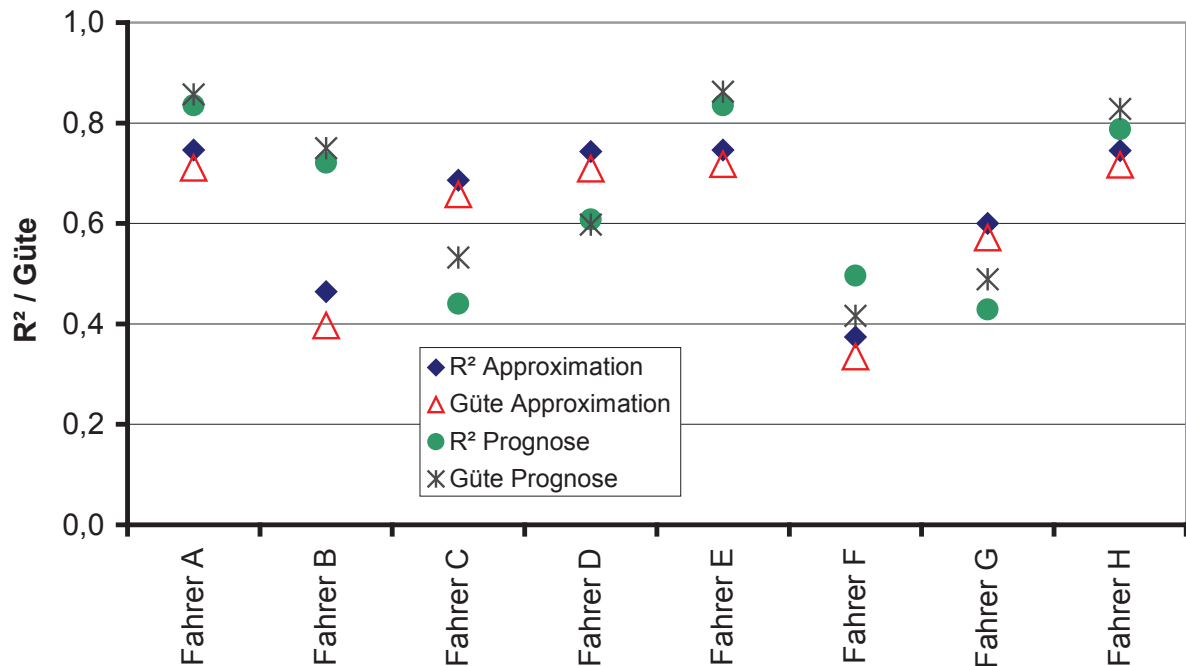


Abbildung 4-28: Übersicht Modellierung Hesitation (lin. Regressionsmodell, A80-P20)

In Abbildung 4-28 ist eine Übersicht über die Modellierung der Hesitation-Bewertung aller Fahrer dargestellt. Die Fahrer F und G zeigen eine vergleichsweise niedrige Modellgüte. Bei Fahrer G ist dies darauf zurück zu führen, dass er das Kriterium nicht bei allen Fahrmanövern differenziert bewertet.

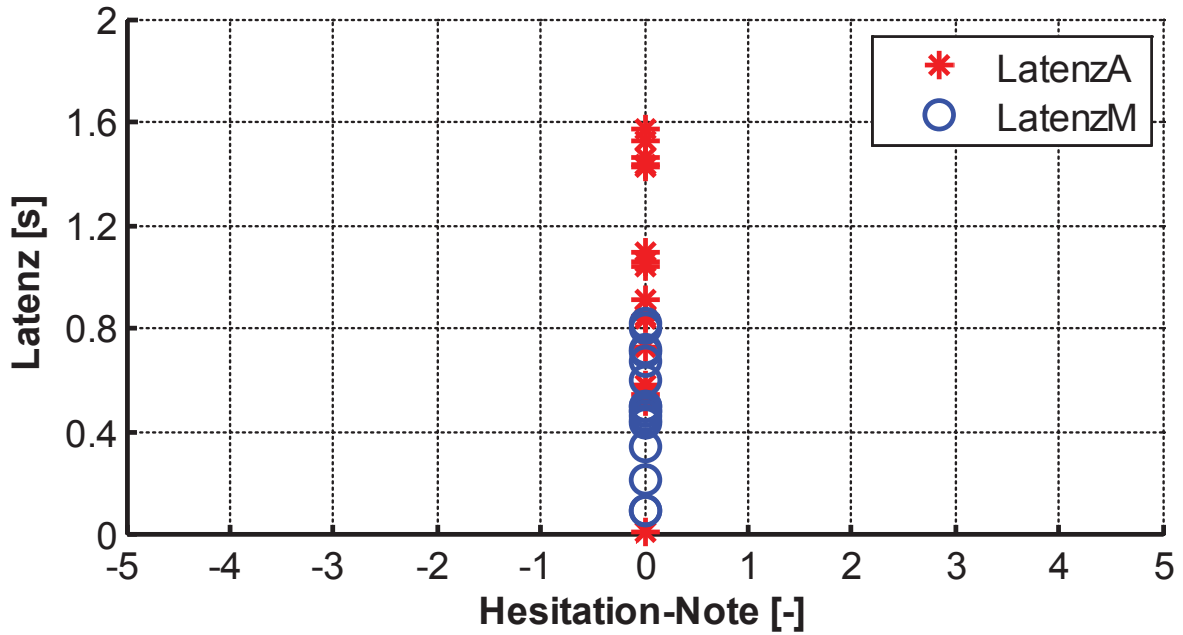


Abbildung 4-29: Fahrer G, Bewertung der Hesitation, Manöver Anfahren 30 %

Beim Anfahren mit 30 % Pedalwert nimmt er keine Differenzierung vor (Abbildung 4-29), obwohl zum Teil starke zeitliche Verzögerungen zwischen Fahrerwunsch und Fahrzeugantwort (Kennwerte LatenzA, LatenzM<sup>213</sup>) messtechnisch zu ermitteln waren.

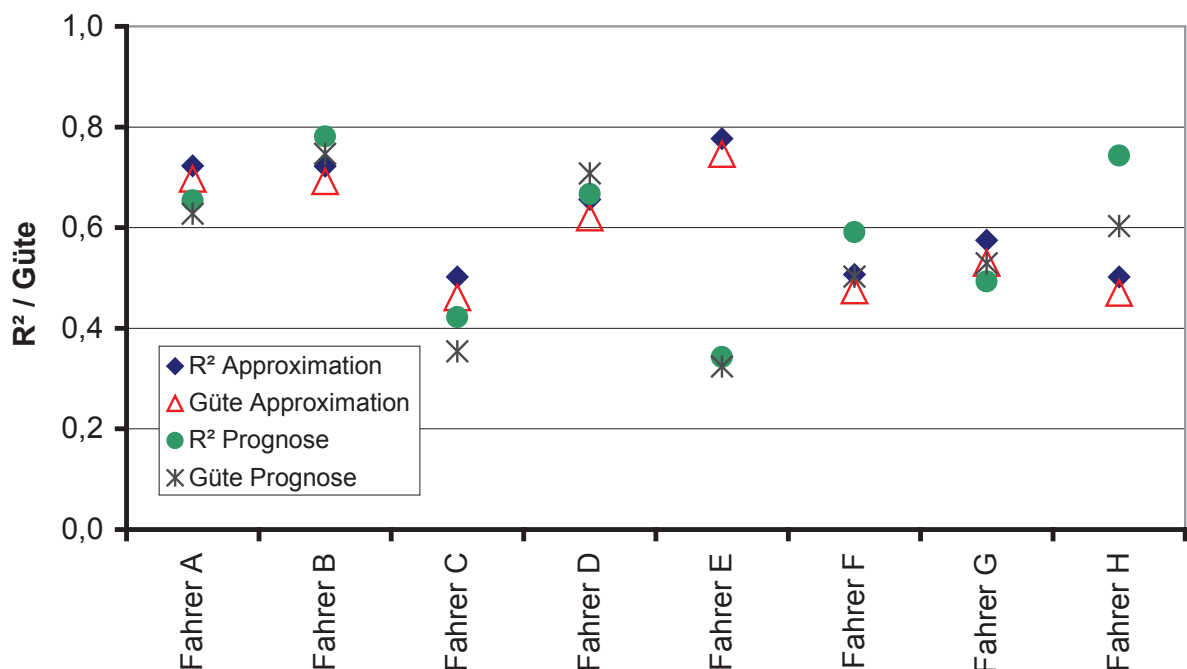


Abbildung 4-30: Übersicht Modellierung Diskomfort (lin. Regressionsmodell)

<sup>213</sup> vgl. Abschnitt 4.3.3

In Abbildung 4-30 ist die Modellierung des Kriteriums Diskomfort für alle Fahrer zusammenfassend dargestellt. Ähnlich wie bei den oben dargestellten Zusammenfassungen zeigen sich zwischen den Fahrern, obwohl sie alle als Experten betrachtet werden können, erhebliche Unterschiede in der Modellierung des betrachteten Einzelkriteriums.

### 4.3.6.2 Objektivierung mit künstlichen neuronalen Netzen

Lerspalungsanti<sup>214</sup> weist darauf hin, dass die Nachbildung der menschlichen Komfortbeurteilung mit Hilfe künstlicher neuronaler Netze nicht nur fundierte Kenntnisse der KNN selbst, sondern auch Erfahrungen mit der Anwendung von KNN erfordert. Wie in Kapitel 2.7.3.2 beschrieben, kann eine Vielzahl von Parametern eines KNN vom Entwickler genutzt werden, um ein KNN-Modell aufzubauen. Er hat die Aufgabe die folgenden Parameter so zu bestimmen, dass eine geeignete Netzstruktur für die vorliegende Problemstellung bereitgestellt wird.

Als Parameter stehen zur Verfügung:

- Art und Anzahl der Eingangsneuronen (entspricht der Anzahl der objektiven Kenngrößen)
- Anzahl der verdeckten Schichten
- Anzahl der Neuronen in der jeweiligen verdeckten Schicht
- Aktivierungsfunktion der Eingangsschicht
- Aktivierungsfunktion der jeweiligen verdeckten Schicht
- Aufteilung der Datensätze in Trainings-, Validierungs- und Verifikationsdaten
- Initialisierungsfunktion
- Anzahl der Initialisierungen
- Trainingsalgorithmus
- Trainingsparameter in Abhängigkeit des gewählten Trainingsalgorithmus
- maximale Anzahl der Trainingsepochen
- Fehlerfunktion zur Minimumsuche (Performance-Funktion)
- Anwendung des „Early-Stopping“ Abbruchkriteriums
- Minimaler Verbesserungsgrad (falls Early-Stopping verwendet wird)

---

<sup>214</sup> Lerspalungsanti 2010

- Maximale Trainingsepoche ohne Performance Steigerung (bei Verwendung des Early-Stopping-Verfahrens).

Weiterhin stellt Lerspalungsanti fest, dass das Finden einer geeigneten Netz-Struktur und -Parametrierung einen hohen Programmieraufwand erfordert. Deshalb wurde das „IPEK Driver Modeling Tool“ zur Modellierung des menschlichen Komfortempfindens entwickelt<sup>215</sup>. Es stellt ein leicht handhabbares Werkzeug mit einer benutzerfreundlichen Oberfläche (GUI) dar, wodurch auch Nutzer, die über wenig Programmier-Erfahrung oder wenige Kenntnisse im Umgang mit KNN verfügen, in die Lage versetzt Bewertungsmodelle auf Basis von KNN zu erstellen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde das vorhandene Werkzeug weiterentwickelt. Ziele dieser Weiterentwicklung waren im Wesentlichen:

- Flexiblere Datenauswahl
- Freiere Gestaltung der Pattern-Files
- Schlankere Darstellung der Benutzeroberfläche
- Nutzbarkeit mehrerer verdeckter Schichten
- Verbesserte interne Programmierung

In Abbildung 4-31 ist die geänderte Oberfläche dargestellt.

---

<sup>215</sup> Albers et al. 2008b, Lerspalungsanti 2010

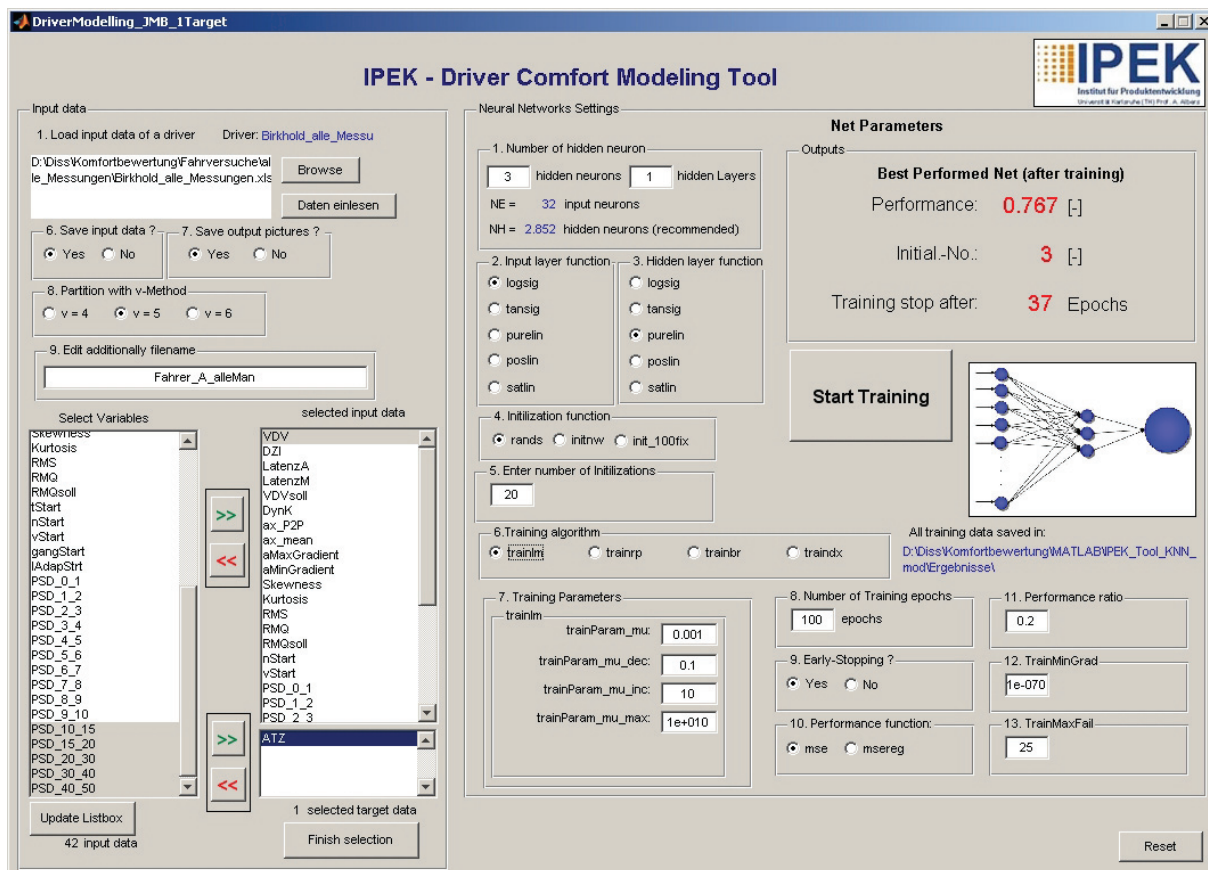


Abbildung 4-31: Oberfläche des weiterentwickelten Tools zum Training neuronaler Netze

Im linken Teil der Oberfläche finden die Dateiauswahl, die Einstellung grundsätzlicher Programmeigenschaften sowie die Auswahl von Eingangs- und Zielgrößen (Target) für das KNN statt. Ausgewählt werden können Dateien im Microsoft-Excel-Format (Dateiendung \*.xls), die gemäß Abbildung 4-32 strukturiert sind.

Parameter-bezeichnung	Datensatz 1	Datensatz 2	...	Datensatz n
Zielgröße 1	<Wert>	<Wert>	<Wert>	<Wert>
Zielgröße 2	<Wert>	<Wert>	<Wert>	<Wert>
Parameter 1	<Wert>	<Wert>	<Wert>	<Wert>
Parameter 2	<Wert>	<Wert>	<Wert>	<Wert>
...	...	...	...	...
Parameter m	<Wert>	<Wert>	<Wert>	<Wert>

Abbildung 4-32: Strukturierung der Pattern-Files zum KNN-Training

In der ersten Spalte der Tabelle muss die Bezeichnung der objektiven Kenngröße oder der jeweiligen Zielgröße stehen. Die Reihenfolge und Position kann dabei beliebig gewählt werden und kann beliebig viele Targets und Parameter enthalten. Dadurch kann ein Pattern-File beispielsweise verschiedene Komfort-Noten oder -Kriterien enthalten, die dann je nach zu erstellendem Modell ausgewählt werden können. Die Datensätze aus einzelnen Versuchen sind spaltenweise angeordnet.

Durch Betätigen der Schaltfläche „Daten einlesen“ wird das Pattern-File eingelesen, konvertiert und anschließend wird die Liste aller auswählbaren Parameter in der im GUI links unten dargestellten Auswahlfenster angezeigt. Mit Hilfe der Auswahl- und Abwahl-Pfeile können jeweils Eingangsgrößen und Zielgrößen für das Netz-Training ausgewählt werden. Mit der Schaltfläche „Finish Selection“ wird die Datenauswahl beendet und die Modellerstellung kann mit der Parametrierung des Netzes und des Netz-Trainings fortgesetzt werden.

Wie im ursprünglichen Werkzeug erfolgt die Auswahl der oben genannten Netzparameter wie z.B. der Anzahl der verdeckten Neuronen oder die Festlegung der Trainingsparameter durch Eingabe im rechten Bereich Teil des GUI. Um die Bedienung weiter zu erleichtern, werden nur noch die für den gewählten Trainingsalgorithmus verfügbaren Parametrierungsmöglichkeiten angezeigt. Dadurch ergibt sich eine übersichtlichere Darstellung, die insbesondere einem ungeübten Nutzer das Arbeiten mit dem Werkzeug erleichtert. Mit dem Schaltfeld „Start Training“ wird das Netz trainiert und mit den Test-Datensätzen validiert, sofern das „Early-Stopping“ als Abbruchkriterium aktiviert wurde. Zur Überprüfung des erreichten Trainingsfortschritts wird das Netz mit den Verifikations-Daten simuliert und die sich ergebenden Prognosegüten sowie weitere Informationen im Feld „Outputs“ angezeigt. Das Netz, das nach abgeschlossenem Training die höchste Prognosegüte erreicht, wird im Ablageverzeichnis abgelegt und steht dann für die weitere Verwendung zur Verfügung.

### **Modellierung der Gesamtnote mit KNN (Fahrer-spezifisch)**

Wie bei der Objektivierung mit den Methoden der linearen Regression wurden zunächst KNN-Modelle für jeden einzelnen Fahrer erstellt, wobei das oben beschriebene Werkzeug zur Erzeugung und zum Training der KNN verwendet wurde. Im Gegensatz zu den Regressionsmodellen wurden keine Kollinearitäten zwischen verschiedenen objektiven Kennwerten in die Objektivierung einbezogen. Wie oben bereits erwähnt findet die Beurteilung der erreichten Netz-Qualität anhand des Gütekriteriums  $G$  statt.

Abbildung 4-33 zeigt das Ergebnis der Modellierung der von Fahrer A vergebenen Gesamtnoten für die während der verschiedenen Fahrmanöver erlebten und

beurteilten Wiederstarts. Dargestellt sind die Trainingsergebnisse als blaue Punkte (Approximation), sowie die Ergebnisse die aus der Simulation des trainierten Netzes mit den Verifikationsdaten ermittelt wurden als rote Dreiecke (Prognose). Die Winkelhalbierende, die die optimale Modellgüte beschreibt, sowie die Markierungen des Bereichs, in dem die Abweichung eine Note beträgt, sind gestrichelt dargestellt.

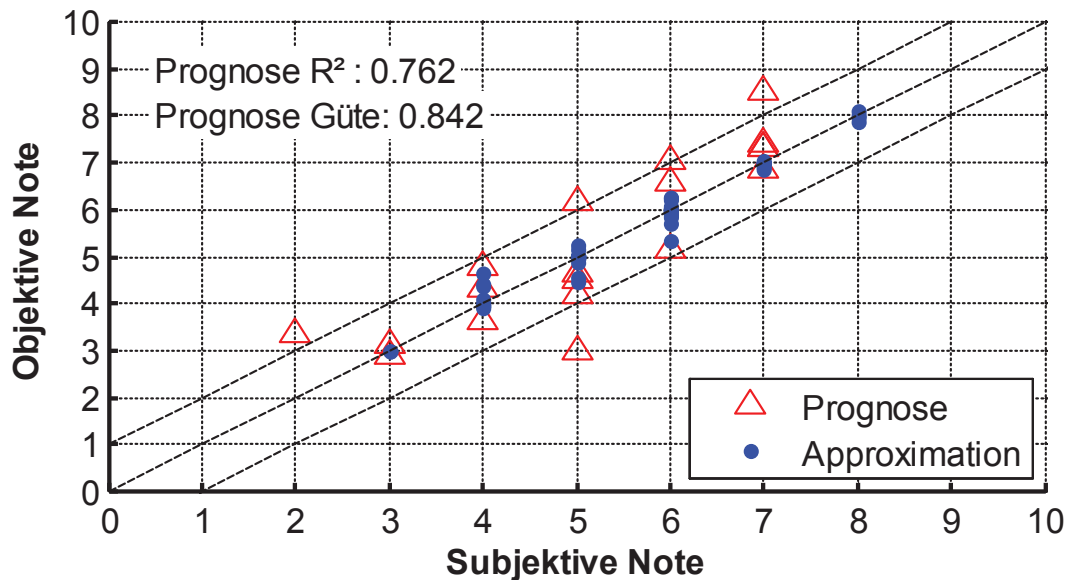


Abbildung 4-33: Fahrer A, Approximation und Prognose Gesamtnote (KNN)

Für die Prognosegüte ergibt sich für Fahrer A ein Wert von 0,842 und liegt damit im Vergleich zum linearen Regressionsmodell<sup>216</sup> um etwa 0,18 höher.

<sup>216</sup> vgl. Abbildung 4-17

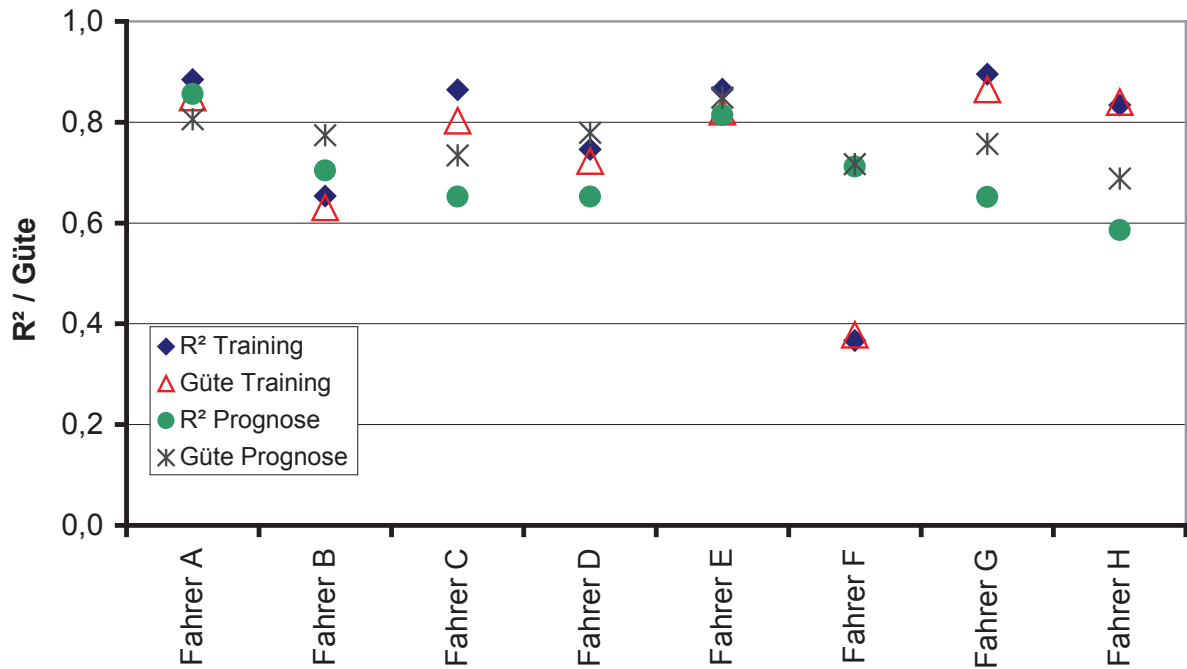


Abbildung 4-34: Modellierung der Gesamtnote mit KNN (R<sup>2</sup> und Güten)

In Abbildung 4-34 ist die Modellierung der Gesamtnoten, die von den verschiedenen Probanden vergeben wurden, zusammengefasst. Mit Ausnahme von Fahrer F befinden sich die Bestimmtheitsmaße (R<sup>2</sup>) und die Güten von Training und Prognose im Bereich von etwa 0,6 bis 0,9. Die durchschnittliche Prognose-Güte aller Bewerter beträgt 0,768. Sie betrug bei der Modellierung mit der schrittweisen Regression<sup>217</sup> etwa 0,63. Damit zeigt sich die bessere Modellierungsfähigkeit von KNN im Vergleich zu den Methoden der linearen Regression in Bezug auf das menschliche Komfortempfinden.

Auffällig ist in Abbildung 4-34 die starke Abweichung zwischen Trainings- (Approximation) und Prognose-Güte bei Fahrer F. Zudem übersteigt die Prognose-Güte die Approximationsgüte deutlich. Dies kann durch statistische Effekte bedingt sein, die bei der Aufteilung der Datensätze in Trainings-, Validierungs- und Test-Datensätze auftreten können.

### Modellierung der Gesamtnote mit KNN (Fahrmanöver-spezifisch)

Auch bei der Fahrmanöver-spezifischen Auswertung mit KNN (Abbildung 4-35) ergibt sich ein ähnliches Bild wie bei der Regressionsanalyse<sup>218</sup>, die Güte der Modellierung liegt dabei durchschnittlich über den mit den Regressionsmodellen erzielten Werten.

<sup>217</sup> vgl. Abbildung 4-19

<sup>218</sup> vgl. Abbildung 4-25



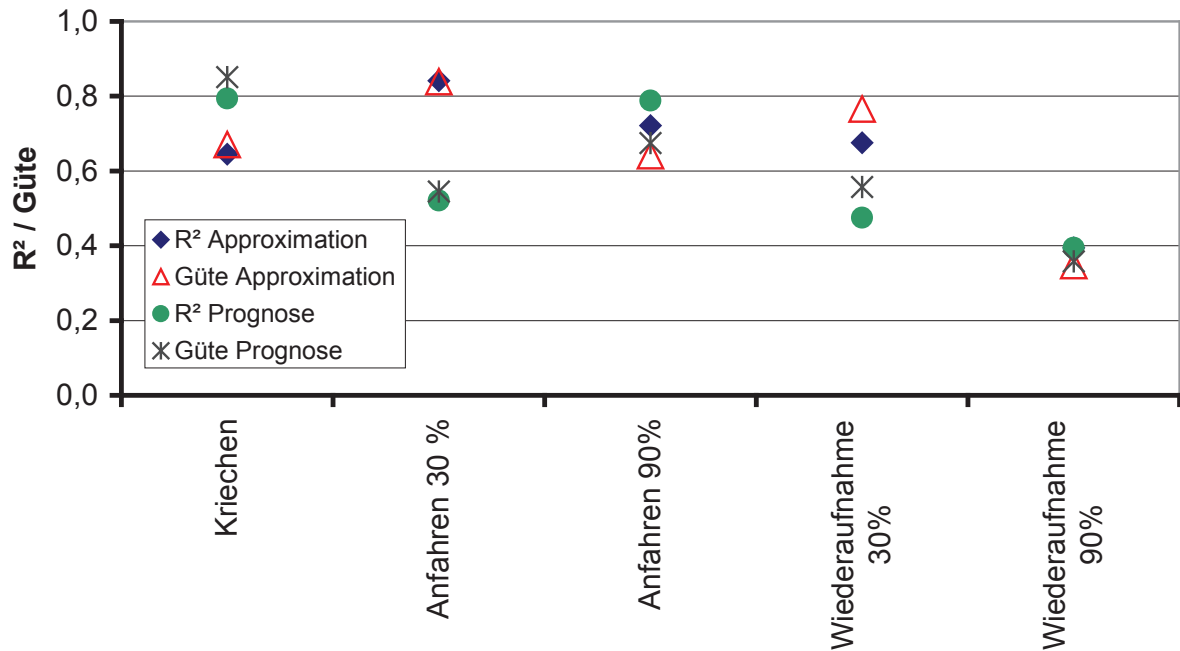


Abbildung 4-35: Fahrmanöverspezifische Modellierung Gesamtnote (KNN)

Die Manöver Kriechen und Anfahren 90% werden im Vergleich zu den übrigen Manövern mit höheren Güten bei der Approximation und der Prognose modelliert. Dies unterstützt die Vermutung, dass sich die Erwartungshaltungen der einzelnen Fahrer bei diesen beiden Fahrversuchen stärker ähneln.

### Modellierung von Einzelkriterien mit KNN (Fahrer-spezifisch)

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Objektivierung der im Fahrversuch abgefragten Einzelkriterien „Hesitation“ und „Diskomfort“ mit Hilfe der KNN vorgestellt.

Abbildung 4-36 zeigt die Modellierung der von Fahrer H bewerteten Hesitation.

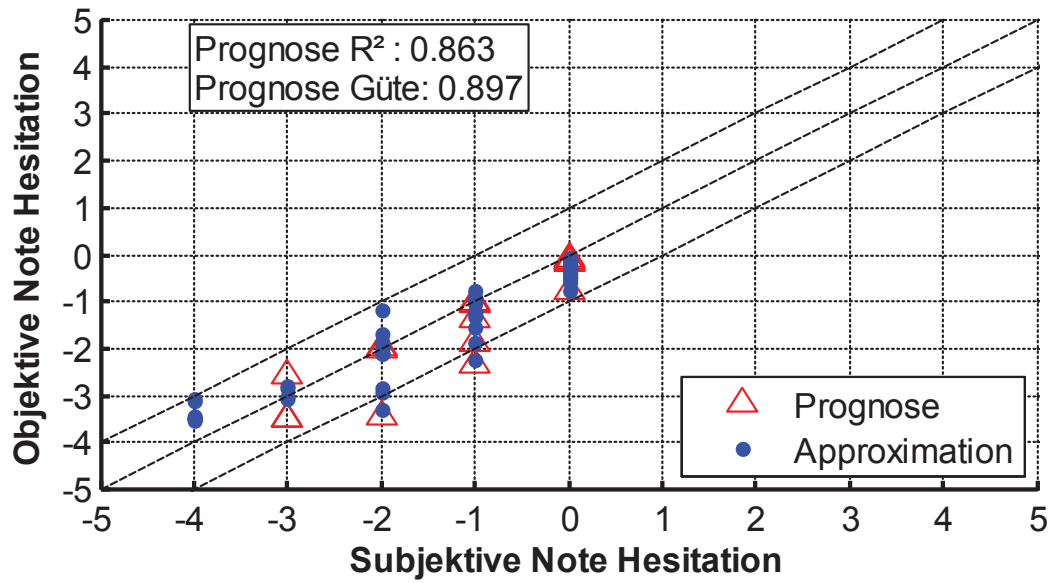


Abbildung 4-36: Fahrer H, Approximation und Prognose Hesitation (KNN)

Mit einer Prognose-Güte von fast 0,9 wird ein vergleichsweise hoher Wert erreicht. Doch auch die Modellierungen für alle weiteren Fahrer erreichen Werte von über 0,6 bis 0,9, der Durchschnitt liegt bei etwa 0,80 (Abbildung 4-37).

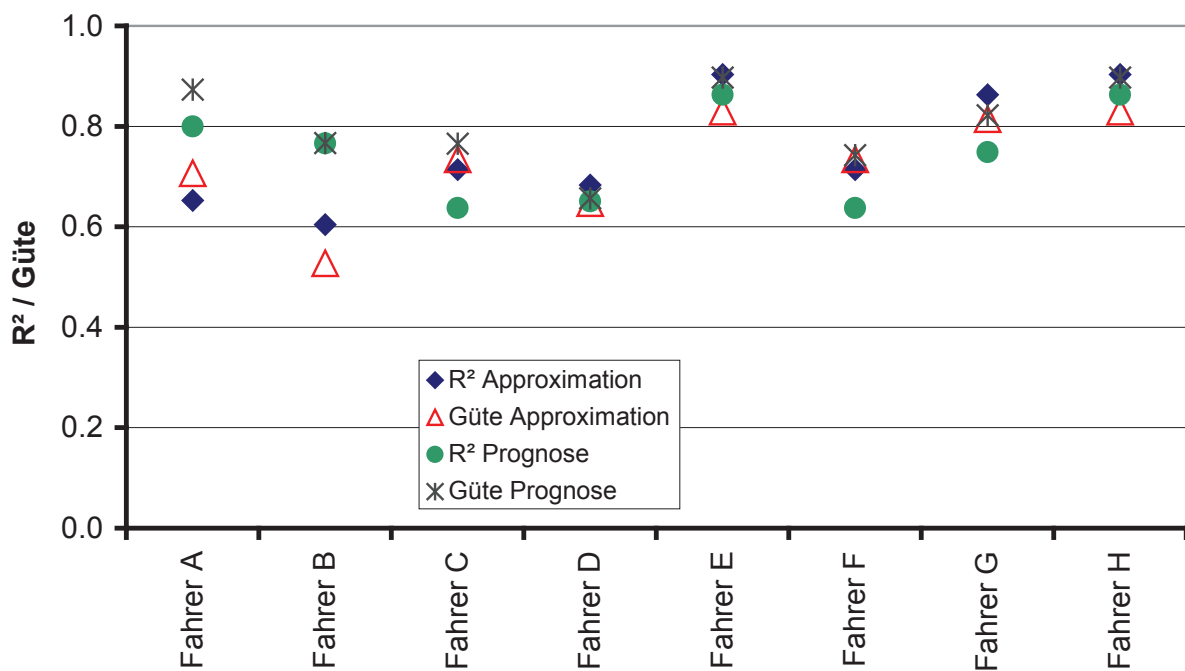


Abbildung 4-37: Alle Fahrer, Approximation und Prognose Hesitation (KNN)

Die Modellierung der Bewertung dieses Kriteriums mit linearen Regressionsmodellen<sup>219</sup> war hier offenbar nicht in der Lage relevante Zusammenhänge zwischen den Kennwerten und den von den Probanden vergebenen Noten nachzubilden. Die Versuchsplanung mit Hilfe der linearen DOE setzt als Bedingung einen linearen Zusammenhang zwischen Parameter und Wirkung voraus. Bei der Manipulation der Ansprechverzögerung des Fahrzeugs über ein einfaches Totzeit-Glied ist dies gewährleistet, da dieser Parameter direkt in die Steuerung eingeht. Die Probanden scheinen hier also das Kriterium Hesitation nicht unabhängig von anderen Bewertungsgrößen erfassen und differenziert bewerten zu können.

In Abbildung 4-38 ist die Modellierung des Kriteriums Diskomfort für Fahrer C dargestellt. Die Prognose erreicht eine Güte von  $G = 0,746$ . Dabei liegen mit einer Ausnahme alle berechneten objektiven Noten im Bereich von maximal einer Note Abweichung von der subjektiven Note.

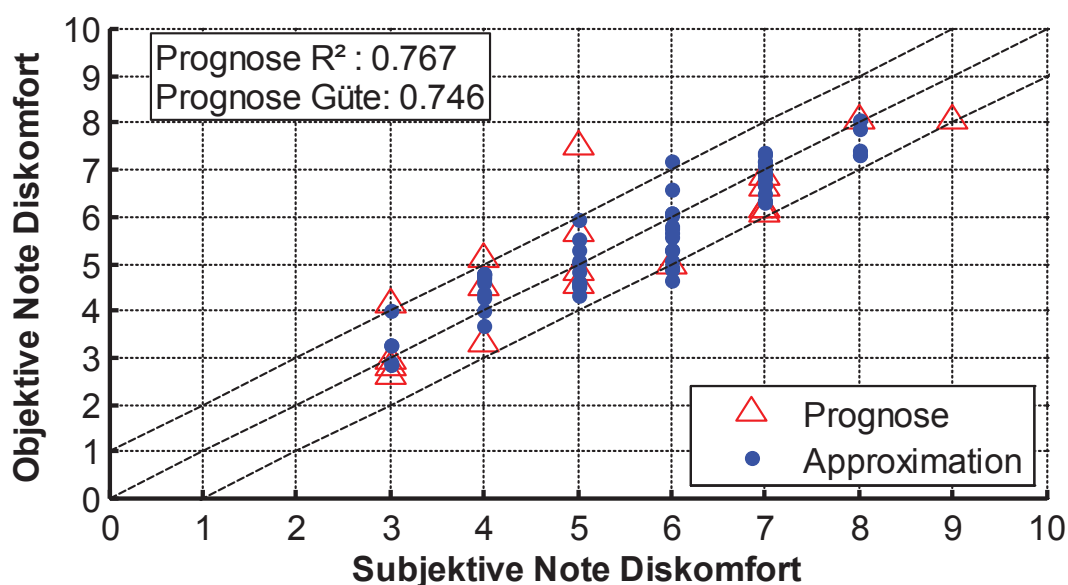


Abbildung 4-38: Fahrer C, Approximation und Prognose Diskomfort (KNN)

Auch für die übrigen Probanden ergeben sich überwiegend Güten mit einem Wert um 0,8. Lediglich die Bewertungen der Fahrer F und G werden schlechter abgebildet (Abbildung 4-39). Schon bei der Modellierung des Komfortempfindens zur Ermittlung der Gesamtnote<sup>220</sup> ergaben sich für Fahrer F im Vergleich zu den anderen Probanden geringere Modellgüten. Er scheint deshalb eine höhere Varianz seiner Bewertung zu besitzen als die übrigen Fahrer.

<sup>219</sup> vgl. Abbildung 4-28

<sup>220</sup> vgl. Abbildung 4-34

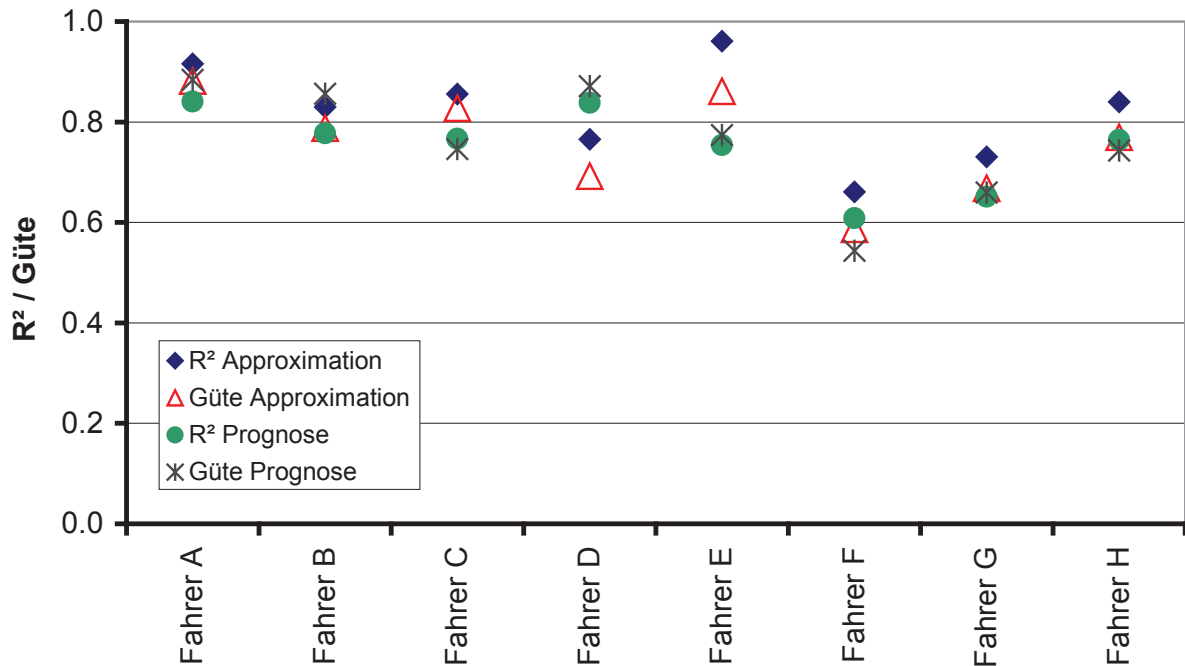


Abbildung 4-39: Alle Fahrer, Approximation und Prognose Diskomfort (KNN)

Güte und Bestimmtheitsmaß  $R^2$  von Approximation und Prognose liegen bei allen Fahrern in einem kleinen Bereich. Diese Streuung ist bei der Modellierung der Gesamtnote und des Kriteriums Hesitation größer. Dieser Sachverhalt kann folgendermaßen interpretiert werden:

Durch die Aufteilung aller Datensätze in Trainings-, Validierungs- und Testdatensätze können unter Umständen Parametersätze für die Berechnung der prognostizierten Noten verwendet werden, die eine höhere Varianz aufweisen als die für Training und Validierung (bei Anwendung des Early-Stopping-Verfahrens) eingesetzten. Damit könnte eine hohe Approximations-Güte erzielt werden. Aufgrund der höheren Varianz der Testdaten wird das Modell diese dann ungenauer abbilden, was eine geringere Prognosegüte zur Folge hätte. Weichen Approximation und Prognose nur wenig voneinander ab (wie in Abbildung 4-39) kann dies zwei Gründe haben:

- Die KNN sind bei der Modellierung in der Lage die unterschiedlichen Varianzen zu erkennen und das Modell entsprechend anzupassen.
- Trainings-, Validierungs- und Testdatensätze wurden so aufgeteilt, dass alle Datensätze sehr ähnliche Varianzen besitzen, womit sich auch ähnliche Approximations- und Prognose-Güten ergeben

Da aber die Testdaten dem KNN während des Trainings nicht zur Verfügung gestellt werden und damit für das Netz unbekannt bleiben, kann von letzterer Hypothese ausgegangen werden. Somit zeigt sich, dass die Bewertung des Einzelkriteriums Diskomfort den meisten der untersuchten Probanden am besten gelingt, da hier die

Güte-Unterschiede zwischen Approximation und Prognose am geringsten sind und die mittlere Prognose-Güte bei Vernachlässigung der Fahrer F und G mit 0,81 höher liegt als bei der Modellierung der vergebenen Gesamtnote und des Kriteriums Hesitation.

### 4.3.6.3 Zusammenfassung der Objektivierungs-Ergebnisse

Mit Hilfe der linearen Regressionsmodelle konnten zum Teil schon zufrieden stellende Ergebnisse erzielt werden. Die Analysen zeigen, dass die Kennwerte zur Beschreibung der Hesitation, der vom Fahrer erlebten Längsschwingen und der minimale Beschleunigungsgradient eine hohe Relevanz für den Wiederstartkomfort besitzen. Beim Manöver „Kriechen“ kann sogar ein fahrmanöverspezifisches Komfortmodell das Empfinden übergreifend über alle Fahrer vergleichsweise gut modellieren, was sich mit der Reproduzierbarkeit und der Reduzierung des Komfortzustandes auf den Diskomfort begründen lässt.

Die Modellierung mit Hilfe der KNN zeigt deutlich höhere Modellgüten, erfordert aber einen höheren Aufwand bei der Erstellung und dem Training der Netze. Dieser Aufwand kann allerdings mit den vorgestellten Werkzeugen begrenzt werden. Bei der Modellierung der Einzelkriterien Hesitation und Diskomfort können die besten Güten erreicht werden.

Wie bei anderen in der Literatur erwähnten Komfortobjektivierungen kann auch hier keine Güte von eins erreicht werden. Dennoch zeigt die Objektivierung der Einzelkriterien ein großes Potential Entwicklungsingenieure bei der Bewertung und Optimierung des Wiederstartsystems in parallelen Hybrid-Antriebssträngen zu unterstützen.

Außerdem zeigen die Untersuchungen, dass die hier als Probanden zur Verfügung stehenden Experten zwar den Diskomfort aufgrund ihres Erfahrungsschatzes gut differenzieren können. Bei der Bewertung von Charaktergrößen und der Beschreibung von Einzelkriterien erscheinen sie ungeübter zu sein. Dies könnte beispielsweise durch ein gezieltes Training der bewertenden Personen verbessert werden.

## 4.4 Implementierung der Methode

Zur Durchführung von Fahrversuchen zur Wiederstartkomfort-Bewertung wurde ein grafisches Werkzeug zur Erfassung von Messdaten aus dem Fahrzeug und zur Eingabe subjektiver Noten für das zu bewertende Ereignis entwickelt. Es wurde in

MATLAB<sup>221</sup> erstellt und verfügt über eine grafische Oberfläche zur einfachen Anwendung. Zur Aufnahme von Fahrzeugmessdaten wird eine Schnittstelle zwischen MATLAB und der Mess- und Applikationssoftware INCA genutzt (INCA MIP<sup>222</sup>). Der Aufbau des Werkzeugs und seine einzelnen Module werden im Folgenden erläutert.

#### 4.4.1 Erfassung von Fahrzeugdaten

Ein in der Automobilindustrie zur Applikation und Kalibrierung von Steuergeräten sehr häufig eingesetztes Werkzeug ist die Software INCA der Firma ETAS<sup>223</sup>. INCA ist in Verbindung mit der notwendigen Messtechnik in der Lage, Informationen aus verschiedenen Datenquellen (CAN-Bus, Steuergeräte-Speicher) auszulesen, darzustellen und abzuspeichern.

Das INCA MIP ist eine Programmierschnittstelle, über die die viele Funktionalitäten von INCA mit Hilfe von MATLAB angesteuert werden kann. Damit können insbesondere Messdaten, die in einem INCA-Messexperiment enthalten sind, gelesen und in MATLAB übertragen sowie im Experiment hinterlegte Parametrierungen von Steuergeräte-Algorithmen (Verstelldaten) verändert werden.

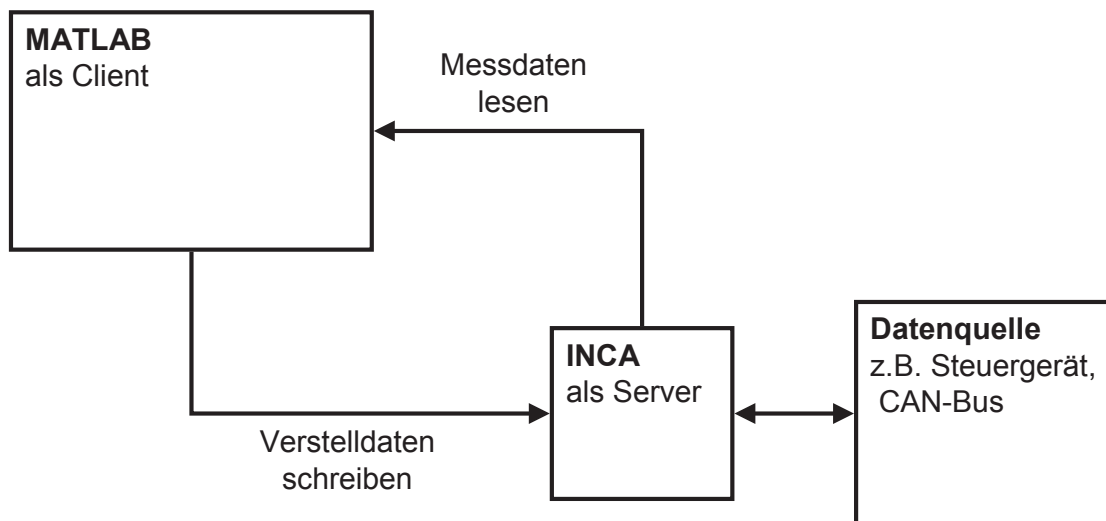


Abbildung 4-40: Kommunikation zwischen MATLAB und INCA<sup>224</sup>

Abbildung 4-40 zeigt schematisch ein Anwendungsbeispiel der Schnittstelle. MATLAB agiert als Client, der auf die Ressourcen von INCA als Server zugreift.

<sup>221</sup> MathWorks, [www.mathworks.com](http://www.mathworks.com)

<sup>222</sup> MIP: MATLAB Integration Package, [www.etas.com](http://www.etas.com)

<sup>223</sup> ETAS GmbH, [www.etas.com](http://www.etas.com)

<sup>224</sup> nach ETAS 2006

Auf den verschiedenen Daten-Bussen können Messsignale in unterschiedlichen Frequenzen abgetastet werden. Die Abtastrate wird auch als Messraster bezeichnet. Signale, die demselben Messraster zugehören, werden als Mess- oder Signalgruppe zusammengefasst, die mindestens ein Signal enthält. Jede Messgruppe besitzt einen eindeutigen Namen.

Zur Gewährleistung der zuverlässigen Datenübertragung zwischen INCA und MATLAB wird für jede Messgruppe ein Ringpuffer zur Zwischenspeicherung der Daten verwendet. Diese Speicher können aus MATLAB heraus periodisch ausgelesen und anschließend weiterverarbeitet werden.

#### 4.4.2 Software-Module und GUI zur Versuchsdurchführung

Für die Aufzeichnung, Auswertung und Bewertung von Wiederstarts wurden in MATLAB verschiedene Module implementiert und in eine grafische Benutzeroberfläche (GUI) integriert. Die Modulstruktur erlaubt es sowohl das GUI zur Untersuchung anderer Phänomene einzusetzen als auch einzelne Elemente in andere Software-Anwendungen zu integrieren. Module und GUI werden im Folgenden vorgestellt.

##### Module zur Signaldefinition und Aufzeichnung

Um Messsignale zwischen INCA und MATLAB austauschen zu können, muss zunächst die Schnittstelle zwischen den beiden Umgebungen initialisiert werden. Anschließend können die Signale definiert werden, die von INCA in MATLAB übertragen und dort weiter verarbeitet werden sollen. Die Definition der Messgrößen erfolgt dabei anwenderfreundlich in einer Excel-Tabelle, die die in Abbildung 4-41 gezeigten Informationen beinhalten muss.

Signalname	Datenquelle	Zeitraster/ CAN-Frame	Abtastfrequenz [Hz]	Interpolationsart
Moment_Motor	CAN-1	frame_1	200	linear
Drehzahl_Motor	ETK	10ms	100	linear
Status_Kupplung	CAN-2	frame_1	200	nearest

Abbildung 4-41: Tabelle zur Signal-Definition

Der Signalname muss dabei exakt dem Namen in der Beschreibungsdatei für die CAN-Signale bzw. der Definition im Steuergerät entsprechen. Die Datenquelle beschreibt, welchem Bussystem oder welcher Kommunikationsschnittstelle die Messgröße entnommen wird. Zusätzlich ist die Angabe des für das Signal

verwendete Zeitraster oder CAN-Frame erforderlich, womit sich auch die Zuordnung zur jeweiligen Messgruppe ergibt. Für die Datenverarbeitung in MATLAB sind zudem die Abtastfrequenz und die Interpolationsart („linear“ oder „nearest“) für die spätere Datenkonvertierung anzugeben. Signale, die nur diskrete Werte annehmen, sollten immer mit der Methode „nearest“ interpoliert werden, um zu verhindern, dass Zwischenwerte erzeugt werden. Dadurch werden spätere Probleme bei der Auswertung und Kennwertberechnung vermieden. Neben den für die vorgesehenen Auswertungen notwendigen Signalen können beliebig viele weitere Messgrößen in die Tabelle aufgenommen werden, um zusätzliche Informationen zu erhalten.

Die Tabelle wird von einer in MATLAB implementierten Funktion eingelesen und nach Messgruppen sortiert. Eine Messgruppe fasst schließlich alle Signale einer Datenquelle mit demselben Zeitraster zusammen. Jede Messgruppe wird anschließend in INCA angelegt und in das Messexperiment integriert.

Um den Datenabruf aus den INCA-Ringpuffern nicht unnötig zu bremsen, werden die Daten in Ringpufferspeichern mit einer Messdauer von 20 Sekunden abgelegt, die in MATLAB implementiert sind und deren Speicherbedarf schon bei der Initialisierung des Programms reserviert wird. Für jede Messgruppe wird ein separater Ringpuffer verwendet, dessen Größe sich aus Abtastfrequenz und Messdauer errechnet. Die Daten werden periodisch abgerufen und in den Ringpuffern abgelegt. Bei der Ringspeicherarchitektur existieren zwei Varianten:

- Rundschieberegister mit Zeigerbit auf den neuesten Eintrag
- Anhängen neuer Daten an die bisher aufgezeichneten und anschließendes Zurechtschneiden der Datenmenge

Für die Implementierung in MATLAB wurde die erste Variante gewählt, da sie eine etwas günstigere Rechengeschwindigkeit bietet. Dieser Vorsprung begründet sich aus der mögliche Speicherreservierung (Preallokation). Die zweite Variante kann grundsätzlich ebenfalls eine Speicherallokation nutzen, verliert aber durch zusätzlich notwendige Vergleichsoperatoren an Performance<sup>225</sup>.

### **Module zur Trigger-Definition und -Überwachung**

Da auftretende Ereignisse automatisch erkannt und aufgezeichnet werden sollen, wurde ein Modul zur Definition von Trigger-Bedingungen implementiert. Die Definition erfordert den Namen des zu überwachenden Signals, einen Vergleichsoperator, einen Vergleichswert sowie die Angabe einer Nachlaufzeit. Das

---

<sup>225</sup> Stangier 2009



zu überwachende Signal muss dabei in der Definitions-Tabelle für die Messsignale enthalten sein. Somit können beliebige Ereignisse wie z.B. die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Wiederstarts oder Getriebebeschaltungen erfasst werden. Dabei können beliebig viele Trigger-Bedingungen festgelegt werden. Sie werden in der Tabelle „Trigger-Definitions-Matrix“ abgelegt. Sie enthält die in Abbildung 4-42 dargestellten Informationen zu Signal, Triggerbedingung und Nachlaufzeit. Die Nachlaufzeit gibt an, wie lange die Aufzeichnung nach Erfüllung der Trigger-Bedingung fortgesetzt werden soll.

Signalname	Triggerbedingung	Nachlaufzeit
<Name 1>	<Bed. 1>	<Wert 1>
<Name 2>	<Bed. 2>	<Wert 2>
<...>	<...>	<...>
<...>	<...>	<...>

Abbildung 4-42: Trigger-Definitions-Matrix

Die Trigger-Überwachung liest die definierten Bedingungen ein und prüft diese auf Plausibilität. Um die Rechengeschwindigkeit möglichst nicht einzuschränken, wird bei der Erstellung der Triggerbedingung ermittelt, in welcher Signalgruppe des Ringpuffers das zu überwachende Signal zu finden ist und an welcher Stelle es steht. Der Aufruf der Überwachung erfolgt periodisch nach jedem Übertrag neuer Daten in die Ringpufferspeicher. Um auch hierbei den notwendigen Berechnungsaufwand gering zu halten, wird nur die in einem Durchlauf neu hinzu gekommene Datenmenge sowie der letzte Wert jedes Signals auf die Trigger-Bedingungen überprüft. Bei Erfüllung einer dieser Bedingungen, erfolgt ein Eintrag in die „Trigger-Set-Matrix“. Er enthält die Bezeichnung des überwachten Signals, den Zeitpunkt, in dem die Bedingung erfüllt wurde, sowie die vorher festgelegte Bezeichnung des Triggers.

Ein Modul zum Abspeichern der Aufzeichnungen liest wiederum periodisch die „Trigger-Set-Matrix“ ein und überprüft für jeden gesetzten Trigger, ob dessen Nachlaufzeit bereits verstrichen ist. In diesem Fall wird die relevante Datenmenge aus dem Ringpuffer entnommen und unter Verwendung der Triggerbezeichnung abgespeichert.

### Module zur Datenkonvertierung und Kennwertberechnung

Aufgrund unterschiedlicher Datenraten der verschiedenen Bus-Systeme empfiehlt es sich die aufgezeichneten Daten auf eine einheitliche und konstante Abtastrate zu interpolieren. Dies muss für jeden Ringpuffer der einzelnen Signalgruppen vorgenommen werden. Aufgrund der Arbeitsweise des Speichers müssen die Daten in jedem Puffer vor der Interpolation in ihrer zeitlichen Reihenfolge sortiert werden. Die Zeiger-Position entspricht immer dem aktuellsten Zeitstempel innerhalb der aufgezeichneten Datenmenge. Anschaulich gesprochen müssen die Daten an der Zeigerposition getrennt werden und so wieder zusammengefügt und als Vektoren oder Matrizen abgelegt werden, dass der Zeiger auf die letzte Position im Pufferspeicher zeigt (Abbildung 4-43).

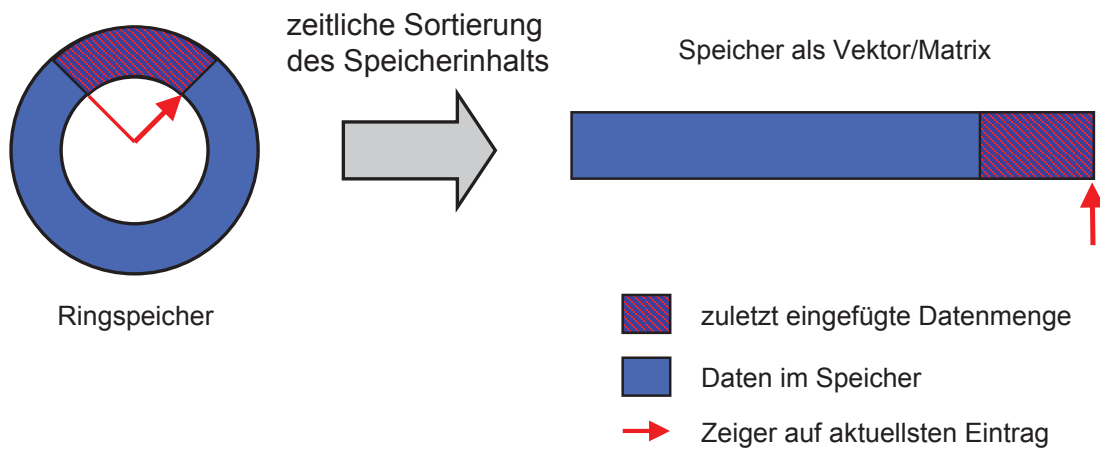


Abbildung 4-43: Sortieren der Daten aus dem Ringspeicher

Sollte der Ringpuffer zum Zeitpunkt des Abspeicherns noch nicht vollständig gefüllt sein, müssen nach der Sortierung noch diejenigen Teile entfernt werden, die nicht beschrieben sind.

Die Kennwertberechnung wird nach der Konvertierung durchgeführt. Dabei werden nur die tatsächlich benötigten Kennwerte ermittelt. Die Angabe der Kennwerte muss dabei üblicherweise durch den Anwender erfolgen, wird ein Komfortmodell zur Berechnung objektiver Noten verwendet, ist diese Definition im Modell enthalten und wird an die Berechnungsfunktion weitergegeben. Die Übergabe erfolgt über eine einfache Liste mit den Namen der benötigten Kennwerte.

### Modul zur Abarbeitung von Versuchsplänen

Bei Fahrversuchen, die zur Komfort-Objektivierung durchgeführt werden, müssen häufig eine Vielzahl von Parameter-Variationen eingestellt werden, um verschiedene Ausprägungen der zu bewertenden Phänomene zu erzeugen.

Die Parameter-Sätze werden in einer Excel-Tabelle vorgenommen. Ihre Struktur ist in Abbildung 4-44 schematisch dargestellt.

Standardwert	<Wert 0,1>	<Wert 0,2>	<...>	<Wert 0,n>
Parameter-Namen	<Name 1>	<Name 2>	<...>	<Name n>
1	<Wert 1,1>	<Wert 1,2>	<...>	<Wert 1,n>
2	<Wert 2,1>	<Wert 2,2>	<...>	<Wert 2,n>
<...>	<...>	<...>	<...>	<...>
m	<Wert m, 1>	<Wert m,2>	<...>	<Wert m,n>

Abbildung 4-44: Datenstruktur für Versuchspläne

Die Versuchsreihen sind dabei zeilenweise angeordnet, die Variation jedes Parameters ist in einer Spalte enthalten. In der ersten Zeile sind zudem die Standard-Werte jedes Parameters anzugeben, um alle Veränderungen, die während des Fahrversuchs vorgenommen wurden, nach Versuchende wieder rückgängig zu machen. Die erste Spalte enthält die Versuchsnummer in aufsteigender Reihenfolge.

### Grafische Benutzer-Oberfläche (GUI)

Die oben beschriebenen Module wurden in eine grafische Benutzeroberfläche integriert, sodass auch ungeübten Nutzern die Anwendung gelingt (Abbildung 4-45). Die Abbildung zeigt exemplarisch Drehzahl-, Momenten- und Beschleunigungsverläufe eines in einem hybriden Fahrzeug aufgenommenen Wiederstarts.

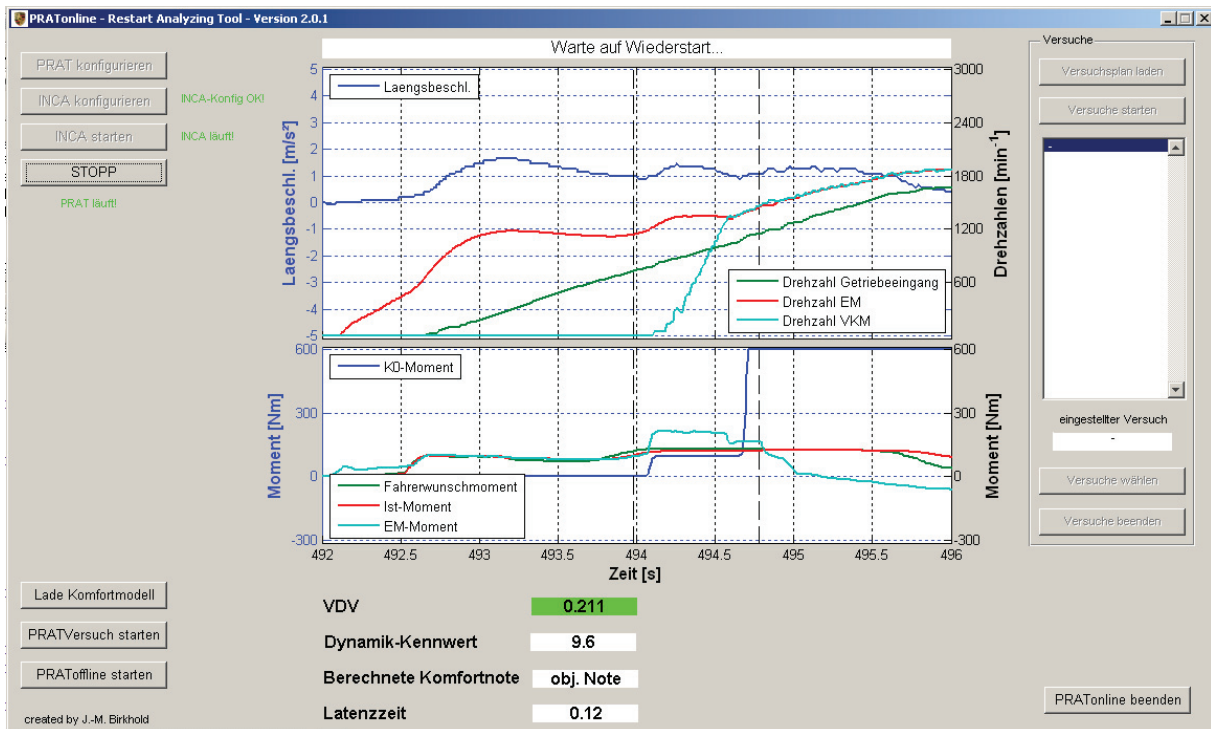


Abbildung 4-45: Grafische Benutzeroberfläche zur Unterstützung der Objektivierung

Neben verschiedenen Schaltflächen zur Konfiguration des GUI im linken Teil, ist im rechten Bereich die Schnittstelle zum Modul zur Abarbeitung von Versuchsplänen dargestellt. Aus einer Auflistung der einzelnen hinterlegten Parametervariationen kann jeder beliebige Eintrag ausgewählt und durch Betätigung der Schaltfläche „Versuch wählen“ eingestellt werden.

Die gewonnen Messdaten können nach der Aufzeichnung so konvertiert werden, dass sie den oben vorgestellten Tools für die Komfortobjektivierung mittels Regressionsmodellen oder KNN zur Verfügung gestellt werden können.

Die vorgestellten Werkzeuge wurden entwickelt, um den Wiederstartkomfort zu objektivieren. Sie können aber durch einfache Umparametrierung auch für andere komfortrelevante Ereignisse wie beispielsweise Getriebebeschaltungen verwendet werden. Werden weitere objektive Kennwerte benötigt, können deren Berechnungen durch die modulare Programmstruktur einfach implementiert werden.

## 5 Methode zur funktionalen Bewertung paralleler Hybridantriebe

Ein hybrides Antriebssystem für Kraftfahrzeuge stellt ein ungleich komplexeres System dar als ein konventioneller, rein verbrennungsmotorischer Antriebsstrang. Neben einer großen Vielfalt eingesetzter Komponenten und anwendbarer Triebstrangtopologien existieren, wie bereits in den vorherigen Abschnitten ausgeführt, in einem hybriden Antriebsstrang zusätzliche Betriebsmodi. Anders ausgedrückt erhöht sich die Anzahl der Funktionsträger innerhalb des Systems. Dadurch ergeben sich auch neue Möglichkeiten im funktionalen Zusammenspiel der Triebstrang-Komponenten. Außerdem müssen Komponenten und Subsysteme neue Aufgaben übernehmen, die sie im konventionellen Antrieb unter Umständen bisher nicht ausüben mussten.

Während in frühen Phasen des Produktentstehungsprozesses (PEP) noch nicht alle Eigenschaften von Komponenten eines Fahrzeugs (z.B. Steifigkeiten, Dämpfungswerte) feststehen können, existieren aber Aussagen darüber, welche Komponenten grundsätzlich eingesetzt werden sollen. Die Frage, ob ein neues Antriebskonzept auch die an es gestellten funktionalen Anforderungen erfüllt, muss durch die Entwicklungsingenieure auf dieser Wissensbasis beantwortet werden. Zur Unterstützung dieses Prozesses wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine Methode entwickelt. Sie nutzt als Metamodell den C&C<sup>2</sup>-A<sup>226</sup> und eine umsatzorientierte Funktionsbeschreibung<sup>227</sup>. Dadurch ist die Verknüpfung von Funktion und Gestalt gewährleistet, was die schrittweise Abstrahierung von Systemen und die umgekehrte Konkretisierung funktionaler Beschreibungen ermöglicht.

Vor der eigentlichen Bewertung des Systems müssen funktionale Anforderungen und geforderte Funktionen identifiziert und gesammelt werden. Unterschiedliche Motivationen sowie verschiedene Abstraktionsniveaus bedingen verschiedene Sichten auf ein Produkt oder ein System. Für Personen, die ausschließlich die inertialen Zielsysteme betrachten, steht der Kundennutzen im Vordergrund. Andere Personen wie Entwicklungsingenieure müssen auch Aspekte des Anbieternutzens

---

<sup>226</sup> Contact & Channel Connector Ansatz; vgl. Abschnitt 2.4.1

<sup>227</sup> Mit Hilfe der umsatzorientierten Funktionsbeschreibung können Eigenschaftsänderungen von Umsatzprodukten beschrieben werden. Sie eignet sich zur Darstellung von Systemen mit Stoff-, Energie und Informationsflüssen.

(z.B. Wirtschaftlichkeit) betrachten. In den folgenden Abschnitten werden die Sichten von Kunden und Entwicklern auf hybride Antriebe erläutert, da im Rahmen dieser Arbeit die technischen Funktionen des Antriebsstrangs im Fokus liegen.

Anschließend soll die Erstellung einer funktionalen Beschreibung anhand eines Beispielsystems vorgestellt werden. Ausgehend von einer verbalen Funktionsbeschreibung in einer Matrixstruktur soll dazu beigetragen werden, einem Entwicklungs-Team ein einheitliches Systemverständnis - ein objektives Mentalmodell<sup>228</sup> - zu verschaffen. Dazu gehört auch eine einheitliche Beschreibungsform von Funktionen, um die Arbeit im Team effizienter zu gestalten.

Zur Durchführung der eigentlichen Bewertung müssen Bewertungskriterien formuliert werden, die mit der funktionalen Beschreibung angewendet werden können. Hierzu müssen Flüsse und Zustände für die Erfüllung von Funktionen quantifiziert werden.

Da eine funktionale Bewertung eines komplexen Systems sehr aufwendig werden kann, wird ein Ansatz zur rechnergestützten Implementierung der Methode entwickelt.

Am Beispiel eines Parallel-Hybrids mit einem Doppelkupplungsgetriebe<sup>229</sup> wird die entwickelte Methode angewendet. Mit Hilfe einer numerischen Simulation werden die Analysen veranschaulicht. Die Basis des Simulationsmodells bildet ein bereits existierendes, in MATLAB/Simulink implementiertes Mehrkörpermodell des Triebstrangs, das mit Fahrzeugmessungen abgeglichen wurde. Neu entwickelt wurden die Ablauf- und Wiederstartsteuerung. Zusätzlich kommt ein Motormodell zum Einsatz, dessen Aufbau noch detailliert beschrieben wird<sup>230</sup> und ebenfalls bei der Abbildung anderer Triebstrang-Modelle Verwendung findet. Im betrachteten Fall ist die E-Maschine über ein Stirnradgetriebe an die Eingangswelle angebunden, die die ungeraden Gänge trägt. Der Wiederstart des Verbrennungsmotors kann grundsätzlich über beide Kupplungen erfolgen<sup>231</sup>, wobei Grenzen und Randbedingungen gelten, die in den späteren Abschnitten erläutert werden.

## 5.1 Begriffsabgrenzungen

In diesem Abschnitt sollen einige Begriffe, die in den weiteren Ausführungen Verwendung finden, definiert und voneinander abgegrenzt werden. Sie stehen im

---

<sup>228</sup> vgl. Abschnitt 2.4

<sup>229</sup> vgl. Abschnitt 2.1.2

<sup>230</sup> siehe Abschnitt 5.7.2.1

<sup>231</sup> Blessing Blankenbach 2009

Kontext mit dem Aufbau hybrider Antriebsstränge sowie deren Betrieb und Funktionen.

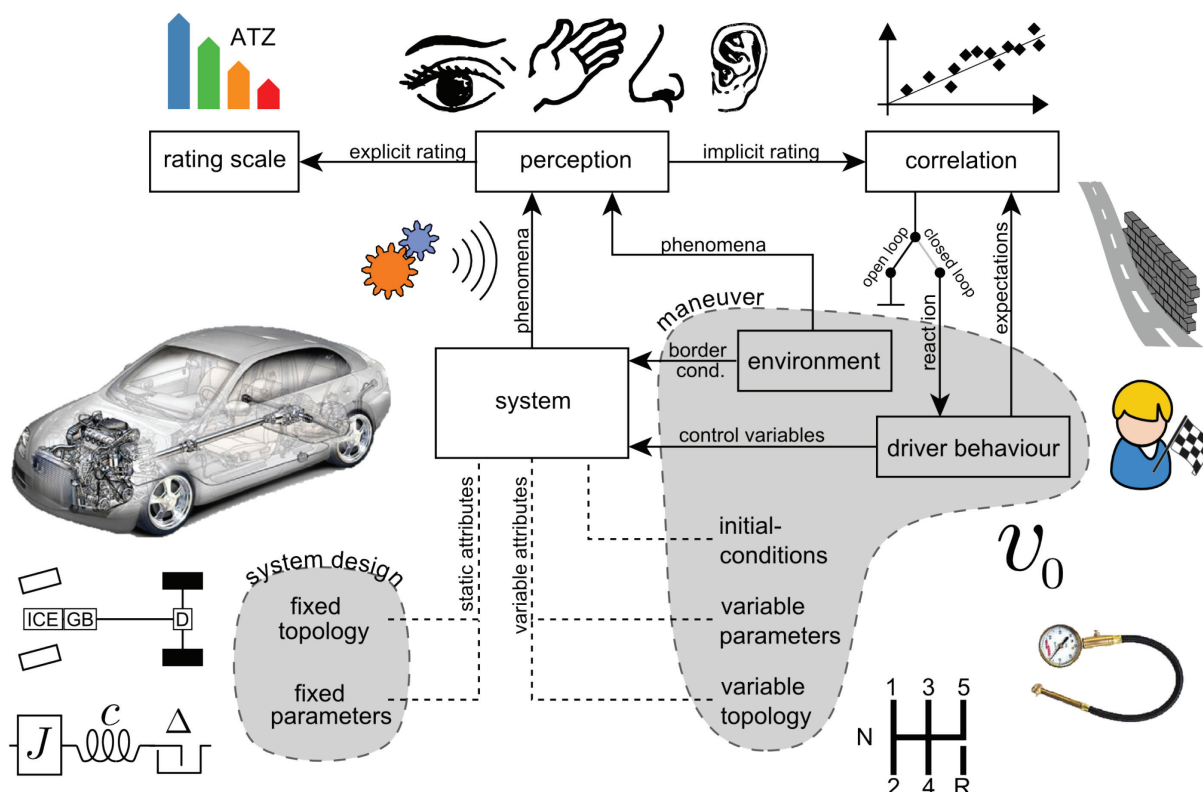


Abbildung 5-1: Wechselwirkungen zwischen Fahrzeug, Fahrer und Umwelt<sup>232</sup>

Als Basis für die weiteren Abgrenzungen und Definitionen dient ein am IPEK von Albers<sup>232</sup> und Mitarbeitern entwickeltes Modell (Abbildung 5-1), das die Wechselwirkungen zwischen Fahrzeug, Fahrer und Umwelt abbildet. Das Verhalten des Systems Fahrzeug (in der Mitte der Darstellung) wird durch das System-Design sowie durch das Manöver bestimmt. Letzteres beschreibt dabei unter anderem variable Parameter und Topologien, Umgebungs- und Ausgangsbedingungen, die auf das Fahrzeug wirken, sowie das Fahrerverhalten. Das Fahrzeugverhalten wird vom Menschen wahrgenommen und kann sowohl zu einer expliziten Beurteilung im Sinne einer Noten-Skala als auch zu einer impliziten Bewertung verarbeitet werden. Je nach Manöver-Art (open- oder closed-loop) wird die implizite Bewertung mit den Erwartungen des Fahrers verglichen und zur Beeinflussung der Reaktionen bzw. des Verhaltens des Fahrers zurückgeführt.

<sup>232</sup> Albers et al. 2010

## **Bauteil, Baugruppe und Komponente**

Nach Koller<sup>233</sup> sind Bauteile aus festen Stoffen bestehende Gebilde (Körper) bestimmter Gestalt. Sie sind nicht weiter zerlegbare Elemente technischer Systeme. Flüssigkeiten und Gase können Bauteile im weiteren Sinne sein (z.B. Öle, Gasfeder)<sup>234</sup>. Ein Bauteil alleine kann noch keine Funktion erfüllen. Einfache Bauteile sind beispielsweise Schrauben, Muttern oder einzelne Bleche.

Durch die Kombination zweier oder mehrerer Bauteile entstehen Baueinheiten und Baugruppen<sup>235</sup>. Sie werden auch als Zusammenbau (ZSB) bezeichnet. Im in Kapitel 2.1.1 vorgestellten Antriebsstrang des Porsche Cayenne S Hybrid sind unter anderem die ZSB Verbrennungsmotor, Hybridmodul und das Hauptgetriebe vorhanden. Durch das Zusammenfügen dieser ZSB, die im Folgenden auch als (Triebstrang-)Komponenten bezeichnet werden, können Funktionen im Antriebsstrang entstehen. Baugruppen und Komponenten sind Bestandteile des Systems in Abbildung 5-1.

## **Triebstrang-Topologie**

Die Triebstrang-Topologie beschreibt die Anordnung der verschiedenen Komponenten innerhalb des Antriebsstrangs. Konventionelle Antriebsstränge weisen überwiegend die gleiche Anordnung von Verbrennungsmotor, Anfahrlement, Hauptgetriebe und Achsgetriebe auf. Parallele Hybrid-Antriebsstränge bieten hier eine ungleich höhere Variantenvielfalt<sup>236</sup>. Die elektrische Antriebseinrichtung kann beispielsweise separat an einer Achse des Fahrzeugs, an einer Getriebeeingangswelle oder -ausgangswelle oder starr verbunden am Verbrennungsmotor angeordnet sein. Die Triebstrang-Topologie kann auch als Triebstrangkonfiguration bezeichnet werden.

Unterschieden werden kann variable und feste Topologie. Die feste Topologie ist dabei durch den Aufbau des Fahrzeugs bestimmt und ist Bestandteil des System-Designs in Abbildung 5-1. Die variable Topologie ist durch das Manöver bestimmt. Ein Beispiel hierfür ist ein manuell zuschaltbarer Allrad-Antrieb. Durch die Möglichkeit des Ankoppelns einer Antriebsachse ist eine Variabilität der Triebstrang-Topologie gegeben.

---

<sup>233</sup> Koller 1998

<sup>234</sup> IPEK-Glossar, abgerufen am 13.03.2012

<sup>235</sup> Haberhauer Bodenstein 2007, Koller 1985

<sup>236</sup> Vgl. Abschnitt 2.1



## Fahrzustand

Der Fahrzustand im Sinne der Querdynamik eines Fahrzeugs kann mit Hilfe der Bewegungsgleichungen für Giergeschwindigkeit und Schwimmwinkel beschrieben werden<sup>237</sup>. Ein stationärer Fahrzustand ist dabei durch einen konstanten Schwimmwinkel  $\beta$  und eine konstante Giergeschwindigkeit  $\dot{\psi}$  gekennzeichnet. Damit gilt, dass Gierbeschleunigung  $\ddot{\psi}$  und Schwimmwinkelgradient  $\dot{\beta}$  gleich Null sind.

Für die Längsdynamik eines Fahrzeugs ergibt sich der Fahrzustand mit der bekannten Fahrwiderstandsgleichung (Abbildung 5-2).

### Gleichgewichtsbeziehung zwischen Antrieb und Fahrwiderständen:

Kraftangebot = Fahrwiderstände an den Antriebsrädern (Kraftbedarf)

$$F_{an} = m * g * f * \cos\alpha + m * g * \sin\alpha + e * m * a + c_w * A * \frac{\rho}{2} * v^2$$

treibende Kraft  
in der Reifen-  
Aufstandsfläche

Rollwiderstand

Beschleunigungs-  
widerstand

Steigungs-  
widerstand

Luft-  
widerstand

m	Masse	$c_w$	Luftwiderstandsbeiwert
g	Erdbeschleunigung	A	Querschnittsfläche des Fahrzeugs
f	Rollwiderstandsbeiwert	$\rho$	Luftdichte
$\alpha$	Fahrbahnneigung	v	Fahrzeuggeschwindigkeit
e	Massenfaktor		

Abbildung 5-2: Fahrwiderstandsgleichung

Der Fahrzustand eines Fahrzeugs wird dann durch die Zustandsgrößen des Gleichungssystems beschrieben. Für die Längsdynamik sind dies die Geschwindigkeit und Beschleunigung. Die Zustandsgrößen Giergeschwindigkeit und Schwimmwinkel als relevante Größen für querdynamische Analysen werden im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet, da sie für die weiteren Ausführungen nicht benötigt werden.

<sup>237</sup> Schindler 2007

### **Betriebszustand**

Der Betriebszustand beschreibt den Arbeitspunkt eines Systems, Teilsystems oder einer Komponente, der aufgrund von Systemeigenschaften und Einflüssen aus benachbarten Systemen eingenommen wird. Üblicherweise verfügen Komponenten über zulässige Arbeitsbereiche.

Der Arbeitspunkt eines Verbrennungsmotors ist durch Drehzahl und Drehmoment charakterisiert. Wird die Leerlaufdrehzahl unterschritten oder die maximale Drehzahl überschritten, wird der zulässige Arbeitsbereich verlassen.

### **Betriebsmodi hybrider Antriebe**

Der Betriebsmodus (oder die Betriebsart) eines Hybrid-Antriebs lässt sich nach dem Einsatz der Antriebsquelle unterscheiden. Bei einem parallelen Voll-Hybridantrieb sind die Betriebsmodi elektrisches Fahren, verbrennungsmotorisches Fahren sowie hybridisches Fahren mit beiden Antriebseinrichtungen möglich. Es erlauben also verschiedene Unterfunktionen die übergeordnete Funktion des Fahrzeugantriebs, weshalb diese im Folgenden auch als Betriebsfunktionen bezeichnet werden.

## **5.2 Zustände und Funktionen im Hybridantrieb**

Ein technisches System erfüllt in der Regel eine Hauptfunktion. Je nach Art kann das System dabei verschiedene Zustände zur Erfüllung dieser Funktion einnehmen. Diese Zustände werden im Allgemeinen durch die Bewegungsgleichungen und Zustandsgrößen des betrachteten Systems oder Teilsystems beschrieben.

Je nach Art und Auslegung des Systems kann dabei ein Systemzustand durch unterschiedliche Betriebsfunktionen eingestellt werden. Dies ist zum Beispiel möglich, wenn ein Fahrzeug über zwei Antriebe verfügt, die es in gleicher Weise in Bewegung setzen können. Zu unterscheiden sind dann aber die Funktionen der Komponenten des Systems sowie deren Zustände, die wiederum über eigene Gleichungen beschrieben werden können.

Am Beispiel eines Fahrzeugs mit Hybridantrieb soll dies verdeutlicht werden. Der Fahrer nimmt Informationen vom Fahrzeug und aus der Umgebung auf und reagiert falls erforderlich mit Eingaben (z.B. Lenkung, Gaspedal, Bremspedal), um beispielsweise die Fahrgeschwindigkeit zu verändern. Dadurch ergeben sich verschiedene Systemzustände des Fahrzeugs, die dann als Fahrzustände bezeichnet werden. Der Fahrer kann durch seine Eingaben zwar den Fahrzustand beeinflussen. Durch welche Funktionen seine Vorgaben umgesetzt werden, kann aber nicht immer durch ihn vorgegeben werden. Insbesondere bei Hybridantrieben liegt die Entscheidung welcher Betriebsmodus bzw. welche Betriebsfunktion eingesetzt wird, üblicherweise bei der Steuerung des Triebstrangs (z.B.

Energiemanagement). So kann ein Hybridfahrzeug aufgrund des Fahrerwunschs den Fahrzustand „vorwärts fahren mit 30 km/h“ einnehmen. Die Entscheidung, ob das Fahrzeug dann von der E-Maschine oder vom Verbrennungsmotor angetrieben wird, kann nicht immer direkt vom Fahrer beeinflusst werden. Der gewünschte Fahrzustand kann also in diesem System durch zwei verschiedene Betriebsfunktionen oder Betriebsmodi hergestellt werden.

In jedem Betriebsmodus übernehmen auch die im System vorhandenen Komponenten verschiedene Funktionen. Beim rein elektrischen Antreiben des Fahrzeugs übernimmt die E-Maschine das Bereitstellen mechanischer Energie während der Verbrennungsmotor keine Funktion erfüllt. Je nach Funktion der jeweiligen Triebstrang-Komponente nimmt es auch verschiedene Zustände ein. Beispielsweise steht die VKM im erwähnten Betriebsmodus still und die E-Maschine dreht mit einer bestimmten Drehzahl, um die benötigte Leistung abzugeben.

### **5.2.1 Ableitung notwendiger Funktionen des Systems**

Zur funktionalen Analyse und Bewertung eines Systems muss zunächst die Frage geklärt werden, welche Zustände das System einnehmen kann und welche Funktionen dafür genutzt werden können. Anschließend können die oben beschriebenen Komponenten-Funktionen und -Zustände ermittelt werden. Erst wenn diese eingegrenzt sind, kann ein Entwicklungs-Ingenieur auf einer theoretischen Basis bewerten, ob ein System sämtliche geforderten Funktionen erfüllen kann, oder ob möglicherweise Funktionseinschränkungen zu erwarten sind.

Am Beispiel des Systems Hybrid-Antrieb sollen notwendige Funktionen abgeleitet werden. Anschließend werden Unterfunktionen, die von Triebstrangkomponenten erfüllt werden müssen, anhand eines Beispielsystems beschrieben.

Für die funktionale Bewertung eines technischen Systems ist es zunächst erforderlich die von ihm zu erbringenden Betriebsfunktionen zu definieren. Dabei können durchaus verschiedene Sichtweisen auf das System aufgrund verschiedener Anforderungen existieren. Am Beispiel des Hybridantriebs soll dies verdeutlicht werden.

Die notwendigen Funktionen eines Antriebssystems lassen sich aus den verschiedenen Anforderungen ableiten. Dabei existieren verschiedene Sichten:

- Anforderungen aus Sicht des Gesetzgebers: Sie beziehen sich hauptsächlich auf die Sicherheit und die Umweltverträglichkeit der Fahrzeuge, wobei Letzteres sowohl Produktion wie auch Betrieb und Entsorgung einschließt.
- Anforderungen aus Kundensicht: Sie sind im Wesentlichen Anforderungen an Komfort, Verbrauch und Performance, also an Größen, die der Kunde

subjektiv und objektiv beim Betrieb des Fahrzeugs wahrnehmen und vergleichen kann.

- Anforderungen aus Entwickler-Sicht: Sie stellen den größten Anteil dar und lassen sich in Forderungen bei Betrieb des Fahrzeugs und in Forderungen für untergeordnete technische Funktionen unterteilen. Die untergeordneten technischen Funktionen ergeben sich zum Teil als Schnittmenge aus den Forderungen des Kunden und des Gesetzgebers. Beispielhaft seien Forderungen wie Lebensdauer, Wartungsfreundlichkeit oder Skalierbarkeit des Systems genannt. Die eigentlichen Betriebsfunktionen werden später weiter unterteilt.

Andere Anforderungen wie beispielsweise Gewährleistung oder Recycling-Fähigkeit müssen ebenfalls beachtet werden. Sie fließen bei der Zielsystembildung und -konkretisierung ein und beeinflussen damit von Beginn an die Gestalt und auch Funktionen des Systems. Da hier der Ausgangspunkt für die funktionale Bewertung aber bereits die Gestalt eines konkreten Systems ist, werden sie an dieser Stelle nicht separat aufgegriffen.

Im Folgenden sollen die Sichten von Kunde und Entwickler weiter aufgegriffen werden, da sie besonderen Einfluss auf die Gestaltung des Triebstrangs besitzen.

Die für einen Hybrid-Antrieb minimal notwendigen Betriebsfunktionen lassen sich unter anderem aus der Kundenanforderung an den Kraftstoffverbrauch und dem vom Kunden gewünschten Fahrerlebnis ableiten. Dabei stehen sowohl die Steigerung der Fahrleistungen auch das Erlebnis des elektrischen Fahrens im Vordergrund<sup>238</sup>.

Um den gesamten Einsatz der Kraftstoffmenge möglichst gering zu halten, ist sowohl der effiziente Umgang mit dem Energieträger als auch die Fähigkeit des Systems, Energieverluste durch Dissipation zu vermeiden, erforderlich. Daraus lassen sich die Betriebsfunktionen der Lastpunktverschiebung<sup>239</sup> und der Rekuperation ableiten. Die beiden Funktionen tragen dazu bei, auf unterschiedliche Eingaben des Fahrers so zu reagieren, dass ein effizienter Umgang mit dem Kraftstoff und die Rückgewinnung kinetischer und potentieller Energie ermöglicht werden. Zudem kann bei kleinen Fahrerwunschkomenten das elektrische Fahren als weitere Funktion zum effizienten Umgang mit der eingesetzten Energie genutzt werden. In Abbildung 5-3 sind die Hauptfunktionen des Hybridantriebs aus Kundensicht dargestellt. Das E-Fahren beinhaltet dabei die Unterfunktion Rekuperation als Fahren mit generatorischem

---

<sup>238</sup> Kemper et al. 2006

<sup>239</sup> Anhebung des Lastpunkts des Verbrennungsmotors in einen Betriebspunkt mit höherem Wirkungsgrad und gleichzeitiges Laden des elektrischen Energiespeichers.

Betrieb des Elektro-Antriebs. Das hybridische Fahren umfasst alle Betriebszustände, in denen der Verbrennungsmotor mit dem Antriebsstrang verbunden ist. Dazu gehört auch das Boosten<sup>240</sup> zur Steigerung der Fahrleistungen. Der Fahrzeugstillstand beinhaltet die Fallunterscheidung, ob der Verbrennungsmotor abgeschaltet ist oder nicht.

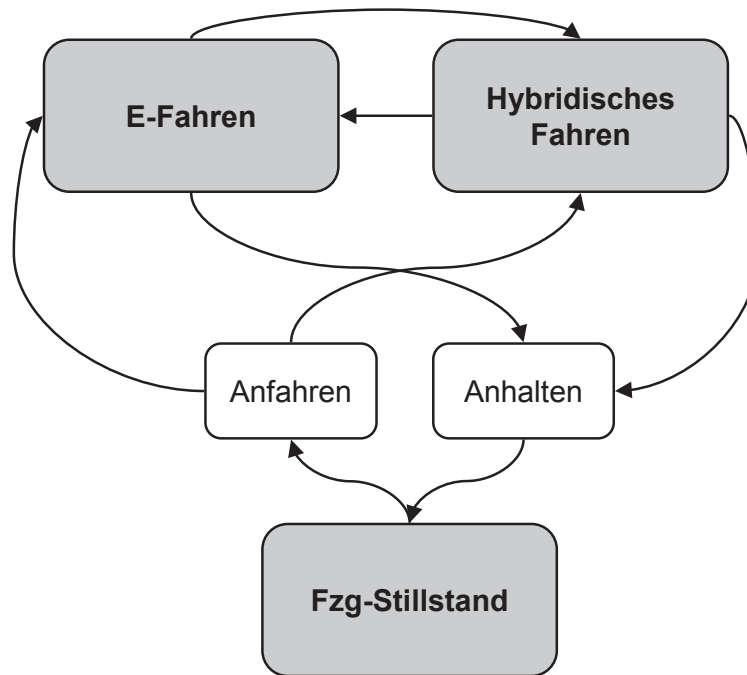


Abbildung 5-3: Funktionen des Hybridantriebs aus Kundensicht

Der Kunde als Laie wird dabei vermutlich mindestens diese reproduzierbaren Betriebsfunktionen des Antriebssystems wahrnehmen. Welche dieser Funktionen zum Antreiben des Fahrzeugs genutzt wird, ist von Wechselwirkungen zwischen Fahrer, Umgebung und Fahrzeugsystem abhängig (vgl. Abbildung 5-1).

Übergänge zwischen zwei der oben beschriebenen Hauptfunktionen wird der Laie aber nicht wahrnehmen, sofern sie sein Komfortempfinden nicht stören. Diese Übergänge stellen aber aus technisch-funktionaler Sicht Anforderungen an die im Triebstrang vorhandenen Komponenten. In Abbildung 5-4 ist die Darstellung der Betriebsfunktionen um die Übergänge zwischen ihnen ergänzt.

<sup>240</sup> Stellen eines positiven Drehmoments mit der E-Maschine zusätzlich zum vom Verbrennungsmotor abgegebenen Drehmoment

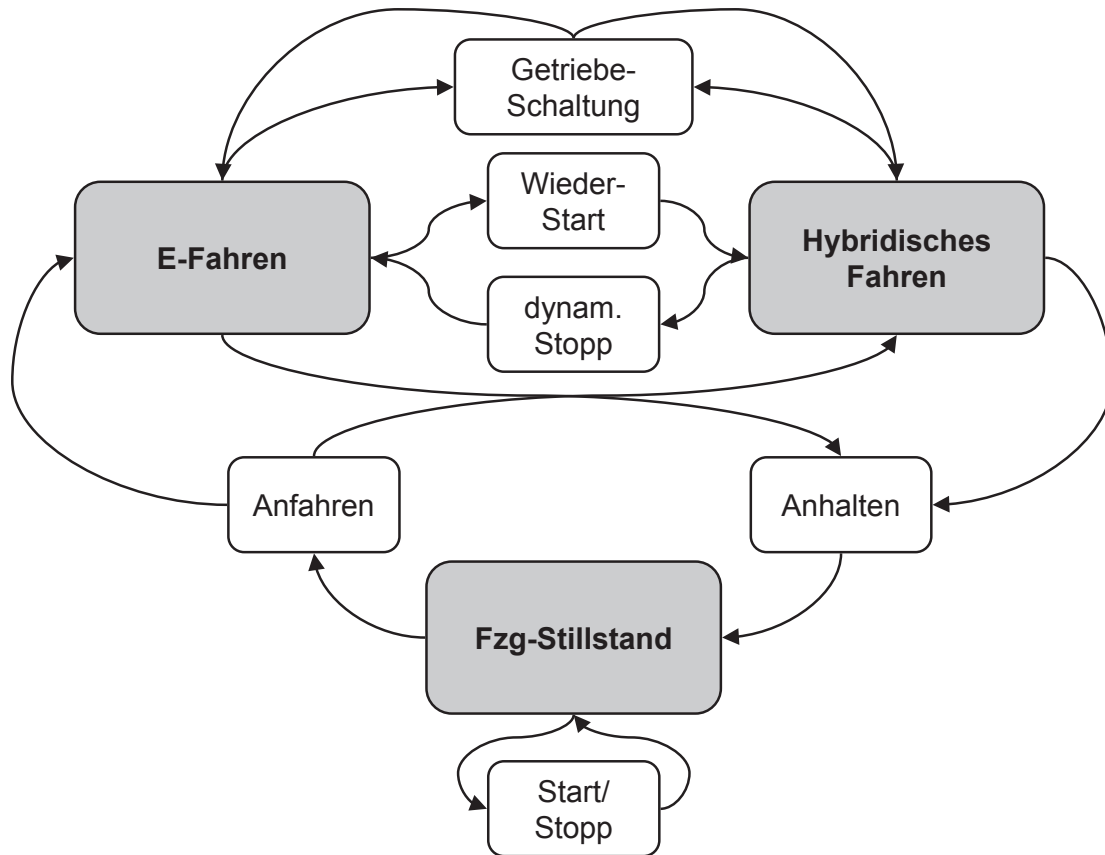


Abbildung 5-4: Funktionen des Hybridantriebs aus Entwicklersicht

Durch das Anfahren kann das Fahrzeug vom Stillstand aus, in Abhängigkeit davon, ob die VKM abgeschaltet ist oder nicht, in die Zustände elektrisches und hybridisches Fahren versetzt werden. Der Übergang vom elektrischen in das hybridische Fahren wird durch den Wiederstart des Verbrennungsmotors gewährleistet. Der umgekehrte Weg führt über den dynamischen Stopp, also das Abschalten der VKM während der Fahrt. Getriebebeschaltungen können sowohl im elektrischen als auch im hybridischen Fahrbetrieb erfolgen, um anschließend in den Ausgangszustand zurückzukehren. Die Funktion Anhalten ermöglicht das Einnehmen des Zustands Fahrzeugstillstand. Sie ist hier separat dargestellt, kann aber auch als Teilmenge des elektrischen und des hybridischen Fahrens aufgefasst werden. Im Fahrzeugstillstand kann der Verbrennungsmotor ebenfalls gestartet und gestoppt werden, ohne dass der Zustand dauerhaft verlassen wird. Da für diesen Fall andere Randbedingungen gelten als für den Wiederstart, wird diese Funktion separat aufgeführt.

### 5.2.2 Funktionsbeschreibung

Zur Erfüllung der oben beschriebenen Funktionen müssen Komponenten, die im betrachteten Antriebssystem vorhanden sind, ebenfalls bestimmte Unterfunktionen erfüllen. Auch diese müssen für die funktionale Bewertung modellhaft beschrieben

werden. Für einen Antriebsstrang wird diese Funktionsbeschreibung am Beispiel des Hybrid-Antriebsstrangs eines Porsche Cayenne S Hybrid exemplarisch durchgeführt.

Wie bereits in Kapitel 2.1.1 erwähnt, handelt es sich beim betrachteten Fahrzeug um einen parallelen Voll-Hybrid. In diesem System werden die Momente beider Antriebseinheiten nach dem Prinzip der Momentenaddition auf einer Welle summiert. Abbildung 5-5 zeigt die physische Struktur des Antriebsstrangs.

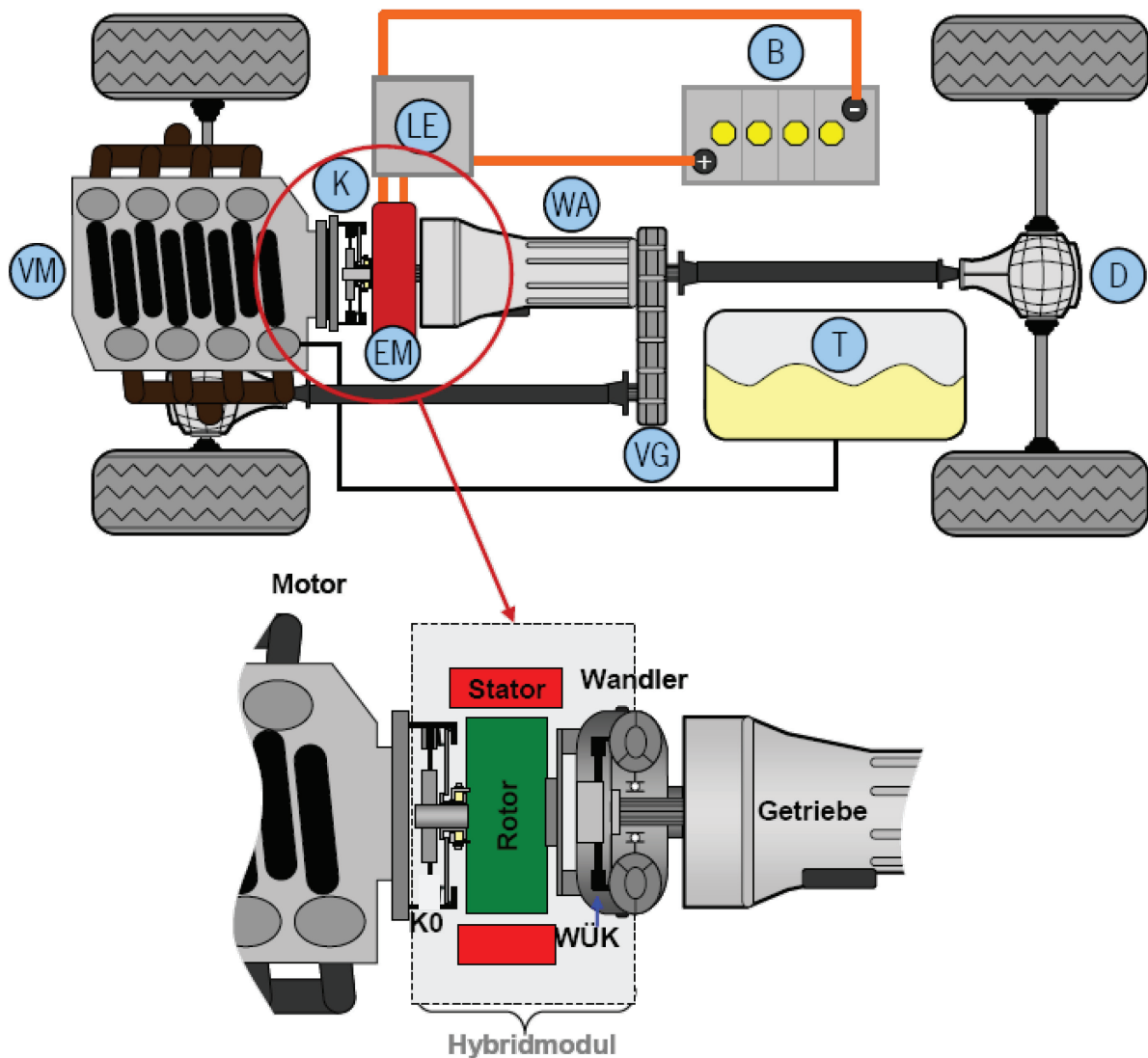


Abbildung 5-5: Physische Struktur des Cayenne S Hybrid<sup>241</sup>

Dank der eingesetzten Baukastenstruktur ist das System klar strukturiert. Der Verbrennungsmotor (VKM), der durch die im Treibstoff enthaltene chemische Energie aus dem Tank (T) angetrieben wird, stellt bei Bedarf Energie in mechanisch-

<sup>241</sup> Füchtner 2006

rotatorischer Form zur Verfügung. Das Hybridmodul ist zwischen VKM Automatikgetriebe mit hydraulischem Wandler (WA) koaxial positioniert und beinhaltet die Trennkupplung (K) und die E-Maschine (EM). Neben dem Verbinden oder Trennen der angeschlossenen Komponenten kommt der Kupplung insbesondere beim Wiederstart der VKM eine große Bedeutung zu. Hierbei überträgt sie definierte Momente bzw. Leistungen, um dem Verbrennungsmotor den sicheren Start während des elektrischen Fahrens zu ermöglichen. Die E-Maschine als zweite Momentenquelle nimmt eine zentrale Position im Triebstrang ein. Die Steuerung des elektrischen Leistungsflusses übernimmt die Leistungselektronik (LE), die je nach Fahrzustand oder Betriebsfunktion der Batterie (B) elektrische Energie entnimmt oder in sie zurückspeist. Zwischen E-Maschine und Hauptgetriebe ist der hydraulische Drehmomentwandler als Anfahrlement angeordnet, der zusätzlich über eine Wandlerüberbrückungskupplung (WÜK) verfügt. Je nach Fahrzustand werden durch vollständiges Schließen der WÜK die Wandlerverluste vermieden und somit der Gesamtwirkungsgrad verbessert. Das Verteilergetriebe (VG) leitet die Antriebsleistung an die Differentialgetriebe (D) von Vorder- und Hinterachse weiter.

Für das weitere Vorgehen und eine weitergehende Abstrahierung soll der beschriebene Triebstrang weiter vereinfacht und modularisiert werden. Dies geschieht mit Hilfe des C&C<sup>2</sup>-Ansatzes bzw. eines konkreten C&C<sup>2</sup>-Modells<sup>242</sup> des Antriebssystems (Abbildung 5-6).

Abbildung 5-6: C&C<sup>2</sup>-M des Triebstrangs

Die verschiedenen Leitstützstrukturen, die den Antriebstrangkomponenten zugeordnet sind, stehen jeweils über ein WFP miteinander in Kontakt. Die LSS<sub>Wandler</sub>

---

<sup>242</sup> C&C<sup>2</sup>-M, vgl. Abschnitt 2.7.1



beschreibt sowohl die Eigenschaften des hydraulischen Drehmomentwandlers als auch der Wandlerüberbrückungskupplung. Der Connector  $C_2$  bildet alle wirkungsrelevanten Eigenschaften ab dem Getriebeausgang ab. Dazu gehören beispielsweise die Eigenschaften der Kardanwelle, der Räder oder relevante Eigenschaften der Fahrbahn. Dadurch kann dem Kriterium „Verkürzung“<sup>243</sup> der Modellbildung Rechnung getragen werden, da die durch den Connector repräsentierten Teilsysteme und Systeme zwar an der Funktionserfüllung des Gesamtsystems beteiligt sind, aber für die Funktionen und Unterfunktionen im Hybridantrieb als nicht variabel aufgefasst werden können. Die Funktionen werden jetzt durch die Wirkflächenpaare und die sie verbindenden Leitstützstrukturen abgebildet und sind mit der Gestalt des Antriebsstrangs verknüpft. Durch die gewählte Detaillierungsstufe des C&C<sup>2</sup>-M bleiben wie bei der vorangegangenen verbalen Beschreibung Funktionen im Triebstrang bestimmten Komponenten zugeordnet. Dies erleichtert dem Entwickler die Analyse des technischen Systems und entspricht dem intuitiven Vorgehen, Triebstrang-Komponenten als gekapselte Systeme zu betrachten, was den in der Automobilindustrie eingesetzten Baukasten-Systemen entgegenkommt.

Da ein Verbrennungsmotor die Umwandlung von chemischer in mechanische Energie nur in diese eine Wirkrichtung darstellen kann, wird die VKM für den weiteren Verlauf der Funktionsanalyse lediglich als unbegrenzte Quelle mechanischer Energie betrachtet. Der Tank als Kraftstoffversorgung wird dementsprechend vernachlässigt. Ebenso werden die Leistungselektronik und die Batterie stark idealisiert und als ideale Wandler betrachtet. Sie steuern zwar den elektrischen Leistungsfluss im Antriebssystem, können jedoch für die Betrachtung der Funktionalität des Fahrbetriebs aus der Systemstruktur entfernt werden.

Ausgehend von der Beschreibung des Systems mit Hilfe des C&C<sup>2</sup>-A erfolgt ein weiterer Abstraktionsschritt, in welchem die bereits verbal beschriebenen Funktionen der Komponenten des Antriebsstrangs im Sinne eines Black-Box-Modells<sup>243</sup> dargestellt werden sollen. Diese Komponenten-basierte Darstellung des Triebstrangs bildet die Grundlage für die spätere Zuordnung entsprechender Funktionen und repräsentiert somit das Gerüst für die funktionale Modellbildung. Neben der Information, welche Komponenten funktional für die geforderten Funktionen im Antriebsstrang notwendig sind, ist zudem die energetische Verschaltung der Elemente sichtbar.

---

<sup>243</sup> vgl. Kapitel 2.4

Um der Forderung nach einer einheitlichen Funktionsbeschreibung gerecht zu werden, eignet sich beispielsweise der Ansatz der Funktionsbasis nach Hirtz<sup>244</sup>. Sie legt den Grundstein für eine einheitliche und eindeutige Beschreibung von Funktionen in einem technischen System. Ein Vorzug dieser Funktionsbasis ist, dass sie die Kriterien der „Uniformität der Funktionsbeschreibung“ und der „Vollständigkeit der Funktionsbasis“<sup>245</sup> erfüllt. So kann eine einheitliche Basis für das Systemverständnis geschaffen werden.

### 5.3 Funktionstabellen

Als Basis für die Funktionsbeschreibung eines Hybrid-Antriebsstrangs wurde eine Tabelle erstellt, die die Funktionsanalyse unterstützt (Abbildung 5-7).

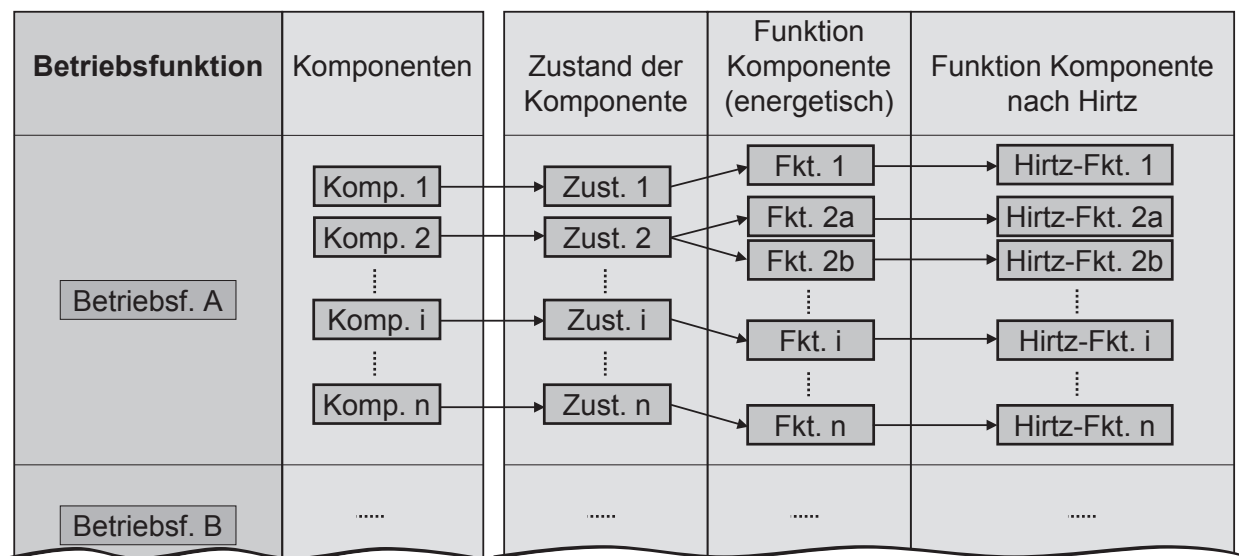


Abbildung 5-7: Struktur der Funktionstabelle

Die Funktionstabelle ist in fünf Spalten aufgeteilt. Die erste Spalte nennt die Betriebsfunktionen bzw. den Betriebsmodus des Hybrid-Antriebsstrangs, wie sie in Kapitel 5.2.1 eingeführt wurden. Dabei können sowohl die stationären Funktionen als auch Übergangs-Funktionen berücksichtigt werden. Für jede dieser Betriebsfunktionen wird anschließend detailliert beschrieben, welchen Betriebszustand jede beteiligte Komponente einnimmt und welche Funktionen diese in der jeweiligen Betriebsfunktion erfüllen. Dazu werden in der zweiten Spalte der Tabelle alle für die Funktionserfüllung relevanten Komponenten aufgeführt. Im Falle des betrachteten Antriebsstrangs sind dies der Verbrennungsmotor, die Trennkupplung, die E-Maschine mit der Batterie, der Wandler mit

<sup>244</sup> Hirtz et al. 2002, vgl. Abschnitt 2.4.2

<sup>245</sup> Sadowski 2009

Wandlerüberbrückungskupplung und das Automatikgetriebe. Diese Baugruppen werden für jede zu beschreibende Betriebsfunktion erneut aufgetragen und die Felder der nachfolgenden Spalten ausgefüllt. Andere Teile des Systems werden nicht mit in der Tabelle mit aufgeführt, da sie an dieser speziellen Funktionserfüllung nicht beteiligt sind. Als Beispiel sei hier ein Teilgetriebe eines Doppelkupplungs-Getriebes genannt. Ist kein Gang eingelegt, kann das Teilgetriebe kein Drehmoment zwischen Getriebeeingang und –ausgang übertragen. Die Leitstützstruktur ist im C&C<sup>2</sup>-M also nicht enthalten. Soll der Fokus der Untersuchung allerdings auf andere Phänomene gelegt werden (z.B. Getrieberasseln, Schleppverluste im Getriebe) darf die LSS nicht entfallen, da dann in dem Teilgetriebe Wirkflächenpaare relevant sind.

In den weiteren Spalten der Tabelle werden für jede Komponente der in der jeweiligen Betriebsfunktion eingenommene Zustand, die jeweilige Funktion aus energetischer Sicht sowie die Funktion gemäß der Funktionsbasis nach Hirtz eingetragen. Im Sinne des C&C<sup>2</sup>-A ist für jeden Zustand ein eigenes C&C<sup>2</sup>-Modell zu erstellen, da zur Erfüllung neuer oder anderer Funktionen Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen hinzugefügt werden müssen oder, falls notwendig, aus dem Modell entfernt werden.

Die dritte Spalte, die den Zustand der Komponenten enthält, stellt durch ihre verbale Beschreibungsform eine Hilfestellung für die weitere Funktionsbeschreibung dar. Wird die Tabelle gemeinsam innerhalb eines Entwicklungs-Teams gefüllt, trägt dies zum gemeinsamen Verständnis bei und dokumentiert zudem die Art der Aktivität einer Komponente. Bereits bei diesen Diskussionen werden dabei oftmals Diskrepanzen im Verständnis von Beschreibungen aufgedeckt, die durch gemeinsame Definition und Dokumentation ausgeräumt werden können. So wurde zum Beispiel während Analysen des betrachteten Systems bei der Dr. Ing h.c. F. Porsche AG, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden, festgestellt, dass unterschiedliche Definitionen des Vier-Quadranten-Betriebs einer E-Maschine existieren. Um ein einheitliches Verständnis sicher zu stellen, wurde deshalb festgelegt die Drehzahl auf der Ordinate und das Drehmoment auf der Abszisse aufzutragen. Zudem können hier bereits Fallunterscheidungen einfließen, die bei der späteren Bewertung eines Systems relevant sein können. Als Beispiel sei hier die Wandlerüberbrückungskupplung genannt. Sie kann in Abhängigkeit vom Fahrzustand bei der Erfüllung der Betriebsfunktion „Elektrisches Fahren“ geöffnet oder geschlossen sein. Solche Fallunterscheidungen können den Entwicklern später Hinweise auf eventuell vorhandene Funktionseinschränkungen liefern, die dann durch geeignete Maßnahmen (z.B. andere Auslegung einer Komponente) vermieden werden können.

Die vierte Spalte der Funktionstabelle beschreibt die Komponenten aus energetischer Sicht. Eine Komponente kann so zum Beispiel eine Energiequelle, ein

Energiespeicher oder ein Energiewandler sein. Diese Beschreibung dient vorrangig als Zwischenschritt zur letzten Stufe - der Beschreibung nach der Hirtz-Funktionsbasis. Diese gliedert sich definitionsgemäß wiederum in drei Spalten und beschreibt Eingangs- und Ausgangsfluss sowie das zugehörige Übergangsverb. Am Beispiel einer E-Maschine lässt sich dies beispielhaft verdeutlichen. Sie setzt im motorischen Betrieb den Eingangsfluss „elektrische Energie“ mit Hilfe der Funktion „Wandeln“ in den Ausgangsfluss „mechanische, rotatorische Energie“ um. Mit diesem Vorgehen werden die Funktionen auf Basis des Energieflusses beschrieben. Es liegt also eine umsatzorientierte Funktionsbeschreibung<sup>246</sup> vor.

Abbildung 5-8 zeigt einen Auszug aus der Funktionstabelle, die für den betrachteten Antriebsstrang des Porsche Cayenne S Hybrid erstellt wurde. Betrachtet wird hier die Start-Stopp-Funktion des Fahrzeugs im Stillstand. Je nach Zustandsgrößen des Antriebssystems (z.B. SOC<sup>247</sup> der Batterie) kann der Verbrennungsmotor abgeschaltet sein oder nicht. Hieraus ergibt sich bereits die erste Fallunterscheidung, die dann für die Funktionen anderer Komponenten ebenfalls berücksichtigt werden muss.

---

<sup>246</sup> vgl. Abschnitt 5, Fußnote 227

<sup>247</sup> State of Charge, engl. für Ladezustand

# 156 Methode zur funktionalen Bewertung paralleler Hybridantriebe

Betriebsfunktionen	Komponente	Zustand_Komponente	Funktion	Eingangsfluss (Hirtz)	Funktion (Hirtz)	Ausgangsfluss (Hirtz)	Bemerkungen	
<b>Fahrzeug steht</b> (Start/Stop-Funktion)	VKM	Aus Außer: SOC niedrig, Motortemperatur niedrig, andere Zwangsbedingungen --> An	keine	keine	keine	keine		
			Energiequelle	Chemische Energie	Wandeln	Mechanische, rotatorische Energie	Schwungscheibentragheit dem VKM zuordnen	
	Massenschwungrad (beinhaltet Trägheit d. VKM)	Steht Dreht sich	keine Energiespeicher	keine Mechanische, rotatorische Energie	keine Speichern	keine -		
	Trennkupplung	Offen	Trennung des Leistungsflusses zum Hybrid-/Getriebeteil		-	Trennen	-	
		Außer: VKM an -> Geschlossen	Kraftschluss herstellen		Mechanische, rotatorische Energie (VKM)	Übertragen	Mechanical Rotational Energy (Abtriebsselement)	
	E-Maschine	Abgeschalten	DrehSchwingung dämpfen	keine	Mechanische, rotatorische Energie	Regulieren	Mechanische, rotatorische Energie	
		Außer VKM an: Dreht sich (2. Quadrant) Aktiv	Energiewandler	keine	keine	keine	keine	
	Batterie	Gibt Energie ab	Energie bereitstellen	Energie bereitstellen	Mechanische, rotatorische Energie	Wandeln	Elektrische Energie	
		Außer VKM an: Nimmt Energie auf	Energiespeicher	Energiespeicher	-	Importieren Versorgen	Elektrische Energie Elektrische Energie	
	WÜK	Offen	Trennung des Leistungsflusses zum Abtrieb		-	Trennen	-	
	Wandler	Steht	keine	keine	keine	keine	keine	
	Automatikgetriebe	Steht	Evtl. Hill Hold	keine	keine	keine	keine	
				Mechanische Energie (Getriebe) (=Verblocken von Bremsen/ Kupplungen)		Stoppen	-	

Abbildung 5-8: Auszug aus der Funktionstabelle

### 5.4 Formulierung der Bewertungskriterien

Während die Hauptfunktionen hybridisches und elektrisches Fahren sowie der Fahrzeugstillstand für sehr lange Zeitdauern eingenommen werden können, ist grundsätzlich davon auszugehen, dass die Übergangszustände nach sehr kurzer Zeit wieder verlassen werden, um in den Zielzustand zu wechseln.

		Zielzustand				
		E-Fahren vorwärts	hybrides Fahren vorwärts	Fzg.-Stillstand	E-Fahren rückwärts	hybrides Fahren rückwärts
Ausgangszustand	E-Fahren vorwärts	Getriebeschaltung	Wiederstart	Verzögern elektrisch	-	-
	hybrides Fahren vorwärts	dynamischer Stopp	Getriebeschaltung	Verzögern hybridisch	-	-
	Fzg.-Stillstand	Anfahren elektrisch	Anfahren hybridisch	Wiederstart/ dyn. Stopp	Anfahren elektrisch	Anfahren hybridisch
	E-Fahren rückwärts	-	-	Verzögern elektrisch	Getriebeschaltung	Wiederstart
	hybrides Fahren rückwärts	-	-	Verzögern hybridisch	dynamischer Stopp	Getriebeschaltung

Abbildung 5-9: Funktionen und Betriebszustände eines Hybridantriebs

In Abbildung 5-9 sind die Ausgangs- und Zielzustände mit den jeweils möglichen Übergängen noch einmal tabellarisch aufgeführt und um die Unterscheidung zwischen vorwärts und rückwärts fahren erweitert. Dabei ist bereits eine Unterscheidung des Fahrzustands (vorwärts oder rückwärts fahren) eingeflossen. Dies deutet bereits an, dass die Bewertung von Funktionen in jedem beliebigen Fahrzustand notwendig sein wird, um eine Triebstrang-Topologie vollständig zu bewerten. Die für einen parallelen Vollhybrid-Antrieb wichtigsten Übergänge sind der Wiederstart und der dynamische Stopp des Verbrennungsmotors. In der Realität können auch Wechsel zwischen zwei dieser Übergangszustände stattfinden. So kann aufgrund eines geringen Fahrerwunschlages im hybridischen Fahren ein Stopp des Verbrennungsmotors angefordert werden. Möchte der Fahrer jetzt wieder beschleunigen, muss die VKM zur Deckung des Fahrerwunschs wieder gestartet werden. Solche als „Change-of-Mind“ bezeichneten Situationen würden allerdings die Darstellung unübersichtlich werden lassen. Deshalb sollen sie an dieser Stelle vernachlässigt werden.

Jeder der Übergangszustände ist durch die ihm vorgegebenen Eingangs- und Zielbedingungen charakterisiert. Am Beispiel eines Getriebe-Schaltvorgangs lässt sich dies gut veranschaulichen. Sie beginnt bei einer bestimmten Fahrzeuggeschwindigkeit, die sich auf eine bestimmte Eingangsrehzahl reduzieren lässt. Unter der Annahme, dass die Veränderung der Fahrzeuggeschwindigkeit bei

kurzer Schaltzeit vernachlässigt werden kann, ergibt sich als Endzustand des Vorgangs eine neue Zieldrehzahl, die sich aus der Geschwindigkeit und der neuen Getriebeübersetzung ergibt. Sollte diese Drehzahl eine zulässige Grenze für eine Komponente überschreiten, darf die Schaltung nicht durchgeführt werden. Die Funktion kann also nicht erfüllt werden.

Für den Wiederstart des Verbrennungsmotors lassen sich ebenfalls solche Randbedingungen formulieren. Zu Beginn ist die Drehzahl der VKM gleich Null und der Motor stellt eine Momentensenke dar. Nach erfolgreichem durchgeführtem Wiederstart ist der Motor eine Momentenquelle und er muss seine Zieldrehzahl, die durch das Wiederstartsystem vorgegeben ist, erreicht haben. Eine weitere Nebenbedingung ergibt sich aus der Charakteristik des eingesetzten Verbrennungsmotors. Die Zieldrehzahl muss immer mindestens so hoch sein wie die Leerlaufdrehzahl des betrachteten Verbrennungsmotors, da sein stabiler Betrieb sonst nicht gewährleistet werden kann. Weitere Nebenbedingungen können sich aus anderen Komponenten des Wiederstartsystems ergeben.

Um ein System funktional bewerten zu können müssen insbesondere sämtliche Eingangs- Ausgangs- und Nebenbedingungen auf ihre Umsetzbarkeit hin überprüft werden. Nur wenn keine dieser Bedingungen verletzt wird, kann das System seine Funktion erfüllen. Diese Bedingungen sind dabei zum großen Teil wiederum abhängig vom Fahrzustand des Fahrzeugs, weshalb eine getrennte Betrachtung von Betriebsfunktionen und Fahrzustand nicht immer möglich ist.

## **5.5 Ansatz zur Implementierung der funktionalen Bewertung**

Mit Hilfe der oben erläuterten Funktionstabellen kann der Entwicklungsingenieur zwar ein einfaches System oder eine Teilmenge der Funktionen und Betriebszustände komplexer Systeme beschreiben und bewerten. Eine vollständige Bewertung aller möglichen Kombinationen würde aber die Tabellen sehr schnell unübersichtlich werden lassen und einen hohen Zeitaufwand bei der Erstellung erfordern. Deshalb soll in den folgenden Abschnitten ein Ansatz zur rechnergestützten Bewertung und deren Implementierung in einer Softwareumgebung erläutert werden.

Für die Realisierung einer rechnergestützten Bewertung müssen zunächst Wege gefunden werden, ein Rechen-Modell des zu untersuchenden technischen Systems zu generieren. Das Funktionsmodell muss dazu in ein Simulationsprogramm überführt werden, was eine geeignete Softwareumgebung erfordert.

Grundsätzlich muss diese Softwareumgebung die Darstellung funktionsbasierter Modelle technischer Systeme zulassen. Funktionen müssen darstellbar sein und entsprechende Elemente zur Modellierung der physikalischen Komponenten eines

Systems vorhanden sein oder zumindest die Möglichkeit besitzen, diese zu implementieren. In Übereinstimmung mit der oben gewählten Beschreibung und Modularisierung des Systems mit Hilfe eines C&C<sup>2</sup>-M ist eine objektorientierte Darstellung der Systemkomponenten im Softwaresystem vorzusehen. Somit kann gewährleistet werden, dass die funktionsbeschreibenden Merkmale der jeweiligen Komponente zugeordnet bleiben. Neben der Deckungsgleichheit mit dem Modell soll die Objektorientierung auch die Verständlichkeit und Intuitivität bei der funktionalen Bewertung unterstützen.

Da die Funktionsbeschreibung auf energetischer Basis geschieht soll auch das Prinzip der Energieerhaltung in der Softwareumgebung anwendbar sein.

Die Erweiterbarkeit der Softwareumgebung ist ein wichtiges Kriterium für weitere Entwicklungen. Dadurch kann die Gesamtfunktionalität beispielsweise durch die Implementierung und Integration neuer Software-Module an die gewünschten Modellierungsanforderungen angepasst werden. Diese Erweiterungen sollten dabei mit möglichst geringem Aufwand möglich sein und insbesondere bestehende Software-Strukturen unbeeinflusst lassen. Um Erweiterungen vielen Anwendern zu ermöglichen sollte der anzuwendende Programmier-Code eine möglichst hohe Verbreitung besitzen.

In einer Vorarbeit<sup>248</sup> wurden verschiedene Software-Pakete analysiert und hinsichtlich ihrer Eigenschaften bewertet und anschließend geeignete Umgebungen ausgewählt:

Modelica als eine objektorientierte Modellierungssprache wurde geschaffen, um dynamische Systeme aus unterschiedlichen physikalischen Disziplinen komponentenbasiert und hierarchisch strukturiert zu modellieren. Zu großen Teilen ist Modelica frei verfügbar. Es stehen umfangreiche Modellbibliotheken für die Implementierung von Modellen zur Verfügung, die ständig durch eine rasch wachsende Gemeinde von Entwicklern aktualisiert wird und wächst. An dieser Stelle sei das OpenModelica Project<sup>249</sup> erwähnt, das sich zum Ziel gesetzt hat eine voll funktionsfähige Umgebung zur Modellierung, Kompilierung und Simulation mit Modelica zu schaffen. Ein weiteres Beispiel für die Ausbreitung und das Potential dieser Modellierungssprache ist der von Schamai<sup>250</sup> vorgestellte Ansatz der Modelica Modeling Language (ModelicaML). Mit Hilfe grafischer Unterstützung können mittels ModelicaML Zeit-kontinuierliche und Zeit-diskrete sowie Ereignis-

---

<sup>248</sup> Rüdener 2010

<sup>249</sup> <http://www.openmodelica.org>

<sup>250</sup> Schamai 2009



basierte Systemen dargestellt werden und daraus ausführbarer Modelica-Code generiert werden. Es stellt einen Unterbereich der OMG<sup>251</sup> Unified Modeling Language dar (UML) und greift Konzepte der Systems Modeling Language (SysML) auf.

Am Cambridge Engineering Design Centre (EDC)<sup>252</sup> wurde P3 Signposting<sup>253</sup> als Plattform und Metamodell-Editor zur Unterstützung der Darstellung großer und komplexer Modelle entwickelt. Die P3 Software basiert auf dem so genannten Applied Signposting Model (ASM), das einen hierarchischen Ansatz zur Prozessmodellierung darstellt, um Prozesse als aktivitätenbasierte Systeme beschreiben, simulieren und ausführen zu können. Ein besonders großer Vorteil ist die individuelle Konfigurierbarkeit von implementierten Modulen sowie die Vielzahl an bereits vorhandenen Modulen. Eines dieser Module ermöglicht die Beschreibung von Systemen gemäß dem C&C<sup>2</sup>-M. Eine Komponenten- und Funktions-Bibliothek<sup>254</sup> unterstützt den Aufbau von Funktions-Modellen. Sie verfügt über eine bidirektionale Filterfunktion, die es ermöglicht einem C&C<sup>2</sup>-M die funktionserfüllenden Baugruppen zuzuordnen oder die zur Funktionserfüllung notwendigen WFP und LSS einer Komponente in das Modell einzufügen. Da die P3 Software in englischer Sprache gehalten ist werden auch für die C&C<sup>2</sup>-Modellelemente im Folgenden die englischen Begriffe und Abkürzungen verwendet:

- Leitstützstruktur (LSS): . Channel and Support Structure, kurz CSS
- Wirkfläche (WF): Woorking Surface, kurz WS
- Wirkflächenpaar (WFP): Working Surface Pair, kurz WFP

Das in der P3-Umgebung integrierte „Systems Architecture Choices“ Modul<sup>255</sup> bietet die Möglichkeit verschiedene Komponentenkonfigurationen zu erstellen und unterstützt damit den Entwickler bereits in der Konzeptauswahl. Auf Basis festgelegter Komponentennetze wird die Topologie bzw. die Architektur eines Systems variiert und anschließend ein Ranking bezüglich vorgegebener Kriterien aufgestellt.

Damit stellt das C&C<sup>2</sup>-M-Modul in P3 Signposting eine attraktive Grundlage dar, um systematisch ein technisches System in eine Funktionsstruktur zu überführen. Eine hierarchische Darstellbarkeit trägt zur Abbildung komplexer Systeme bei. Um

---

<sup>251</sup> Object Management Group, [http:// www.omg.org](http://www.omg.org)

<sup>252</sup> <http://www-edc.eng.cam.ac.uk/>

<sup>253</sup> Wynn et al. 2009

<sup>254</sup> Sadowski 2009

<sup>255</sup> Albers et al. 2009b; Wyatt Wynn 2009

mathematische Beschreibungen oder ein Rechenmodell des Systems zu erzeugen, bietet sich das ebenfalls hierarchisch strukturierte, objektorientierte Modelica an. Eine Koppelung von Modelica mit einer anderen Softwareumgebung demonstrierte Schyr<sup>256</sup> in seiner Arbeit. Er erzeugte mathematische Beschreibungen von in einer CAD-Umgebung dargestellten Komponenten zur Erstellung von Rechenmodellen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll jetzt ein Ansatz zur Koppelung von Modelica und P3 Signposting entwickelt und in den folgenden Abschnitten beschrieben werden.

### 5.5.1 Modellierung des Antriebsstrangs mit C&C<sup>2</sup>-M

Ausgehend von der oben in den Funktionstabellen vorgenommenen Funktionsbeschreibung mit Hilfe der Hirtz-Funktionsbasis wird die Implementierung einer Funktionsstruktur im C&C<sup>2</sup>-M-Modul von P3 Signposting erläutert. P3 orientiert sich an den Richtlinien der objektorientierten Programmierung und besitzt die Eigenschaft, hierarchische und verknüpfte Modelle erstellen zu können. Es stellt daher einen guten Ausgangspunkt für die Implementierung komplexer Systeme in funktionaler Weise dar<sup>257</sup>. Im Folgenden werden P3 und insbesondere das C&C<sup>2</sup>-M Modul vorgestellt.

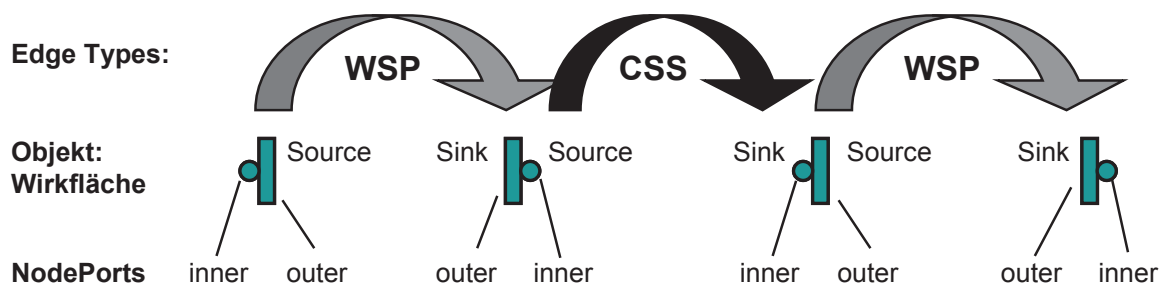
Die Erstellung von Teil-Modellen in der P3-Benutzeroberfläche geschieht innerhalb eines so genannten Worksheets, die zu einem Workbook zusammengefasst und miteinander verknüpft sind. Deshalb bestehen parallel verschiedene Möglichkeiten zur Darstellung eines Systems.

Die wesentlichen Bausteine eines Datenmodells in P3 sind so genannte Node Ports und Edges. Node Ports sind dabei Elemente, die Verknüpfungen herstellen können und Edges sind diejenigen Elemente, über welche die Node Ports verbunden werden. Abbildung 5-10 zeigt den Zusammenhang zwischen Node Ports und Edges bei der Verwendung des C&C<sup>2</sup>-M Moduls, das heißt für die Darstellung von Wirkflächen als verwendete Objekte.

---

<sup>256</sup> Schyr 2006

<sup>257</sup> Rüdener 2010

Abbildung 5-10: Verknüpfungen im C&C<sup>2</sup>-M-Modul von P3 Signposting<sup>258</sup>

Als Bedingung für die konsistente Implementierung von C&C<sup>2</sup>-Modellen in P3 gilt, dass jedes Element in einem Diagramm, das ein bestimmtes Objekt darstellt (zum Beispiel eine WS), mindestens einen Node Port besitzt.

Außerdem existieren so genannte Connection Constraints. Sie geben an, ob einzelne Node Ports miteinander verbunden werden können und vermitteln damit den aus der Art der Verbindung resultierenden Typ von Edge-Elementen. Ein Node Port an der Außenseite kann beispielsweise nur eine Beziehung zu einer anderen Wirkfläche über ein WSP-Edge-Element herstellen. Dieser wird als Rechteck (Outer Port) dargestellt. Ein Node Port an der Innenseite kann dagegen nur mit einem Edge-Typ „Leitstützstruktur“ verbunden werden. Ein Inner Node Port wird durch ein Kreiselement (Inner Port) repräsentiert. Dieser Formalismus kann intuitiv verinnerlicht werden, da LSS ebenfalls die innere Struktur einer Komponente oder eines Teilsystems darstellen können. Als LSS in P3 dargestellte Komponenten können zu Gruppen zusammengefasst werden. Dabei kann generell die Zuordnung funktionsbeschreibender Merkmale nur auf Komponentenebene stattfinden. Gruppen können keine solchen Merkmale zugewiesen werden. Diese enthalten lediglich Unterbaugruppen sowie Komponenten und sind damit eine reine Darstellungshilfe. Lediglich Komponenten enthalten eine individuelle Anzahl und Anordnung von WFP und LSS, denen funktionsbeschreibende Merkmale zugeordnet werden können.

In der grafischen Oberfläche von P3 werden den WFP - also der Verbindung zweier Outer Ports - die zu übertragenden Energieflüsse zugeordnet. Den LSS als Verbindungen jeweils zweier Inner Ports werden die mit Übertragungscharakter behafteten Funktionen entsprechend der Funktionsbasis nach Hirtz zugeschrieben. Dabei unterstützt das integrative Datenbankkonzept von P3. Es verknüpft Flüsse, Funktionen, Komponenten und deren Merkmale. Jedes dieser vier Modellelemente verfügt über eine eigene Datenbank, auf die von verschiedenen hierarchischen und

<sup>258</sup> Sadowski 2009

funktionalen Ebenen des Modells aus zugegriffen werden kann. In der Softwaresystemstruktur ist bei Verwendung Folgendes zu beachten:

Die Festlegung einer bestimmten Flussart stellt gleichzeitig eine Grundlage für die Definition von Funktionen dar. Neben Energieflüssen ist dabei auch die Berücksichtigung von Informations- und Materialflüssen möglich. Komponenten, die dieselben Funktionen erfüllen wie die modellierten Systemkomponenten, werden aus der Datenbank ausgewählt und im Modell ergänzt. Falls die Notwendigkeit besteht, können fehlende WSP und LSS automatisch ebenfalls eingesetzt werden. Eine Filterfunktion gewährleistet die Suche nach Komponenten, die zu den definierten Ein- und Ausgangsflüssen einer Komponente beziehungsweise deren Funktion passen. Der Filter präsentiert dem Anwender alle möglichen Komponenten. Er fällt schließlich die Entscheidung welches eingesetzt werden soll. Außerdem wird dabei zunächst auf generische Elemente zurückgegriffen. In weiteren Schritten der Modellierung können später die modellierten Flüsse, Funktionen und Komponenten mit konkreten Elementen aus der Datenbank ersetzt werden. Anders ausgedrückt werden den generischen Elementen Eigenschaften konkreter Komponenten zugeordnet.

Unter Beachtung dieser Grundsätze kann der Aufbau eines Funktionsmodells mit Hilfe des C&C<sup>2</sup>-M-Moduls in P3 beginnen. Dabei können zum einfacheren Verständnis Baugruppen oder Module des abzubildenden Systems beibehalten werden und die jeweils enthaltenen Komponenten modelliert werden. Bei einer Modellierung des Triebstrangs des Cayenne S Hybrid<sup>259</sup> kann so beispielsweise das Hybridmodul als bauliche Einheit dargestellt werden, das die funktionserfüllenden Komponenten Trennkupplung und E-Maschine enthält. Jede Komponente wird in der P3 Signposting Umgebung durch notwendige WFP und LSS repräsentiert und in das C&C<sup>2</sup>-M integriert. Das erstellte Gerüst des Antriebsstrangs kann danach mit Hilfe der oben erläuterten Funktionstabelle und der Funktionsbasis nach Hirtz in eine funktionale Beschreibung überführt werden. Das mit Funktionen verknüpfte C&C<sup>2</sup>-M wird anschließend mit Hilfe der Filterfunktionen mit generischen Komponenten verknüpft. Diese Zuweisung stellt bereits eine wichtige Grundlage für die unten erläuterte Koppelung des C&C<sup>2</sup>-M mit der objektorientierten Simulationsumgebung Modelica dar.

### **5.5.2 Überführung von C&C<sup>2</sup>-M in Rechenmodelle**

Nach der Erzeugung einer funktionalen Beschreibung des zu untersuchenden Systems muss diese als nächster Schritt zu einer automatisierten Bewertung in ein Rechenmodell überführt werden. Deshalb wird im Folgenden eine Koppelung des

P3 Signposting mit der Modellierungssprache Modelica vorgeschlagen und vorgestellt.

Das Grundprinzip dieser Koppelung sieht vor, die Beschreibung energetischer Flüsse, auf die sich die oben erläuterten C&C<sup>2</sup>-Modelle stützen, mit Hilfe der entsprechenden generischen Elemente aus einer Modelica-Bibliothek zu ersetzen<sup>260</sup>. Dazu muss eine geeignete Schnittstelle zwischen dem C&C<sup>2</sup>-M-Modul in der P3-Umgebung und den Modellelementen in Modelica geschaffen werden. Werden die Komponenten eines Systems und ihre Möglichkeiten mit der Umgebung in Kontakt zu treten als Black-Boxes betrachtet, so erfolgt diese Interaktion im Sinne des C&C<sup>2</sup>-A über die Wirkflächen. Analog dazu bieten Elemente in Modelica so genannte Konnektoren<sup>261</sup> an, mit deren Hilfe Elemente untereinander verbunden werden können.

Eine weitere Analogie zwischen C&C<sup>2</sup>-M und Modelica besteht in der Beschreibung der physikalischen Eigenschaften einer Komponente. Im C&C<sup>2</sup>-M werden sie durch die Leitstützstrukturen beschrieben, in Modelica durch die in den Modell-Elementen hinterlegten Gleichungen („equations“), die beispielsweise die Zustandsgleichungen der Komponente beschreiben. In Abbildung 5-11 ist dies für ein beliebiges akausales System dargestellt.

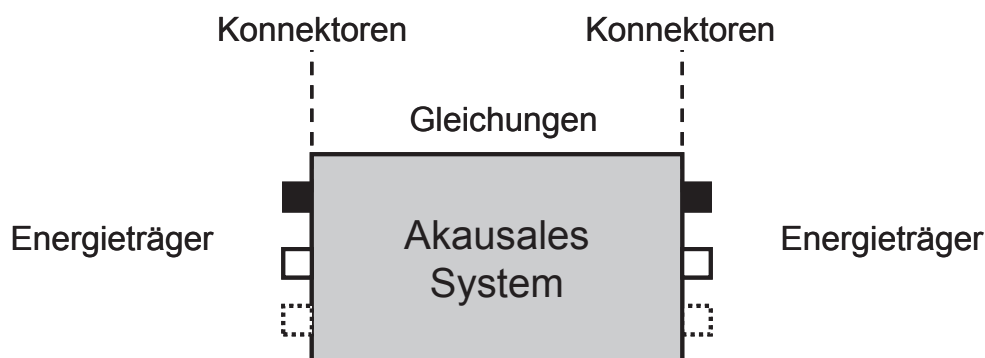


Abbildung 5-11: Darstellung von Konnektoren und Gleichungen in Modelica<sup>262</sup>

Die Koppelung von P3 und Modelica basiert auf dieser Analogiebildung und wie oben erwähnt unter Berücksichtigung der Energieflüsse im System. Damit entsprechen die Wirkflächen des in P3 mit Hilfe des C&C<sup>2</sup>-M erstellten Funktionsmodells den

<sup>259</sup> vgl. Kapitel 2.1

<sup>260</sup> Rüdener 2010

<sup>261</sup> Konnektoren in Modelica sind nicht mit den Connectoren des C&C<sup>2</sup>-Ansatzes zu verwechseln. Konnektoren aus Modelica entsprechen am ehesten den Wirkflächen gemäß dem C&C<sup>2</sup>-A.

<sup>262</sup> Schyr 2006

Konnektoren in Modelica und die Leitstützstrukturen den „equations“ in Modelica. Die Konnektoren werden zum Teil auch als „flange“ (engl. für Flansch) bezeichnet. Konnektoren aus Modelica sind nicht mit „Connectoren“ des C&C<sup>2</sup>-A zu verwechseln. In Modelica haben Konnektoren eher den Charakter von Wirkflächen.

Ähnliche Ansätze zur Koppelung von Modelica mit anderen Software-Umgebungen finden sich in den Arbeiten von Schyr<sup>263</sup> oder Bender<sup>264</sup>. Dabei kamen hier jedoch CAD-Systeme zum Einsatz.

Zunächst soll die Strukturierung der Komponenten-Datenbank im C&C<sup>2</sup>-M-Modul vorgestellt werden, um ein besseres Verständnis für die Entwicklung der Schnittstelle zu schaffen. P3 nutzt generell eine hierarchische Darstellung. Deshalb gilt für die drei vorhandenen Datenbank-Elemente eine ähnliche Strukturierung. Sie enthalten entweder „Flow-Type“-Elemente zur Beschreibung von Flussvariablen oder „Function-Type“-Elemente für die Funktionsvariablen. Beide Element-Typen sind gemäß der Hirtz-Funktionsbasis implementiert. Als dritte Variante existiert eine Datenbank für „Part-Types“ - also für die Bauteile.

Alle Element-Typen sind in der Datenbank jeweils durch eine individuelle Bezeichnungsnummer (engl. identifier, ID), den Namen sowie der ID des übergeordneten Elements (engl. parent) gekennzeichnet. Function-Type-Elemente werden zusätzlich durch einen charakteristischen Flusswert beschrieben, der drei Werte annehmen kann:

- Wert Null: Die Funktion besitzt lediglich ein Flow-Type-Element zur Beschreibung des Eingangsflusses nicht aber zur Beschreibung eines Ausgangsflusses.
- Wert Eins: Die Funktion besitzt jeweils ein Flow-Type-Element zur Beschreibung sowohl von Eingangs- als auch von Ausgangsfluss.
- Wert Zwei: Er beschreibt den inversen Fall von Wert Null.

In P3 wird somit eine Funktion durch den Ausdruck

„functionTypeID, inFlowTypeID, outFlowTypeID“

beschrieben. Existiert aufgrund des charakteristischen Flusswerts kein Eingangs- oder Ausgangs-Flow-Type-Element, wird die jeweilige ID durch einen Punkt „.“ ersetzt.

---

<sup>263</sup> Schyr 2006

<sup>264</sup> Bender 2010

Die Parameter des Part-Type-Elements innerhalb der Datenbank sind in Tabelle 5-1 dargestellt.

Element-Typ	Formale Bezeichnung in der jeweiligen Datenbank	Beispiel
PartType	partTypeID, name, parent-ID, genericStatus, characteristic function value, path to property-file	116, Electric Motor, 114, 1, 45-67-12:56-22-., <Pfad>

Tabelle 5-1: Parameter des Datenbank-Elements PartType<sup>265</sup>

Die ersten drei Parameter sind für alle Element-Typen (Part-Type, Function-Type und Flow-Type) identisch: ID, Element-Name und ID des übergeordneten Elements. Der „genericStatus“ (generischer Status) als vierter Kennwert kann ausschließlich die Werte Null oder Eins annehmen. Der Wert Null beschreibt eine konkrete (real vorhandene) Komponente, der Wert Eins eine generische. Der „characteristic function value“ beschreibt die Verknüpfungen von Eingangs- und Ausgangsflüssen mit der jeweiligen Funktion, repräsentiert durch die jeweiligen ID's. Er kann so beispielsweise den Wert „45-67-12:56-22-.“ annehmen, um auszudrücken, welche Funktionen dieser Komponente zugewiesen sind. Die Pfadangebe „path to property-file“ weist auf eine auf dem Rechner gespeicherte Datei hin, in der Eigenschaften der im Modell angelegten Komponente (bei einem Getriebe z.B. die Getriebeübersetzung) abgelegt sind.

Durch diese Struktur kann die Datenbank von jedem Anwender nachträglich durch Einträge am Ende der Liste ergänzt werden, falls benötigt Elemente noch nicht vorhanden sein sollten. Die Eingliederung in die Hierarchie der Datenbank ist automatisch gegeben.

Zur Darstellung von Funktionen mit dem C&C<sup>2</sup>-A müssen den LSS jeweils ein generisches Äquivalent aus der Bauteilbibliothek zugeordnet werden. Durch die Verknüpfung der LSS mit Hilfe der WFP können die eigentlichen Funktionen dann realisiert werden. Die Software liest dann die im Modell verwendeten Part-Type-Elemente aus und hinterlegt sie in einer Bauteilmatrix. Der Aufbau dieser Struktur und die Verknüpfung der LSS mit den Funktionsbeschreibungen spielt eine wichtige Rolle für die Koppelung von P3 mit Modelica. Dabei kommen prinzipiell drei Vorgehensweisen in Frage:

<sup>265</sup> Sadowski 2009

- Der Anwender wählt in P3 ein aus seiner Sicht mögliches Element aus der Modelica-Bibliothek aus und ergänzt anschließend fehlende Parameter des generischen Bauteils.
- Gemäß der Hirtz-Funktionsbasis wird eine Vorauswahl automatisch getroffen, sodass der Anwender nur aus diesem Teil auswählen kann.
- Es wird eine direkte Verknüpfung aller generischen Bauteile in P3 mit generischen Modelica-Elementen vorgenommen.

Die erste Variante bedingt einen hohen Aufwand für den Anwender und birgt die Gefahr, dass nicht zur Funktionsbeschreibung passende Elemente ausgewählt werden. Die dritte Möglichkeit bietet den höchsten Grad der Automatisierung und sollte deshalb zum Einsatz kommen. Sie benötigt lediglich die Eingabe fehlender Parameter nach der automatisierten Koppelung.

Dadurch wird auch gewährleistet, dass ausschließlich die für die Funktionserfüllung relevanten Elemente in den Modelica-Code übersetzt werden. Dadurch werden erhöhte Komplexität und erhöhter Rechenaufwand vermieden.

Für die Realisierung der Koppelung ist auch ein gewisses Verständnis des Aufbaus der Modelica-Bibliotheken notwendig. Modelica wird seit dem Jahr 1996 von der Modelica Association<sup>266</sup> als freie, objektorientierte Modellierungssprache entwickelt. Die Grundmodelle von Bauteilen werden in der Modelica Standard Library hinterlegt, die im Rahmen dieser Arbeit in der Version 3.1 verwendet wird. Darin enthalten sind über 900 Komponentenmodelle aus den verschiedenen Ingenieursdisziplinen sowie über 600 Funktionen, die auf einer standardisierten Schnittstellendefinition basieren. Diese Bibliothek unterscheidet weitere Unter-Bibliotheken, die sich entweder der Modellierung einer bestimmten Domäne (z.B. Elektrotechnik) widmen oder allgemeine Elemente zum Aufbau eines Modells bereitstellen. Für die Modellierung von hybriden Antriebssträngen sind insbesondere die Unter-Bibliotheken zur Modellierung mechanischer und elektrischer Systeme von Interesse. Letztere unterscheidet verschiedene Typen elektrischer Maschinen, die in weiteren Unterbibliotheken in einem hierarchischen Aufbau angeordnet sind

Die Bibliothek der mechanischen Komponenten beinhaltet sowohl ein- als auch dreidimensionale rotatorische und translatorische Systeme. Für die Abbildung von Fahrzeug-Antriebssträngen besitzt die Sammlung rotatorischer Systeme besondere Relevanz. Neben Elementen zur Modellierung der reinen mechanischen Systeme

---

<sup>266</sup> <http://www.modelica.org/>



hält sie noch Sensoren-, Schnittstellen und weitere Elemente zum Betrieb der Komponenten bereit.

Nach der Zuweisung eines Modelica-Elements zur Funktionsbeschreibung in P3 müssen Informationen über die Verbindungen der verschiedenen Komponenten hinterlegt werden. Dazu werden die IDs aller Wirkflächen eines Bauteils gespeichert und anschließend für die Verknüpfung der Modelica-Elemente verwendet. Außerdem muss definiert werden, welche Wirkflächen sich zu einem Wirkflächenpaar zusammenschließen. Dadurch kann später eine automatische Verknüpfung der Elemente des Modica-Modells stattfinden.

Mit diesem Vorgehen wird es ermöglicht eine teilautomatisierte Verbindung der P3-Software mit Modelica herzustellen. Um einen ausführbaren Modelica-Code zu erhalten müssen noch Parameter zur Konkretisierung der generischen Bauteile vom Anwender ergänzt werden. Dann kann das System beispielsweise mit dem von OpenModelica zur Verfügung gestellten Compiler simuliert werden.

### 5.5.3 Ansatz zur rechnergestützten funktionalen Bewertung

Zur Durchführung einer rechnergestützten funktionalen Bewertung muss ein Rechenmodell des zu untersuchenden Systems zur Verfügung stehen, das alle geforderten Systemzustände und Betriebsfunktionen abbilden kann. Bei der Modellierung des Systems mit Hilfe des C&C<sup>2</sup>-A ist dies zu beachten. Komponenten, die je nach Betriebsfunktion des Systems verschiedene Funktionen übernehmen können, müssen unter Umständen mit Hilfe mehrerer LSS abgebildet werden, damit eine eindeutige Übersetzung des C&C<sup>2</sup>-M in das Rechenmodell gelingt. Am Beispiel eines Getriebes lässt sich dies veranschaulichen: Es wandelt, sofern ein Gang eingelegt ist, Drehzahl und Drehmoment entsprechend der jeweiligen Übersetzung. Sobald jedoch die Neutralstellung gewählt ist, kann kein Drehmoment übertragen werden. Das Getriebe übernimmt nach Hirtz die Funktion „Trennen“. Auf physischer Ebene wird diese Funktion in einem Handschaltgetriebe durch die Synchronseinheiten realisiert und sollte dann mit Hilfe einer neuen LSS in das C&C<sup>2</sup>-M integriert werden. Diese mehrfache Zuordnung von Funktionen zu im System vorhandenen Komponenten kann bereits beim Ausfüllen der oben erläuterten Funktionstabellen aufgedeckt werden.

Für das Erstellen des C&C<sup>2</sup>-M ergeben sich für den beschriebenen Anwendungsfall damit auch Vorschriften für die Wahl des „Zoomfaktors“<sup>267</sup> :

- Grundsätzlich soll die Funktionserfüllung auf Komponenten-Ebene stattfinden

---

<sup>267</sup> vgl. Abschnitt 2.4.1

- Bei der mehrfachen Zuordnung von Funktionen zu einer Komponente soll der Zoomfaktor so gewählt werden, dass die Beziehungen zwischen Eingangs- und Ausgangsflüssen hinreichend beschrieben werden können.

Dies bedeutet, dass alle Funktionen einer Komponente mit möglichst wenigen LSS und WFP bzw. Einzelfunktionen abgebildet werden sollen. Andernfalls erhöht sich die Komplexität des Modells schnell, wodurch die spätere funktionale Bewertung erschwert wird.

Wie bereits oben angedeutet, ergeben sich die Eingangs- und Ausgangszustände (Betriebszustände) von Komponenten und Systemen aus Eigenschaften der Komponenten und Gesamtsystem-Zuständen. Deshalb müssen in einem nächsten Schritt die Bauteileigenschaften den generischen Elementen des Rechenmodells zugeordnet werden. Die Zustandsgrößen der Komponenten ergeben sich dann aus dem aktuellen Gesamtsystem-Zustand und diesen Parametern. Am Beispiel eines Getriebes bedeutet dies, dass zunächst alle möglichen Getriebeübersetzungen hinterlegt werden müssen. Die Eingangs- und Ausgangszustände (z.B. die Getriebeeingangsdrehzahl) ergeben sich dann mit Hilfe der aktuellen Zustandsgrößen des Gesamtsystems, also dem Fahrzustand des Fahrzeugs. In Abbildung 5-12 ist dies schematisch dargestellt.

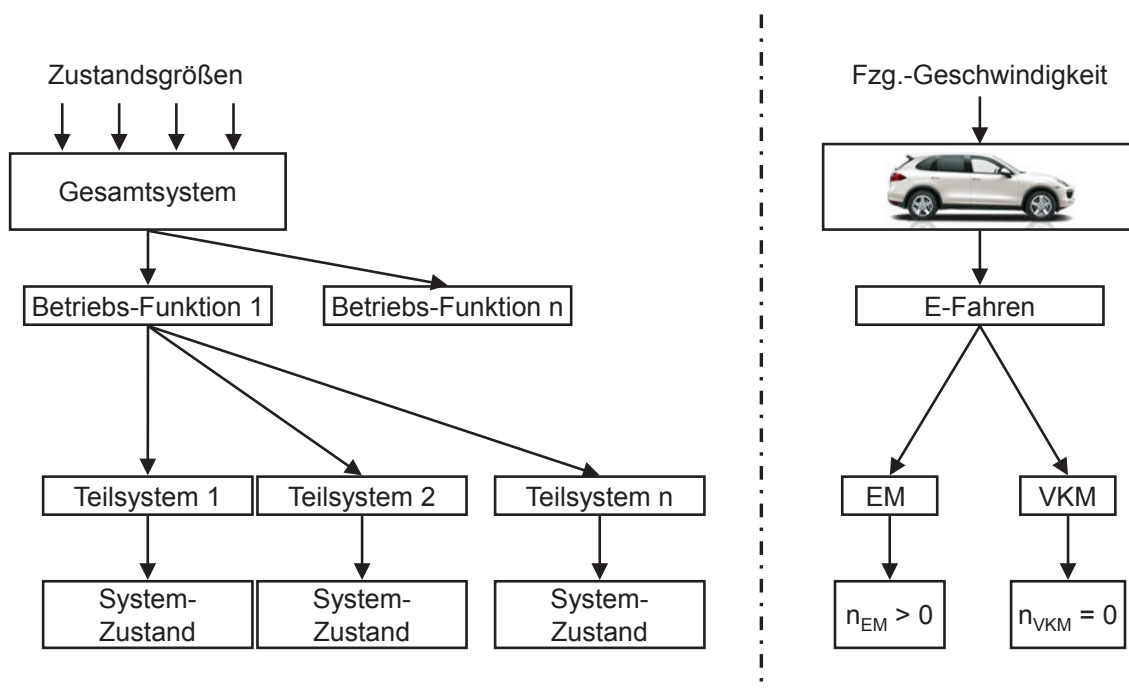


Abbildung 5-12: Ableitung der Komponentenzustände

Während des elektrischen Fahrens (E-Fahren) bei einer bestimmten Fahrzeuggeschwindigkeit nimmt die E-Maschine (EM) eine Drehzahl von  $n_{EM} > 0$  ein, der Verbrennungsmotor (VKM) steht still ( $n_{VKM} = 0$ )

Die Ermittlung der Systemzustände erfordert eine so genannte Rückwärts-Simulation des Systems. Das Modell des Systems erhält als Eingangsgrößen die Zustandsgrößen des Gesamtsystems, im Falle eines Fahrzeugmodells zur Bewertung des Antriebsstrangs also z.B. die Fahrzeuggeschwindigkeit. Aufgrund der angegebenen Komponenteneigenschaften ergeben sich dann die gesuchten Zustandsgrößen.

Zur vollständigen Bewertung des Systems muss die Menge aller möglichen Gesamtsystemzustände mit der Menge aller möglichen Betriebsfunktionen verknüpft werden. Dies wurde bereits in Abbildung 5-9 am Beispiel der Zustandsgröße „Fahrzeuggeschwindigkeit“ angedeutet. Jede dieser Betriebsfunktionen kann durch ein eigenes C&C<sup>2</sup>-Modell repräsentiert werden, in denen auch nur die an der Funktion beteiligten Elemente des Triebstrangs abgebildet sind.

Anschließend können sämtliche im Modell abgebildeten Unterfunktionen überprüft werden. Dazu müssen zulässige Eingangs- und Ausgangszustände der im Gesamtsystem vorhandenen Komponenten oder Teilsysteme beschrieben und definiert werden. Damit wird die funktionale Bewertung streng genommen in eine Bewertung zulässiger Zustände überführt.

Für die Bewertung von Funktionen müssen Eingangs- und Ausgangszustände bestimmt werden. Neben den Zustandsgrößen sind oftmals die Eingangs- und Ausgangsflüsse (z.B. Drehmomente oder Leistungen) von Interesse. Auch diese können mit Hilfe des erstellten Rechenmodells des zu untersuchenden Systems für den jeweiligen Systemzustand und die jeweilige Betriebsfunktion (Betriebsmodus) ermittelt werden. Dadurch ergibt sich eine Vielzahl von Kombinationsmöglichkeiten von Systemzuständen und Parametervariationen. Bei der Bewertung eines hybriden Fahrzeug-Antriebsstrangs müssen beispielsweise für jede Übersetzungsstufe des Hauptgetriebes sämtliche für die funktionale Bewertung notwendigen Größen für alle Betriebsmodi untersucht werden. Sind diese Größen ermittelt, stehen damit auch die Eingangs- und Ausgangszustände und die notwendigen Flüsse für weitere Unterfunktionen zur Verfügung, im Falle des Hybridantriebs zum Beispiel für den Wiederstart des Verbrennungsmotors.

Nach einer Überprüfung der Funktion des Gesamtsystems können mit Hilfe der gewonnenen Informationen auch weitere detaillierte Bewertungen einzelner Komponenten durchgeführt werden. Dazu kann jede dieser Komponenten als zu untersuchendes System aufgefasst werden, die Zustände des Systems sind durch die in der Analyse des übergeordneten Systems und die daraus resultierenden Ergebnisse definiert. Hierzu muss dann zur Modellierung des Teilsystems mit dem C&C<sup>2</sup>-A ein neuer Zoomfaktor gewählt werden, um die geforderte Detaillierung zu erreichen. Hier zeigt sich die Stärke des C&C<sup>2</sup>-A als Metamodell, beliebige

Detailierungsstufen einnehmen zu können. So kann das Gesamtsystem beispielsweise von einem Entwickler-Team funktional bewertet werden, einzelne Triebstrang-Komponenten anschließend noch einmal gezielt von den jeweiligen Experten. Deren Analyse-Ergebnisse können in einer Rekursionsschleife in die Bewertung des Gesamtsystems einfließen.

Zeigen sich während der Analyse funktionale Schwächen eines Systems, kann es erforderlich sein, die Auslegung einzelner Komponenten zu verändern. Dies kann bei der Anwendung der beschriebenen Modellierung durch eine veränderte Parametrierung der generischen Elemente erneut in einer erneuten funktionalen Bewertung berücksichtigt werden. Bei weiterreichenden Schwächen muss die Topologie des Systems unter Umständen verändert werden, was dann eine neue Systemmodellierung erfordert.

Besteht nicht die Möglichkeit die Topologie zu verändern, lassen sich mit der vorgestellten Methode auch Informationen zur Auslegung von Steuerungen gewinnen, um funktionale Schwächen zu kompensieren.

## 5.6 Ableitung eines Vorgehensmodells

Ein festgelegtes Vorgehen soll in der Praxis dazu beitragen, reproduzierbare Ergebnisse bei der funktionalen Bewertung eines technischen Systems zu erhalten. Es ist in Abbildung 5-13 dargestellt.

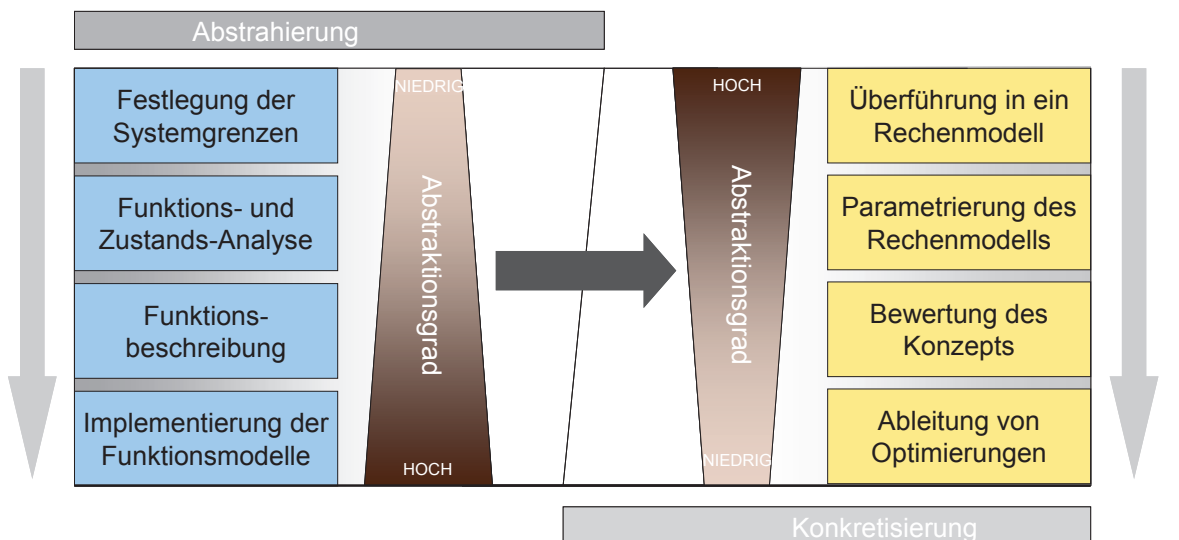


Abbildung 5-13: Vorgehensmodell der funktionalen Bewertung

Basis hierfür ist immer ein gestaltbasiertes System, aus dem mit Hilfe des C&C<sup>2</sup>-A eine funktionale Beschreibung abgeleitet werden soll.

Das Modell sieht zunächst Schritte zur Abstrahierung des Systems und anschließend Schritte zur Konkretisierung der funktionalen Beschreibung vor. Die einzelnen Schritte werden im Folgenden kurz erläutert.

### **Festlegung der Systemgrenzen**

Ein erster Schritt zur Vereinfachung des Systems ist die Festlegung der Systemgrenzen, in denen die funktionale Bewertung stattfinden soll. Im Falle des oben vorgestellten Hybrid-Triebstrangs kann die Systemgrenze beispielsweise am Getriebeausgang gezogen werden. Je nach gewählter Grenze müssen die Zustandsbeschreibungen angepasst werden. Für die Modellierung des Systems mit dem C&C<sup>2</sup>-A beinhaltet dies auch die Festlegung von Connectoren, die dann den Gestaltungsraum eingrenzen. Damit entstehen an der Systemgrenze Wirkflächen die zum System gehören und mit den Wirkflächen der Connectoren Wirkflächenpaare bilden.

### **Funktions- und Zustands-Analyse**

Vor der Beschreibung müssen zunächst die vom betrachteten System zu erfüllenden Funktionen identifiziert werden. Je nach System bestehen dabei verschiedene Sichten, wie es oben am Beispiel von Gesetzgeber, Kunde/Anwender oder Entwicklungsingenieur erläutert wurde. Außerdem sind die Orte der Funktionserfüllung zu identifizieren. Um alle notwendigen Funktionen aufdecken zu können, ist es unter Umständen notwendig den Detaillierungsgrad anzupassen. Eine Darstellung der Funktionen ist in tabellarischer Form oder wie oben vorgestellt in einer Diagramm-Form möglich. Zu unterscheiden sind dabei Haupt-Betriebsfunktionen<sup>268</sup> und Unterfunktionen, die beispielsweise den Wechsel zwischen ersteren ermöglicht. Jede Betriebsfunktion des betrachteten Systems kann später durch ein eigenes C&C<sup>2</sup>-M abgebildet werden.

Mit Hilfe der Zustandsgleichungen des Systems können für die Bewertung Werte relevanter Zustandsgrößen ermittelt werden. Sie dienen als Eingangsgrößen für die spätere Rückwärts-Simulation des Modells des zu untersuchenden Systems. Sie beschreiben damit auch, welche Stoff- und Energieflüsse sowie Informationen an den Connectoren ausgetauscht werden.

---

<sup>268</sup> auch als Betriebsmodi bezeichnet, vgl. Abschnitt 5.1

## **Funktionsbeschreibung**

Für die Beschreibung der Funktionen im betrachteten System müssen alle relevante Teil- und Unterfunktionen identifiziert werden. Dabei werden Funktionen den Komponenten fest zugeordnet. Zur Unterstützung dieser Beschreibung dienen die oben vorgestellten Funktionstabellen. Auch die Überführung der Funktionsbeschreibung gemäß der Hirtz-Funktionsbasis wird darin festgehalten. Dadurch wird das System soweit abstrahiert, dass nur die zur Funktionserfüllung notwendigen Informationen vorliegen.

## **Implementierung der Funktionsmodelle**

In diesem Schritt kommt das ausgewählte Metamodell zur Anwendung. Im Meta-Modell-Editor P3 wird ein Modell des Systems mit Hilfe des C&C<sup>2</sup>-M-Moduls erstellt und mit Funktionsbeschreibungen nach Hirtz verknüpft. Gemäß dem C&C<sup>2</sup>-A ist dabei für jede Betriebsfunktion ein eigenes C&C<sup>2</sup>-Modell zu erstellen. Dadurch entsteht ein durchgängiges Funktionsmodell.

## **Überführung in ein Rechenmodell**

Mit Hilfe der vorgestellten Koppelung von P3 und Modelica soll anschließend aus dem Funktionsmodell ein Rechenmodell des Systems erzeugt werden. Dieses soll später dazu dienen, eine teilautomatisierte Bewertung des Systems vornehmen zu können.

## **Parametrierung des Rechenmodells**

Nach der Erzeugung des Rechenmodells mit Hilfe generischer Modelica-Elemente, müssen die einzelnen Bauteile parametrierung werden, um Eigenschaften der in der Realität vorgesehenen Komponenten des Systems nachzubilden. Durch diese zunehmende Konkretisierung des Systems wird der Abstraktionsgrad verringert. Eine Quantifizierung der Systemeigenschaften wird ermöglicht.

## **Bewertung des Konzepts**

Für die Bewertung des Systems müssen wie oben am Beispiel des Hybridantriebsstrangs erläutert, sämtliche Funktionen auf ihre Erfüllbarkeit hin untersucht werden. Dazu muss das Modell mit allen möglichen Systemzuständen simuliert werden. Funktionale Schwächen oder Einschränkungen können erkannt werden, indem Eingangs- und Ausgangszustände sowie Flüsse auf zulässige Werte überprüft werden.

### Ableitung von Optimierungen

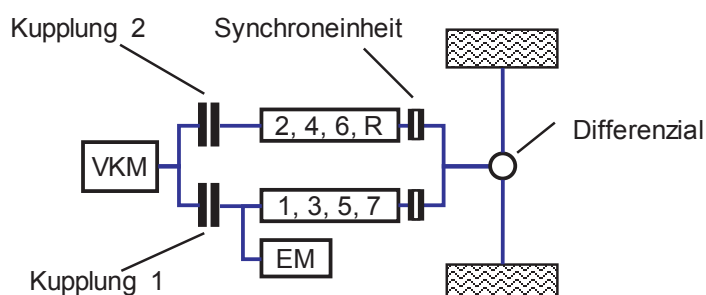
Sollten bei der Bewertung Schwächen entdeckt worden sein, sind diese durch geeignete Maßnahmen zu eliminieren. Dabei kann die Topologie des Systems verändert werden, neue Komponenten als Funktionsträger hinzugefügt oder unnötige Elemente entfernt werden. Anschließend kann eine erneute Bewertung des Systems durchgeführt werden.

Sollen nach der Bewertung des Gesamtsystems zusätzlich weitere Bewertungen einzelner Komponenten durchgeführt werden, kann dies ebenfalls mit dem beschriebenen Vorgehen erfolgen, wobei dann das zu bewertende System andere Grenzen besitzt. Seine Zustandsgrößen werden durch das übergeordnete Teilsystem und dessen Funktionen und Zustände definiert.

## 5.7 Exemplarische Anwendung der funktionalen Bewertung

Die vorgestellte Methode zur funktionalen Bewertung technischer Systeme soll in den folgenden Abschnitten am Beispiel eines Hybridantriebs mit 7-Gang-Doppelkupplungsgetriebe angewendet werden.

### Schema



### C&C<sup>2</sup>-M

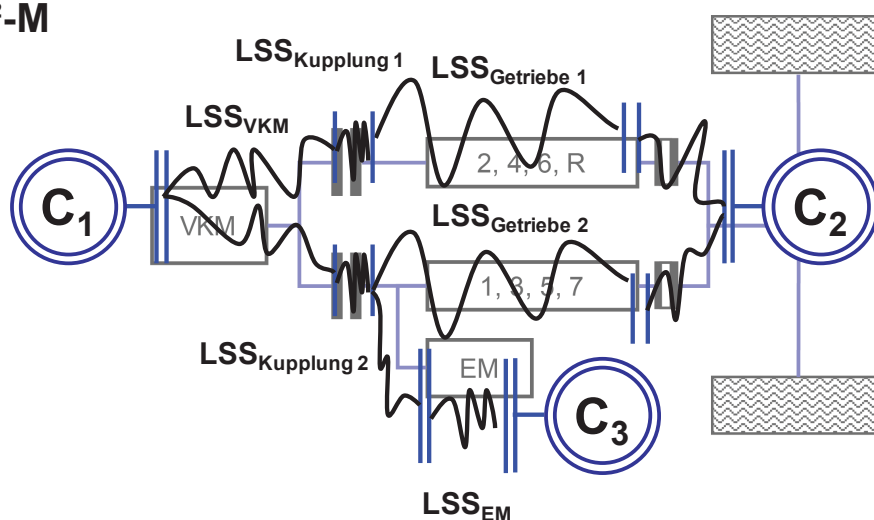


Abbildung 5-14: Schema und C&C<sup>2</sup>-M des untersuchten Systems

Die E-Maschine (EM) ist bei diesem Konzept an der Eingangswelle 1 angeordnet, die die Gänge 1, 3, 5 und 7 trägt. Abbildung 5-14 zeigt eine schematische Darstellung sowie das C&C<sup>2</sup>-Modell des Systems.

Für den Wiederstart des Verbrennungsmotors (VKM) ist keine zusätzliche Starteinrichtung vorgesehen, sodass der Start mit Hilfe der Anfahr-Kupplungen erfolgen muss. Die übrige Triebstrangkonfiguration entspricht der in Abbildung 2-3 vorgestellten Variante B<sup>269</sup>. Stellvertretend für die im Getriebe vorhandenen Synchronseinheiten ist jeweils eine für jedes der beiden Teilgetriebe dargestellt. Sie dienen der Abbildung der möglichen Neutralstellung beider Teilgetriebe.

Da dieses System lediglich ein Konzept darstellt und nicht als reales System zur Verfügung stand, werden phänomenologische Auswirkungen der später aufgezeigten funktionalen Schwächen des Systems an einem Simulationsmodell aufgezeigt.

Für die funktionale Bewertung kann auch in diesem Fall die Systemgrenze zwischen Haupt- und Differenzialgetriebe gezogen und die Systemzustände auf den Getriebeausgang reduziert werden.

### 5.7.1 Anwendung der Funktionstabellen

Im Folgenden soll das oben vorgestellte System anhand ausgewählter Fahrzustände und Betriebsfunktionen mit Hilfe der Funktionstabellen untersucht werden. Als Fahrzustände und Funktionen wurden gewählt:

- das Fahren vorwärts mit Verbrennungsmotor
- das Fahren vorwärts mit elektrischem Antrieb
- das Fahren rückwärts mit elektrischem Antrieb
- der Wiederstart des Verbrennungsmotors beim elektrischen Vorwärts- und Rückwärtsfahren

Das Antriebsstrangkonzept wird bezüglich der einzelnen Fahrsituationen analysiert und seine funktionalen Schwächen und Einschränkungen werden erläutert.

#### **Fahren vorwärts mit Verbrennungsmotor**

Das Fahren vorwärts mit dem Verbrennungsmotor kann aufgrund des eingesetzten Doppelkupplungsgetriebes jeweils über eines der Teilgetriebe erfolgen. Dadurch ergibt sich die Zwangsbedingung, dass sowohl Kupplung als auch die Synchronseinheit des Teilgetriebes geschlossen sein muss. Auf dem jeweils anderen

---

<sup>269</sup> vgl. Abschnitt 2.1.1



Teilgetriebe muss die Kupplung geöffnet sein. Optional ist es möglich auch die Synchron Einheit zu öffnen. Dies kann beispielsweise geschehen, um Schleppverluste im Getriebe zu verringern. Die Leitstützstruktur des jeweils nicht aktiven Teilgetriebes entfällt aus dem C&C<sup>2</sup>-Modell.

Der Verbrennungsmotor muss oberhalb seiner Leerlaufdrehzahl arbeiten, um einen stabilen Betrieb zu gewährleisten. Unterhalb dieser Drehzahl könnten Drehungleichförmigkeiten den Triebstrang zu Schwingungen anregen oder der Motor könnte abgewürgt werden. Zur Deckung des elektrischen Energiebedarfs des Fahrzeugs wird die E-Maschine üblicherweise generatorisch betrieben. Deshalb ist ihr in der in Abbildung 5-15 dargestellten Funktionstabelle die Funktion „Wandeln mechanischer in elektrische Energie“ zugeordnet. Die Getriebeausgangswelle überträgt die Antriebsleistung an das Differential und zu den angetriebenen Rädern des Fahrzeugs.

Betriebsfunktionen	Komponente			Zustand_Komponente			Funktion			Bemerkungen			Beschreibung nach Hirtz		
	Komponente	Zustand_Komponente	Funktion	Funktion	Bemerkungen	Eingangsstrom	Funktion	Ausgangsstrom							
<b>vorwärts Fahren mit VKM</b>	VKM	An, Dreht vorwärts	Energiequelle	VKM arbeitet oberhalb Leerlaufdrehzahl	chemische Energie	Wandeln	mechanisch rotatorische Energie								
	E-Maschine	Dreht sich (2. Quadrant)	Energiewandler	E-Maschine arbeitet im 2. Quadranten (generatorisch)	mechanisch rotatorische Energie	Wandeln	elektrische Energie								
	Kupplung 2	Offen	Energiefluss trennen	Ungerader Gang in Betrieb	mechanisch rotatorische Energie	Trennen	mechanisch rotatorische Energie								
		Geschlossen	Energiefluss herstellen	Gerader Gang in Betrieb	mechanisch rotatorische Energie	Übertragen	mechanisch rotatorische Energie								
	Kupplung 1	Geschlossen	Energiefluss herstellen	Gerader Gang in Betrieb	mechanisch rotatorische Energie	Übertragen	mechanisch rotatorische Energie								
		Offen	Energiefluss trennen	Ungerader Gang in Betrieb	mechanisch rotatorische Energie	Trennen	mechanisch rotatorische Energie								
	Synchroninheit 2	Kein Gang eingelegt	Energiefluss trennen	Ungerader Gang in Betrieb	mechanisch rotatorische Energie	Trennen	mechanisch rotatorische Energie								
		Gang eingelegt	Energiefluss herstellen	Gerader Gang in Betrieb	mechanisch rotatorische Energie	Übertragen	mechanisch rotatorische Energie								
	Synchroninheit 1	Gang eingelegt	Energiefluss herstellen	Ungerader Gang in Betrieb	mechanisch rotatorische Energie	Übertragen	mechanisch rotatorische Energie								
		Kein Gang eingelegt	Energiefluss trennen	Ungerader Gang in Betrieb	mechanisch rotatorische Energie	Trennen	mechanisch rotatorische Energie								
	Getriebeausgangswelle	Dreht sich	Leistung übertragen		mechanisch rotatorische Energie	Übertragen	mechanisch rotatorische Energie								

Abbildung 5-15: Betriebsfunktion „Fahren mit VKM“ im Fahrzustand „vorwärts Fahren“

### **Fahren vorwärts mit elektrischem Antrieb**

Beim Fahren vorwärts mit Hilfe des elektrischen Antriebs muss insbesondere gewährleistet werden, dass der Verbrennungsmotor vom Triebstrang abgekoppelt ist, um Reibungsverluste zu vermeiden. Der Fall eines als Motorbremse angekoppelten Motors wird hier vernachlässigt.

In der zugehörigen Funktionstabelle würde dem Verbrennungsmotor deshalb keine Funktion zugeordnet werden. Beide Kupplungen sind geöffnet und trennen den Motor vom Triebstrang und damit den Fluss mechanisch rotatorischer Energie. Diese Leitstützstrukturen sind folglich nicht vorhanden. Außerdem wurde angenommen, dass auch der Gang im Teilgetriebe 2 ausgelegt ist, um mögliche Verluste weiter zu reduzieren. Dadurch wird das Teilgetriebe im C&C<sup>2</sup>-M ebenfalls nicht mit abgebildet. Lediglich die Synchronereinheit 1 stellt einen Energiefluss zwischen E-Maschine und der Getriebeausgangswelle her, die ihn an den Abtrieb überträgt. Die E-Maschine arbeitet im 1. Quadranten und gibt somit bei positiver Drehzahl ein positives Drehmoment ab.

Durch diese Betrachtung wird verdeutlicht, dass das elektrische Fahren ausschließlich mit Hilfe des Teilgetriebes 1 realisiert werden kann. Für einen Getriebebeschaltvorgang bedeutet dies gleichzeitig, dass er während des elektrischen Fahrbetriebs nur mit Zugkraftunterbrechung durchgeführt werden kann, da keine Möglichkeit besteht den Energiefluss über Teilgetriebe 2 zu leiten. Somit konnte die erste funktionale Schwäche des Systems identifiziert werden.

### **Fahren rückwärts mit elektrischem Antrieb**

Auch beim elektrischen Rückwärtsfahren treibt die E-Maschine das Fahrzeug alleine an. Deshalb muss die Synchronereinheit des Teilgetriebes 1 geschlossen sein, um den Energiefluss von der E-Maschine bis zum Rad zu ermöglichen. Da aufgrund des Fahrzustands das Rad und damit auch der Getriebeausgang die Drehrichtung wechseln, muss auch die E-Maschine mit negativer Drehzahl, d.h. im 4. Quadranten betrieben werden. Kupplung 2 und Synchronereinheit 2 sind geöffnet um den Verbrennungsmotor vom Triebstrang zu trennen beziehungsweise Schleppverluste im Getriebe zu vermeiden.

### **Wiederstart des Verbrennungsmotors**

Für den Wiederstart des Verbrennungsmotors als wichtige Funktion im Hybridantrieb sind zwei grundsätzlich verschiedene Zustände zu unterscheiden: Der geschleppte Betrieb und der selbständige Lauf, der erst über einer vom Motor abhängigen Drehzahlschwelle erfolgen kann

Während des gesamten Wiederstartvorgangs treibt die E-Maschine das Fahrzeug an. Auf der Getriebewelle 1 muss deshalb ein Gang eingelegt und die Synchronereinheit geschlossen sein. Auch auf Teilgetriebe 2 kann ein Gang eingelegt und die zugehörige Synchronereinheit geschlossen sein. Damit kann der Motor prinzipiell über beide Kupplungen angeschleppt werden. Hierbei ist nun zunächst der Fahrzustand von entscheidender Bedeutung:

Beim Fahren vorwärts wurde oben angenommen, dass das Teilgetriebe 2 zur Vermeidung von Schleppverlusten vom Triebstrang abgekoppelt ist. Für den Wiederstart muss dann zunächst ein Gang eingelegt und damit die Synchronereinheit 2 geschlossen werden, um den Start auch über Kupplung 2 zu erlauben. Oder die oben getroffene Annahme muss zurückgenommen werden und beim elektrischen Fahren immer ein Gang auf der Getriebewelle 2 eingelegt sein.

Soll der Wiederstart beim Rückwärtsfahren durchgeführt werden, ist zu beachten, dass die E-Maschine eine negative Drehzahl besitzt. Beim Startversuch via Kupplung 1 würde die VKM ebenfalls mit negativer Drehzahl angeschleppt werden, was bei üblichen Verbrennungsmotoren unzulässig ist. Deshalb kann der Start beim Rückwärtsfahren ausschließlich über die Kupplung 2 erfolgen. Zudem muss zwangsweise der Rückwärtsgang auf Welle 2 eingelegt sein, um den Verbrennungsmotor mit korrekter Drehrichtung anzudrehen.

Außerdem kann kein Wiederstart der VKM beim Fahrzeugstillstand durchgeführt werden, sofern auf Teilgetriebe 1 ein Gang eingelegt ist, da damit auch die Drehzahl der Kupplung 1 zu Null wird und somit keine Leistung zum Anschleppen des Motors übertragen werden kann.

Bei geringen Fahrgeschwindigkeiten und den damit verbundenen niedrigen Drehzahlen beider Getriebeeingangswellen kann es zu Konflikten mit den oben genannten Zuständen des Verbrennungsmotors kommen. Der Motor müsste unter Umständen unterhalb seiner Leerlaufdrehzahl betrieben werden, was nur bedingt möglich ist. Ein Wiederstart mit Hilfe der Doppelkupplung darf also nur oberhalb einer bestimmten Drehzahlschwelle erfolgen. Dieser Fall eines Starts bei sehr geringer Fahrzeuggeschwindigkeit soll mit Hilfe der unten vorgestellten Simulation des Systems erläutert werden.

### **5.7.2 Numerische Simulation des Systems**

Wie bereits oben erwähnt, sollen an einem Simulationsmodell des untersuchten Triebstrangs phänomenologische Auswirkungen funktionaler Schwächen und das Verhalten der Triebstrangkomponenten verdeutlicht werden. Dieses Modell basiert nicht auf einem in P3 erstellten Modell, sondern stellt eine separate Entwicklung dar.

In den folgenden Abschnitten werden deshalb die wesentlichen Bestandteile des eingesetzten Simulationsmodells vorgestellt. Sämtliche Modelle wurden in MATLAB/Simulink, die Steuerungen mit Stateflow<sup>270</sup> aufgebaut. Das Motormodell und die Steuerungen wurden neu entwickelt und implementiert. Das Triebstrangmodell stand aus früheren Anwendungen bei der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG zur Verfügung und wurde um Modelle zur Abbildung des Kupplungsverhaltens ergänzt. Anschließend wird auf einzelne Simulationsergebnisse eingegangen werden.

#### 5.7.2.1 Motormodell

Um den Wiederstart des Motors abbilden zu können, muss ein geeignetes Modell gefunden werden. In der Literatur existiert eine Vielzahl verschiedener Motormodelle. Viele der beschriebenen Ansätze bilden jedoch nur stationäre Betriebspunkte des jeweils betrachteten Motors ab und sind aufgrund verschiedener Vereinfachungen nicht in der Lage den dynamischen Vorgang des Motorstarts zu beschreiben.

Zur Abbildung des Wiederstarts ist es notwendig sowohl den geschleppten, ungefeuerten als auch den gefeuerten Betrieb des Motors abzubilden. Ziel im Rahmen dieser Arbeit ist es nicht die Thermodynamik des Motors exakt zu beschreiben, sondern das Kurbelwellenmoment mit seinen Ungleichförmigkeiten unter verschiedenen Randbedingungen im betrachteten Betriebsbereich ausreichend genau abzubilden. Deshalb wurde ein empirischer Modellansatz mit physikalischen Teilmodellen ergänzt, um das Start- und Hochlaufverhalten eines Verbrennungsmotors zu beschreiben. Außerdem soll das Verhalten des Motors beim Betrieb in statischen Betriebspunkten ausreichend genau abgebildet werden. Neben dem gefeuerten kann das Modell auch den geschleppten Betrieb abbilden und ist damit in der Lage sämtliche Arbeitspunkte vom Motorstillstand bis zum Betrieb unter Last darzustellen.

Das Motormodell ist modular aufgebaut, um auch verschiedene Motoren abbilden zu können. Die einzelnen Module werden im Folgenden kurz vorgestellt.

#### **Analyse des dynamischen Kurbelwellenmoments**

Das Kurbelwellenmoment setzt sich aus den folgenden Anteilen zusammen:

- Kompressions- und Expansionsmomente der Zylinderladung
- Massenmomente der oszillierenden Massen

---

<sup>270</sup> [www.mathworks.com](http://www.mathworks.com)

- Indiziertes Moment durch die Verbrennung
- Reibmomente

Diese Anteile können im Modell für jeden Zylinder einzeln bestimmt werden und durch Superposition entsprechend der jeweiligen Zündabstände zum resultierenden Kurbelwellenmoment zusammengefügt werden.

Für den Startvorgang sind zunächst die Momente ausschlaggebend, die von der Starteinrichtung aufgebracht werden müssen, um den unbefeuerten Motor anzudrehen. Dazu zählen neben Reibungsanteilen die Kompressionsmomente. Letztere sind maßgeblich vom effektiven Kompressionsverhältnis, der Kurbel- und Zylindergeometrie sowie dem Zylinderdruck beim Schließen der Einlassventile abhängig. Dieses Moment ist nicht über der Zeit konstant, weshalb es als Verlauf über dem Arbeitsspiel des Motors im Motormodell abgebildet werden soll. Für die reine Kompression und Expansion des Arbeitsgases wurden verschiedene Annahmen getroffen:

- Aufgrund der niedrigen Motordrehzahl beim ersten Andrehen des Motors und der damit verbundenen niedrigen Strömungsgeschwindigkeit kann ein Luftaufwand von  $\lambda_a = 1$  angenommen werden
- Der Zylinderdruck beim Schließen der Einlassventile entspricht dem Saugrohrdruck
- Die Verdichtung wird als konstant isentrop angenommen
- Das Arbeitsgas wird als ideal angenommen.

Die Einflüsse der oszillierenden Massen auf das Kurbelwellenmoment lassen sich mit Hilfe bekannter Gleichungen über die Kolbenbeschleunigung abbilden<sup>271</sup>.

Das Kurbelwellenmoment, das durch die Verbrennung verursacht wird, kann nach Isermann<sup>272</sup> mit einem empirischen Ansatz beschrieben werden. Ausgehend vom indizierten Mittelmoment  $M_{ind, Zyl}$  eines Zylinders wird das Moment ähnlich einer Vibe-Funktion zur Abbildung des Verbrennungsdruckes über dem Arbeitsspiel moduliert. Daraus entsteht das dynamische Verbrennungs-Moment  $M_V$  über dem Kurbelwinkel  $\alpha$  (Formel 5-1):

---

<sup>271</sup> Pischinger 2000

<sup>272</sup> Isermann et al. 1999

$$M_V(\alpha) = \frac{16 * \pi * M_{ind,Zyl}}{(\alpha_{max})^3} * \alpha^2 * e^{-2 * \frac{\alpha}{\alpha_{max}}} \quad \text{Formel 5-1}$$

Die beiden Parameter mittleres indiziertes Zylindermoment  $M_{ind, Zyl}$  und Kurbelwinkel maximalen Verbrennungsmoments  $\alpha_{max}$  können aus Messdaten gewonnen werden.

Unter Annahme stöchiometrischer Verbrennung lässt sich das mittlere indizierte Moment  $M_{ind,Zyl}$  eines Otto-Motors auch aus der Luftmasse im Zylinder  $m_{L, Zyl}$ , dem indizierten Wirkungsgrad  $\eta_{ind}$ , dem Luftverhältnis  $\lambda$ , dem Heizwert  $H_u$  und dem stöchiometrische Luftbedarf  $L_{st}$  berechnen (Formel 5-2):

$$M_{ind, Zyl} = \frac{m_{L,Zyl} * H_u * \eta_{ind}}{4 * \pi * \lambda * L_{st}} \quad \text{Formel 5-2}$$

Die Luftmasse im Zylinder  $m_{L, Zyl}$  ergibt sich aus Zylindervolumen beim Schließen der Einlassventile sowie der Dichte der Ansaugluft und steht damit in direkten Zusammenhang mit dem Druck und der Temperatur im Saugrohr.

Das Moment, das durch die reine Kompression und Expansion des Arbeitsgases in den Zylindern entsteht, wurde unter Annahme konstant isentroper Verhältnisse abgebildet. Dieses Moment ist ebenfalls abhängig vom Druck im Zylinder beim Schließen der Einlassventile und somit vom Saugrohrdruck.

Abbildung 5-16 zeigt ein implementiertes Modul zur Berechnung der oszillierenden Momente eines Zylinders.

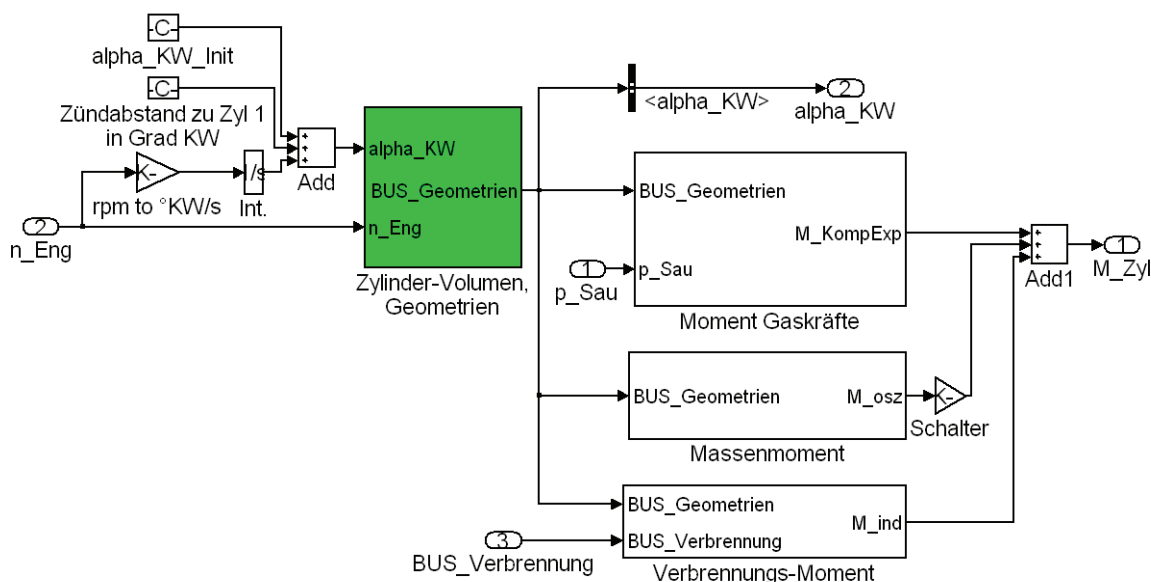


Abbildung 5-16: Zylinder-Modul zur Berechnung oszillierender Momente

Es beinhaltet ein Teilmodell zur Berechnung der notwendigen Geometriedaten sowie Module zur Berechnung der oben beschriebenen Anteile der oszillierenden Momente.

### Saugrohrmodell

Der beschriebene Modellansatz benötigt eine Angabe des indizierten Mittelmoments. Dieses kann entweder aus Kennfeldern gewonnen oder aus Berechnungen generiert werden. Da der Saugrohrdruck nicht nur Einfluss auf das indizierte Moment hat, sondern auch die Kompressionsmomente stark beeinflusst, ist es notwendig den Saugrohrzustand im Modell zu beschreiben. Das indizierte Moment wird dann aus der Füllung des Zylinders unter Berücksichtigung eines Umsetzungswirkungsgrades berechnet. Dieser fasst verschiedene im realen Motor auftretende Arbeitsverluste zu einem Parameter zusammen. Diese sind im Wesentlichen der innere Wirkungsgrad des Kreisprozesses, Verluste aufgrund unvollständiger Verbrennung sowie sonstige thermische Verluste. Aus Rastervermessungen bestehender Motoren können diese Informationen gewonnen werden.

Die Füllung ist beim Start des Motors abhängig vom Zylindervolumen beim Schließen der Einlassventile und der Luft- bzw. Gemischdichte im Saugrohr. Da sich während des Startvorgangs der Saugrohrdruck und damit das indizierte Moment stark verändert, muss das Saugrohr und dessen dynamisches Verhalten abgebildet werden. Das Saugrohr kann dabei vereinfacht als idealer Behälter mit dem Volumen  $V$  und der konstanten Temperatur  $T$  aufgefasst werden. Die Veränderung des Drucks im Behälter kann dann mit Hilfe der ein- und ausströmenden Luftmassenströme ( $\dot{m}_1$  bzw.  $\dot{m}_2$ ) und der Gaskonstanten für Luft  $R_L$  berechnet werden (Formel 5-3):

$$\dot{p} = (\dot{m}_1 - \dot{m}_2) \cdot \frac{R_L \cdot T}{V}. \quad \text{Formel 5-3}$$

Durch Integration der Gleichung kann der Druck im Saugrohr bestimmt werden. Der einströmende Luftmassenstrom  $\dot{m}_1$  entspricht dem Luftmassenstrom aus der Umgebung über die Drosselklappe in das Saugrohr. Er kann mit Hilfe nulldimensionaler isentroper Strömungsbeziehungen<sup>273</sup> aus den isentropen Größen Strömungsquerschnitt  $A_s$ , Strömungsgeschwindigkeit  $c_s$  und der Dichte  $\rho_s$  beschrieben werden (Formel 5-4):

---

<sup>273</sup> Pischinger 2000



$$\dot{m}_1 = c_s * \rho_s * A_s. \quad \text{Formel 5-4}$$

Bei der Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit  $c_s$  muss unterschieden werden, ob unter- oder überkritische Strömungszustände vorliegen (Formel 5-5 bzw. Formel 5-6):

$$c_s = \sqrt{\frac{2 * \kappa}{\kappa - 1} * R_L * T * \left(\frac{p_U}{p_{sau}}\right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}}} \quad \text{unterkritischer Fall} \quad \text{Formel 5-5}$$

$$c_s = \sqrt{\frac{2 * \kappa}{\kappa - 1} * R_L * T * \left(1 - \frac{2}{\kappa - 1}\right)} \quad \text{überkritischer Fall} \quad \text{Formel 5-6}$$

Dabei werden die Größen Isentropenexponent  $\kappa$ , der Umgebungsdruck  $p_U$  und der Saugrohrdruck  $p_{sau}$  verwendet. Auch bei der Bestimmung der Dichte  $c_s$  ist die gleiche Fallunterscheidung vorzunehmen (Formel 5-7 bzw. Formel 5-8).

$$\rho_s = \rho_U * \left(\frac{p_U}{p_{sau}}\right)^{\frac{1}{\kappa}} \quad \text{unterkritischer Fall} \quad \text{Formel 5-7}$$

$$\rho_s = \rho_U * \left(\frac{2}{\kappa + 1}\right)^{\frac{1}{\kappa - 1}} \quad \text{überkritischer Fall} \quad \text{Formel 5-8}$$

Der isentrope Strömungsquerschnitt  $A_s$  der Drosselklappe kann aus Versuchen gewonnen werden und als Kennlinie über dem Drosselklappenwinkel abgelegt werden.

Der aus dem Saugrohr ausströmende und in die Zylinder einströmende Luftmassenstrom  $\dot{m}_2$  lässt sich unter Annahme eines Luftaufwands von eins vereinfacht durch die Luftdichte im Saugrohr und das Zylindervolumen beim Schließen der Einlassventile in Abhängigkeit der Drehzahl  $n$  berechnen (Formel 5-9):

$$\dot{m}_2 = \frac{V_{H,ES} * i * n * p_{sau}}{R_L * T_{sau}}. \quad \text{Formel 5-9}$$

Der Parameter  $i$  beschreibt die Anzahl der Arbeitstakte der einzelnen Zylinder pro Motorumdrehung und nimmt deshalb beim Viertakt-Motor den Wert 0,5 an.

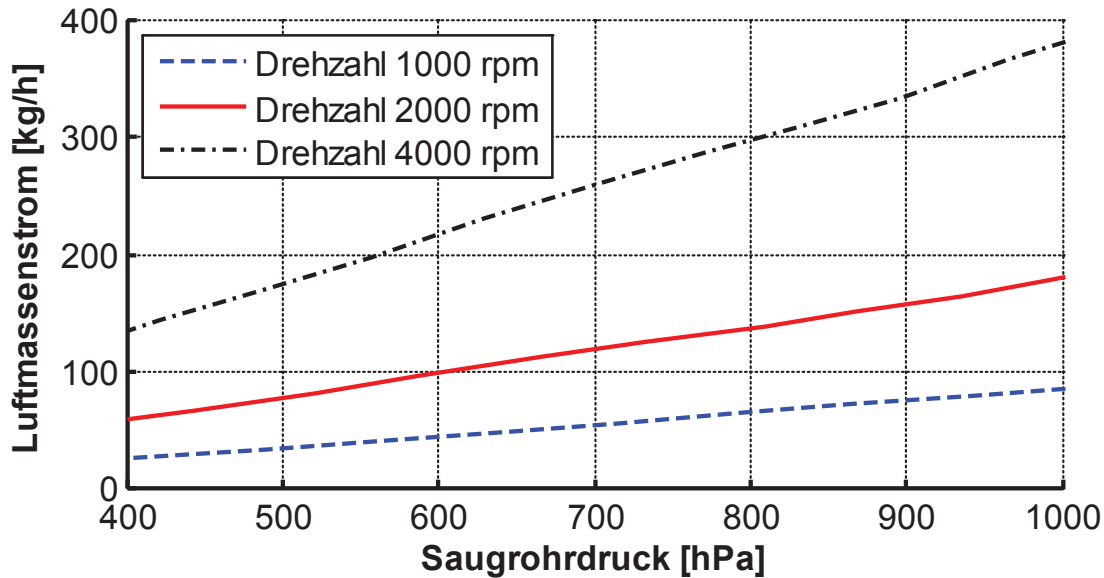


Abbildung 5-17: Luftmassenstrom als Funktion von Drehzahl und Saugrohrdruck

Abbildung 5-17 zeigt dies beispielhaft an aus einer realen Messung gewonnenen Daten für die drei Motordrehzahlen 1000, 2000 und 4000  $\text{min}^{-1}$ . Der Luftmassenstrom über die Drosselklappe steigt linear mit dem Saugrohrdruck und proportional zur Drehzahl.

Soll der Motor ein bestimmtes indiziertes Moment bereitstellen, lassen sich aus dieser Vorgabe in Abhängigkeit von der aktuellen Motordrehzahl ein Soll-Saugrohrdruck und ein Soll-Luftmassenstrom über die Drosselklappe berechnen, wodurch die Laststeuerung entsprechend angepasst werden kann. Annahme hierfür ist wieder der lineare Zusammenhang zwischen Saugrohrdruck, Drehzahl und Luftmassenstrom sowie der aus Kennfeldern ermittelte indizierte Wirkungsgrad. Der Einfluss von Aufladeeinrichtungen wie eines Abgasturboladers oder eines mechanisch angetriebenen Kompressors auf den Saugrohrdruck kann für den Wiederstart des Verbrennungsmotors vernachlässigt werden, da sie während der für den Start relevanten Zeitdauer noch keinen Ladedruck aufbauen.

Um verschiedene Startarten und Ausprägungen des Wiederstarts abbilden zu können, wurden Module zur Abbildung von Einspritzfreigaben in das Modell integriert. Sie ermöglichen es verschiedene Kriterien analog einer realen Motorsteuerung zu schaffen, um den Beginn der ersten Verbrennung festzulegen. Dabei können beliebige Kriterien wie Drehzahlschwellen, Zylinder-individuelle Kriterien oder Saugrohrzustände Eingang finden. Damit kann der Motor alle Betriebszustände inklusive des geschleppten Betriebs und eines unterstützten Direktstarts abbilden. Auch Fehlerfälle wie Zündaussetzer können nachgestellt werden.

In Abbildung 5-18 ist das implementierte Modul zur Berechnung des indizieren Mittelmoments dargestellt.

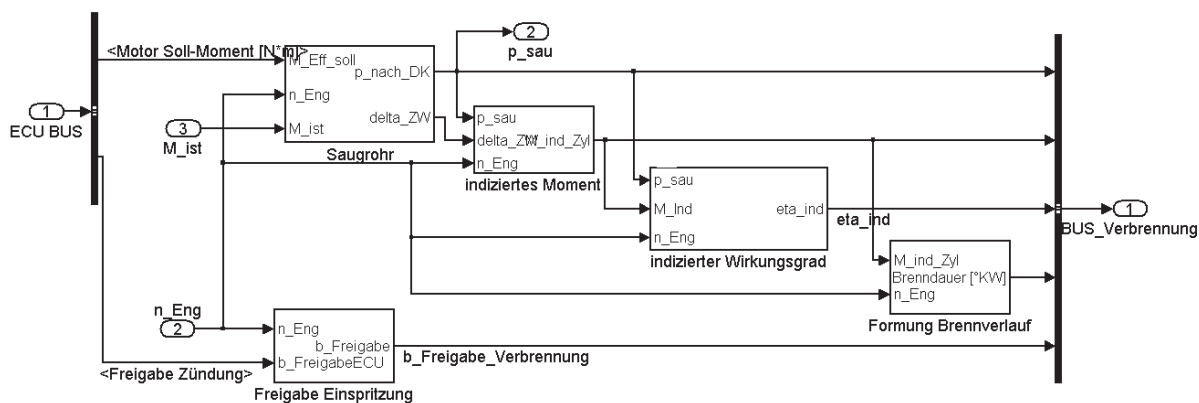


Abbildung 5-18: Modul zur Berechnung des indizierten Moments

Es beinhaltet die Teilmodelle zur Abbildung des Saugrohrs, zur Berechnung des indizierten Zylindermoments selbst, zur Bestimmung des indizierten Wirkungsgrads, die Berechnung der Form-Parameter für den Brennverlauf sowie die Berechnung der Einspritzfreigaben.

### 5.7.2.2 Triebstrangmodell

Das Triebstrangmodell stand wie oben bereits erwähnt aus früheren Anwendungen zur Verfügung und wurde durch die Integration des Motormodells, eines Kupplungsmodells sowie eines einfachen E-Maschinen-Modells erweitert. Da auch von der E-Maschine nur wenige Daten zur Verfügung standen, wurde sie stark idealisiert als einfaches Massenträgheitsmoment und als ideale Momentenquelle abgebildet.

Der Triebstrang ist als eindimensionales Drehschwingungsmodell aus einzelnen Masse-Feder-Dämpfer-Systemen aufgebaut, die die Massenträgheitsmomente, Steifigkeiten und Dämpfungen der Triebstrangkomponenten abbilden.

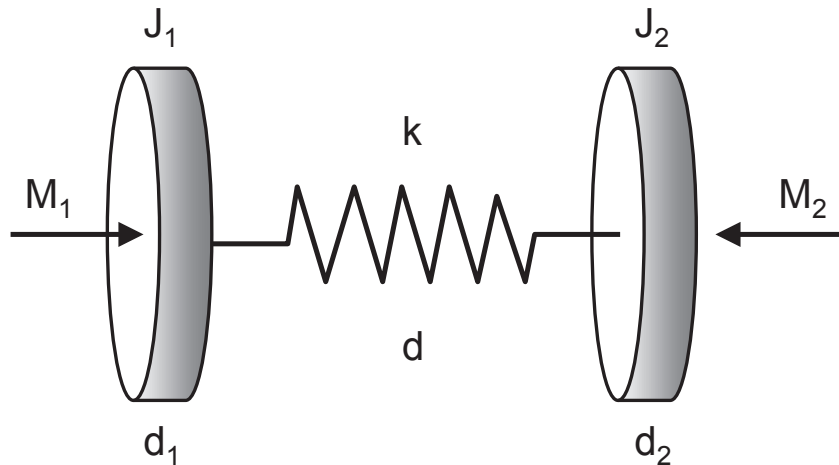


Abbildung 5-19: Masse-Feder-Dämpfer-System

In Abbildung 5-19 ist ein solches System bestehend aus zwei rotierenden Massen  $J_1$  und  $J_2$  sowie einem Feder-Dämpfer-Element mit der Steifigkeit  $k$  und der Dämpfung  $d$  dargestellt. Auf beide Massen können äußere Momente  $M_1$  und  $M_2$  sowie die Dämpfungen  $d_1$  und  $d_2$  einwirken.

Im Modell müssen die Kupplungen des Doppelkupplungsgetriebes sowohl schlupfende Zustände als auch geschlossene Zustände abbilden können. Im ersteren Fall sind Eingangs- und Ausgangsseite der Kupplung als separate Massenträgheiten aufzufassen. Im zweiten Fall können beide Trägheiten zusammengefasst werden. Im Moment des Übergangs der beiden Zustände kann deshalb eine Modellumschaltung vorgenommen werden. Dies erfordert allerdings die Implementierung beider Fälle in der Struktur des Simulationsmodells. Um dies zu vermeiden, wurde im Rahmen dieser Arbeit der Ansatz der Momentenumschaltung gewählt. Dabei wird nicht ein Teil des Modells umgeschaltet, sondern lediglich die Berechnung des übertragenen Moments  $M_{\text{Kupplung}}$  zwischen Eingangs- und Ausgangsseite der Kupplung.

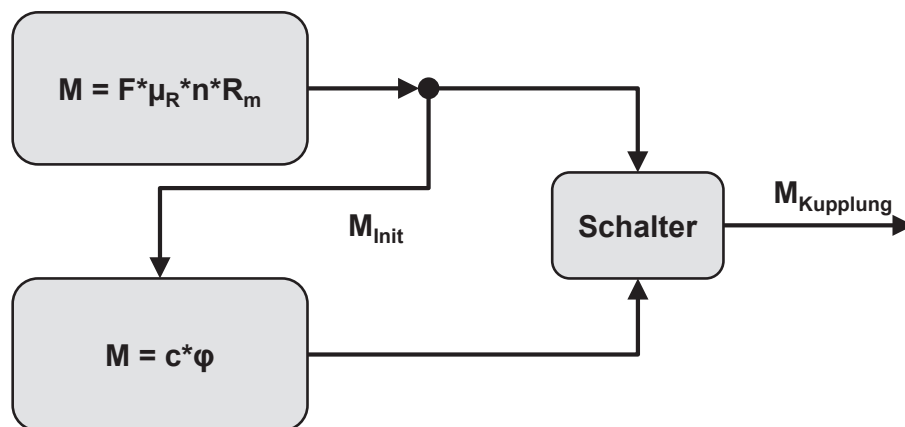


Abbildung 5-20: Momentenumschaltung im Kupplungsmodell

Die Umschaltung ist schematisch in Abbildung 5-20 dargestellt. Solange sich die Kupplung in einem schlupfenden Zustand befindet, wird zwischen den beiden Kupplungsteilen das durch die Kennung der Kupplung vorgegebene Drehmoment übertragen. Es ergibt sich aus der wirkenden Anpresskraft  $F$ , dem Reibkoeffizienten  $\mu_R$ , dem mittleren Reibradius  $R_m$  sowie der Anzahl der Wirkflächenpaare  $n$ . Sobald die Kupplung in den geschlossenen Zustand übergeht, wird das Moment mit Hilfe eines Feder-Dämpfer-Elements mit einer sehr hohen Steifigkeit berechnet. Durch die sehr hohe Steifigkeit in der Größenordnung von  $10^6 \text{ Nm/rad}$  kann sie als steif angenommen werden, wodurch die Beeinflussung der Eigenfrequenzen und des Schwingungsverhalten des Systems vernachlässigt werden können. Im Moment der Umschaltung muss das Feder-Dämpfer-System korrekt mit einem der momentanen Kupplungskapazität  $M_{init}$  entsprechenden Verdrehwinkel initialisiert werden, um ungewünschte Anregungen des gesamten Schwingungssystems zu vermeiden.

Die implementierte Logik für die Umschaltung der beiden Momenten-Modelle ist in Abbildung 5-21 dargestellt.

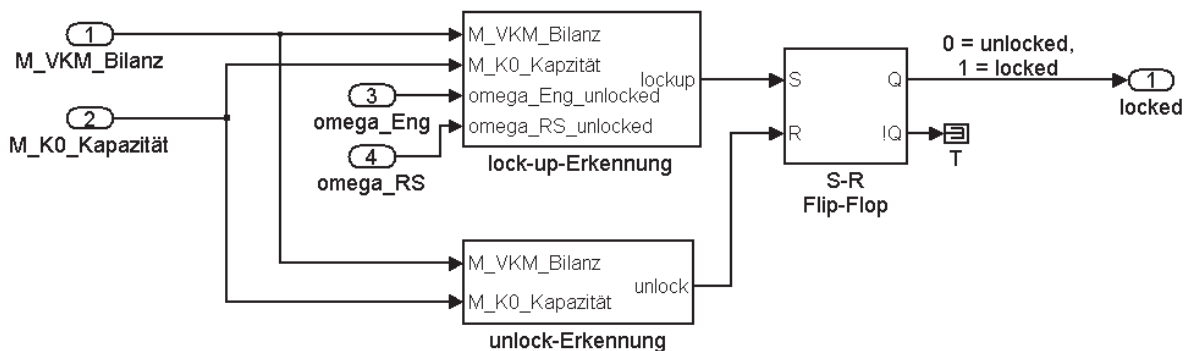


Abbildung 5-21: Logik-Modul des Kupplungsmodells

Ein Flip-Flop wird über eine Erkennung (lock-up-Erkennung) aktiviert, sobald ein geschlossener Zustand vorliegt und bei Bedarf mit Hilfe einer Überwachung von Kupplungskapazität und übertragenem Drehmoment (unlock-Erkennung) zurückgesetzt.

### 5.7.2.3 Steuerungen

Die Steuerungen des Triebstrangs wurden in Stateflow<sup>274</sup> implementiert. Stateflow ist ein grafisches Werkzeug zur Entwicklung und Simulation ereignisgesteuerter Systeme. Die damit erstellten Modelle können direkt in Simulink integriert und zusammen mit weiteren Modellen simuliert werden.

Die Ablaufsteuerung des Wiederstarts stellt eine Neuentwicklung dar, die es ermöglicht den Verbrennungsmotor über jede der beiden Kupplungen oder mit einem bestimmten Zusammenspiel der beiden Kupplungen zu starten.

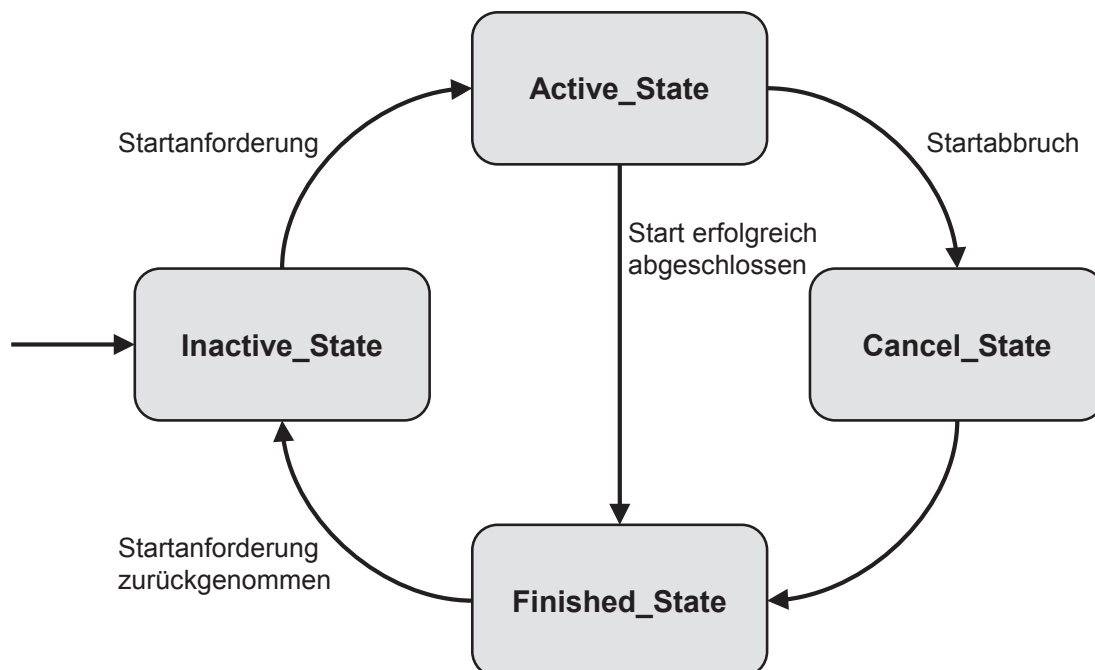


Abbildung 5-22: Übergeordneter Zustandsautomat der Ablaufsteuerung (schematisch)

Ein übergeordneter Zustandsautomat (Abbildung 5-22), der die Schnittstelle zur Betriebsstrategie bildet, unterscheidet zunächst vier Zustände. Im „Inactive\_State“ wird auf eine Anforderung zum Starten des Verbrennungsmotors gewartet. Sobald diese Anforderung vorliegt, findet der Übergang in den „Active\_State“ statt, in welchem der Startablauf gesteuert wird. Bei erfolgreichem Beenden des Starts

<sup>274</sup> www.mathworks.com

wechselt der Zustandsautomat über den „Finished\_State“ zurück in den „Inactive\_State“, sobald die Betriebsstrategie die Startanforderung zurücknimmt. Ein Abbruch des Starts löst zunächst einen Zustandsübergang in den „Cancel\_State“ und den anschließenden Übergang in den „Inactive\_State“ aus.

Die Ablaufsteuerung im „Active\_State“ orientiert sich an den in Abschnitt 2.3.4 erläuterten Phasen des Wiederstarts. Sie ist in Abbildung 5-23 schematisch dargestellt.

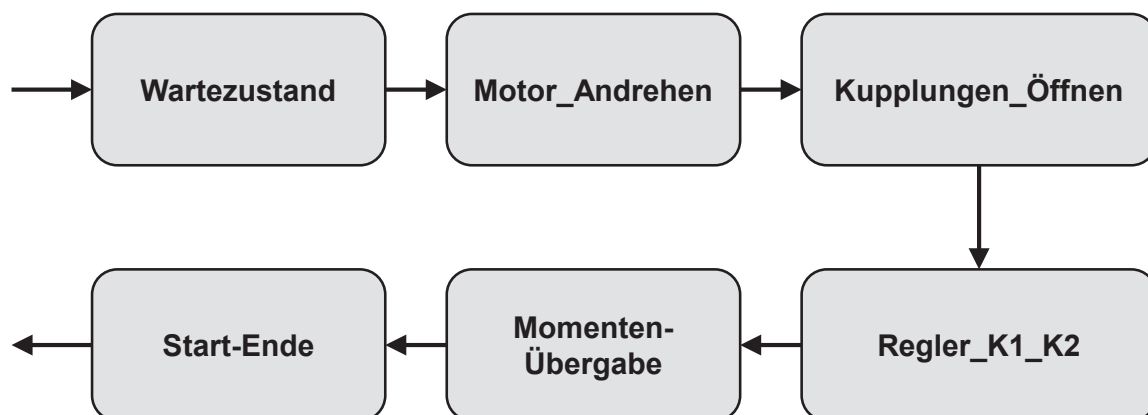


Abbildung 5-23: Steuerung Wiederstart-Ablauf (schematisch)

Nach erfolgreicher Prüfung einiger Randbedingungen im Wartezustand wird im Zustand „Motor\_Andrehen“ die VKM mit Hilfe einer der beiden Anfahrkupplungen des Doppelkupplungsgetriebes (DKG) angeschleppt und dem Verbrennungsmotor die Zündfreigabe erteilt. Zusätzlich kann ein Drehzahlregler aktiviert werden, um den Hochlauf des Motors steuern zu können. Welche der beiden Kupplungen zum Starten verwendet wird kann dabei frei gewählt werden.

Sobald der Verbrennungsmotor ein positives Drehmoment abgeben kann, wird die zum Andrehen des Motors eingesetzte Kupplung im nächsten Zustand wieder vollständig geöffnet. In den weiteren Zuständen wird der Hochlauf des Motors und seine Drehzahlsynchronisierung mit der gewünschten Getriebeeingangswelle gesteuert. Zur Beschleunigung bzw. zum Abbremsen des Motors kann dabei je nach Drehzahlverhältnissen von Motor und Getriebeeingangswellen die Doppelkupplung genutzt werden, was das Einlegen eines Ganges in jedem der beiden Teilgetriebe erfordert (Zustand „Regler\_K1\_K2“).

Sobald der Verbrennungsmotor auf die Eingangs-Drehzahl des gewünschten Teilgetriebes eingeregelt ist, kann die Momentenübergabe an die entsprechende Kupplung erfolgen und der Startablauf beendet werden.

Eine Steuerung, die außerhalb des Zustandsautomaten arbeitet, kompensiert während des Starts die gestellten Kupplungsmomente mit Hilfe der E-Maschine.

## 5.7.2.4 Simulationsergebnisse

Wie im Abschnitt 5.7.1 angekündigt sollen hier nun mit Hilfe der numerischen Simulation phänomenologische Auswirkungen der funktionalen Schwächen des Systems verdeutlicht werden. Dazu wird ein Wiederstart des Verbrennungsmotors simuliert, der mit Hilfe der Kupplung 2 des Doppelkupplungsgetriebes durchgeführt wird. Im Getriebe sind die Gänge drei und vier auf den entsprechenden Teilgetrieben eingelegt.

Der Start wird zunächst bei einer Drehzahl der Getriebeeingangswelle 1 von  $n_{GEW1} = 500 \text{ min}^{-1}$  ausgelöst (Abbildung 5-24).

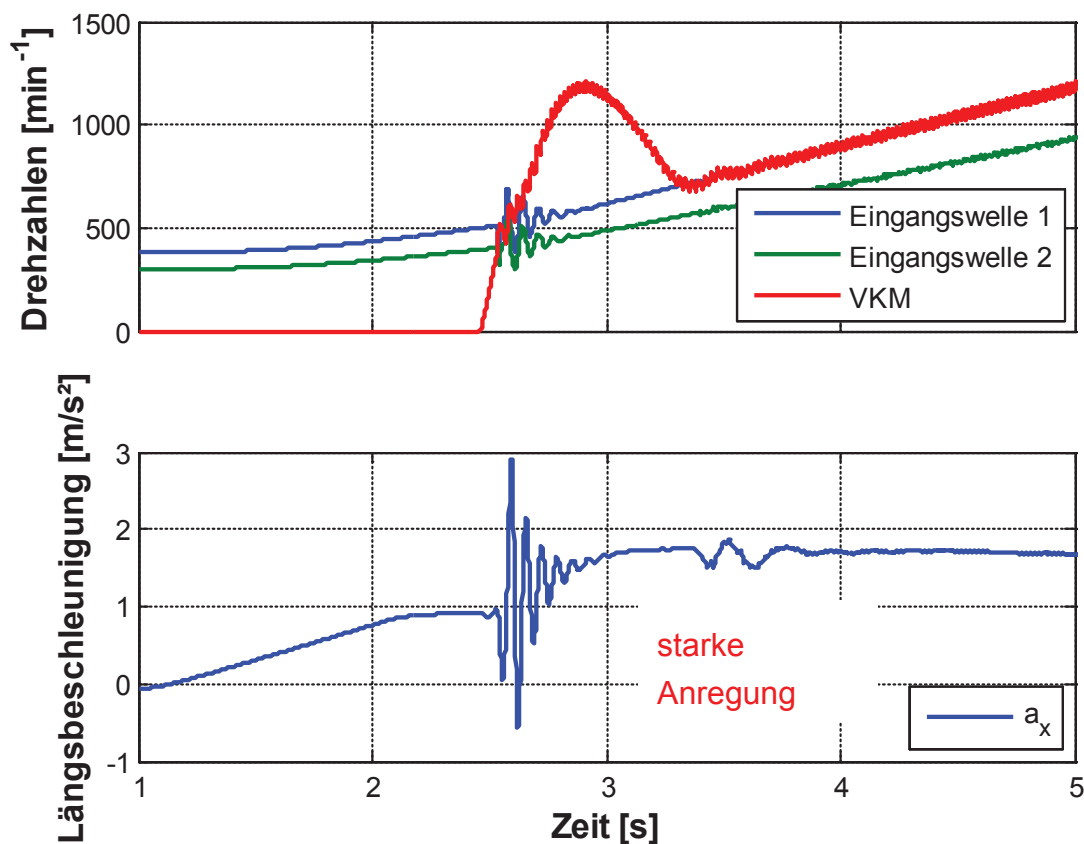


Abbildung 5-24: Simulierter Wiederstart bei  $n_{GEW1} = 500 \text{ min}^{-1}$

Im Zeitpunkt  $t = 2,5 \text{ s}$  wird das Fahrzeug zu starken Längsschwingungen angeregt. Ursache hierfür ist das Zusammenspiel von Motor und Kupplung. Der Motor muss durch die Kupplung mit einem Drehmoment, das höher ist als das Schleppmoment des Motors, angedreht werden, um eine bestimmte Beschleunigung zu erzielen. Die VKM kann erst kurz vor Erreichen der Drehzahl der Eingangswelle 2 gezündet werden. Da die Kupplung zu diesem Zeitpunkt aber noch ein Moment überträgt, führt das Kreuzen der beiden Drehzahlen zu einem Schub-Zug-Wechsel an der Kupplung. Dieser regt den Triebstrang zu Drehschwingungen und infolgedessen das Fahrzeug



zu Längsschwingungen an. Die Anregungen, die etwa zum Zeitpunkt  $t = 3,5$  s zu erkennen sind, resultieren aus der Synchronisierung von Verbrennungsmotor und Getriebewelle 1 und können durch eine optimierte Steuerung des Synchronisierungsvorgangs gemildert werden.

In Abbildung 5-25 ist das Ergebnis der Simulation des gleichen Startvorgangs bei einer Drehzahl der Getriebewelle 1 von  $n_{GEW1} = 800 \text{ min}^{-1}$  dargestellt.

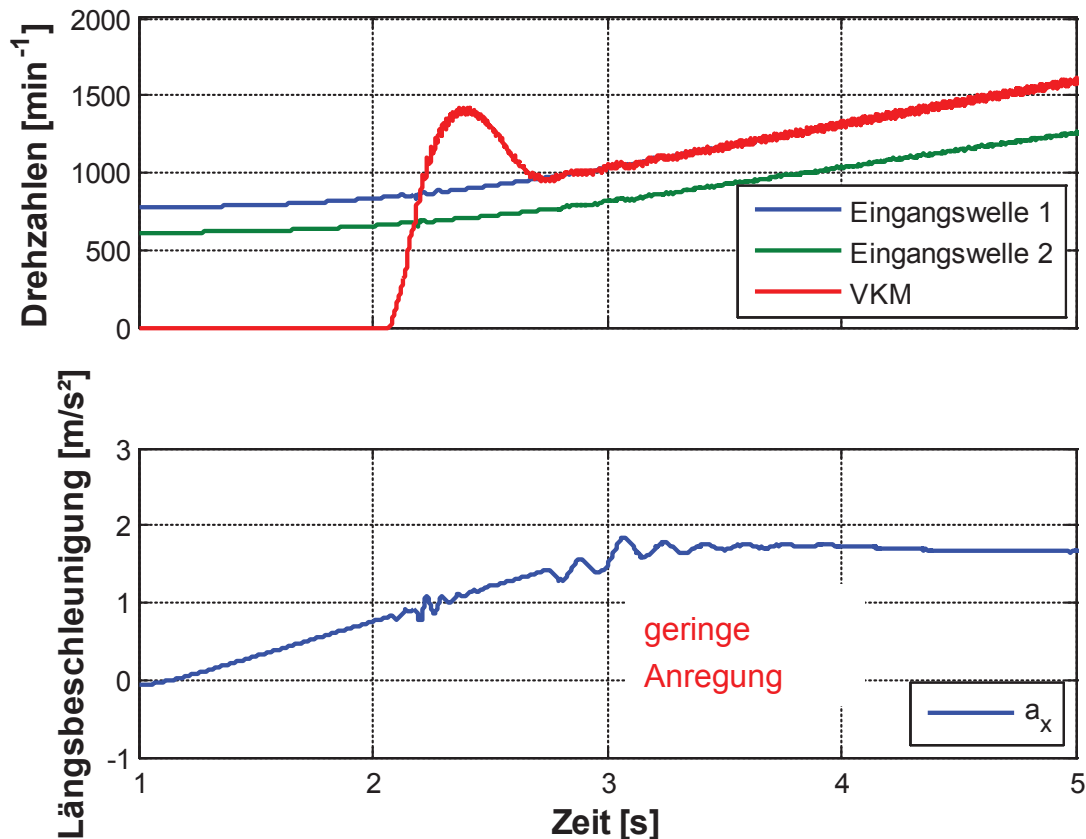


Abbildung 5-25: Simulierter Wiederstart bei  $n_{GEW1} = 800 \text{ min}^{-1}$

Die Anregungen des Fahrzeugs zu Längsschwingungen durch den eigentlichen Startvorgang (Bereich  $t = 2$  s bis  $t = 2,5$  s) sind deutlich reduziert worden. Der Motor kann vor dem Erreichen der Drehzahl der Getriebewelle 2 ein positives Drehmoment bereitstellen, womit durch Öffnen der Kupplung 2 der Übergang in den haftenden Zustand vermieden werden kann. Dies gelingt nur wenn die Stelldynamik der Kupplung hoch genug ist und stellt somit hohe Anforderungen an die Betätigungseinrichtungen der Kupplungen.

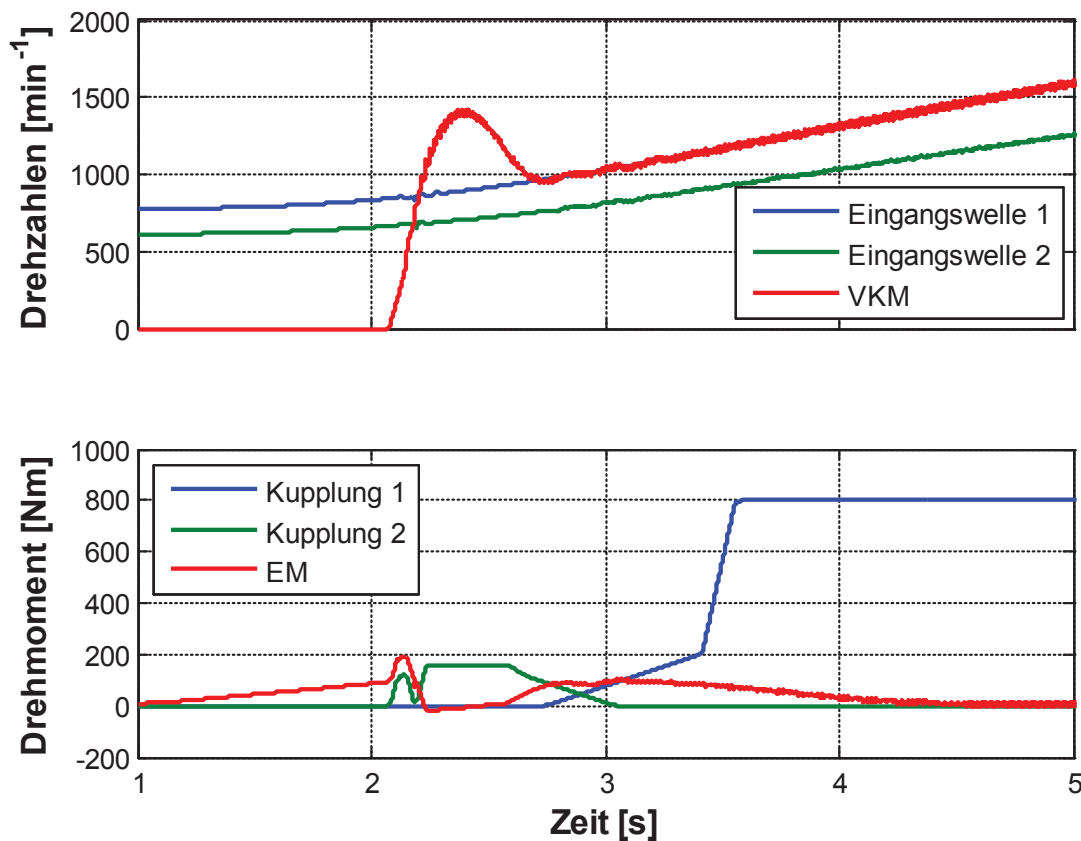


Abbildung 5-26: Simulierter Wiederstart bei  $n_{\text{GEW1}} = 800 \text{ min}^{-1}$ , Momentenverläufe

In Abbildung 5-26 sind die Verläufe der Kupplungs- und E-Maschinenmomente des simulierten Wiederstarts dargestellt. Der Verbrennungsmotor wird zunächst durch Kupplung 2 angedreht. Die E-Maschine kompensiert dies durch aufsteuern eines Drehmoments. Nachdem die VKM-Drehzahl die Drehzahl der Getriebeeingangswelle 1 überschritten hat, wird der Motor mit Hilfe der Kupplung 2 abgebremst und auf die Drehzahl der Eingangswelle 1 eingeregelt. Gleichzeitig wird das Drehmoment der E-Maschine reduziert, da der Verbrennungsmotor über Kupplung 2 ein Antriebsmoment an das Fahrzeug abgibt. Sobald VKM und Getriebeeingangswelle 1 synchron drehen (ca.  $t = 2,8$  Sekunden), wird das Moment des Verbrennungsmotor von Kupplung 2 an Kupplung 1 übergeben, und diese vollständig geschlossen.

An diesem Beispiel zeigt sich sehr deutlich, dass funktionale Schwächen eines Systems zu negativen Folgen für den Anwender führen können. Im Falle des Starts bei einer Drehzahl von  $500 \text{ min}^{-1}$  (vgl. Abbildung 5-24) würde das Komfortempfinden des Fahrers durch die starke Schwingungsanregung beeinträchtigt werden. Der Start bei einer Drehzahl von  $800 \text{ min}^{-1}$  verläuft mit deutlich geringeren Fahrzeuganregungen (vgl. Abbildung 5-25).

### 5.7.3 Optimierungsansätze für das untersuchte System

Die Aufgabe der Entwicklungsingenieure besteht nun darin, die aufgeführten Schwächen durch eine veränderte Triebstrangtopologie oder durch Hinzufügen neuer Funktionen und Funktionsträger - also zusätzlicher Komponenten im Triebstrang - zu eliminieren.

Um den Wiederstart in jedem beliebigen Fahrzustand zu ermöglichen, sind beispielsweise Veränderungen in der Triebstrangtopologie und das Hinzufügen zusätzlicher Komponenten denkbar. So könnte der Antrieb durch die Verlagerung der E-Maschine zwischen Verbrennungsmotor und Getriebeeingang und der Einsatz einer Trennkupplung zu einem P2-Hybrid umgebaut werden. Dadurch könnte die Drehzahl der EM mit Hilfe einer schlupfenden Anfahrkupplung unabhängig von der Getriebeeingangsdrehzahl gewählt werden und so der Wiederstart bei jeder beliebigen Drehzahl durchgeführt werden. Zu erwarten ist dann aber ein höherer Bauraumbedarf des Systems in Längsrichtung, der durch das Fahrzeug-Package erlaubt sein muss. Zudem entsteht ein zusätzlicher Aufwand für die Steuerung der Trennkupplung. Die Anordnung eines P2-Hybriden würde auch das zugkraftunterbrechungsfreie Schalten des Getriebes im elektrischen Fahren ermöglichen und somit eine weitere Schwäche des untersuchten Systems beseitigen. Allerdings müsste eine erneute funktionale Bewertung durchgeführt werden, um eventuell neu entstandene Schwächen aufzudecken.

Eine weitere Möglichkeit den Wiederstart auch bei niedrigen Fahrzeuggeschwindigkeiten zu erlauben ist das Hinzufügen einer zusätzlichen Starteinrichtung (z.B. Ritzelstarter, RSG). Sie wäre in der Lage den Motor unabhängig vom Resttriebstrang zu starten, bringt aber andere Nachteile<sup>275</sup> mit sich. Da bei einer solchen Maßnahme neue Leitstützstrukturen und Wirkflächenpaare eingefügt würden, ohne Änderungen an bestehenden Strukturen vorzunehmen, könnte auf eine erneute vollständige funktionale Bewertung verzichtet werden, sofern die bisher vorhandenen Elemente nicht in ihrer Funktion verändert werden.

---

<sup>275</sup> vgl. Abschnitt 2.2.3

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Motivation für die vorliegende Arbeit entstand durch die zunehmende Komplexität bei der Entwicklung hybrider Antriebssysteme für Kraftfahrzeuge. Durch neue Anforderungen an das Fahrzeug entstehen auch neue Funktionen wie beispielsweise das elektrische Fahren, die Rekuperation oder der Wiederstart des Verbrennungsmotors, die das Antriebssystem erfüllen muss. Insbesondere der Wiederstart besitzt dabei eine hohe Relevanz für die Komforteigenschaften des Fahrzeugs. Zudem nimmt durch die erhöhte Anzahl von Komponenten im Triebstrang auch die Komplexität des funktionalen Zusammenspiels der Komponenten zu. Ein Produkt kann nur erfolgreich im Markt eingesetzt werden, wenn es die an es gestellten Erwartungen bezüglich Komforteigenschaften und Funktion erfüllt.

Die vorliegende Arbeit befasst sich deshalb mit zwei Methoden, die Ingenieure bei der Entwicklung des Wiederstartsystems in parallelen Vollhybrid-Antrieben unterstützen sollen. Zum einen wird eine Methode zur Objektivierung des Wiederstartkomforts aus Expertensicht entwickelt. Zum anderen soll die entwickelte Methode zur funktionalen Bewertung technischer Systeme das frühe Aufdecken von Schwächen eines Systems und die Einleitung von Optimierungsmaßnahmen ermöglichen.

Im Kapitel 2 dieser Arbeit wurden die Grundlagen für diese Arbeit dargelegt. Nach einer Vorstellung verschiedener Topologien paralleler Hybridantriebe werden Startverfahren für Verbrennungsmotoren in konventionellen und in hybriden Fahrzeugen erläutert und miteinander verglichen. Dabei zeigt sich, dass der Wiederstart mit Hilfe einer Reibkupplung zwar eine präzise Steuerung erfordert, aber gegenüber anderen Verfahren einige Vorteile bietet. Anschließend wird der Begriff des Wiederstartsystems abgegrenzt und die Anforderungen an das System erläutert. Insbesondere die Anforderungen an die Fahrzeuglängsdynamik und die Funktion des Systems sind hier besonders hervorzuheben. Einige Aspekte der Modellbildung als vielfältig verwendeter Begriff werden im Anschluss zusammengefasst. Der Contact & Channel-Connector-Ansatz (C&C<sup>2</sup>-A) verknüpft als Meta-Modell - also ein Modell zur Modellbildung - Funktion und Gestalt und stellt deshalb eine gute Möglichkeit dar funktionsorientierte Modelle von beliebigen Systemen zu erstellen. Als Grundlagen für die Objektivierung des Wiederstartkomforts werden die Begriffe Komfort und Diskomfort sowie subjektive und objektivierte Komfortbewertung diskutiert.

Der Abschnitt 4 der vorliegenden Arbeit beschreibt die Entwicklung der Methode zur Objektivierung des Wiederstart-Komforts. Nach einer Analyse des Wiederstarts und des betrachteten Wiederstartsystems werden die Anforderungen an die Methode beschrieben. Für die Entwicklung der Methode werden mit Hilfe einer Probandenbefragung Einzelkriterien zur Beschreibung des Wiederstartkomforts ermittelt. Neben der erlebten Schwingungsbelastung, also dem Diskomfort, kommt nach Aussage der befragten Personen der zeitlichen Verzögerung zwischen Fahrerwunsch als Auslöser des Starts und der Fahrzeugreaktion eine besonders große Bedeutung bei der Beurteilung des Startvorgangs zu. Auf Basis dieser Befragung werden anschließend objektiv messbare Kennwerte ausgewählt und teilweise neu definiert, die für die Objektivierung genutzt werden sollen. Für die Fahrversuche standen acht Probanden zur Verfügung, die über mehrjährige Erfahrung in der Entwicklung und dem Betrieb von Hybridfahrzeugen verfügen und damit über Expertenwissen verfügen. Während der Versuche werden gezielt verschiedene Parameter in der Fahrzeugsteuerung manipuliert, um Wiederstarts mit unterschiedlichem Komfort zu erzeugen. Die Objektivierung wurde sowohl mit Methoden der multiplen linearen Regression als auch mit den Methoden der künstlichen neuronalen Netze (KNN) durchgeführt. Wie in anderen Arbeiten<sup>276</sup> zeigt sich auch im Rahmen dieser Arbeit, dass KNN im Vergleich zu den Regressionsmodellen das leistungsfähigere Werkzeug zur Abbildung des oft unscharfen menschlichen Komfortempfindens sind. Neben der Modellierung von Gesamtnoten nach der in der Automobilindustrie oft eingesetzten ATZ-Skala<sup>277</sup> wurden auch von den Fahrern im Versuch bewertete Einzelkriterien abgebildet. Dabei zeigt sich, dass die an den Versuchen teilnehmenden Experten scheinbar eine ähnliche Bewertung des Diskomforts vornehmen, sich aber bei der Bewertung von anderen Komfort-Anteilen erheblich unterscheiden. Teilweise sind auch sie nicht in der Lage bei jedem Manöver jedes Einzelkriterium differenziert zu bewerten. Die entwickelte Methode wurde mit Hilfe verschiedener Softwarewerkzeuge implementiert, die die Versuchsdurchführung, die Bildung objektiver Kennwerte sowie die Objektivierung selbst unterstützen. Dabei wurde auch das am Institut für Produktentwicklung des KIT<sup>278</sup> entwickelte Werkzeug<sup>279</sup> zur Erstellung und zum Training neuronaler Netze weiterentwickelt, um künftigen Nutzern die Arbeit mit diesem Tool weiter zu erleichtern.

---

<sup>276</sup> z.B. Albrecht 2005

<sup>277</sup> Aigner 1982

<sup>278</sup> Karlsruher Institut für Technologie

<sup>279</sup> Lerspalungsanti 2010

Im Kapitel 5 dieser Arbeit wird eine Methode zur funktionalen Bewertung technischer Systeme vorgestellt. Ziel dieser Methode ist es, in sehr frühen Phasen des PEP eine Bewertung durchführen zu können, ob ein System die von ihm geforderten Funktionen in allen Betriebsbereichen und -zuständen zu erfüllen und gegebenenfalls Optimierungen des Systems abzuleiten. Am Beispiel des parallelen Hybridantriebs wird die Ableitung notwendiger Funktionen innerhalb des Systems aus verschiedenen Sichten erläutert. Diese Funktionen werden in den darauf folgenden Schritten immer weiter abstrahiert. Ausgehend von einer verbalen Beschreibung werden die Funktionen in eine standardisierte Beschreibung gemäß der Funktionsbasis nach Hirtz<sup>280</sup> überführt, um das zu untersuchende System auf seine Funktionen zu reduzieren. Die Auflistung aller Funktionen und Komponenten des Systems in Funktionstabellen soll Anwender der Methode eine strukturierte Vorgehensweise an die Hand geben. Durch die gewählte Funktionsbeschreibung werden Funktionen durch Eingangs- und Ausgangsflüsse sowie durch Zustände beschrieben, die quantifiziert werden können. Eine funktionale Bewertung gelingt nun durch die Überprüfung dieser Größen auf zulässige Werte. Überschreitet eine dieser Größen einen zulässigen Grenzwert, kann die Funktion nicht erfüllt werden. Im Abschnitt 5.4 wird ein Ansatz zur Implementierung der Methode mit dem Ziel einer Rechnerunterstützung der funktionalen Bewertung vorgestellt. Basis hierfür ist ein Funktionsmodell, das mit Hilfe des C&C<sup>2</sup>-A erstellt und in der Software P3 Signposting erzeugt werden kann. Verschiedene Bauteil- und Funktionsbibliotheken unterstützen dabei die Erstellung und funktionale Beschreibung des zu untersuchenden Systems. Eine neu entwickelte Schnittstelle ermöglicht es, das so erstellte Funktionsmodell mit Hilfe der objektorientierten Simulationssprache Modelica in ein Rechenmodell zu überführen. Diese kann als Basis für eine rechnerische Bewertung dienen. Im Abschnitt 5.6 wird die funktionale Bewertung exemplarisch auf ein Konzept eines parallelen Hybridantriebs mit Doppelkupplungsgetriebe angewendet. Dabei können mit Hilfe der entwickelten Methode funktionale Schwächen des Systems aufgezeigt werden. Da das untersuchte System lediglich ein Konzept darstellt und nicht als realer Antriebsstrang für Untersuchungen zur Verfügung stand, werden an einem Simulationsmodell die phänomenologischen Auswirkungen dieser Schwächen auf den Komfort des Fahrzeugs aufgezeigt. Am Beispiel des Wiederstarts bei niedrigen Geschwindigkeiten zeigt sich so, dass eine der funktionalen Schwäche des Systems zu einer erheblichen Schwingungsbelastung der Fahrzeug-Insassen führt.

---

<sup>280</sup> Hirtz 2002

Zwar kann bei der Objektivierung keine Güte von eins und damit kein exaktes Modell des menschlichen Komfortempfindens erzielt werden, dennoch bietet die entwickelte Methode Möglichkeiten Entwicklungsingenieure insbesondere bei der Applikation des Wiederstartsystems zu unterstützen. Oftmals optimieren Applikationsingenieure ein System nach einem Einzelkriterium, bevor der nächste Aspekt eines Systems bearbeitet wird. Eine objektive Bewertung kann den Ingenieur dann fortlaufend während seiner Tätigkeit bei der Bewertung des Ergebnisses seiner Arbeit unterstützen. Würde er die Bewertung stets subjektiv vornehmen, würden seine Beurteilungen aufgrund von Ermüdungserscheinungen und damit abnehmender Bewertungsfähigkeit einer stärkeren Varianz unterliegen.

Komfortmodelle auf Basis von Expertenurteilen könnten in Zukunft dazu genutzt werden, während Fahrzeug-Dauerläuferprobungen statistische Verteilungen von Komfortwerten kontinuierlich aufzuzeichnen. Momentan werden Komfort-Bearstandungen von den Dauerlauf-Fahrern aufgezeichnet und dokumentiert. Durch den Einsatz einer Online-Komfortbewertung im Fahrzeug könnten Beanstandungen modellbasiert ermittelt und aufgezeichnet werden.

Die Modellierung der verschiedenen Probanden zeigte, dass Diskomfort von den an den Versuchen teilnehmenden Experten ähnlich wahrgenommen wird, andere Komfortanteile teilweise jedoch nicht ausreichend differenziert werden können. Anders ausgedrückt sind diese Personen zwar Experten auf dem Fachgebiet hybrider Antriebe, besitzen aber doch einen sehr unterschiedlichen Erfahrungsschatz bei der Komfortbewertung. Zur Erhöhung der Bewertungsqualität könnten die implementierten Werkzeuge auch dazu genutzt werden ein regelmäßiges Training der bewertenden Personen durchzuführen.

Die vorgestellte Methode zur funktionalen Bewertung zwingt die Entwicklungsingenieure eine einheitliche Funktionsbeschreibung zu verwenden. Ein solches Vorgehen birgt grundsätzlich die Gefahr die Kreativität der Ingenieure einzuschränken. Bei gezielter Anwendung der Methode kann dies aber vermieden werden. So können Funktionsmodelle eines Systems beispielsweise in einem Team erstellt werden. Da die Verantwortungsbereiche innerhalb eines Entwicklungsteams zwischen den Ingenieuren aber oft Komponenten bzw. einzelnen Systemen zugeordnet ist, können weitere Detailbewertungen am besten auch von den dafür verantwortlichen Personen als Experten auf ihrem Fachgebiet vorgenommen werden. Die funktionale Betrachtungsweise kann dann dabei helfen festgefahrene Denkstrukturen aufzubrechen und damit neue Lösungswege entstehen zu lassen.

Eine weitergehende Implementierung der Methode könnte die Bewertung zumindest teilweise automatisieren. Verschiedene Topologien könnten dann schneller bewertet und miteinander verglichen werden.

## 7 Literaturverzeichnis

- Aigner 1982: Aigner, J.: Zur zuverlässigen Beurteilung von Fahrzeugen. ATZ, Automobiltechnische Zeitschrift 84 (1982), Nr.9, S. 447-450.
- Albers 2008: Albers, A.: Produktentstehung - Entwicklungsmethodik. Vorlesungsskript, Karlsruhe, Universität Karlsruhe (TH), 2008
- Albers 2010: Albers, A.: Five Hypotheses about Engineering Processes and their Consequences. In: International Symposium series on Tools and Methods of Competitive Engineering – TMCE 2010 .
- Albers Albrecht 2002: Albers, A.; Albrecht, M.: Vorhersage subjektiver Komforturteile mittels künstlicher neuronaler Netze. VDI-Tagung: Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau, 11. Internationaler Kongress, Würzburg, 01.-02. Oktober 2002. Tagungsband: VDI-Berichte 1701, VDI-Verlag Düsseldorf 2002, S. 401-420
- Albers Albrecht 2004: Albers, A.; Albrecht, M.: Einsatz künstlicher neuronaler Netze zur objektiven Beurteilung des Schwingungskomforts am Beispiel des automatisierten Anfahrens. In: VDI-Tagung Humanschwingungen. Tagungsband VDI-Berichte Nr. 1821, Darmstadt, 17.-18. März 2004. Düsseldorf: VDI-Verlag, Bd. 1821, S. 159–182, 2004
- Albers Albrecht 2005: Albers, A.; Albrecht, M.: Abbildung der individuellen subjektiven Komfortbeurteilung von Kunden aus objektiven Messwerten am Beispiel des automatisierten Anfahrens. 5. Tagung Dynamisches Gesamtsystemverhalten von Fahrzeugantrieben, Haus der Technik, Augsburg, 01.-02.03.2005. Tagungsbuch: Systemanalyse in der Kfz-Antriebstechnik, Bd.3, Expert Verlag, Renningen, 2005, S.30-47
- Albers Düser 2009: Albers, A., Düser, T.: Integration von Simulation und Test am Beispiel Vehicle-in-the-loop auf dem Rollenprüfstand und im Fahrversuch, Universität Karlsruhe, IPEK, 2009
- Albers Dylla 2006: Albers A.; Dylla, S.: Entwicklung einer Methode zur objektiven Bewertung der Schaltbetätigungsqualität von Fahrzeugen mit Handschaltgetriebe; 5. Internationales CTI Symposium, 04.-07.12.2006, Berlin
- Albers Enkler et al. 2009: Albers, A.; Enkler, H.; et al.: Die Herausforderung komplexer Simulationsprozesse - Ein methodischer Ansatz mit dem generalisierten Contact and Channel Model. In: 6. Paderborner Workshop: Entwurf mechatronischer Systeme. Paderborn, 2009



- Albers et al. 2005: Albers, A.; Burkhardt, N.; Ohmer M.: Approaches for the synthesis of technical systems within the contact and channel model C&CM. International Conference on Engineering Design ICED 05, Melbourne 2005 .
- Albers et al. 2007: Albers, A.; Weiler, H.; Bangert, C.; Puls, C.; Robustheits- und Zuverlässigkeitsanalysen zur Optimierung eines Planetengetriebes unter realitätsnahen Randbedingungen; 23. Tagung Technische Zuverlässigkeit TTZ, 2007
- Albers et al. 2008a: .Albers, A.; Lerspalungsanti, S.; Düser, T.; Ott, S. : Wang J.; A Systematic Approach to Support Drive Train Design Using Tools for Human Comfort Evaluation and Customer Classification. In: American Society Of Mechanical Engineers (Hg.): Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference ASME - DETC 2008. 10th International Conference on Advanced Vehicle and Tire Technologies – AVTT. New York: ASME .
- Albers et al. 2008b: Albers, A. ; Lerspalungsanti, S. ; Düser, T. ; Ott, S.: Vehicle Start-Up Simulation on Drive Train Test Bench and Subjective Comfort Evaluation of Virtual Drive Train by Means of New Driver Modelling Tools Based on Artificial Neural Networks. In: International Federation of Automotive Engineering Societies (Veranst.): World Automotive Congress - FISITA 2008 (Munich 2008)
- Albers et al. 2008c: X-in-the-loop als integrierte Entwicklungsumgebung von komplexen Antriebssystemen; 8. Tagung Hardware-in-the-loop-Simulation, 2008
- Albers et al. 2009: Albers, A.; Sadowski, E.; Marxen, L.: A new Perspective on Product Engineering – Overcoming Sequential Process Models. In: Birkhofer, H. (Hg.): The Future of Design Methodology, 2009
- Albers et al. 2009b: Albers, A.; Braun, A.; Clarkson, J.; Enkler, H.-G.; Wynn, D.: Contact and Channel modelling to support early design of technical systems; International Conference on Engineering Design (ICED), 2009, 24 - 27 August 2009, Stanford University, Stanford, CA, USA
- Albers et al. 2009b: Albers, A.; Merkel, P.; Geier M.: Validierung von Antriebsstrangsystemen am Beispiel realer und virtueller Untersuchungen des Zweimassenschwungrads in der X-in-the-Loop (XiL) Umgebung, CTI Getriebe-Symposium, Berlin, 2009
- Albers et al. 2010: Albers, A., Ott, S., Behrendt, M., Merkel, P., & Geier, M.: Validation as knowledgebase for future mobility systems. In 9. Internationales CTI Symposium 2010.
- Albers Matthiesen 2002: Albers, A.; Matthiesen, S.: Konstruktionsmethodisches Grundmodell zum Zusammenhang von Gestalt und Funktion technischer Systeme - Das Elementmodell, Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen zur Analyse und Synthese technischer Systeme, Konstruktion, Zeitschrift für Produktentwicklung. Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag Düsseldorf, 2002

- Albers Skiera 1998: Albers, S.; Skiera, B.; Skript "Regressionsanalyse". Kiel. Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 1998
- Albrecht 2005: Albrecht, M.: Modellierung der Komfortbeurteilung aus Kundensicht am Beispiel des automatisierten Anfahrens, Karlsruhe, Universität Karlsruhe, IPEK, 2005
- Alink 2010: Alink, T; Bedeutung, Darstellung und Formulierung von Funktion für das Lösen von Gestaltungsproblemen mit dem C&C-Ansatz. Karlsruhe, KIT, Dissertation, (Forschungsberichte IPEK, 48), 2010
- Bandemer Bellmann 1994: Bandemer H.; Bellmann, A.: Statistische Versuchsplanung. 4. neubearbeitete Auflage; Teubner; Stuttgart 1994
- Beckmann Biermann 2003: Beckmann, T., Biermann, J. W.: Bewertung des Schaltkomforts bei Kraftfahrzeugen mit verschiedenen Getriebebauarten, in: Systemanalyse in der Kfz-Antriebstechnik II, Laschet, A. (Hrsg.). Haus der Technik Fachbuch. 22. Beurteilung von Schwingungen und akustischen Eigenschaften in Fahrzeugantrieben ; [Beiträge der 3. Fachtagung Dynamisches Gesamtsystemverhalten von Fahrzeugantrieben am 11.-12.03.2003 im M,O,C, Veranstaltungscener in München], Renningen, 2003.
- Behrendt 2009: Behrendt, M.: Entwicklung eines Systemtribometers mit Abbildung mehrachsiger instationärer Beanspruchungskollektive zur Analyse von Reibung und Verschleiß im Mischreibungsgebiet im Kontext nasslaufender Umschlingungs-CVT. Dissertation, Universität Karlsruhe, 2009.
- Bender 2010: Bender, P.: Entwurf und Implementierung einer Software Verknüpfung CAD und Simulation durch Modellbildung mit C&CM. Studienarbeit. Betreut von o. Prof. Dr.-Ing. A. Albers. Karlsruhe. KIT, 2010
- Bender Lange 2007: Bender, R.; Lange, S.: Was ist der p-Wert? In: Deutsche medizinische Wochenschrift 2007; 132,
- Berkan 2006: Berkan, J.: Modellierung des Schlepp- und Startverhaltens von Verbrennungsmotoren bei tiefen Temperaturen. Dissertation, Techn. Univ. Clausthal, 2006, Shaker, Aachen, 2006.
- Bertsche 2010: Bertsche, B.: Reliability in Automotive and Mechanical Engineering, Springer Berlin Heidelberg, 2010
- Birkhold 2008: Birkhold, J.-M.: Bewertung von Adaptionismethoden einer trockenen Trennkupplung in einem parallelen Vollhybrid-Antriebsstrang. Diplomarbeit, RWTH Aachen, 2008.
- Bitter et al. 2005: Bitter, T. et al.: Darstellung des Schwingungsverhaltens von Fahrzeug-Insassen-Symbiose aus Experiment und Simulation, in: FAT-Schriftenreihe 189, 2005.

- Blessing Blankenbach 2009: Blessing, U.; Blankenbach, B.: Hybridkonzepte für Pkw: Simulation und Umsetzung in einem Demonstratorfahrzeug. In: Laschet, A. (Hg.): Systemanalyse in der Kfz-Antriebstechnik V. Schwingungen im Getriebe und im Antriebsstrang - NVH-Optimierungen - Systemabstimmungen von Hybridfahrzeugen - akustische Beurteilungen ; 7. Fachtagung Dynamisches Gesamtsystemverhalten von Fahrzeugantrieben am 10.-11. März 2009; Renningen: expert-Verl. (Haus der Technik Fachbuch, 100), Bd. 100, S. 81–96.
- Blessing Roth-Stielow 2008: Blessing, U., Roth-Stielow, J.: Hybridisierungsmöglichkeiten des Doppelkupplungsgetriebes – eine vergleichende Bewertung, in: Innovative Fahrzeugantriebe, VDI Verlag GmbH (Hrsg.), Düsseldorf, 2008.
- Böhl et al.2006: Böhl, J. et al.: Effiziente Entwicklungswerkzeuge zur Motor- und Getriebeapplikation, in: VDI-Berichte Nr. 1943, VDI (Hrsg.), Düsseldorf, 2006.
- Bönning Krake 2004: Bönning, J., Krake, F.: Neues Sechsgang-Schaltgetriebe von Opel. in: Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Vol. 106, 2004.
- Börtz 1993: Börtz, J.: Statistik für Sozialwissenschaftler. 5. Auflage. Berlin: Springer Verlag, 1993
- Bosch 2007: Bosch: Krafftfahrtechnisches Taschenbuch: Kfz-Fachwissen kompakt, 26., überarb. und erg. Aufl., Vieweg, Wiesbaden, 2007.
- Braess 2007: Braess, H.-H; Seiffert, U.: Vieweg Handbuch Krafftfahrzeugtechnik. 5., überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden: Vieweg (ATZ/MTZ-Fachbuch), 2007
- Brause 1995: Brause, R.: Neuronale Netze: Eine Einführung in die Neuroinformatik, 2., überarb. und erw. Aufl., Teubner, Stuttgart, 1995.
- Bretthauer 2008: Bretthauer, G.: Einführung in die Mechatronik. Vorlesungsskript. Karlsruhe. Universität Karlsruhe (TH), 2008
- Bubb 2001: Bubb, H.: Haptik im Kraftfahrzeug, in: Kraftfahrzeugführung, Jürgensohn, T et al. (Hrsg.), Berlin, 2001.
- Bubb 2003: Bubb, H.: komfort und Diskomfort – Definition und Überblick; in: Ergonomie aktuell; Zeitschrift des Lehrstuhls für Eronomie, Ausgabe oo4, Garching; 2003
- Cleff 2008: Cleff, T.: Deskriptive Statistik und moderne Datenanalyse. 1. Auflage. Wiesbaden, Gabler Verlag, 2008
- Cooper Harper 1969: Cooper, G. E., Harper, R. P.: The Use of Pilot Ranking in the Evaluation of Aircraft Handling Qualities, 1969.

- Cortès 2010: Cortès, S.: Methoden zur Bewertung des Wiederstartkomforts eines Fahrzeuges mit parallelem Hybridantrieb. Bachelorarbeit, Stuttgart, Duale Hochschule Baden-Württemberg, 2010.
- Crandall et al. 1968: Crandall, S. Karnopp D. Kurtz E. Pridemore-Brown D.: Dynamics of mechanical and electromechanical systems. New York: McGraw-Hill, 1968
- Demuth et al. 2010: Demuth, H.; Beale, M.; Hagan, M.: Neural Network Toolbox 6. User's Guide. Mathworks. Online verfügbar unter [www.mathworks.com](http://www.mathworks.com), 2010
- Duden 2006: Duden: Duden - das Bedeutungswörterbuch, 3., neu bearb. und erw. Aufl., Dudenverlag, Mannheim, 2006.
- Düser 2010: Düser, T.: X-in-the-Loop - ein durchgängiges Validierungsframework für die Fahrzeugentwicklung am Beispiel von Antriebsstrangfunktionen und Fahrerassistenzsystemen. Karlsruhe: KIT, Diss., 2010 (Forschungsberichte IPEK, 47).
- Dylla 2010: Dylla, S.: Entwicklung einer Methode zur Objektivierung der subjektiv erlebten Schaltbetätigungsqualität von Fahrzeugen mit manuellem Schaltgetriebe, Dissertation, Universität Karlsruhe, 2010
- Eckstein 2011: Eckstein, L.: Längsdynamik von Kraftfahrzeugen; Schriftenreihe Automobiltechnik; Institut für Kraftfahrwesen; RWTH Aachen, 2011
- El Wardani 2010: El Wardani, A.: Methode zur Bewertung der Wiederstartqualität in Hybridantriebssträngen. Diplomarbeit, Karlsruhe, KIT, 2010.
- Enkler 2010: Enkler, H.-G.: Rechnergestützter Entwurf von Bauteilen mit stark streuenden Leitstützstrukturen am Beispiel hochbelastbarer urgeformter mikromechanischer Systeme. Dissertation; Karlsruhe, KIT, 2010
- ETAS 2008: ETAS GmbH: INCA-MIP V6.2 Benutzerhandbuch, Stuttgart, 2008
- Fackelmann 2009: Fackelmann, E.-J.: Kundenorientierte Objektivierung des Schaltkomforts zur Anwendung in der Simulation. Techn. Univ., Diss.--Braunschweig, 2008. Aachen: Shaker (Schriftenreihe des Instituts für Fahrzeugtechnik, TU Braunschweig, 17).
- Fanghänel 2001: Fanghänel, K.: HF-Signalklassifikation mit Selbst-Organisierenden Karten. Dissertation, Univ. der Bundeswehr, Hamburg, 2001.
- Fesefeldt 2010: Fesefeldt, T. F.: Ganzheitliche Betrachtung zur Auswahl der Starteinrichtung des Verbrennungsmotors eines Parallel-Hybrids mit Trennkupplung. Dissertation, TU Darmstadt, 2010
- Fleckner 2010: Fleckner, M.: Strategien zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs für ein Vollhybridfahrzeug; Aachen, Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen Aachen (fka), Dissertation, RWTH Aachen, 2010

- Füchtner 2006: Füchtner, M.: Optimierung des Hybridmoduls an einem Parallelhybridsystem, Diplomarbeit, Stuttgart, Universität Stuttgart, 2006
- FVA 2008: FVA Forschungsvorhaben 530: Akustik und Schwingungsverhalten Hybrid: Bericht zur abschließenden Arbeitskreissitzung, 2008.
- Gabler 2010: Gabler Wirtschaftslexikon: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/57696/robustheit-v5.html>, eingesehen am 29.04.2010.
- Gebert 2000: Gebert, J.: Adaptive Parametervariation bei Getriebesteuerungen zur Optimierung des Schaltkomforts. Dissertation, Techn. Univ. München, VDI-Verl., Düsseldorf, 2000.
- Gerhardt et al. 2003: Gerhardt, J. et al.: Der Ottomotor mit Direkteinspritzung und Direktstart: Möglichkeiten und Grenzen, in: Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12, Nr. 539/2003.
- Getrag 2009: Getrag GmbH: Ein Drittel weniger Verbrauch bei besseren Fahrleistungen sind schon heute machbar und bezahlbar, Pressemitteilung, Untergruppenbach/Frankfurt, 2009.
- Goto et al. 1988: Goto, Y. et al.: Shift feel in manual transmission: An analysis of unsmooth shifting and gear clashing. in: JSAE, 1988.
- Gray 1957: Gray, D.: American Institute of Physics handbook. New York: McGraw-Hill, 1957
- Griffin 1990: Griffin, M. J.: Handbook of human vibration, Academic Press, London, 1990.
- Griffin 2007: Griffin, M. J.: Discomfort from feeling vehicle vibration. In: Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, Jg. 45, H. 7, S. 679–698. Online verfügbar unter <http://www.informaworld.com/10.1080/00423110701422426>, zuletzt geprüft am 02.04.2011.
- Haberhauer Bodenstein 2007: Haberhauer, H.;Bodenstein, F.: Maschinenelemente; 14., bearbeitete Auflage, Springer Berlin Heidelberg New York, 2007
- Hack 2005: Hack, G.: Auf Sparkurs: Hybridantriebe von VW. in: Auto, Motor und Sport, 2005.
- Hagerodt 2003: Hagerodt, A.: Automatisierte Optimierung des Schaltkomforts von Automatikgetrieben. Dissertation, Techn. Univ. Braunschweig, Shaker, Aachen, 2003.
- Hagerodt Küçükay 2001: Hagerodt, A., Küçükay, F.: Automatisierte Schaltkomfortabstimmung bei PKW mit Stufenautomatik, in: VDI-Berichte Nr. 1610, VDI-Verlag, Düsseldorf
- Heise 2009: Through-the-road-Antrieb für sparsame Nutzfahrzeuge, <http://www.heise.de/newsticker/meldung/Through-the-road-Antrieb-fuer-sparsame-Nutzfahrzeuge-216516.html>, 2009

- Heißing Ersoy 2008: Heißing, B.; Ersoy, M.: Fahrwerkhandbuch. Grundlagen, Fahrdynamik, Komponenten, Systeme, Mechatronik, Perspektiven. 2., verbesserte und aktualisierte Auflage. Wiesbaden, Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 2008
- Hirtz et al. 2002: Hirtz, J.; Stone, R. B.; McAdams, D. A.; Szykman, S.; Wood, K. L.: A Functional Basis for Engineering Design: Reconciling and Evolving Previous Efforts. NIST Technical Note 1447. Washington, USA, 2002
- Hoffmann 1999: Hoffmann, J.: Korrelation objektives Messen - subjektives Empfinden am Beispiel des Lastwechselschlages im Pkw, in: Subjektive Fahreindrücke sichtbar machen I, Becker, K. (Hrsg.), Renningen-Malmsheim, 1999.
- Hofmann 2005: Hofmann, L.: Antriebs- und Steuerungskonzept des VW Golf TDI Hybrid, in: DGES-Fachtagung "Hybrid- und Brennstoffzellenfahrzeuge: Energiemanagement-Aufgaben und -Strukturen", 2005.
- Hohenberg Indra 2006: Hohenberg, G., Indra, F.: Analyse des Hybridantriebs am Beispiel RX400h: Abschlussbericht zur Studie, 2006.
- Hörig 2010: Hörig, M.: Optimierung von Methoden zur Bewertung der Wiederstartqualität in Hybridantriebsträngen. Studienarbeit, KIT, IPEK, 2010
- Hornik et al. 1989: Hornik, K.; Stinchcombe, M.; White, H.: Multilayer feedforward networks are universal approximators. In: Neural Networks, Jg. 2, H. 5, S. 359–366. Online verfügbar unter <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6T08-485RHTR-5R/2/5d13881c0b9d8128fde7950a6f55849d>, 1989
- Horste 1995: Horste, K.: Objective Measurement of Automatic Transmission Shift Feel Using Vibration Dose Value, in: Proceedings of the 1995 Noise and Vibration Conference, SAE Paper 951373, 1995.
- Huard 2009: Huard, E. J.: Kundenorientierte Objektivierung des Schaltkomforts zur Anwendung in der Simulation. Dissertation, Techn. Univ., Braunschweig, Shaker, Aachen, 2009.
- IAV 1997: 1. Symposium Steuerungssysteme für den Antriebsstrang von Kraftfahrzeugen, Berlin, 1997
- Isermann et al. 1999: Isermann, R.; Schaffnit, J.; Sinsel, T.: Hardware-in-the-loop simulation for the design and testing of engine-control systems; in: Control engineering practice, Vol. 7, 1999
- Isermann 2008: Isermann, R.: Mechatronische Systeme. Darmstadt: Springer Verlag, 2008

- ISO 1997: ISO: 2631-1: Mechincal shock an vibration - Evaluation of human exposure - the whole-body-vibration, 1997.
- Jürgensohn et al. 2001: Jürgensohn, T. et al.: Kraftfahrzeugführung, Berlin, 2001.
- Karnopp et al. 1990: Karnopp, D. Margolis D. Rosenberg R.: System dynamics: a unified approach. New York: Wiley, 1990
- Karnopp Rosenberg 1975: Karnopp, D.; Rosenberg, R.: System dynamics: a unified approach. New York, Wiley, 1975
- Kemper et al. 2006: Kemper, H., Rütten O., Jentges M., Schlosser A.: Betriebsstrategien von Hybridfahrzeugen, Funktionen und Applikation. 15. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 2006. S. 202 ff.
- Kirchner 2007: Kirchner, E.: Leistungsübertragung in Fahrzeuggetrieben. Grundlagen der Auslegung, Entwicklung und Validierung von Fahrzeuggetrieben und deren Komponenten, 2007
- Kirschstein et al. 2009: Kirschstein, S. et al.: Efficient transmission application by using modern offline tools, in: CTI Tagung 2009.
- Knobelspies Münnich 2008: Knobelspies, M.; Münnich, R.: Variablenselektion bei gebundener Hochrechnung. In: AUSTRIAN JOURNAL OF STATISTICS, S. 335-347, 2008
- Koller 1985: Koller, R.: Konstruktionslehre für den Maschinenbau, 2., neubearb Auflage, Springer Berlin Heidelberg New York Tokyo, 1985
- Koller 1998: Koller, R.: Prinziplösungen zur Konstruktion technischer Produkte; 2., neubearb. Auflage, Springer Berlin Heidelberg, 1998
- Berlin ; Heidelberg [u.a.] : Springer, 1998. - IX, 503 S. : graph. Darst.; (deutsch)
- Küçükay 2001: Küçükay, F.: Anforderungen an moderne Automatikgetriebe, in: IIR-Tagung "Innovative Fahrzeuggetriebe", 2001.
- Küçükay et al. 2009: Küçükay, F. et al.: Effiziente Abstimmung von automatisch schaltenden Getrieben auf dem Rollenprüfstand. in: Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Vol. 111, 2009.
- Küçükay Gebert 1997: Küçükay, F., Gebert, J.: Schaltkomfort als neue Regelgröße bei Pkw-Automatikgetrieben, in: 1. Symposium Steuerungssysteme für den Antriebsstrang von Kraftfahrzeugen, IAV GmbH, Berlin, 1997.
- Kudritzki 1995: Kudritzki, D.: Mensch-Maschine-System Fahrzeug – die kundenorientierte Auslegung des Fahrwerks, Berlin, 1995.

- Kudritzki 2000: Kudritzki, D.: Möglichkeiten der Objektivierung subjektiver Beurteilungen des Fahrzeugverhaltens, in: Subjektive Fahreindrücke sichtbar machen I – Korrelation zwischen CAE-Berechnung, Versuch und Messung von Versuchsfahrzeugen und -komponenten, Becker, K. (Hrsg.), Renningen-Malmsheim, 2000.
- Kulzer et al. 2003: Kulzer, A. C. et al.: BDE-Direktstart - Startoptimierung eines Ottomotors mit Direkteinspritzung anhand eines thermodynamischen Motorsimulationsmodells, in: Int. Stuttgarter Symposium Kraftfahrwesen u. Verbrennungsmotoren, 2003.
- Laubender et al. 2005: Laubender, J. et al.: Vom Direktstart zum marktattraktiven Start Stopp System, in: 14. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 2005
- Lerspalungsanti 2010: Lerspalungsanti, S.: Ein Beitrag zur Modellierung des menschlichen Komfortempfindens und Beurteilung der NVH-Eigenschaften in der Antriebsstrangentwicklung auf Basis von Künstlichen Neuronalen Netzen. Dissertation, KIT, Karlsruhe, 2010.
- Löffler 2000: Löffler, J.: Optimierungsverfahren zur adaptiven Steuerung von Fahrzeugantrieben. Dissertation, Universität Stuttgart, 2000.
- MacFarlane 1964: MacFarlane, A.: Engineering systems analysis. Cambridge: G.G. Harrop, 1964
- MacFarlane 1970: MacFarlane, A.: Dynamical system models. London: G.G. Harrop, 1970
- Maiwald et al. 2010: Maiwald, O. et al.: Simulationsumgebung zur Analyse verschiedener Hybrid-Antriebs-Konfigurationen. in: Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Vol. 112, 2010.
- Meboldt 2008: Meiboldt, M.: Mentale und formale Modellbildung in der Produktentstehung – als Beitrag zum integrierten Produktentstehungs-Modell (iPeM). Universität Karlsruhe (TH), Institut für Produktentwicklung, Dissertation. In: Albers, Albert (Hrsg.): IPEK–Forschungsberichte, Band 29, Karlsruhe 2008, ISSN 1615-8113
- Müller 2010: Müller, S.: Der Startvorgang von hybridisierten Ottomotoren - Untersuchung, Bewertung, Optimierung. Dissertation, TU Darmstadt, 2010.
- Neukum 2002: Neukum, A.: Bewertung des Fahrverhaltens im Closed Loop – Zur Brauchbarkeit des korrelativen Ansatzes, in: Subjektive Fahreindrücke sichtbar machen II – Korrelation zwischen objektiver Messung und subjektiver Beurteilung von Versuchsfahrzeugen und –komponenten, Becker, K. (Hrsg.). 2, Renningen-Malmsheim, 2002.
- Knoll 2006: Knoll, C.: Einfluss des visuellen Urteils auf den physisch erlebten Komfort am Beispiel von Sitzen. Ein Beitrag zu dem Verhältnis von Ergonomie und Design. München.



- TU München, Lehrstuhl für Ergonomie. Online verfügbar unter [http://deposit.d-nb.de/cgi-bin/dokserv?idn=985432411&dok\\_var=d1&dok\\_ext=pdf&filename=985432411.pdf](http://deposit.d-nb.de/cgi-bin/dokserv?idn=985432411&dok_var=d1&dok_ext=pdf&filename=985432411.pdf), 2006
- Matthiesen 2002: Matthiesen, S.: Ein Beitrag zur Basisdefinition des Elementmodells "Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen" zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer System. IPEK Forschungsberichte Nr. 6, KIT, 2002
- Noreikat 2010: Noreikat, K.: Alternative Antriebe. Vorlesungs-Skript. Stuttgart. Duale Hochschule Baden-Württemberg, 2010
- Nørgaard 2003: Nørgaard, M.: Neural networks for modelling and control of dynamic systems. A practitioner's handbook. 3. printing, with corrections. London: Springer (Advanced textbooks in control and signal processing), 2003
- Oberguggenberger 2005: Oberguggenberger, M. et al.: Lineare Regression: <http://www.mathe-online.at/nml/materialien/innsbruck/regression/Regression.pdf>, eingesehen am 18.11.2010.
- Otnad 2009: Otnad, J.: Topologieoptimierung von Bauteilen in dynamischen und geregelten Systeme. Dissertation, Karlsruhe, Universität Karlsruhe (TH), IPEK, 2009
- Pahl Beitz 2005: Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., & Grote, K. H.: Konstruktionslehre - Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Berlin, Heidelberg, New York, Springer Verlag, 2005
- Paynter 1961: Paynter, H.: Analysis and design of engineering systems. Cambridge, USA: MIT press, 1961
- Petersen 1991: Petersen, H.: Grundlagen der Statistik und der statistischen Versuchsplanung; Band 1; ecomed; Landsberg/Lech; 1991
- Philipp Scholz 2008: Philipp, K., Scholz, N.: Driveline and energy management strategy of the Touareg Hybrid SUV, in: 7. Internationales CTI Symposium, Berlin, 2008
- Pischinger 2000: Pischinger, S.: Verbrennungsmotoren, Vorlesungsumdruck, Band 1, Aachen, RWTH-Aachen, 2000
- Ponn Lindemann 2008: Ponn, J.; Lindemann, U.: Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte: Optimierte Produkte - systematisch von Anforderungen zu Konzepten: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-68563-0>, 2008
- Popper 1995: Popper, K. R.: Objektive Erkenntnis. Ein evolutionärer Entwurf. 3. Aufl. Hamburg: Hoffmann und Campe (Campe-Paperback), 1995
- Porsche 2007: Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG: Porsche-Bewertungs-Index (PBI), 2007

- Porsche 2008: Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG:: Reibleistungsanalyse: interner Bericht, Weissach, 2008.
- Porsche 2009: Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG: Pressevorstellung Cayenne S Hybrid, 2009
- Porsche 2010: Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG. Pressemitteilung vom 02.03.2010, Nr. 19/10, Stuttgart, 2010
- Riedel, Arbinger 1997: Riedel, A., Arbinger, R.: Subjektive und objektive Beurteilung des Handlings von Pkw, in: FAT-Schriftenreihe 139, Frankfurt, 1997.
- Riemschneider 1996: Riemschneider, K. -R.: Parallele Hardware für Backpropagation-Netze auf der Basis stochastischer Rechenwerke. Dissertation. Hamburg. Univ. der Bundeswehr, 1996
- Rost 2004: Rost, J.: Lehrbuch Testtheorie - Testkonstruktion, 2., vollst. überarb. und erw. Aufl., Huber, Bern, 2004.
- Rücker et al. 2008: Rücker, A. et al.: Einfluss der BMW Start Stopp Funktion auf CO<sub>2</sub>- und Schadstoffemissionen, in: 4. Tagung Emission Control, Dresden, 2008.
- Rüdenauer 2010: Rüdenauer, A.: Entwurf einer Methode zur funktionsorientierten Modellierung von Antriebskonzepten. Diplomarbeit., KIT, IPEK, 2010
- Sadowski 2009: Sadowski, E.: Entwicklung einer Funktions- und Bauteilbibliothek für die funktionsbasierte Modellierung technischer Systeme auf Basis des C&CM. Diplomarbeit, Universität Karlsruhe (TH), IPEK, 2009
- SAE 1973: Surface Vehicle Recommended Practice J1060 - Subjective Rating Scale for Noise and Ride Comfort Characteristics Related to Motor Vehicles. SAE, Warrendale, PA, 1973.
- Schamai 2009: Schamai, W.: Modelica Modeling Language (ModelicaML): A UML Profile for Modelica. Technical reports in Computer and Information Science. Linköping, Sweden (Report Number 2009:5), 2009
- Schindler 2007: Schindler, E.: Fahrdynamik. Grundlagen des Lenkverhaltens und ihre Anwendung für Fahrzeugregelsysteme. Renningen: expert-Verl., 2007
- Schöggel et al. 2003: Schöggel, P. et al.: Methoden zur Automatisierung von Entwicklungsprozessen durch den Einsatz neuer Optimierungswerkzeuge und objektiv gemessener Kundenbedürfnisse: Tagung: "Erprobung und Simulation in der Fahrzeugentwicklung - Mess- und Versuchstechnik- 2003", in: VDI-Berichte Nr. 4211, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2003.

- Schögl Ramschak 2000: Schögl, P., Ramschak, E.: Vehicle Driveability Assessment using Neural Networks for Development, Calibration and Quality Tests: SAE 2000 World Congress, Detroit, Michigan, 2000.
- Schyr 2006: Schyr, C.: Modellbasierte Methoden für die Validierungsphase im Produktentwicklungsprozess mechatronischer Systeme am Beispiel der Antriebsstrangentwicklung. Dissertation, Karlsruhe, Universität Karlsruhe (TH), IPEK, 2006
- Sedchaicharn 2010: Sedchaicharn, K. : Eine rechnergestützte Methode zur Festlegung der Produktarchitektur mit integrierter Berücksichtigung von Funktion und Gestalt. Dissertation, Karlsruhe, KIT, IPEK, 2010
- Siebertz et al. 2010: Siebertz, K.; van Bebber, D.; Hochkirchen, T.: Statistische Versuchsplanung. Design of Experiments (DoE). (VDI-Buch). Online verfügbar unter <http://www.springerlink.com/content/n23335>, 2010
- Spiegel et al. 2010: Spiegel, L.; Schürmann, M.; Rauner, T.; Stache, I.; Göhring, M.; Neußer, H. -J: Das Antriebskonzept des neuen Cayenne S Hybrid. In: 19. Aachener Kolloquium "Fahrzeug- und Motorentchnik", S. 53–74, 2010
- Stangier 2009: Stangier, O.: Entwicklung einer automatisierten Versuchsmethode zur interaktiven Beurteilung des Schaltkomforts bei Fahrzeugen mit Doppelkupplungsgetrieben. Diplomarbeit, Köln, Fachhochschule Köln, Institut für Fahrzeugtechnik, 2009
- Taguchi 2004: Taguchi, G.: Taguchi's Quality Engineering Handbook. Hoboken, NJ, USA : John Wiley & Sons, 2004. – ISBN 978-0-4714-1334-9
- TEMA-Q 2006: TEMA-Q Technik und Management für Qualität GmbH: Wachsendes Interesse an Hybrid-Antrieben. Pressemitteilung vom 25.08.2006. Meinersen. Online verfügbar unter <http://www.tema-q.de/de/infopresse/tema-des-monats/artikel/artikel/hybrid-antrieb-2.html>, zuletzt geprüft am 31.03.2011.
- VDA 2007: VDA: Das gemeinsame Qualitätsmanagement in der Lieferkette: Produktherstellung und -lieferung: Robuster Produktionsprozess, 1. Aufl., Oberursel, 2007.
- VDI 1993: VDI-Richtlinie 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. VDI, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1993.
- VDI 1997: VDI-Richtlinie 2221: Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien: VDI, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1997.
- VDI 2002: VDI-Richtlinie 2057: Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen - Ganzkörper-Schwingungen, VDI, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2002.

- VDI 2004: VDI-Richtlinie 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme, VDI, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2004.
- VDI 2006: VDI-Richtlinie 4001: Terminologie der Zuverlässigkeit. VDI, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2006.
- VDI 2007: VDI-Richtlinie 4003: Zuverlässigkeitsmanagement. VDI, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2007.
- Warnke 2009: Warnke, J.: Optimierung des Wiederstartverhaltens eines Verbrennungsmotors in einem Voll-Hybridantriebsstrang. Diplomarbeit, Hamburg, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 2009
- Webersinke 2008: Webersinke, L.: Adaptive Antriebsstrangregelung für die Optimierung des Fahrverhaltens von Nutzfahrzeugen. Dissertation, Universität Karlsruhe, 2008
- Wyatt Wynn 2009: Wyatt, D. F.; Wynn, D. C.; Clarkson P. J.: A computational method to support product architecture design. Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE'09), 13.-19. November 2009. Lake Buena Vista, Florida, USA.
- Wymann 2007: Wymann, O.: Car Innovation 2015. Studie zum Thema Innovationspotenziale, Frankfurt am Main, 2007
- Wynn et al. 2009: Wynn, D. C.; Nair, S. M. T.; Clarkson, P. J.: The P3 Platform: An approach and software system for developing diagrammatic model-based methods in design research. Proceedings of the International Conference on Engineering Design (ICED'09), 24.-27. August 2009. Palo Alto, California, USA, 2009.
- Zell 2003: Zell, A.: Simulation neuronaler Netze. 4., unveränd. Nachdr. München, Oldenbourg Verlag, 2003
- ZF 2009: ZF Friedrichshafen AG: Sparwunder mit neuem Radsatz-Konzept: Der neue 8-Gang-Getriebekasten ist „Hybrid Ready“, Presseinformation vom 15.09.2009, online verfügbar unter:  
[http://www.zf.com/media/media/de/document/corporate\\_2/press\\_3/press\\_kits\\_1/iaa\\_2009\\_1/iaa2009\\_1\\_02\\_8HP\\_zf.pdf](http://www.zf.com/media/media/de/document/corporate_2/press_3/press_kits_1/iaa_2009_1/iaa2009_1_02_8HP_zf.pdf), zuletzt geprüft am 13.06.11
- Zhang et al. 1996: Zhang, L. et al.: Identifying Factors of Comfort and Discomfort in Sitting. in: Human Factors, Vol. 38, 1996.
- Ziegler 1984: Ziegler, G.: Verminderung des Anlassgeräusches: Umweltforschungsplan des Bundesministers des Innern, Forschungsbericht -Lärmbekämpfung- ; 105 05 109/02. Endbericht Phase 2 ; geräuscharme motorintegrierte Anlasseinrichtung für einen Pkw-Verbrennungsmotor, 1984.

Zülch 2007: Zülch, C.: Konzepte für den sicheren Direktstart von Ottomotoren. Dissertation, Stuttgart, Universität Stuttgart, 2007.

# Lebenslauf

## Persönliche Daten

Name: Jörg-Michael Birkhold  
Geburtsdatum: 01.01.1983  
Geburtsort: Bad Mergentheim  
Staatsangehörigkeit: deutsch  
Familienstand: verheiratet

## Bildungsgang

08/1989-07/1993 Grundschule Weikersheim  
08/1993-07/2002 Gymnasium Weikersheim; Abschluss: Abitur  
10/2002-05/2008 Studium des Maschinenbaus an der RWTH Aachen;  
Abschluss: Diplom-Ingenieur  
seit 05/2008 Doktorand am KIT, Institut für Produktentwicklung (IPEK)

## Berufstätigkeit

01/2004-12/2006 Studentische Hilfskraft am Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der RWTH Aachen  
04/2007-10/2007 Praktikant bei der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG  
11/2007-04/2008 Diplomand bei der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG  
05/2008-01/2011 Freier Mitarbeiter als Doktorand bei der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG  
seit 02/2011 Sachgebietsleiter Hybridantriebe bei der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG