

**Objektivierte automatisierte Fahrbarkeitsapplikation mittels  
Design of Experiment**

**Objectified Automated Drivability Calibration Using Design  
of Experiment**

Von der Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen  
Hochschule Aachen zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der  
Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Matthias Günter Krause

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. (USA) Stefan Pischinger  
Hon.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Horst Schulte

Tag der mündlichen Prüfung: 10.02.2023

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar



# Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit wird eine Methodik zur objektivierten und automatisierten Fahrbarkeitsapplikation entwickelt. Diese basiert auf einem allgemeinen Vorgehensmodell zur Entwicklung objektiver Kriterien. Es wird gezeigt, wie Anwärter für solche Kennwerte mittels statistischer Methoden systematisch untersucht, verfeinert und validiert werden können, um so zu einem Satz objektiver Kriterien zu gelangen, die das Verhalten des Versuchs vollständig beschreiben. Für die betrachtete Domäne der Fahrbarkeitsapplikation wird dies am Manöver des Tip-In exemplarisch diskutiert.

Eine wesentliche Grundlage des Vorgehens ist weitreichende Automatisierung. Diese verzichtet in den untersuchten Fällen vollständig auf zusätzliche Hardware wie Fahrroboter oder Pedalaktuatoren. Stattdessen wird die teil- und vollautomatische Durchführung von Fahrmanövern und ganzen Kalibrieraufgaben auf Basis von Software über die Fernsteuerung des Applikationstools realisiert.

Auf Basis von Objektivierung und Automatisierung wird gezeigt, wie das strukturierte Vorgehen der Prüfstandsapplikation, anhand von Design of Experiment (DoE), konsistent auf die Arbeit im Fahrzeug übertragen werden kann. Mittels angepasster Beschreibung des Versuchsraums, globaler Modellierung mit Gaußprozess-Modellen sowie spezieller Formulierung von Optimierungszielen im Raum der subjektiven Bewertungsgrößen (ausgedrückt als Funktionen der objektiven Kriterien), eröffnet sich für die Applikation von Fahrzeugen erhebliches Potential für Einsparungen an Entwicklungszeit und -kosten. Die Arbeit leistet einen Beitrag, um diese auch in Zukunft notwendigen Arbeiten effizient durchzuführen und so den Gesamtprozess einige Schritte in Richtung eines Optimums zu lenken.



---

## Abstract

The thesis explores a methodology for objectified and automated drivability calibration. Initially a generalized approach for the development of key performance indices is introduced. On this foundation respective candidates for characteristic values can be systematically identified, refined and validated by means of statistical methods, in order to derive a set of objective criteria, that fully describes the observed behavior of the driving scenario. For the investigated domain of drivability calibration, the maneuver of tip-in is exemplarily handled in detail.

An essential basis of the approach is extensive automation. In the cases examined, additional hardware such as driving robots or pedal actuators are completely avoided. Instead, the partially and fully automated execution of driving maneuvers and entire calibration tasks is realized on the basis of software via remote control of the calibration tool.

Based on objectification and automation, it is shown how the well structured test bench calibration methods, based on Design of Experiment (DoE), can be consistently transferred to the work in the vehicle. By means of adapted description of the test space, global modeling with Gaussian process models as well as special formulation of optimization targets in the space of subjective evaluation variables (expressed as functions of the objective criteria), considerable potential for savings in time and cost opens up for the calibration of vehicles. The thesis contributes to a more efficient working procedure in the future work in this area and thus to move the global process of calibration some steps into the direction of an optimum.



---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>vii</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>xi</b>
<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>xiii</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>xv</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Aufgabenstellung und Domänenspezifikation</b>	<b>5</b>
2.1 Aufgabenstellung . . . . .	6
2.2 Domänenspezifikation . . . . .	9
<b>3 Objektivierung von Fahrbarkeitsbewertungen</b>	<b>15</b>
3.1 Objektivierung subjektiver Bewertungen als andauerndes Forschungs- gebiet . . . . .	16
3.1.1 Bewertung des Fahrverhaltens von Fahrzeugen . . . . .	17
3.1.2 Physikalische Modellierung des Fahrzeugverhaltens . . . . .	20
3.1.3 Methodik in der Fahrbarkeitsapplikation . . . . .	21
3.2 Methodische Entwicklung objektiver Kriterien zur Fahrbarkeitsbe- wertung . . . . .	22
3.2.1 Physikalisch motivierte Kriterien und deren Entwicklung . . . . .	23
3.2.2 Zum Vibration Dose Value und dessen Legitimität . . . . .	35

3.2.3	Validierung der objektiven Kriterien . . . . .	39
3.2.4	Übertragbarkeit der objektiven Kriterien auf andere Antriebskonzepte . . . . .	46
<b>4</b>	<b>Automatisierte Fahrzeugapplikation</b>	<b>49</b>
4.1	Modellbasierter Applikationsprozess . . . . .	50
4.2	Automatisierung als Schlüssel zur Effizienzsteigerung . . . . .	51
4.3	Automatisierung von Fahrversuchen . . . . .	53
4.4	Aspekte zur softwaretechnischen Umsetzung der Automatisierung	60
<b>5</b>	<b>Fahrbarkeitsapplikation mit Design of Experiment</b>	<b>65</b>
5.1	Funktionsweise der Lastschlagdämpfung und ihre traditionelle Applikationsmethodik . . . . .	66
5.2	Überführung der DoE-Methodik auf die Fahrbarkeitsapplikation am Beispiel Tip-In . . . . .	69
5.2.1	Einleitung und grundlegendes Konzept . . . . .	69
5.2.2	Wahl der richtigen Eingangsgrößen und Modellierungsform	70
5.2.3	Bestimmung des Versuchsraums und Berechnung des Versuchsplans . . . . .	74
5.2.4	Modellierung des Fahrbarkeitsverhaltens anhand objektiver Kriterien . . . . .	79
5.2.5	Optimierung der Applikationsparameter . . . . .	85
5.2.6	Online Design of Experiment (DoE) . . . . .	93
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>97</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>101</b>
A.1	Subjektive Kriterien in Originalform . . . . .	101
A.2	MATLAB Skript zur Bestimmung der Grenzpunkte entsprechend der Methode aus Abschnitt 5.2.3 . . . . .	102
A.3	Zusätzliche Daten zur Validierung der objektiven Kriterien . . . . .	103
A.4	Gebräuchliche Größen der Statistik zur Bewertung der Modellgüte	107
A.5	Ergänzende Trade-Off Darstellungen zu Abschnitt 5.2.4 . . . . .	110
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>111</b>
	<b>Sachverzeichnis</b>	<b>125</b>

---

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Prognose Fahrzeugtypenverteilung und mögliche Effizienzsteigerungen bis 2040 [37, S.18]	2
2.1	Grundschemata modellbasierter Applikationsprozesse für globale Optimierung	8
2.2	Beispielvordruck zur subjektiven Bewertung von Fahrmanövern [101]	11
3.1	Zusammenhänge zwischen den wichtigsten Begriffen der Domäne der Fahrbarkeitsapplikation	16
3.2	Schema methodischer Entwicklung von Kriterien für die Objektivierung von Fahrmanövern	24
3.3	Entscheidungsmatrix zur Ableitung eines Referenzsystems	26
3.4	Qualitative Darstellung eines Tip-In-Manövers zur Erläuterung der subjektiven Kennwerte	28
3.5	Vergleich zweier Beschleunigungsverläufe zur Erklärung der Schwierigkeit der Definition objektiver Kriterien	29
3.6	Qualitative Darstellung eines Tip-In-Manövers zur Erläuterung der objektiven Kennwerte	31
3.7	Auswertung der Stabilität und Signifikanz von Wiederholungsversuchen ausgewählter Kennzahlen des Tip-In-Manövers	34
3.8	Prinzipieller subjektiver Versuchsplan für Validierung der objektiven Kriterien	41

3.9	Vergleich von Tip-In-Manövern von mittelklassigen und sportlichen Fahrzeugen mit Verbrennungs- bzw. Elektromotor . . . . .	47
4.1	Modellbasierter Applikationsprozess . . . . .	50
4.2	State-of-the-art Systemaufbau bei Aufgaben der Prüfstandsapplikation . . . . .	52
4.3	Systemaufbau für Fahrzeugautomatisierung mittels per Software realisierter Verstellung . . . . .	54
4.4	Zustandsmaschine für das Tip-In-Manöver: Sicherheitsebene der Automatisierung im Fahrzeug . . . . .	56
4.5	Zustandsmaschine für das Tip-In-Manöver: Ebene zur vollautomatischen Tip-In-Realisierung . . . . .	57
4.6	Vergleich der erzielten Tip-In Drehzahl bei manueller und automatisierter Durchführung mit $2\sigma$ -Bereich für beide Messreihen . . . . .	58
4.7	Vergleich von Beschleunigung und Pedalverlauf in 20 wiederholten Tip-In-Messungen bei automatisierter (links) und manueller (rechts) Durchführung . . . . .	59
4.8	Schema-Darstellung der Automatisierungssoftware mit Schnittstellen und Komponenten deren Erweiterbarkeit bzw. Änderbarkeit speziell in Betracht gezogen werden muss . . . . .	62
5.1	Qualitativer Verlauf wichtiger Größen während eines Tip-In . . . . .	67
5.2	Grundidee der Fahrbarkeitsapplikation mittels DoE . . . . .	69
5.3	Veranschaulichung des Trade-Off zwischen Komplexität, Aufwand und Genauigkeit der Vorhersage . . . . .	71
5.4	Möglichkeiten der Modellbildung auf Basis der zu applizierenden Kennfelder mit dabei optimierbaren Kennfeldbereichen . . . . .	73
5.5	Globales raumfüllendes Design aus 500 Punkten im beschränkten Versuchsraum aus den Größen Pedal, Drehzahl, $\text{Trq}_2$ , $\Delta\text{Trq}_2$ , $T_2$ und $T_3$ . . . . .	78
5.6	Vergleich lokaler, semi-globaler und globaler Modellierung der nach Abschnitt 3.2.3 in Tabelle 3.7 (S. 46) identifizierten signifikanten objektiven Kriterien zur Beschreibung der Hauptkomponenten der subjektiven Bewertungen am Betriebspunkt mit Drehzahl $2000 \frac{1}{\text{min}}$ und Pedalposition 50%. Der Übersichtlichkeit halber wurden die Einheiten an den x- und y-Achsen weggelassen und lauten $\text{Trq}_2/\text{Nm}$ , $\Delta\text{Trq}_2/\text{Nm}$ , $T_3/\text{s}$ . . . . .	83
5.7	Modellvorhersage- vs. Messung-Plots der objektiven Kriterien $\frac{da}{dt}^+_{FJ\text{max}}$ , $\alpha_{FJ\text{peak}}$ , $\text{VDV}_{FJ}$ und $t_{80\%}$ von Modellpunkten (schwarz) und Validierungspunkten (grau). . . . .	84

5.8	Trade-Off-Darstellungen der Größen $\frac{da}{dt}_{FJmax}^+$ , $a_{FJpeak}$ , $t_{80\%}$ und $VDV_{FJ}$ . . . . .	85
5.9	Optimierungsergebnisse der Einflussparameter für die Abstimmung des Tip-In-Manövers entsprechend der gewählten Gewichtungen aus den Gleichungen 5.10 bis 5.12 . . . . .	90
5.10	Beispiel für die Überführung der Ergebniswerte auf entsprechende Electronic Control Unit (ECU) Kalibrierparameter . . . . .	90
5.11	Vergleich des Optimierungsergebnisses mit der Basisapplikation am Betriebspunkt mit Drehzahl $2000\frac{1}{min}$ und Pedalposition 50% . . . . .	91
5.12	Schema zur Erklärung der Möglichkeit die ECU-Struktur direkt in die Optimierung einzubeziehen . . . . .	92
5.13	Grundschemata vollständig automatisierter modellbasierter Applikationsprozesse . . . . .	93
5.14	Workflow zur Realisierung der Online-DoE Methodik mit automatischer Modellierung . . . . .	96
A.1	Modellvorhersage- vs. Messung-Plots der objektiven Kriterien $\frac{da}{dt}_{FJmax}^+$ , $t_{FJmax}^+$ , $a_{FJpeak}$ , $t_{FJpeak}$ , $\frac{da}{dt}_{FJmax}^-$ , $t_{FJmax}^-$ . . . . .	105
A.2	Modellvorhersage- vs. Messung-Plots der objektiven Kriterien $\frac{da}{dt}_{FJkick}$ , $\Delta a_{FJkick}$ , $\frac{da}{dt}_{FJav}$ , $t_{FJend}$ , $VDV_{FJ}$ , $VDV_{Surge}$ . . . . .	106
A.3	Trade-Off-Zusammenhänge der wesentlichen objektiven Modelle $\frac{da}{dt}_{FJmax}^+$ , $a_{FJpeak}$ , $VDV_{FJ}$ und $t_{80\%}$ in Abhängigkeit von den Applikationsparametern $Trq_2$ , $\Delta Trq_2$ , $T_2$ und $T_3$ . . . . .	110



---

# Tabellenverzeichnis

3.1	Vereinheitlichung subjektiver Kriterien für die Tip-In Bewertung . . . . .	27
3.2	Erklärung der subjektiven Bewertungen für die Tip-In Bewertung . . . . .	28
3.3	Zusammenfassung der objektiven Kriterien für das Tip-In-Manöver . . . . .	32
3.4	Frequenzwichtungen nach BS 6841, ISO 2631-1, ISO 2631-2 [26, 60, 90] . . . . .	38
3.5	Matrix der Wahrscheinlichkeiten $p_{ij}^{\text{subj}}$ für eine signifikante Abweichung der Korrelationskoeffizienten zw. den subjektiven Bewertungen von 0 . . . . .	43
3.6	Matrix der Wahrscheinlichkeiten $p_{ij}^{\text{obj,subj}}$ für eine signifikante Abweichung der Korrelationskoeffizienten zwischen den subjektiven Bewertungen und objektiven Kriterien von 0 . . . . .	45
3.7	Reduzierte Matrix der Korrelationskoeffizienten $\varrho_{ij}^{\text{obj,subj}}$ zwischen den subjektiven Hauptkomponenten und signifikanten objektiven Kriterien . . . . .	46
5.1	Allgemeine lokaler Parametergrenzen für die Definition des Versuchsraums . . . . .	76
5.2	Beispiel lokaler Parametergrenzen für die Definition des Versuchsraums . . . . .	77
5.3	Vergleich des Optimierungsergebnisses mit der Basisapplikation am Betriebspunkt mit Drehzahl $2000\frac{1}{\text{min}}$ und Pedalposition 50% . . . . .	92
A.1	Vereinheitlichung subjektiver Kriterien für die Tip-In Bewertung (englische Originalbezeichnungen) . . . . .	101

A.2	Korrelationsmatrix $\rho^{\text{subj,subj}}$ der subjektiven Bewertungen untereinander . . . . .	103
A.3	$p$ -Matrix der subjektiven Bewertungen untereinander . . . . .	103
A.4	Matrix der Korrelationskoeffizienten zwischen den objektiven Kriterien und den subjektiven Bewertungen . . . . .	104

---

## Symbolverzeichnis

$(y_t)_{t=1,\dots,T}$	Menge von Zeitreihen $y_1, y_2, \dots, y_{T-1}, y_T$ zur Beschreibung eines Systems
$w$	Kurtosis oder auch Wölbung. Dient als Maßzahl für die Steilheit bzw. „Spitzigkeit“ einer Wahrscheinlichkeitsfunktion, statistischen Dichtefunktion oder Häufigkeitsverteilung. Sie wird zur Herleitung des VDV verwendet
VDV	Vibration Dose Value: Maß für die Bewertung des Ruckelns
$\tilde{a}(t)$	Für die praktische Berechnung des VDV speziell gefilterte und mit einem Fensteralgorithmus beaufschlagte Messung der Fahrzeugbeschleunigung
$\tau_a, \tau_e$	Anfangs- und Endzeitpunkt der Integration für die Berechnung des Vibration Dose Value (VDV)
$T_s = \tau_e - \tau_a$	Dauer des betrachteten Zeitintervalls für die Berechnung des VDV
$\bar{x}$	Mittelwert der Größe $x$

$E(X)$	Erwartungswert der Zufallsvariable $X$
$\text{VarK}(X)$	Variationskoeffizient bzw. relative Standardabweichung der Zufallsvariable $X$
$\sqrt{\text{Var}(X)} = \sigma$	Standardabweichung der Zufallsvariable $X$
$\varepsilon_{\text{VarK}}$	Grenzwert für den ein Ergebnis der objektiven Bewertung als stabil angesehen wird
$C_i$	Bezeichnung für erzeugte Applikationsdatensätze während der Signifikanzanalyse der objektiven Kriterien
$\forall x$	Der sogenannte Allquantor ist ein Operator der Prädikatenlogik mit der Bedeutung „Für alle/jedes $x$ gilt ...“
$W_{(\cdot)}(s)$	Übertragungsfunktionen für die Frequenzwichtung bei der praktischen Anwendung des VDV nach BS 6841, ISO 2631-1, ISO 2631-2 [26, 60, 90]
$a_0, a_1, \dots, a_{n-1}$	Nenner-Koeffizienten von Polynomen zur Beschreibung von Filter-Übertragungsfunktionen
$b_0, b_1, \dots, b_m$	Zähler-Koeffizienten von Polynomen zur Beschreibung von Filter-Übertragungsfunktionen
$p_{ij}^{(\cdot),(\cdot)}$	Wahrscheinlichkeit für die signifikante Abweichung von Korrelationskoeffizienten verschiedener Bewertungsansätze
$\varrho_{ij}^{\text{obj,subj}}$	Korrelationskoeffizienten zwischen subjektiven Hauptkomponenten und signifikanten objektiven Kriterien
$R_{xy}(\tau)$	Kreuz-Korrelationskoeffizient zweier Signale $x(t)$ und $y(t)$ im Zeitintervall $T_F$
$\text{Trq}_2$	Kalibrierbares Anfangsmoment der in dieser Arbeit beispielhaft genutzten Momentenformung zur Fahrbarkeitsapplikation

$T_2$	Kalibrierbare Dauer des linearen Anstiegs des Moments der in dieser Arbeit beispielhaft genutzten Momentenformung zur Fahrbarkeitsapplikation
$\Delta \text{Trq}_2$	Kalibrierbare Momentendifferenz des linearen Anstiegs des Moments der in dieser Arbeit beispielhaft genutzten Momentenformung zur Fahrbarkeitsapplikation
$T_3$	Kalibrierbare Dauer der finalen Übergangsphase des Moments der in dieser Arbeit beispielhaft genutzten Momentenformung zur Fahrbarkeitsapplikation
$\mathbf{f}$	Menge abgeschlossener Funktionswerte wobei $\mathbf{f} = \{f(\mathbf{x}_1), f(\mathbf{x}_2), \dots, f(\mathbf{x}_N)\}$
$\text{Cov}[f(\mathbf{x}), f(\mathbf{x}')] ]$	Kovarianzfunktion über den beiden Eingängen $\mathbf{x}$ und $\mathbf{x}'$
$\lambda$	Längenskalierung in der quadriert-exponentiellen (QE) Form der Kovarianzfunktion $K_{QE}(\mathbf{x}, \mathbf{x}')$
$\text{MS}_{\text{val}}$	Kennwert zur Berechnung der Vorhersagequalität eines Modells unter Anwendung von Gleichung A.9 auf die Validierungspunkte
$f_i(\mathbf{x})$	Zielfunktionen der Optimierung die in gewichteter Form in die Kostenfunktion $F(\mathbf{x})$ eingehen
$\psi_i$	Zusätzliche Normierungsfaktoren, die zugehörig zu den Zielfunktionen $f_i(\mathbf{x})$ in der Kostenfunktion $F(\mathbf{x})$ während der Optimierung einen einheitlichen Beitrag der individuellen Zielgröße sicherstellen
$w_i$	Wichtungsfaktoren die zugehörig zu den Zielfunktionen $f_i(\mathbf{x})$ in der Kostenfunktion $F(\mathbf{x})$ in die Optimierung eingehen
$F(\mathbf{x})$	Kostenfunktion als gewichtete Summe der Zielfunktionen $f_i(\mathbf{x})$



---

## Verzeichnis der Abkürzungen

ACI	Von der ASAM spezifiziertes Interface für die Kommunikation zwischen Automatisierungssystem (AuSy) und Automatic Calibration System (ACS)
ACS	Automatic Calibration System
API	Application Programming Interface
ASAM	Association for Standardisation of Automation and Measuring Systems
AuSy	Automatisierungssystem
CRC	Coordinating Research Council Inc.
CVT	Getriebe mit kontinuierlich veränderbarem Übersetzungsverhältnis
DoE	Design of Experiment
ECU	Electronic Control Unit
EPA	Environmental Protection Agency
ESP	Electronic Stability Control
GP	Gauß-Prozess
HCU	Hybrid Control Unit

## Verzeichnis der Abkürzungen

---

MBC	Model based Calibration
RMS	Root Mean Square
TCU	Transmission Control Unit
VDV	Vibration Dose Value

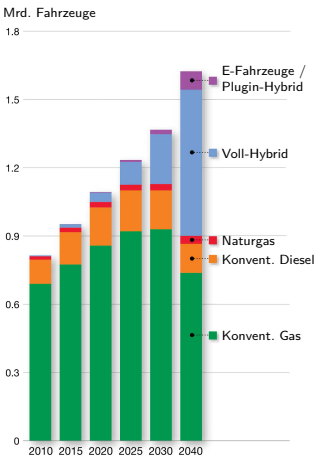
# Einleitung

Trotz zunehmendem Wandel der globalen Energieversorgung in Richtung alternativer Varianten wie Windkraft, Solarenergie oder Erdwärme bleiben die fossilen Energieträger Kohle, Erdgas und Öl zentraler Bestandteil des weltweiten Energiemixes um den stetig steigenden Bedarf der schnell wachsenden Weltbevölkerung zu decken. Durch die im November 2012 veröffentlichten Prognosen der International Energy Agency (IEA) [59, S. 1f.] wird dies untermauert. Dort heißt es, dass „der globale Energieverbrauch im Zeitraum bis 2035 um mehr als ein Drittel“ steigen wird. Amerika wird in dieser Zeit zum Netto-Exporteur von Öl werden. Etwa 40% des Ölverbrauchswachstums werden im Straßengüterverkehr anfallen. Bereits jetzt liegt der Anteil des Verkehrssektors am Ölverbrauch bei etwa 60% und dieser wird laut [58, S. 33] noch weiter ansteigen. Verbrennungsmotoren werden demnach sowohl in naher als auch mittlerer Zukunft noch einen enormen Stellenwert einnehmen (siehe Abbildung 1.1 links<sup>1</sup>). Der in [37] für 2035 geschätzte weltweite Durchschnittsverbrauch von 5 Litern auf 100km und der prognostizierte technische Fortschritt werden unweigerlich mit einer weiter steigenden Komplexität der verwendeten Systeme einhergehen. So ist nicht zu erwarten, dass die seit den 70er Jahren drastisch steigende Anzahl an Komponenten und zugehörigen Steuerungsfunktionen, die zum Betrieb eines Verbrennungsmotors mit all seinen umgebenden Aggregaten notwendig sind, eine Trendwende erleben wird.

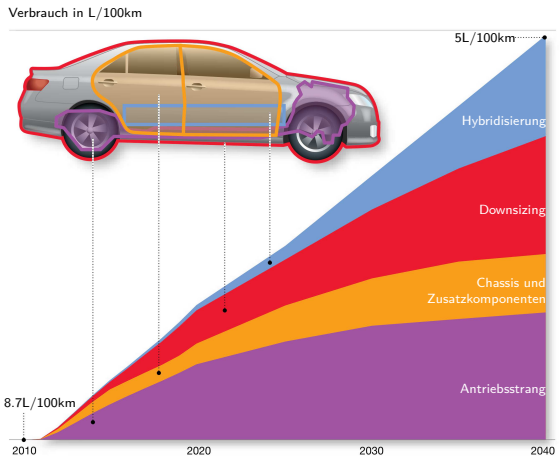
---

<sup>1</sup>Originalabbildung (engl.): [37, S. 18]. Die Beschriftungen wurden ins Deutsche übertragen und die Zahlenwerte und Einheiten auf in Deutschland gebräuchliche Größen umgerechnet.

## Fahrzeugtypenverteilung



## Anteilige Effizienzsteigerung zukünftiger PKWs



**Abbildung 1.1:** Prognose Fahrzeugtypenverteilung und mögliche Effizienzsteigerungen bis 2040 [37, S. 18]

Parallel ist seit vielen Jahren ein gegenläufiger Trend der verfügbaren Entwicklungszeiträume zu verzeichnen. Mit dem Ziel der Effizienzsteigerung werden Budgets sowie Projektdauern gekürzt. Trotzdem erweitert sich der Umfang der anzubietenden Varianten für unterschiedliche Kundenkreise und Märkte bei gleichbleibenden oder gar steigenden Qualitätsansprüchen. Die vom Kunden empfundene Qualität und Wertigkeit eines Fahrzeugs manifestiert sich dabei zunächst in harten Fakten wie Leistungsdaten und Ausstattungsmerkmalen. Dabei ist die Probefahrt ein wichtiger Grundpfeiler bei der Kaufentscheidung. Technische Merkmale unterschiedlicher Produkte liegen in einem Marktsegment und gleicher Preisklasse häufig in einem überschaubaren Rahmen eng zusammen. Das Fahrverhalten des Fahrzeugs hingegen ist ein direkt beeinflussbares Individualisierungsmerkmal und wird zunehmend aggressiv verfeinert, um die Position der eigenen Marke weiter auszubauen [32, 33]. Die Anforderungen des Kunden werden dabei von der Art des Fahrzeugs, dem Anwendungsfall, seinen technologischen Merkmalen, dem Stil und der Marktposition geprägt. Sie spiegeln sich in der Art und Weise wider, wie die Fahrzeuge gefahren werden und ändern sich zudem im Laufe der Zeit [33].

Der Aufwand zur Applikation<sup>2</sup> des Fahrverhaltens unter Beachtung der genannten zusätzlichen Anforderungen ist mit Blick auf die steigende Komplexität der

<sup>2</sup>Eine Definition und weitere Erklärung dieses Begriffs finden sich im nachfolgenden Kapitel.

Systeme nicht zu unterschätzen. Es werden beträchtliche Kapazitäten in die Abstimmung und Prüfung investiert. Für diese Aufgabe werden speziell ausgebildete Ingenieure eingesetzt, um das Erwartungsbild der eigenen Marke und der Kunden möglichst gut zu treffen [61]. Obwohl seit geraumer Zeit Methoden zur Objektivierung des Fahrverhaltens wissenschaftlich untersucht und veröffentlicht sind, basiert deren Ausführung auch heute noch in vielen Fällen auf subjektiver Bewertung und der Erfahrung der beteiligten Personen.

Um diese zu unterstützen und einen Beitrag zur Effizienzsteigerung zu leisten, beschäftigt sich die vorliegende Arbeit mit der Entwicklung einer durchgehenden Methodik der objektivierten, teil-automatisierten, modellbasierten Applikation der Fahrbarkeit von Kraftfahrzeugen. Neben einem schnelleren und klar nachvollziehbaren Erlangen von Basisapplikationen, ist ein Vorteil der hier entwickelten Methodik die stark erleichterte Ableitung der geforderten Varianten für unterschiedliche Kundenprofile, Zielmärkte aber auch Fahrprogramme, wie sie heute in vielen Fahrzeugen Anwendung finden.

Dafür wird in Kapitel 2 zunächst die Aufgabenstellung der Arbeit ausgearbeitet. Daran schließt sich eine detaillierte Einführung der Zieldomäne der Fahrbarkeitsapplikation. Es werden Begriffe, Zusammenhänge sowie Vor- und Nachteile aktueller Vorgehensweisen des Arbeitsgebiets vorgestellt und, wenn notwendig, genauer erklärt. Die bisher verwendeten Bewertungsmethoden, welche meist auf subjektivem Empfinden oder dessen Vorhersage basieren, stehen hier im Zentrum der Kritik.

Kapitel 3 bildet den ersten Kernbestandteil dieser Arbeit. Zunächst wird ein Überblick über den Stand der Technik und Forschung im Bereich der objektivierten Fahrbarkeitsapplikation gegeben. Darauf folgend wird am Beispiel des Tip-In<sup>3</sup> ein strukturierter Weg zur Entwicklung und Validierung physikalisch motivierter Kriterien aufgezeigt. Als objektives Kriterium zur Bewertung des Rucks<sup>4</sup> kommt hierbei dem so genannten Vibration Dose Value (VDV) eine besondere Stellung zu, weswegen ihm ein einzelner Abschnitt gewidmet ist. Letztlich müssen die neu entwickelten Bewertungskriterien die subjektive Methodik vollständig ersetzen können, was mit Hilfe von statistischen Mitteln geprüft und sichergestellt werden kann. Abschließend wird aufgezeigt, dass die hier entwickelte Methodik

---

<sup>3</sup>Der Tip-In ist ein charakteristisches Fahrmanöver zur Bewertung der Längsdynamik und des Komforts eines Fahrzeugs, das in Abschnitt 2.2 eingeführt und nachfolgend durchgängig als Beispiel herangezogen wird.

<sup>4</sup>Der Ruck ist ein subjektives Bewertungsaspekt in unterschiedlichen Fahrmanövern, auf das im entsprechenden Kapitel im Detail eingegangen wird. Physikalisch gesehen ist er als Ableitung  $\frac{d}{dt}a(t)$  der Beschleunigung  $a(t)$  definiert.

nicht auf Kraftfahrzeuge mit Verbrennungsmotor beschränkt ist, sondern analog auch auf alternative Antriebskonzepte angewandt werden kann.

Einen Grundpfeiler der Methodik und weiteren zentralen Aspekt dieser Arbeit bildet die Automatisierung von Messkampagnen im Fahrzeug. Wie dies mit Hilfe der Fernsteuerung des verwendeten Applikationstools und somit der automatischen Verstellung von Kalibrierparametern realisiert werden kann, wird in Kapitel 4 im Detail betrachtet. Die so gesteigerte Messdatenqualität ist bereits für jegliche Applikationsarbeiten im Fahrzeug wertvoll. Sie bildet aber auch die Grundlage für weiterführende modellbasierte Methoden.

Als solche wird Design of Experiment (DoE) in Kapitel 5 auf die Domäne der Fahrbarkeit angewandt. Nach initialen Überlegungen zur Wahl der richtigen Eingangsgrößen und Bestimmung des Versuchsraums wird erarbeitet, wie diese Methodik zur globalen Abstimmung des Fahrverhaltens genutzt werden kann. Erweitert man die Konzepte aus Kapitel 4 von der reinen Messdatenerfassung auf die Modellierungs- und Optimierungsschritte der DoE-Methodik, so gelangt man auf diesem Weg zu einer vollständigen Automatisierung der Applikation.

Nach einigen Betrachtungen für die direkte Online-Anwendung der vorgestellten Methodik im Fahrzeug, bildet das Kapitel 6 mit einer Zusammenfassung, dem Ausblick und Überlegungen zur Verallgemeinerung über die Fahrbarkeitsapplikation hinaus den Abschluss dieser Arbeit.

# Aufgabenstellung und Domänenspezifikation

In diesem Kapitel steht zunächst eine genaue Spezifikation der Intention dieser Arbeit im Fokus. Den Anfang bilden eine kurze Einführung des Begriffs der Applikation, sowie ein zusammenfassender Abriss zum typischen modernen Prozess der Prüfstandsapplikation und dessen Vorteilen. Es wird das Ziel formuliert, dieses dort etablierte und sehr strukturierte Vorgehen mit modellbasierten Methoden auf den Bereich der Fahrzeugapplikation zu übertragen. Als Beispiel wird die Fahrbarkeitsapplikation gewählt.

Als Grundlage hierfür wird im zweiten Abschnitt dieses ersten Kapitels eine Einführung in die Domäne der Fahrbarkeitsapplikation gegeben. Die dort verwendeten Begriffe, gegenwärtigen Methoden und Vorgehensweisen werden beleuchtet. Außerdem wird im Detail betrachtet welche Herausforderungen und Nachteile diese mit sich bringen. Sie sind zum Teil in menschlicher Unvollkommenheit, aber auch in prinzip- und prozess-bedingten Problemen begründet.

# 2.1 Aufgabenstellung

Der Entwicklungszyklus moderner Pkw beträgt etwa drei bis dreieinhalb Jahre. Diese kurze Zeitspanne bedingt, dass einige der Entwicklungsschritte, Konzept, Konstruktion, Simulation, Prüfstandsapplikation, Dauerlaufabsicherung, Fahrzeugapplikation, etc. teilweise parallel zueinander ablaufen müssen. Außer des Begriffs der Applikation sind alle zuvor angesprochenen Schritte aus dem täglichen Sprachgebrauch bekannt und verständlich. Auch der Begriff der Applikation wurde einleitend bereits kurz eingeführt, soll hier aber noch einmal aufgegriffen werden: Viele Komponenten in modernen Fahrzeugen sowie deren Interaktionen untereinander werden von sogenannten Steuergeräten (ECUs) kontrolliert und geregelt. Diese Steuergeräte werden jedoch nicht für jedes Fahrzeug neu entwickelt. Stattdessen gibt es spezialisierte Hersteller, die solche Systeme für verschiedene Fahrzeugtypen zur Verfügung stellen. Um den Fahrer zu befähigen, durch die nur drei direkten Einflussparameter<sup>5</sup> Fahrpedal, Bremspedal und Lenkradwinkel das komplexe System Kraftfahrzeug vollständig kontrollieren zu können, sind eine Vielzahl von Sensoren, Aktuatoren und Algorithmen notwendig. Diese müssen in ihren Parametern so aufeinander abgestimmt werden, dass zum Beispiel ein System wie das Electronic Stability Control (ESP) im Bruchteil einer Sekunde reagierend eingreifen kann, um das Fahrzeug zu stabilisieren und trotzdem dem Fahrer die Hoheit über sein Fahrzeug zu garantieren<sup>6</sup>. Dieser am Prüfstand und in Entwicklungsfahrzeugen durchgeführte Vorgang wird als Applikation (eng.: Calibration) bezeichnet. Als Ergebnis entsteht ein Datensatz der schließlich während der Produktion in die Serienfahrzeugsteuergeräte kopiert wird.

Weite Teile der Grundapplikation eines Motors werden traditionell am Motorenprüfstand bearbeitet. Dort wird dieser zum Beispiel in Verbindung mit dem System zur Abgasnachbehandlung (jedoch ohne Fahrzeug und übrigen Antriebsstrang) betrieben, um ihn so einzustellen, dass die gesetzlich vorgeschriebenen Normen eingehalten werden. Stetig strengere und zudem weltweit unterschiedliche Gesetzgebungen sowie steigende Komplexität bedingten dabei bereits vor Jahren den Schritt zu modellbasierten Methoden. Diese haben sich durchgesetzt und sind bei der Prüfstandsapplikation etabliert. Auf Basis von Messungen an einem Versuchsträger gewinnt man einen Einblick in das Verhalten des Systems. Es ist verständlich, dass die hierfür benötigte Prüfstandszeit aus Kostengründen auf

---

<sup>5</sup>Bei manuell geschalteten Getrieben kommt entsprechend als vierter Parameter der gewählte Gang hinzu. Darüber hinaus sind eine Vielzahl sekundärer Parameter wie Fahrprogramm oder Tempomat zu nennen.

<sup>6</sup>Hier kann man allerdings davon ausgehen, dass dem Fahrer dieses Gefühl nur noch vermittelt wird, denn tatsächlich stellt der Fahrer eine der größten Schwachstellen im umfangreichen Repertoire aktiver und passiver Sicherheitssysteme dar.

ein Minimum reduziert wird, wofür vor allem die folgenden Hebel zur Verfügung stehen:

1. Vollständige Automatisierung der Kampagnen,
2. Verkürzung der Messzeit pro Messpunkt sowie
3. Reduktion der benötigten Anzahl zu messender Punkte.

Die Automatisierung von Prüfprozeduren bietet als einfachen Vorteil, den Motor auch ohne beaufsichtigendes Personal über Nacht oder an Wochenenden betreiben zu können. Die effektive Nutzungszeit eines Prüfstandes erhöht sich dadurch erheblich. Zudem steigert eine Automatisierung auch die Effizienz, denn in den meisten Fällen versucht man am Prüfstand zunächst zu ergründen, welchen Einfluss bestimmte Kombinationen der Parameter auf das Verhalten eines Motors haben. Um dabei hochwertige Informationen aus den Messungen zu erlangen, muss der Motor für jeden Messpunkt unter bestimmten Randbedingungen (z.B bei korrekter Drehzahl und Last sowie Temperaturen, Massenströmen und Drücken an verschiedenen Messstellen) betrieben werden. Diese Randbedingungen manuell herzustellen kann mitunter aufwändig sein, denn die zu verändernden Parameter haben häufig wechselweise Einfluss auf die Betriebsbedingungen. Eine Automatisierung spart hier erheblich Zeit und stellt reproduzierbare Messergebnisse sicher.

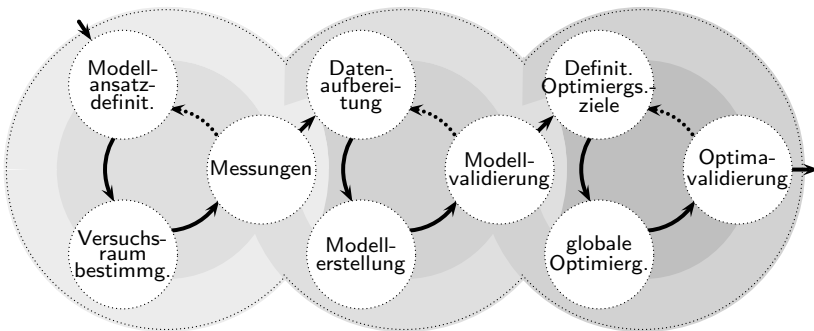
Manche der Ausgangsgrößen eines Motors lassen sich jedoch nicht einfach automatisch einregeln. Vielmehr hat man nach der Veränderung der Eingangsgrößen keine direkten Einflussmöglichkeiten mehr und muss das physikalisch bedingte Übergangsverhalten abwarten<sup>7</sup>. Dies hat zur Folge, dass die zu messenden stationären Endwerte erst aufgenommen werden können, sobald alle Übergangsvorgänge abgeklungen sind. Speziell im Fall von Temperaturen oder Abgasemissionen wird mitunter eine nicht unerhebliche Zeit in Anspruch genommen. Diese Wartezeit könnte eingespart werden, wenn die benötigten stationären Endwerte vorhergesagt bzw. geschätzt werden könnten. So kann der nächste Punkt bereits eingestellt werden, wenn die aktuelle Schätzung vertrauenswürdig genug ist. Solche Verfahren des „Rapid Measurement“ wurden in den letzten Jahren vermehrt untersucht [41, 77, 109], sollen hier aber nicht eingehender betrachtet werden.

Neben der je Punkt benötigten Messzeit können durch Reduktion der Anzahl benötigter Messungen bedeutende Einsparungen erzielt werden. Trotz reduzierter Anzahl muss der Informationsgehalt der Messungen so groß wie möglich sein.

---

<sup>7</sup>In manchen Fällen kann eine geschickte Wahl der zeitlichen Verläufe der Eingangsgrößen dieses Übergangsverhalten günstig beeinflussen, das soll hier jedoch nicht betrachtet werden.

Dies erreicht man, indem die Messpunkte geschickt verteilt werden. Die am weitesten verbreitete Methodik ist in Literatur und Praxis unter dem Begriff Design of Experiment (DoE) [75, 76] bekannt. Sie basiert auf statistischen Optimalitätsbewertungen und wird in sehr unterschiedlichen Themengebieten angewandt. Die gewonnenen Informationen werden genutzt, um das Verhalten des betrachteten Systems an den nicht explizit vermessenen Parameterkombinationen zu modellieren und auf dieser Grundlage weitere Analysen oder numerische Optimierungen der zur Verfügung stehenden Parameter durchzuführen. Fester Bestandteil zur Effizienzsteigerung des modernen Prüfstandsapplikationsprozesses aus Abbildung 2.1, sind vor allem der erste und dritte Ansatz. Nach einer initialen Berechnung ei-



**Abbildung 2.1:** Grundschaema modellbasierter Applikationsprozesse für globale Optimierung

nes Messplans werden automatisierte Messungen durchgeführt. Anschließend wird auf Basis der ermittelten Daten das übrige Verhalten des Motors multidimensional modelliert. Mithilfe dieser Modelle werden numerisch optimierte Parameter berechnet, die abschließend am Prüfstand validiert werden. In aktuellen Untersuchungen werden all diese Schritte voll integriert und automatisiert online am Prüfstand durchgeführt [20, 41].

Im Gegensatz dazu ist Applikation im Fahrzeug weniger methodisch strukturiert. Messungen werden häufig gerastert oder nur stichprobenartig an markanten Punkten (zudem in den meisten Fällen manuell) gewonnen. Die Anwendung von Modellbildungsansätzen und anschließende numerische Optimierung sind selten und bisher kaum veröffentlicht. Ziel dieser Arbeit ist es, die Vorteile des zuvor aufgezeigten Vorgehens der Prüfstandsapplikation am Beispiel der Fahrbarkeitsabstimmung auf die Arbeit im Fahrzeug zu übertragen.

## 2.2 Domänenspezifikation

Möchte man den Begriff *Fahrbarkeit* zunächst etwas genauer umreißen, so ist dies nur schwer in definitiver Art und Weise möglich. Ganz abstrakt verfolgt man das Ziel, das Fahrzeug so abzustimmen, dass es sich stets den Erwartungen des Fahrers entsprechend verhält. So befindet sich ein Fahrzeug zum Beispiel während einer Autobahnfahrt in unterschiedlichsten Betriebsmodi. Ein erster Aspekt der Fahrbarkeit ist es, diese Betriebsmodi sowie entsprechende Übergänge für die Insassen nicht spürbar zu machen. So wäre es unerwartet, wenn die übliche Agilität des Fahrzeugs plötzlich nicht mehr zu spüren wäre, nur weil sich das Abgasnachbehandlungssystem gerade im Modus der Regeneration befindet.

Eine weitere Aufgabe ist die Realisierung marktsegment- und markttypischen Fahrverhaltens [32, 33], wobei zum Beispiel das Lastschlagverhalten einen wesentlichen Anteil hat. Als Lastschlag oder auch Tip-In bezeichnet man eine sprunghafte Änderung des vom Motor angeforderten Drehmoments, wie sie durch eine plötzliche Betätigung des Gaspedals hervorgerufen wird. Diese Situation kommt im täglichen Betrieb sehr häufig vor. Um das Beispiel der Autobahnfahrt noch einmal aufzugreifen, kennt man die Situation, in der ein Überholvorgang im Ansatz abgebrochen werden muss, weil sich auf der Überholspur von hinten ein anderes Fahrzeug nähert. Der Fahrer nimmt den Fuß vom Gaspedal und der Motor wechselt in den Schubbetrieb. Er wird nun durch die Trägheit der Massen weiter angetrieben und in modernen Fahrzeugen werden nach kurzer Zeit die Einspritzung und damit auch die Verbrennung typischerweise komplett abgeschaltet. Sobald die linke Spur wieder frei ist, wird häufig sehr motiviert das Fahrpedal betätigt, um den Vordermann schnellst möglich überholen zu können. Der Motor wird wieder befeuert, die Lager und Spiele werden umgelegt, was je nach Fahrzeugtyp durch einen mehr oder weniger markant-dynamischen Ruck quittiert wird. Anschließend beschleunigt das Fahrzeug möglichst kontinuierlich zur gewünschten Endgeschwindigkeit. Es ist ersichtlich, dass dieses Manöver in einem Sportwagen ausgeprägter vonstatten geht als in einer großen Limousine.

Eine weitere interessante Perspektive der Fahrbarkeit kommt ins Spiel, wenn die gleiche Hardware (Motor, Getriebe, Differential, Fahrzeugrahmen, etc.) in anderem Design in verschiedenen Marktsegmenten und somit bei unterschiedlichen Käufergruppen platziert werden soll. So kann unter Einsparung zusätzlicher Entwicklungskosten das eigentlich gleiche Gefährt einmal in sportlicher Variante und in komfortabler Form an unterschiedliche Kunden verkauft werden.

Als meist abschließender Schritt der gesamten Applikationstätigkeiten nimmt die Fahrbarkeitsapplikation eine spezielle Rolle ein. Neben der bereits angesproche-

nen Abstimmung auf das Marktsegment, in dem das Fahrzeug platziert werden soll (Sportwagen, Kleinwagen, Limousine, etc.), müssen regional unterschiedliche Kundenwünsche einbezogen und markenspezifische Identifikation erreicht werden. Es wird also die Charakteristik des Fahrzeugs schlussendlich definiert. Da bei der Testfahrt eines potentiellen Autokäufers sowie bei finalen Abnahmefahrten durch das Management eines Pkw-Herstellers schlicht die Frage des Gefallens oder Nicht-Gefallens beantwortet werden muss, basiert der zugehörige Teil des Applikationsprozesses auch heute noch in vielen Fällen auf rein subjektiven Bewertungen. Obwohl die entsprechenden Ingenieure erfahren und spezialisiert auf ihrem Gebiet sind, geht diese subjektive Methode mit den hier zunächst postulierten Nachteilen

- unterschiedlicher Einschätzungen verschiedener Fahrer,
- ungenügender Auflösbarkeit feiner Unterschiede,
- schlechter Reproduzierbarkeit von Bewertungen
- und tagesformabhängiger Bewertungen

einher [69, 68], die nachfolgend genau betrachtet werden sollen.

Dass mehrere Menschen die gleichen Situationen und Stimuli je nach persönlicher Sensitivität und Erfahrung unterschiedlich wahrnehmen, ist unbestritten. In einem ersten Schritt begegnet man diesem Problem variierender Bewertungen unterschiedlicher Fahrer, durch die Aufteilung des Gesamtfahrverhaltens in quasi standardisierte Fahrmanöver, wie sie bereits 1971 in [35] in einer ersten Form beschrieben wurden. Diese sind grundlegend in die Gruppen Start-, Leerlauf-, Beschleunigungs-, Konstantfahrtverhalten und Bremsvorgänge eingeteilt. Zu jeder dieser Gruppen sind Manöver mit entsprechend zu bewertenden Kriterien (z.B. Verzögerung, Ruck, Nachruckeln, Stocken, Linearität des Geschwindigkeitsaufbaus, Laufunruhe, etc.) definiert, deren Qualität entsprechend eines ISO-Standards auf einer Skala von 0 (Fahrzeug nicht betreibbar) bis 10 (keine spürbaren Probleme) bewertet wird. Um ein gemeinsames Verständnis zu erreichen, sind den Noten in der Regel zusätzlich Beschreibungen des erwarteten Verhaltens zugeordnet. In der nachfolgenden Abbildung 2.2 kann man erkennen, dass neben der vorhandenen Standardisierung eine Vielzahl von Abwandlungen dieser Methodik existieren. Die hier verwendete Notenskala ist invertiert und umspannt außerdem nur einen Wertebereich von 1 . . . 9. Diese offensichtlich einfache Möglichkeit der Adaption erleichtert im Einzelfall natürlich die direkte Anwendung im eigenen Projekt, ist einer allgemeinen Vergleichbarkeit allerdings nicht zuträglich, da solche Veränderungen nicht dem Standard entsprechen.

## 2.2 Domänenspezifikation

**Subjektiv - Beurteilungsbogen**

Subjektiv - Beurteilungsbogen

Fahrzeug: \_\_\_\_\_  
*hier zus. evtl. Fahrwerkeinstellung (z.B. ABC Sport) vermerken*

Fahrer: \_\_\_\_\_

Strecke: \_\_\_\_\_  
*Autobahn / Landstraße / Stadt*

Datum: \_\_\_\_\_

mittel / unauffällig

						Kunde ist zufrieden			Kunde beklagt sich nicht			Fzg. nicht kundenfähig		
						Benchmark	sehr gut	gut	Erwartung erfüllt	vereinzelt Kritik	MB-Standard verfehlt	Reklamationen	grav. Reklamationen	Katastrophe
						1	2	3	4	5	6	7	8	9
Anfahrverhalten	Anfahrfragilität	träge												
	AnfahrDOSierbarkeit	gut												
	Anfahrnicken	niedrig												
Aufbau- bewegung	Wankwinkel	gering												
	Dämpfung	lose												
	Federung	weich												
Lenkungs- rücklauf	Rücklauf	langsam												
	Aktives Rücklenken	stark/verhärten												
	Verlauf über Lenkradwinkel	stockend												
Bremsen	Dosierbarkeit	schwammig												
	Spurtreue Kurve	übersteuernd												
	Spurtreue geradeaus	abweichend												
<b>Gesamturteil</b>		schlecht												

Abbildung 2.2: Beispielvordruck zur subjektiven Bewertung von Fahrmanövern [101]

Trotz inhaltlicher Reduktion der Komplexität in unterschiedliche Aspekte, kann der immanent fehleranfällige menschliche Faktor nicht ausgeglichen werden. So gelangt man leicht zu der These, eine womöglich untere Schwelle menschlicher Wahrnehmungsfähigkeit beeinträchtigt die Fähigkeit, feine Unterschiede ausreichend auflösen zu können. Dies wird zum Beispiel in [84] mit der Angabe einer maximal auflösbaren frequenzgewichteten Beschleunigungsänderung von ca.  $0.015 \frac{m}{s^2}$  in vertikaler Richtung vertreten. Mit Bezug zu den Ergebnissen aus [13] ist dem jedoch entgegenzuhalten, dass solche Grenzen in Bereichen liegen, die ingenieurtechnisch unbedeutend sind. Man hatte herausgefunden, dass das Innenohr Verschiebungen von  $10^{-10}$  m zuverlässig auflösen kann. Außerdem findet sich in [13] der Verweis auf Untersuchungen in denen nachgewiesen wurde, dass Menschen sprichwörtlich „einzelne Photonen zählen können“, wobei die Angaben zwischen Schwellwerten von 2-7 Photonen schwanken. Die hier untersuchte Aufgabe ist also praktisch nicht durch derartige Grenzen beeinflusst. Als Ergebnis der Untersuchungen wird außerdem genannt, dass zum Beispiel die Fähigkeit eine Signalform von Rauschen unterscheiden zu können, genau genommen einer Wahrscheinlichkeitsbetrachtung unterliegt, die mit Hilfe des Bayes' Theorems<sup>8</sup> berechnet werden müsste. Weiterhin zeigen die in [13] durchgeführten Analysen, dass die Funktionalität des Innenohrs am ehesten mit der eines aktiven Filters

<sup>8</sup>Das Bayes' Theorem lautet  $P(x = x_0|y) = P(y|x_0)P(x = x_0)/P(y)$  und liefert eine Berechnungsvorschrift für die Wahrscheinlichkeit des Eintretens eines Ereignisses  $P(y)$  unter der Bedingung, dass ein weiteres Ereignis  $P(x = x_0)$  zuvor eingetreten ist.

zu vergleichen ist. Zu erkennende Anteile in Signalen werden also verstärkt und erneut aufgeprägt, um Resonanzen zu erzeugen, womit bestimmte Frequenzen geschärft werden. Obwohl ein erfahrener Fahrbarkeitsapplikateur diese Fähigkeit sicher viel stärker geschult hat, hängt die Fähigkeit eines Menschen, bestimmte Abweichungen in erwarteten Signalformen zu erkennen, in großem Maße vom umliegenden Rauschanteil und der möglichen Ablenkung durch andere Anregungen ab.

Der Mensch muss in solchen Bewertungsaufgaben einem weiteren entscheidenden Nachteil Tribut zollen. Bereits in den 1960er Jahren wurde in [7] vom so genannten *Primacy Effect* gesprochen. Man demonstrierte, dass Menschen, die sich eine Abfolge von Dingen merken sollten, typischerweise die ersten und letzten Elemente sehr gut wiedergeben können. Neuheit löst demnach eine implizite Überbeachtung im Menschen aus. Solche Effekte durch entsprechend korrigierende Berechnungen auszugleichen könnte nur dann gelingen, wenn man sie individuell pro Person modellieren würde. Problematisch daran ist, dass es dafür als Grundlage einer objektiven Bewertung bedarf. Wenn diese einmal vorliegt ist der Aufwand für weitere Arbeiten in Richtung der Korrektur von subjektiven Bewertungen nur in seltenen Fällen gerechtfertigt. Ein Anwendungsfall könnte die nachträgliche Korrektur von lange zurückliegenden subjektiven Bewertungen sein, zu deren Zeit noch keine objektiven Methoden zur Verfügung standen. Da die Erstellung solcher wahrscheinlich aufwändigen statistischen Modelle aus wissenschaftlicher Sicht zwar interessant wäre, aus aktuellem Blickwinkel dieser Arbeit jedoch keinen praktisch anwendbaren Mehrwert erzeugen würde, soll dieses Thema hier nicht weiter betrachtet werden.

Zwei weitere nahe liegende Probleme subjektiver Bewertung entstehen in enger Verwandtschaft mit dem Primacy Effect und wurden durch Rückmeldungen nach Fahrversuchen bestätigt, welche im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden. So ergaben Selbsteinschätzungen erfahrener Fahrer nach der subjektiven Bewertung von zufällig verteilten Kombinationen von Applikationsparametern<sup>9</sup>, dass sie die ersten Messungen unverhältnismäßig schlecht bewertet hatten. Außerdem wurde geäußert, dass die letzten 10-20 Messungen einer 2.5 h dauernden Messreihe mit 240 Punkten, aufgrund von Konzentrationsmangel „falsch“<sup>10</sup> bewertet wurden. Legt man zugrunde, dass die subjektive Einordnung von Charakteristika eines Phänomens im Wesentlichen auf Basis der Erkennung von Pattern geschieht [102] und entsprechend [57] sehr geeignet mit Fuzzy-Sets beschrieben werden kann, so

---

<sup>9</sup>Diese wurden hier zum Beispiel im Rahmen der in einem späteren Kapitel besprochenen DoE-Versuche durchgeführt.

<sup>10</sup>Zitat der befragten Person.

muss dieses System wohl zu Beginn einer Versuchsfahrt zunächst justiert werden. Mithin wird der Bewertungsprozess auf nahezu reinem Vergleich aufgebaut, dessen Leistungsfähigkeit zu Anfang einer Versuchsreihe wesentlich von der Erfahrung der bewertenden Person und somit von der Menge zur Verfügung stehender Vergleichselemente abhängt<sup>11</sup>. Je mehr Vergleichselemente zur Verfügung stehen, umso eher kann ein neuer Stimulus in Relation zu diesen „korrekt“ eingeordnet werden. Laut [27, 112, 113] wird die Skala, auf der solche Bewertungen stattfinden aber durch die zu bewertenden Elemente selbst aufgespannt und somit kontinuierlich verändert. Je weiter ein Stimulus vom bisherigen Mittelwert entfernt liegt, umso eher wird er als auffällig erkannt. Bringt man dies nun mit dem Primacy Effect und den begrenzten Kapazitäten des menschlichen Kurzzeitgedächtnisses in Zusammenhang, folgt daraus eine vom Messplan abhängige Drifttendenz, die zudem sehr wahrscheinlich von der aktuellen Tagesform der bewertenden Person beeinflusst ist.

Hält man sich dies und die bisher angesprochenen Kritikpunkte gesammelt vor Augen, so ist die Frage zu stellen, ob die Vorhersage subjektiver Bewertungen für das Erreichen eines guten Fahrzeugverhaltens überhaupt zielführend sein kann. Das im nächsten Kapitel vorgestellte Vorgehen fordert aus zwei Gründen eine Trennung von jeglicher subjektiver Bewertung<sup>12</sup>. Zunächst sind Kategorien wie „gut“ oder „schlecht“ nur temporär und kontextabhängig begrenzt gültig [32, 33]; vor dem Aufkommen von Elektromotoren für Fahrzeuge hätte zum Beispiel die Aussage: *„Das beste dynamische Verhalten weist das Fahrzeug mit kürzester Ansprechzeit auf.“* wahrscheinlich noch bei sehr vielen Menschen Zustimmung gefunden. Es bleibt offen, ob die heutigen Möglichkeiten eines instantanen Momentenaufbaus einem Elektrofahrzeug tatsächlich beste Bewertungen einbringen würden. In [111] wird bereits vorgeschlagen, spezifische Bewertungsmethoden für Fahrzeuge mit Hybridantrieben zu entwickeln. Entsprechend ist eher zu vermuten, dass ein zu schnelles Ansprechverhalten im Elektrofahrzeug negativ bewertet werden wird. Folgerichtig muss eine absolute Skala mit technischen Weiterentwicklungen, genau wie geschmacklichen Veränderungen innerhalb oder zwischen Zielgruppen, regelmäßig angepasst werden. Die Gewinnung der notwendigen Datensätze und speziell die in [73] genannte Methode der Abbildung mittels neuronaler Netze, erfordert ein wiederkehrendes Neu-Trainieren besagter Netze und ist somit zeitaufwändig und teuer.

---

<sup>11</sup>In diesem Zusammenhang sind vor allem die Begriffe Kurzzeit- und Langzeitgedächtnis im alltäglichen Gebrauch. Dass dieses einfache Modell von 1958 heute wissenschaftlich nicht mehr aktuell ist, zeigen [7] und [29].

<sup>12</sup>Für die Validierung der objektiven Kriterien werden die subjektiven Bewertungen noch benötigt. Wie später gezeigt wird, bedarf eine Validierung dieser eines abschließenden Nachweises ihrer Vollständigkeit. Dies wird hier zum Beispiel auf Basis einer Korrelationsanalyse mit den subjektiven Bewertungen realisiert.

Ein zweiter Anstoßpunkt ist die unverhältnismäßig große Intransparenz eines Verfahrens, das für einen Messdatenverlauf direkt die wahrscheinlichste subjektive Bewertung bestimmt. Ohne die Offenlegung expliziter Maßzahlen, wie Verzugszeiten oder Amplituden, bekommt ein Applikationsingenieur zu wenig Unterstützung und Informationen, die ihm bei seiner Arbeit effizient weiter helfen. Ein Rückschluss auf notwendige Parameteränderungen ist schwerer möglich. In manchen Fällen werden bei solchen Verfahren sogar zueinander orthogonale Phänomene in einer gemeinsamen Größe aggregiert. Dies bringt aus Sicht der vorliegenden Untersuchungen immer den Nachteil mit sich, dass das Verständnis des Trade-Offs, den die beteiligten Größen zueinander haben, stark eingeschränkt wird.

Ein weiterer Nachteil subjektiver Bewertung findet sich in der Eingliederung der Fahrbarkeitsapplikation in den Gesamtprozess der Fahrzeugentwicklung. So ist es naheliegend, dass während der parallelen Arbeit unterschiedlicher Gewerke zum Beispiel Änderungen an der Konstruktion direkte Auswirkung auf die Applikation haben. Aber auch variierte Parameter in Verbrennungsreglern oder ein geändertes Verhalten des Getriebes beeinflussen direkt die Fahrbarkeit und führen somit zu wiederholten manuellen Aufwänden für deren Anpassung. Um solche nicht geplanten Quereinflüsse besser kontrollieren zu können, werden Applikationsprojekte häufig in iterativer Form geführt. Die Fertigstellung eines Datensatzes wird dabei in verschiedene Reifegrade unterteilt, wobei in jedem Grad der Umfang der zu bearbeitenden Parameter sowie die erwartete Qualität des Systemverhaltens genau spezifiziert ist. In dieser Weise versucht man zwar die negative äußere Beeinflussung so gering wie möglich zu halten, speziell für die Fahrbarkeitsapplikation könnte man eine Beeinträchtigung jedoch weiter entscheidend abmildern, wenn der Prozess nicht manuell und subjektiv, sondern stattdessen automatisiert und objektiv durchgeführt werden könnte.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass subjektive Methoden der Fahrbarkeitsbewertung verschiedenen nachteiligen Einflüssen menschlicher Unvollkommenheit unterliegen, die auch in anderen technischen und wissenschaftlichen Gebieten beobachtet und nachgewiesen sind. Um den Prozess der Fahrbarkeitsapplikation effizienter zu gestalten sollten die Bewertungen also objektiviert werden. Dies würde unter der Voraussetzung gut reproduzierbarer Fahrmanöver zu konsistenten Datenbasen führen. Anschließend eröffnet sich daraus die Möglichkeit der Anwendung modellbasierter Methoden, um schlussendlich in verkürzter Zeit zu optimierten Applikationsparametern zu gelangen, welche die Anforderungen des Kunden bestmöglich realisieren können.

# Objektivierung von Fahrbarkeitsbewertungen

Im vorangegangenen Kapitel wurde dargelegt, warum subjektive Bewertungen Nachteile mit sich bringen und so die Effizienz der Fahrbarkeitsapplikation einschränken. In diesem Kapitel wird nun eine semi-physikalische Methodik zur Ableitung von Objektivierungskriterien von Fahrmanövern eingeführt. Es wird gezeigt, auf welche Art und Weise objektive Kriterien strukturiert, entwickelt und validiert werden können, um effizient in produktiven Einsatz zu gehen. Am Tip-In-Manöver werden beispielhaft ausgewählte objektive Kriterien dargelegt, die sich in ihrer Struktur leicht auf andere Manöver übertragen lassen. Diese semi-physikalische Art der Entwicklung objektiver Kriterien unterteilt sich in fünf Schritte. Ihr Vorteil besteht in der direkten Anwendbarkeit auf applikative Aufgaben. So sind zum Beispiel Zeiten und Amplituden direkt in aufgenommenen Messdaten auffindbar und damit leicht verständliche Größen, die keiner weiteren Interpretation bedürfen. Im Vergleich zu Methoden, die versuchen, die subjektive Bewertung eines Applikateurs vorauszusagen, kann man so unmittelbare Rückschlüsse auf notwendige Applikationsänderungen ziehen, da diese meist ebenso in physikalischen Parametern wie Rampenzeiten oder Momentendifferenzen ausgedrückt werden.

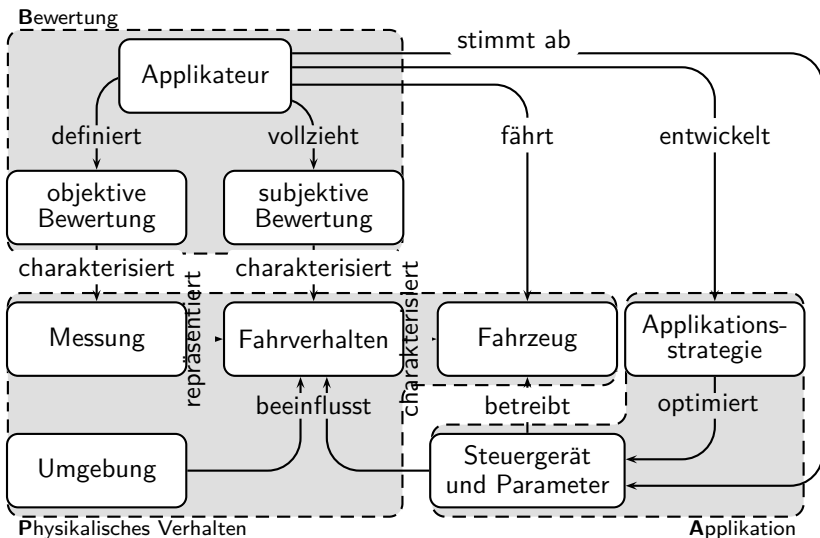
### 3.1 Objektivierung subjektiver Bewertungen als andauerndes Forschungsgebiet

Vor eine detailliertere Betrachtung des Begriffs Objektivität und die ausführliche Darstellung der hier bevorzugten Entwicklungsmethodik der benötigten Kriterien soll eine kurze Zusammenfassung wichtiger Publikationen zu diesem Thema gestellt werden, da es seit einigen Jahrzehnten mit verschiedenem Fokus regelmäßig wiederkehrend untersucht wurde.

Einleitend sind dafür in Abbildung 3.1 schematisch die drei wesentlichen Aspekte der Fahrbarkeitsapplikation und deren Abhängigkeiten voneinander gezeigt:

1. das Fahrzeug selbst und sein physikalisches Verhalten,
2. ein System oder eine Methodik zur Bewertung des Verhaltens und
3. eine passende Strategie sowie Möglichkeiten um das Fahrzeugverhalten zu beeinflussen.

Betrachtet man nun die wissenschaftlichen und technischen Veröffentlichungen zum Fachgebiet, kann man diese leicht auf die drei oben genannten Aspekte



**Abbildung 3.1:** Zusammenhänge zwischen den wichtigsten Begriffen der Domäne der Fahrbarkeitsapplikation

aufteilen. Indem die Systemgrenzen unterschiedlich gezogen und die innen bzw. außen liegenden Teilkomponenten sowie verbindenden Schnittstellen angemessen definiert werden, erreicht man natürlicherweise eine Reduktion des Komplexitätsgrades.

#### 3.1.1 Bewertung des Fahrverhaltens von Fahrzeugen

Aus chronologischer Motivation steht hier zuerst der zweite Punkt im Fokus. Bereits seit den 70er Jahren bis Ende der 80er wurde das Fahrverhalten als Zusammenspiel zwischen Fahrzeug, Umgebung und Fahrer vom Coordinating Research Council Inc. (CRC) der USA<sup>13</sup> wiederkehrend untersucht [46]. Die betrachteten Aspekte der Fahrbarkeit waren sehr umfassend. So wurden viele der heute typischen Prozeduren wie Warm- und Kalt-Startverhalten, Ansprechverhalten, Leerlauf, Cruising, etc. mit einer großen Anzahl an Fahrzeugen und Fahrern geprüft. Das Augenmerk lag dabei auf dem Einfluss der Kraftstoffeigenschaften auf die zuvor angesprochenen Aspekte. Die jeweilige Bewertung des Verhaltens wurde durch jeden Fahrer individuell und manuell anhand eines vorher abgesprochenen Bewertungssystems vollzogen. In den Folgejahren verfasste man entsprechende Berichte, die andere Umgebungstemperaturen [47, 48] oder auch Wiederholungen anhand aktueller Fahrzeugmodelle [49] zum Inhalt hatten.

Im Jahr 1971 ist die Veröffentlichung von R. L. Everett [35]<sup>14</sup> eine der frühesten Arbeiten, die die objektive Bewertung von Fahrbarkeit anvisiert. Es wird ein objektives Maß für das Ruckelverhalten (engl. surge) von Fahrzeugen vorgestellt, das auf der Integration des gefilterten und angemessen verstärkten Spannungssignals eines Beschleunigungssensors basiert. Die zusätzlichen subjektiven Bewertungen werden hier bereits in der später auch für Deutschland standardisierten Form [114] auf einer Skala von 1 bis 10 angegeben - wobei größere Werte bessere Bewertungen widerspiegeln - und mit den zuvor berechneten Ergebnissen korreliert. Es wurden zusätzlich Untersuchungen durchgeführt, die das Fahrbarkeitsverhalten mit der Abgasrückführrate in Verbindung bringen und dabei viele der noch heute gebräuchlichen Termini im Umfeld der Fahrbarkeit klar definiert und zusammengefasst.

Bis zu den 80er Jahren waren die Bemühungen zur Verbesserung des Fahrverhaltens hauptsächlich auf Einflüsse der verwendeten Hardware beschränkt. So war

---

<sup>13</sup>Diese Untersuchungen wurden unter Beteiligung großer ansässiger Automobilfirmen sowie Herstellern von Kraftstoffen durchgeführt.

<sup>14</sup>R. L. Everett arbeitete hierbei mit einer Forschungsgruppe im Auftrag des zuvor angesprochenen CRC.

es eine große Herausforderung bei Motoren mit bis dahin noch üblicher Vergasertechnik, die Gemischbildung bei dynamischen Anforderungen ausreichend gut zu kontrollieren. Krenz beleuchtet diese Problematik in [70] unter verschiedenen Gesichtspunkten und zeigt Möglichkeiten auf, den dumpfen Lastschlag (engl. clunk) zu reduzieren. Außerdem weist er bereits darauf hin, dass die später eingeführten elektronischen Einspritzeinrichtungen mit entsprechenden Reglern enormes Potential bieten, die Formung der Momentenanforderung in den Phasen der Lagerumlegung besser kontrollieren zu können. In Yonekawa et al. [119] wird als Hauptursache für ungewollte niederfrequente längsdynamische Schwingungen des Antriebsstrangs der Einfluss der Einspritzdüsengeometrie in Zusammenhang mit Rückkopplungen der zugehörigen Regler identifiziert. Das Übertragungsverhalten wird mit Mitteln der linearen Regelungstechnik modelliert. Anhand dessen werden Studien wichtiger konstruktiver Parameter des Antriebsstrangs sowie von Parametern der Regler auf das logarithmische Dekrement der abklingenden Schwingungen durchgeführt.

Während sich in den folgenden Jahren vor allem die Untersuchungen zum querdynamischen Verhalten von Fahrzeugen verstärkten [80, 91, 92], entwickelte Williams [118] im Auftrag der Environmental Protection Agency (EPA) der USA eine Apparatur mit entsprechendem Computerprogramm für die objektive Bewertung des Kaltstart-Verhaltens und der Fahrbarkeitseigenschaften während der Aufwärmphase. In den bereits angesprochenen Untersuchungen des CRC wurde zuvor als wesentlicher Schwachpunkt die schlechte Wiederholbarkeit sowie die Subjektivität der Bewertungen der Fahrer identifiziert. [118] stellt daraufhin zum ersten Mal die funktionstüchtige vollautomatische Erkennung bestimmter Fahrsituationen anhand von aufgezeichneten Messungen und eine anschließend automatisierte spezifische Objektivierung vor.

Im 1990 von Griffin veröffentlichten „Handbook of Human Vibration“ [44] führt dieser dann ein neues objektives Maß zur Bewertung der Auswirkung von Schwingungen auf den menschlichen Körper ein, den sogenannten Vibration Dose Value (VDV), welcher als Integral der frequenz-gewichteten Beschleunigung  $\tilde{a}(t)$

$$\text{VDV} = \sqrt[4]{\int_{\tau_a}^{\tau_e} \tilde{a}^4(t) dt}, \quad (3.1)$$

mit  $\tau_a$  und  $\tau_e$  als Anfangs- bzw. Endzeitpunkt des betrachteten Zeitintervalls, definiert ist. Diese Größe kam in [56] für die Bewertung von Schaltvorgängen zum ersten Mal im Umfeld der Automobilindustrie zum Einsatz, lieferte im Vergleich zu vorher verwendeten Maßen wie Spitze-Spitze-Werten oder Amplituden (z.B. benutzt in [117]) herausragende Ergebnisse und wird in Abschnitt 3.2.2 im Detail betrachtet werden.

Einen prägenden Einfluss auf die objektive Bewertung von Fahrmanövern hatte P. Schögl. In [73, 98] verfolgt er einen komplett neuen Ansatz. Er bringt die in vielen Testfahrten gesammelten subjektiven Benotungen und charakteristischen Werte der aufgenommenen Messdaten mittels neuronaler Netze zueinander in Verbindung, um diese für die Bewertung neuer Versuche zu verwenden. Mit [97] wurde dieses Verfahren außerdem zusammen mit einer Apparatur patentiert und nachfolgend erfolgreich zur Produktreife gebracht, die die Erkennung und automatische Bewertung von Fahrsituationen online während einer freien Fahrt vornimmt. Der entscheidende Unterschied dieses Objektivierungsansatzes liegt nicht in der verwendeten Methode der Modellierung mittels neuronaler Netze, sondern vielmehr in dem Punkt, dass direkt das subjektive Empfinden des Fahrers berechnet wird. Wie auch der VDV, bezieht diese damit indirekt das Übertragungsverhalten der Anregungen durch den menschlichen Körper mit ein. Dies soll hier nicht als positive Wertung verstanden, sondern lediglich als Unterschied herausgestellt werden. Der Themenstellung des biodynamischen Übertragungsverhaltens von Anregungen durch den menschlichen Körper unter verschiedensten Randbedingungen wurde sich parallel in weitem Umfang gewidmet. Nachfolgend sind die wesentlichen Ergebnisse dargestellt. So wurden in [86] alle seit Anfang der 70er Jahre hierzu ermittelten Datensätze zusammenfassend analysiert und versucht, ein Ersatzmodell des Übertragungsverhaltens des menschlichen Körpers zu erstellen. Neben den naheliegenden Schlussfolgerungen, dass das Geschlecht<sup>15</sup> sowie das Vorhandensein einer Rückenunterstützung Einfluss auf das Übertragungsverhalten haben, wurden vor allem prägnante Übertragungsfrequenzen für sitzende Menschen identifiziert, die laut [86] im Bereich 1 . . . 4 Hz liegen. Auch [50] kommt zu einem ähnlichen Ergebnis, wobei eine Hauptfrequenz von etwa 1.3 Hz, sowie ein signifikant höherer Einfluss von Rollbewegungen im Vergleich zu lateralen Bewegungen ausgemacht wird. Die Ergebnisse von [31] zeigen, dass neben der Neigung der Rückenlehne auch die Anregungsamplitude das Übertragungsverhalten des menschlichen Körpers beeinflussen. Der menschliche Körper ist somit aus biodynamischer Sicht mit Bezug auf die Übertragung von longitudinalen Schwingungen eines Fahrzeugs als nichtlineares dynamisches System aufzufassen. Man könnte mit dieser Kenntnis versuchen, das Beschleunigungsverhalten des Fahrzeugs vom Innenraum<sup>16</sup> über den Körper hinweg ins Ohr zu berechnen und dort mit Algorithmen zur Bestimmung der subjektiven Bewertung ansetzen. Da die Vorhersage subjektiver Bewertungen nicht das Ziel dieser Arbeit ist, wird dieser Ansatz hier nicht weiter verfolgt.

---

<sup>15</sup>Aufgrund teilweise widersprüchlicher Aussagen konnte hierfür jedoch kein Modell erstellt werden.

<sup>16</sup>Dies gilt unter der Annahme, dass die Messung der Beschleunigung im Innenraum zum Beispiel an der Sitzschiene durchgeführt wird.

## 3.1.2 Physikalische Modellierung des Fahrzeugverhaltens

Der erste Punkt der anfänglich genannten Aspekte, nämlich das tatsächlich physikalische Verhalten des Fahrzeugs auf Basis von Simulationsmodellen zu beschreiben und zu analysieren, ist heute aus der Fahrbarkeitsapplikation nicht mehr wegzudenken. Neben den bisher betrachteten Modellen, die den Menschen beschreiben, kam damit eine zweite Art Modell hinzu. Dessen Ausgangsgrößen sind je nach Modellierungsform kontinuierliche Funktionen  $y = f(t)$ , bzw. häufiger sogar Zeitreihen  $(y_t)_{t=1, \dots, T} = \{y_1, y_2, \dots, y_{T-1}, y_T\}$  der das Systemverhalten beschreibenden Größen, also Geschwindigkeiten, Beschleunigungen, Momente, Kräfte und andere als wichtig erachtete Verläufe.

Um die relevanten Aspekte zur Modellierung des Fahrbarkeitsverhaltens abbilden zu können, muss besonderes Augenmerk auf die verschiedenen Spiele, Lagerungen und anderen Umschaltpunkte gelegt werden, die bei dynamischer Änderung der Momentenanforderung die Reaktion des Fahrzeugs charakterisieren. In [8, 9, 14, 30] werden ausführlich hybride Modelle zur Simulation beschrieben, die später um einige Freiheitsgrade reduziert werden (z.B. [51]), die dynamischen Anforderungen aber trotzdem noch sehr gut darstellen. Es liegt in der Natur der Modellierung, dass die erzielten Ergebnisse mit höherem Detailgrad der Modelle dem tatsächlich gemessenen physikalischen Verhalten näher kommen. Der Trade-Off zur Ausführungsgeschwindigkeit muss dann jeweils mit dem angestrebten Erkenntnisgewinn abgeglichen und ein entsprechender Fokus gesetzt werden. In folgenden Abschnitten wird gezeigt, wie die Validität von zu entwickelnden objektiven Kriterien geprüft werden kann. Da dabei im Wesentlichen deren Stabilität und Signifikanz mit Bezug zu Ungenauigkeiten aufgrund nicht zu kontrollierender Umgebungsbedingungen sicherzustellen ist, wird hier kein weiterer Fokus auf die Möglichkeit der Simulation des Fahrverhaltens gelegt. Dies ist darin begründet, dass die im „real-life“ auftretenden Störungen zur Zeit nur ungenügend auf simulative Weise reproduziert werden können. Zudem wird der tatsächliche Versuch im Fahrzeug auf absehbare Zeit nicht ersetzt werden können. Somit zielt das Potenzial simulativer Ansätze aus Sicht des Autors vor allem darauf, bereits am Schreibtisch kostengünstig zu hochwertigen Basis-Applikationen zu gelangen. Die Vorversuche im Fahrzeug können so eingespart, die abschließende Abstimmung und Validierung in diesem jedoch nicht ersetzt werden. Da die Publikationen zu physikalischen Ansätzen in den allermeisten Fällen auf die korrekte Vorhersage der im Fahrzeug gemessenen Größen ausgerichtet sind, bedarf es trotzdem einer geeigneten Methodik diese nun simulierten Messgrößen objektiv zu bewerten. Mithin sind Weiterentwicklungen auf diesem Gebiet zwar sehr hilfreich zur Kostenreduktion, sind aber orthogonal zu den in dieser Arbeit gemachten Untersuchungen.

### 3.1.3 Methodik in der Fahrbarkeitsapplikation

Im Bereich der Applikationsmethodik (dem dritten Aspekt aus Abbildung 3.1) sind verschiedene Ansätze und Konzepte zur Effizienzsteigerung entstanden und weiterhin beobachtbar, deren Ausrichtung sich größtenteils an der Art der Erzeugung der Messdaten orientiert. Sind diese etwa durch die bereits beschriebenen Simulationstechniken erzeugt worden, so beschreibt [95] einen Weg zur vollständig simulativen Voroptimierung von Fahrzeughardware und Applikationsparametern. Hierbei wird die Zielfunktion des Optimierers mit den Ergebnissen des Bewertungssystems gespeist, welches zudem die Ergebnisse der Simulation als Eingangsgrößen erhält. In [95] wird dargelegt, wie anhand dieser Art der Co-Simulation die Optimierung von Schaltparametern vollständig automatisiert werden konnte. Dem potentiell auftretenden Problem langer Rechenzeiten, welches in der Regel den komplexeren physikalischen Modellen geschuldet ist, kann man ähnlich zu [6, 108] mittels Ersatzfunktionen begegnen. Hierbei werden die physikalischen Modelle zum Beispiel durch weniger aufwändig auszuwertende Modelle auf Basis von radialen Basis-Funktionen ersetzt. In [96] wird eine vollständig automatisierte Variante der Applikation von Tip-In-Manövern vorgestellt, wobei in diesem Fall ein Motor-Prüfstand in Verbindung mit einer Fahrzeug-Simulation als Quelle für die Messdaten verwendet wurde. Optimiert wurden dabei zwei Applikationsparameter unter Anwendung einer voll faktorisierten Variationsstrategie und Modellierung mittels neuronaler Netze. Die Vorgehensweise der Online-Optimierung bringt den Nachteil mit sich, dass das Systemverhalten nur lokal auf dem beschrifteten Optimierung-Pfad bekannt ist. Es ist also nicht möglich, Informationen über das Systemverhalten für Parameterkombinationen zu gewinnen, die abseits von diesem liegen. Eine Zusammenstellung von Möglichkeiten zur Modellierung, die diese Problematik umgehen, findet man in [22]. Es werden von lokalen Ansätzen über gemischte Verfahren bis hin zu globalen Modellen, deren Eigenschaften und Unterschiede auf Basis von DoE diskutiert. In [120] werden zum Beispiel Fahrbarkeitsparameter lokal (also für einen Betriebspunkt) am Prüfstand optimiert. In [3] wird, ebenfalls basierend auf DoE, die globale Qualitätsabstimmung von Schaltvorgängen automatisiert am Prüfstand durchgeführt.

Alle dem Autor bekannten Veröffentlichungen zur Anwendung von DoE für Aufgaben der Fahrbarkeitsapplikation setzen deren Nutzung unter vollständig kontrollierten Bedingungen an einem Motoren- oder Antriebsstrangprüfstand voraus. Tatsächlich wird ein Großteil der Arbeiten dieser Domäne im Fahrzeug auf Teststrecken durchgeführt. Der Kern der vorliegenden Arbeit hat zum Ziel, eine strukturierte Methodik aufzuzeigen, mit der diese Herausforderung zu meistern ist. Dabei wird nachfolgend zunächst ein Vorgehen zur Entwicklung physikalisch motivierter Objektivierungskriterien vorgestellt, da diese hier aus den bereits mehrfach

diskutierten Gründen als zielführendere Alternative zur Bestimmung subjektiver Bewertungsergebnisse gesehen werden. Später werden die Vorteile und Möglichkeiten automatisierten Fahrens als Grundlage der Gewinnung hoch qualitativer Messdaten eruiert. Diese bilden wiederum die Grundlage für die anschließende Modellierung und Optimierung auf Basis von DoE.

## 3.2 Methodische Entwicklung objektiver Kriterien zur Fahrbarkeitsbewertung

An den Anfang des Abschnitts soll eine kurze Klärung des Begriffs Objektivität, wie er im Zusammenhang dieser Arbeit Verwendung finden soll, gestellt werden. Aus dem Lexikon [1] entnimmt man zum Beispiel:

*Objektivität [lateinisch] die, erkenntnistheoretischer Begriff für die überindividuelle, unabhängig vom Einzelnen bestehende Wahrheit eines bestimmten Gegenstandes (Objekts), Sachverhalts oder einer Aussage; auch die Eigenschaft der Unabhängigkeit von individuellen Umständen, historischen Zufällen oder beteiligten Personen.*

Während der erste, eher philosophische, Teil dieser Definition in der aktuellen Fragestellung nicht weiter hilft, benennt doch der zweite Teil einen entscheidenden Aspekt: Unabhängigkeit von individuellen Umständen und beteiligten Personen. [43] und [115] liefern hierfür zusätzliche Erklärungen. So fordert man zur Erfüllung von Objektivität genauer Durchführungs-, Auswertungs- und Interpretationsobjektivität.

Die ersten beiden Forderungen sind für die Gewinnung von Messdaten technischer Prozesse und deren Auswertung leicht zu realisieren. Die notwendigen Versuche sowie die angeschlossene Datenaufbereitung und -auswertung müssen standardisiert und wiederholbar sein. Dies bedingt in der Realität meist eine vollständig automatisierte Durchführung und wird im nachfolgenden Kapitel eingehender betrachtet werden. Messungen und Auswertungen zu technischen Prozessen sind jedoch nutzlos wenn an diese keine Interpretation und entsprechender Erkenntnisgewinn angeschlossen sind. Eine Interpretation der Daten ist somit notwendiger Bestandteil und sollte mithin ebenfalls den oben genannten Objektivitätsansprüchen genügen. Indessen ist jedoch genau diese dritte Forderung der Interpretationsobjektivität gleichwohl schwieriger zu erfüllen.

Zunächst werden im Zusammenhang dieser Arbeit grundlegend zwei mögliche Interpretationsmethoden voneinander getrennt. Eine besteht darin, eine gewonnene

Datensatz-Entität in ein absolutes Wertesystem einzuordnen und anschließend Aussagen darüber zu treffen, ob diese (und somit der zugrunde liegende Prozess) die gestellten Erwartungen<sup>17</sup> erfüllt. Diesem Vorgehen entspricht zum Beispiel die im vorangegangenen Abschnitt bereits genannte Methodik der Vorhersage subjektiver Bewertungen in Form der Werteskala 1..10, wie sie in [73] praktiziert wird. Eine zweite Möglichkeit der Interpretation besteht darin, lediglich relative Aussagen zu treffen, also Vergleiche zwischen den unterschiedlichen Datensätzen anzustellen. Während die erste Methodik die Existenz eines Wertesystems voraussetzt und notwendigerweise eine subjektive Komponente enthält<sup>18</sup>, ist die zweite Methodik vollkommen frei davon und wird deswegen nachfolgend favorisiert<sup>19</sup>. Eine Methodik zur Entwicklung dafür geeigneter Metriken wird nachfolgend eingeführt und im Detail diskutiert.

### 3.2.1 Physikalisch motivierte Kriterien und deren Entwicklung

Die wesentlichen Schritte zur Entwicklung objektiver Fahrbarkeitskriterien, wie sie im Umfeld dieser Arbeit verwendet werden, sind bereits während der Klärung des Begriffs der Objektivität angeklungen. Sie sollen an dieser Stelle mit Bezug zu Abbildung 3.2 kurz zusammengefasst werden:

1. Definition einer Menge repräsentativer Fahrmanöver,
2. Identifikation charakteristischer Phänomene und Abbildung auf objektive, mathematisch erfassbare Kennzahlen,
3. Durchführung von Messungen und Berechnung der objektiven Kennzahlen,
4. Statistische Analyse der Stabilität und Signifikanz der Kennzahlen,
5. Abstimmung der Ergebnisse mit subjektiven Bewertungen zur Auswahl einer vollständigen Menge.

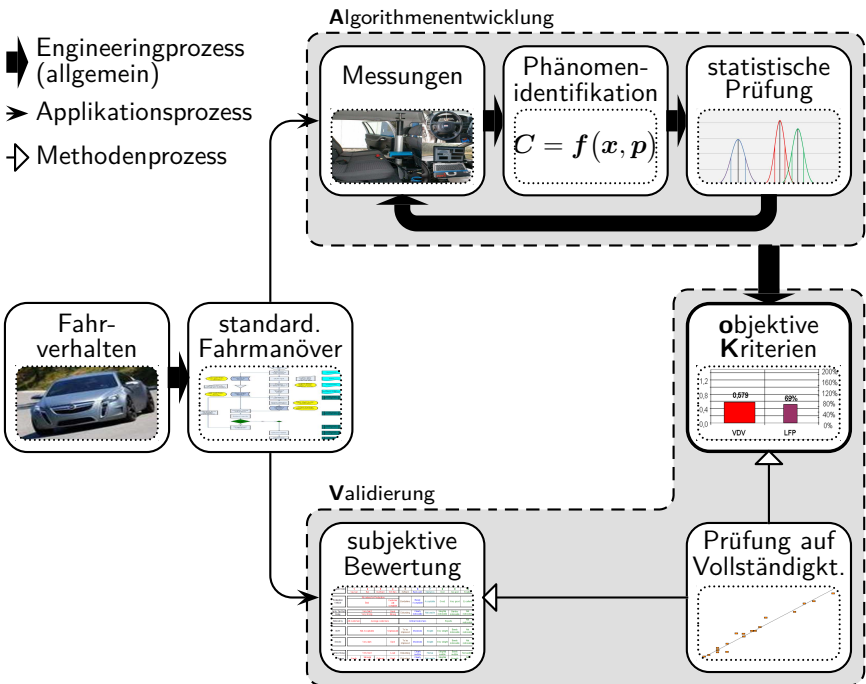
---

<sup>17</sup>Als Erwartung wird hierbei die Aufteilung der absoluten Skala in die Kategorien „gut“ und „schlecht“ sowie eine dem Problem angepasste Anzahl an Zwischenstufen verstanden.

<sup>18</sup>Denn die Begriffe „gut“ und „schlecht“ mussten zunächst dem Wertebereich zugeordnet werden.

<sup>19</sup>Der Nachteil, dass mindestens ein Vergleichsobjekt existieren muss, wird hierbei als vernachlässigbar angesehen. Vorangegangene Varianten eines Fahrzeugs oder auch die Ergebnisse der Entwicklung von Konkurrenten stehen in der Regel zur Verfügung. Hierbei ist es dann sogar unerheblich, ob zu diesen subjektive Bewertungen verfügbar sind oder nicht.

Wie bereits in Kapitel 2 eingeführt, wird unter dem Begriff Fahrbarkeit im Allgemeinen eine kondensierte Aussage über das empfundene Verhalten eines Kraftfahrzeugs in verschiedenen Betriebssituationen verstanden. Es ist naheliegend nicht praktikabel, die unendlich große Menge möglicher Betriebssituationen zu bewerten. Entsprechend ist es zunächst notwendig eine stellvertretende Menge an Situationen auszuwählen bzw. zu definieren, die den größten Teil der typischen Betriebssituationen abdeckt. Weil auch diese wiederum in unterschied-



**Abbildung 3.2:** Schema methodischer Entwicklung von Kriterien für die Objektivierung von Fahrmanövern

lichen Ausprägungen auftreten können, ist es sinnvoll, standardisierte Versionen der Fahrmanöver festzulegen, die diese schließlich repräsentieren, wie zum Beispiel Tip-In, Tip-Out, Leerlauf oder Teillastbeschleunigung. Man führt jeweils entsprechende Messungen durch und analysiert die gewonnenen Zeitverläufe anschließend auf die Existenz bestimmter Phänomene, welche sich grundsätzlich in drei Gruppen, nämlich Zeitpunkte und Zeitspannen, Absolutwerte und Differenzen so-

wie Integral- bzw. Energieinhalts-Kriterien unterscheiden lassen<sup>20</sup>. Die genannten Gruppen sind dabei disjunkt und universell, enthalten aber pro Manöver eine unterschiedlich große Anzahl an Elementen. Während ihrer Entwicklung gelangt man zudem zügig zu dem Punkt, die gleichen Kriterien und Algorithmen identisch oder in leicht abgewandelter Form auf unterschiedliche Manöver anwenden zu können. Dies ist naheliegend, da die Menge möglicher relevanter Phänomene, die während eines Manövers auftreten können, überschaubar ist. Ein Manöver charakterisiert sich gerade durch deren Kombination, Reihenfolge und Intensität.

Die eben genannte Unterteilung beruht auf einer Gruppierung bestimmter Phänomene nach ihrer physikalischen Natur. Sie bezieht sich also vor allem auf die Quelle dessen, was bewertet werden soll, nämlich auf den Verlauf von Messsignalen als Repräsentanz der durchgeführten Manöver. Diese ist aber nur dann hilfreich, wenn man eine weitere Einteilung vornimmt, indem man von der entgegengesetzten Seite, nämlich dem Bewertungsergebnis selbst, ausgeht. Ein numerisches Ergebnis muss signifikant für die unterschiedlichen Qualitäten der zu beschreibenden Kategorie sein. Es ist also die Frage zu beantworten, in welcher Art die Skala der möglichen Ergebniswerte zu gestalten ist.

Wird zum Beispiel eine beliebige Person dazu aufgefordert, einen bestimmten Sachverhalt zu beurteilen, kann sie diese Aufgabe in der Regel nur erfüllen, wenn ein passendes Referenzsystem zur Verfügung steht. Im einfachsten Fall besitzt die Person die notwendige Erfahrung im Fachgebiet, womit die Existenz einer Referenz als gegeben vorausgesetzt werden kann<sup>21</sup>. Ist dies nicht der Fall, bedarf es einer geeigneten Möglichkeit der Zuordnung. Sie muss es der bewertenden Person erlauben, die auftretenden Merkmale aufgrund ihrer eigenen Erfahrungen trotzdem wahrzunehmen und anschließend auf das Referenzsystem des Fachgebiets zu übertragen. Besagtes Referenzsystem sowie eine zugehörige Zuordnungsvorschrift lassen sich jedoch nur dann aufstellen, wenn zunächst für alle zu bewertenden Realisierungen des Sachverhalts erwartete von unerwarteten Merkmalen unterscheidbar sind. Außerdem müssen die Merkmale in einen kausalen Zusammenhang mit zugehörigen Auslösern gebracht werden können<sup>22</sup>. Es ergibt sich also eine Entscheidungsmatrix gemäß Abbildung 3.3 aus der anschließend das Re-

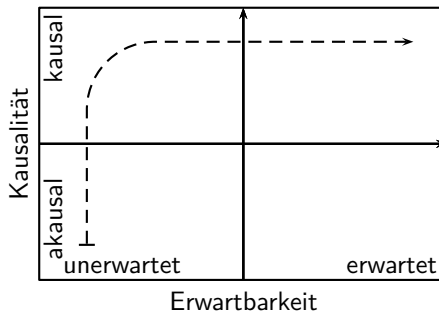
---

<sup>20</sup>Bei dieser Einteilung wurde davon ausgegangen, dass sich zum Beispiel der maximale Ruck grundlegend als Absolutwert der Ableitung eines Beschleunigungssignals zu einem bestimmten Zeitpunkt auffassen und sich somit in das genannte Schema eingliedern lässt.

<sup>21</sup>Ob diese tatsächlich für das notwendige Ergebnis passend ist, sei hierbei nicht von Belang.

<sup>22</sup>Zum hier benutzen Begriff der Erwartung sei noch folgendes angemerkt. Eine Erwartung ist in sich zunächst wertungsfrei. Man kann etwas aufgrund einer Kausalität erwarten, was nicht erwünscht und somit als ungenügend bewertet werden würde. Um hier nicht eine weitere Dimension zu eröffnen, seien im Folgenden erwartbare und gut bewertete Merkmale solche, die „erwartet“ sind. Entsprechend sind erwartbare aber ungenügend zu bewertende Merkmale „unerwartet“ und so fort.

ferenzsystem entlang des eingezeichneten Pfeils abgeleitet werden kann. Starke



**Abbildung 3.3:** Entscheidungsmatrix zur Ableitung eines Referenzsystems

Ausprägungen erwarteter kausaler Merkmale finden sich im Bereich des positiven Endes des Referenzsystems, wohingegen starke Ausprägungen akausaler unerwarteter Merkmale an dessen negativem Ende auftreten werden. Unerwartete aber kausale Merkmale ordnet man je nach Ausprägung entsprechend im mittleren Bereich des Referenzsystems ein. Die Art der Achseneinteilung (also die Anzahl und Verteilung möglicher Zwischenwerte) wird dabei häufig in Form von Likert-Skalen realisiert, um die Zustimmung bzw. Ablehnung der Probanden mit Bezug zu einem bestimmten Umstand zu identifizieren [83]. Das Auftreten von erwarteten (im Sinne von gewünschten) jedoch akausalen Merkmalen deutet in der Regel auf ein ungenügendes Verständnis des zugrunde liegenden Prozesses hin. Man kann durchaus Erwartungen eines guten Ergebnisses haben, die jedoch aufgrund des bisherigen Verständnisses der Zusammenhänge akausal oder unrealistisch erscheinen. Da diese bei späterem Erkenntnisgewinn eventuell wieder zu kausalen Ergebnissen führen können, soll diese Kombination hier nicht ausgeschlossen werden.

An dieser Stelle wird ein weiteres Ziel der Entwicklung objektiver Kriterien formuliert: Die Menge der verwendeten subjektiven Kriterien muss vollständig abgebildet werden. Eine erste Herausforderung besteht hier ein weiteres Mal in der Natur der Subjektivität selbst. In einer Beschreibung empfundenen Fahrgefühls werden Menschen zunächst unterschiedliche Aspekte<sup>23</sup> in Betracht ziehen und diese meist auch uneinheitlich formulieren. Die Aufgabe besteht also darin, gleiche aber heterogen artikulierte Erscheinungen zu identifizieren und eventuell zu vereinheitlichen. Dies tritt vor allem dann zutage, wenn man Daten von verschiedenen

<sup>23</sup>Hier wird bewusst nicht der Begriff Phänomen verwendet, um diesen nicht mit den oben beschriebenen Phänomenen der Messdatenverläufe zu verwechseln.

Herstellern und somit auch deren Schemata zur subjektiven Bewertung miteinander vergleicht. Hierfür soll Tabelle 3.1 dienen. Sie enthält eine auf Veröffentlichungen basierende aufbereitete und übersetzte<sup>24</sup> Zusammenstellung<sup>25</sup> subjektiver Bewertungen bzw. Aspekte für ein Tip-In-Manöver, welches nachfolgend als durchgängiges Beispiel zur Ableitung der in dieser Arbeit entwickelten Methodik dienen soll. Es wurde die Verallgemeinerung der letzten Zeile kondensiert, welche

Quelle	1	2	3	4	5	6
A	Ansprechen	-	QotM <sup>26</sup>	Glattheit	-	-
B	Ansprechen	Zögern	Anstiegsgeschw.	Stocken	Überschw.	Oszill.
C	Verzug	-	Rauheit	Stocken	Überschw.	Oszill.
D	-	Zögern	-	Stocken	Gegenschlag	Ruckeln
E	Verzug	-	Ruck	-	Rückstoß	Ruckeln
F	Verzug	Schleppen	Ruck	-	Überschw.	Ruckeln
G	Verzug	Schleppen	Ruck	Stocken	Rückstoß	Ruckeln
H	Verzug	Zögern	Ruck	-	-	Ruckeln
Allg.	Ansprechen	Zögern	Ruck	Stocken	Rückstoß	Ruckeln

**Tabelle 3.1:** Vereinheitlichung subjektiver Kriterien für die Tip-In Bewertung

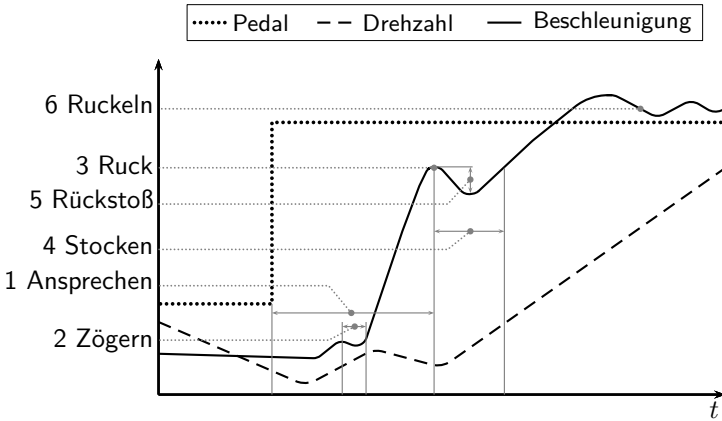
hiermit als Zielmenge abzubildender subjektiver Bewertungen für dieses Manöver definiert wird und durch objektive Kriterien widergespiegelt werden muss. Diese Größen sind in Abbildung 3.4 phänomenologisch<sup>27</sup> dargestellt. Die zugehörige Tabelle 3.2 erklärt die verwendeten Begriffe, um das Verständnis für deren Ausprägung während eines Tip-In-Manövers zu erleichtern. Ein herauszustellender Aspekt an dieser Auflistung ist, dass nur die beiden ersten Bewertungsgrößen, nämlich Ansprechzeit und Ruck, im eigentlichen Sinne positiv bewertbare Charakteristika sind. Die übrigen 4 Größen stellen störende Effekte dar, womit das Ziel der Applikationsarbeit darin besteht, diese zu eliminieren oder zumindest so weit wie möglich zu reduzieren. Die Haupteffekte werden, wie in Abschnitt 3.1

<sup>24</sup>Die entsprechende Tabelle mit den originalen englischen Bezeichnungen aus den genannten Veröffentlichungen findet sich im Anhang A.1.

<sup>25</sup>Referenzen A: [83] (2001), B: [32] (1999), C: [33] (2000), D: [48] (1975), E: [68] (2011), F: [70] (1985), G: [96] (2002), H: [116] (2004)

<sup>26</sup>Quick of the mark (nicht übersetzt)

<sup>27</sup>Dies bezieht sich hier vor allem auf die Markierung der beiden Hauptkriterien Ruck und Ansprechen. Diese sind tatsächlich nicht direkt an der ersten Spitze des Beschleunigungsverlaufs manifestierbar. Wie in Abschnitt 3.2.3 gezeigt werden wird, sind sie vielmehr die kondensierte subjektive Beschreibung eines komplexen Zusammenspiels mehrerer physikalischer Phänomene. Ruck und Ansprechen sind in Abbildung 3.4 so eingezeichnet, wie sie aus linguistischer und semantischer Bedeutung am passendsten erschienen.



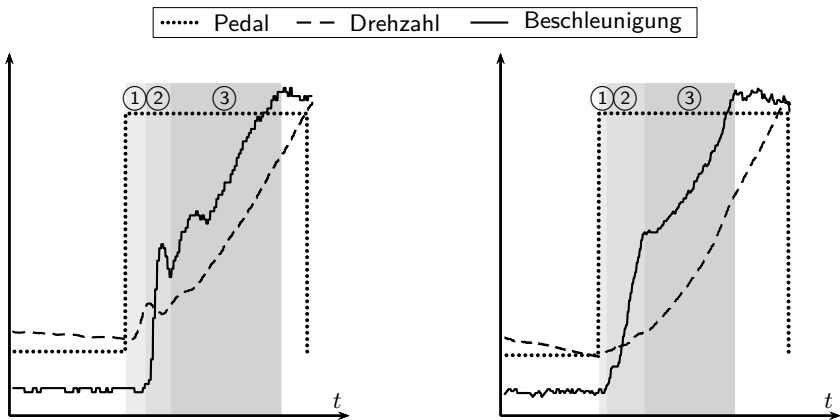
**Abbildung 3.4:** Qualitative Darstellung eines Tip-In-Manövers zur Erläuterung der subjektiven Kennwerte

Bezeichnung	Erklärung
Ansprechen Ruck	Zeitliche Dynamik der Beschleunigungsreaktion Intensität der Beschleunigungsänderung
Zögern Rückstoß Stocken	Nach erster Reaktion, spürbar ausbleibende Beschleunigung Intensität der negativen Beschleunigungsänderung nach erstem Ruck spürbare zeitliche Unterbrechung zwischen erstem Ruck und weiterem Beschleunigungsverlauf
Ruckeln	Nachschwingen während weiterem Beschleunigungsaufbau nach erstem Ruck

**Tabelle 3.2:** Erklärung der subjektiven Bewertungen für die Tip-In Bewertung

beschrieben, in ihrer Qualität auf einer Skala von 1...10 bewertet. Im Gegensatz dazu verringert die gefühlte Intensität eines Störeffekts jeweils entsprechend dessen Benotung ausgehend von einem guten Grundwert (z.B. 8).

Um das Verhalten des Fahrzeugs anhand von Messdatenverläufen objektiv bewerten zu können, ist es notwendig, in diesen zuverlässig die charakteristischen Phänomene mit Hilfe von entsprechenden Algorithmen zu erkennen und zu extrahieren, was bereits eine nicht als geringfügig anzusehende Herausforderung darstellt. Es besteht jedoch eine weitere Schwierigkeit, zu deren Auflösung das physikalische Verständnis des zugrunde liegenden Prozesses notwendig ist. Dies soll kurz an einem einfachen Beispiel mit Hilfe der nachfolgenden Abbildung 3.5 erläutert werden. Zu sehen sind zwei Verläufe von Messungen des Beschleuni-



**Abbildung 3.5:** Vergleich zweier Beschleunigungsverläufe zur Erklärung der Schwierigkeit der Definition objektiver Kriterien

gungssignals und der Motordrehzahl mit offensichtlich unterschiedlicher Charakteristik. In der linken Darstellung können klar drei Phasen voneinander getrennt werden, nämlich:

1. Totzeitverhalten ohne sichtbare Reaktion des Fahrzeugs,
2. Übergangsbereich mit starkem Anstieg der Beschleunigung und
3. weitere Beschleunigung des Fahrzeugs mit sich sättigendem Beschleunigungsvermögen.

Im rechten Bild könnte man ebenso drei Phasen in der eingezeichneten Form ansetzen. Die Dauer wie auch das Verhalten der Phasen ist jedoch offensichtlich stark unterschiedlich. Man kann gut sehen, dass kein Rückschlag zwischen Phase ② und ③ auftritt. Außerdem muss das stark ausgeprägte (für einen turboaufgeladenen Motor typische) hyperbolische Verhalten in Phase ③ explizit in die Algorithmen zur Erkennung der Phänomene integriert werden. Dieses könnte zwar auch leichter durch Hinzunahme weiterer interner Signale des Motors festgestellt werden, zeigt aber die Problematik auf, eine korrekte Identifikation der Phänomene auf Basis eines möglichst geringen Sets an Messkanälen zu realisieren, welche in gleicher Form in allen Fahrzeugen vorzufinden sind. Speziell interne Signale des Motors sind zwischen Motoren und ECU-Herstellern verschieden oder gar nicht überall existent. Eine robuste Methodik zur Objektivierung darf nur Signale verwenden, die unter allen Umständen zur Verfügung stehen. Speziell für die

Bewertung des Tip-In-Manövers wurde hier die Auswahl auf Pedalwert, Motordrehzahl und Beschleunigung festgelegt. Das letztgenannte Signal wird über einen externen Beschleunigungssensor zur Verfügung gestellt, der an der Schiene zur Befestigung des Fahrersitzes montiert und somit steif mit dem Fahrzeugrahmen verbunden ist. Dieses Vorgehen hat sich in Literatur und Praxis durchgesetzt. Eine in [18] veröffentlichte Untersuchung an einem Fiat Punto hat jedoch zum Teil außerordentlich hohe Abweichungen von bis zu  $0.9 \frac{m}{s^2}$  bei einer Beschleunigung von  $1.5 \frac{m}{s^2}$  aufgrund von Fahrzeug-Nicken nachgewiesen. Dort wird auch gezeigt, dass dies nicht alleine auf Basis eines multiaxialen Beschleunigungssignals korrigierbar ist, da die mathematische Lösung im Zustandsraum unter Umständen nicht eindeutig ermittelt werden kann. Der Radstand des in [18] verwendeten Fahrzeugs ist relativ gering. Trotzdem muss dieses Phänomen explizit in Betracht gezogen und bewusst vernachlässigt oder korrigiert werden. Auch diese Frage kann abschließend nur mit Hilfe des physikalischen Verständnisses des Gesamtprozesses im jeweiligen Anwendungsfall beantwortet werden.

Abbildung 3.6 zeigt qualitativ einen Verlauf der Beschleunigungsmessung bei einem Pedalsprung. In der Darstellung sind die Verläufe von Pedalsensor, Motordrehzahl und Beschleunigung über Zeit zu sehen. Zusätzlich enthält die Abbildung die objektiven Kennwerte sowie markante Punkte für deren Bestimmung. Kausal nimmt ein Tip-In seinen Beginn in einer instantanen Änderung der Position des Fahrpedals. Ohne Beschränkung der Allgemeinheit wurde hier ein Beispiel aus vorhergehendem Schubbetrieb<sup>28</sup> gewählt, um alle relevanten Merkmale zu erfassen. Der Motor befindet sich im angetriebenen Zustand, wobei die Motordrehzahl kontinuierlich sinkt, da das Fahrzeug aufgrund von Fahrwiderständen verzögert wird<sup>29</sup>. Zu einem bestimmten Zeitpunkt ① (und somit bei einer Startdrehzahl bzw. -Geschwindigkeit ②) führt eine sprunghafte Betätigung des Fahrpedals auf einen definierten Endwert ③ zu einer neuen Momentenanforderung an den Motor.

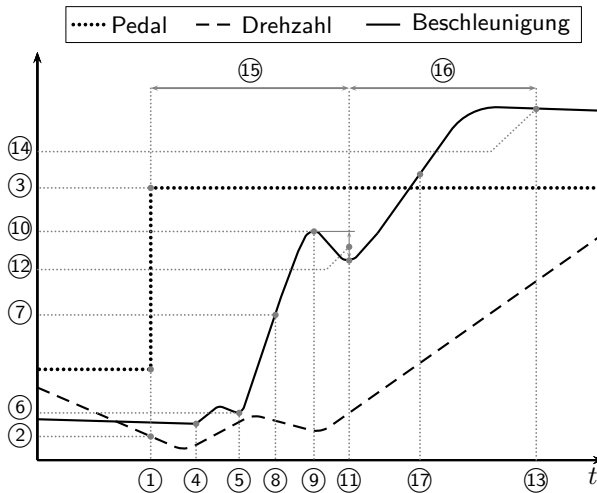
Dieser wird wieder befeuert und die Lager und Losen werden umgelegt. Sobald eine erste Kraftübertragung möglich ist<sup>30</sup> erkennt man nach kurzer Totzeit die zugehörige Reaktion des Fahrzeugs ④. Der Abschluss dieses Vorgangs wird durch den Lastwechsel-Rückstoß ⑤, ⑥ beendet. Anschließend steigt die Beschleunigung des Fahrzeugs stark an, wobei der maximale Ruck ⑦ (also die maximale Ableitung der Beschleunigung [5, 105]) sowie der Zeitpunkt seines Auftretens

---

<sup>28</sup>Das Tip-In-Manöver könnte auch aus einem Zustand mit bereits befeuertem Motor durchgeführt werden.

<sup>29</sup>Obwohl sich der Luftwiderstand als primäre verzögernde Komponente quadratisch zur Fahrzeuggeschwindigkeit verhält, ist die Beschleunigung in dieser Phase hier nahezu konstant dargestellt. Dies ist eine Vereinfachung und für die späteren Berechnungen unwesentlich, da lediglich der Beschleunigungswert zum Zeitpunkt des Pedalsprungs von Interesse ist und durch Mittelung in einem angemessen kurzen Zeitraum bestimmt wird.

<sup>30</sup>Die Lager sind zu diesem Zeitpunkt noch nicht vollständig umgelegt.



**Abbildung 3.6:** Qualitative Darstellung eines Tip-In-Manövers zur Erläuterung der objektiven Kennwerte

⑧ als weiterer markanter Punkt von Interesse sind. Nachdem der erste Anstieg der Beschleunigung und dessen Maximalwert ⑨ und ⑩ vorüber sind, entsteht in manchen Fällen ein weiteres Mal ein Rückstoß ⑫. Ist dieser vorhanden, so bildet der Zeitpunkt des auftretenden Minimums den Abschluss des sogenannten ersten Rucks ⑪. Ansonsten wird dieser im Punkt ⑨ definiert. Für diese erste Phase wird außerdem der VDV ⑮ berechnet. In der darauf folgenden Beschleunigungsphase werden ein weiteres mal der VDV ⑯, also auch markante Amplituden der eventuell auftretenden Schwingungen, bestimmt. Je nach Hardwarekonfiguration treten in dieser Phase unterschiedliche Teilaspekte zutage, wie der Zeitpunkt des Übergangs vom Saug- in den Ladebetrieb, sowie der Moment der Sättigung der Beschleunigung ⑬ und ⑭. Im Falle von eintretenden Schwingungen nach dem Abschluss des ersten Rucks, wird die Zeit bis zu deren Abklingen berechnet. Alle Merkmale sind nachfolgend tabellarisch zusammengefasst<sup>31</sup>. Die Tabelle enthält die in der Darstellung verwendeten Ziffern zur Identifikation, deren Formelzeichen und Beschreibungen. Außerdem wurden die Merkmale in die bereits zuvor

<sup>31</sup>Folgende Abkürzung bzw. englische Markierungen werden innerhalb der Tabelle verwendet

- LA: Load alteration = Lastschlag
- FJ: First jerk = erster Ruck
- kick = Rückstoß
- Surge = Phase der Nachschwingungen

	Kennwert	Beschreibung	#
Zeitpunkte	$t_{\text{start}}$	Startzeit	①
	$t_T$	Totzeit	④
	$t_{L\text{Akick}}$	Zeit bis Lager-Umschalt-Rückschlag	⑤
	$t_{\max}^+ \frac{da}{dt}$	Zeit bis zum maximalen Ruck	⑧
	$t_{FJ\text{peak}}$	Zeit bis zur Beschleunigungsspitze des 1. Rucks	⑨
	$t_{FJ\text{end}}$	Zeit bis zum Ende des ersten Rucks	⑪
	$t_{80\%}$	Zeit bis 80% der maximalen Beschleunigung	⑰
Absolutwerte	$\Delta a_{L\text{Akick}}$	Amplitude des Lager-Umschalt-Rückschlags	⑥
	$\frac{da}{dt}^+_{FJ\text{max}}$	maximaler Ruck	⑦
	$a_{FJ\text{peak}}$	Beschleunigungsspitze des ersten Rucks	⑩
	$\Delta a_{FJ\text{kick}}$	Amplitude des Rückschlags des ersten Rucks	⑫
	$a_{\text{SurgeMax}}$	Finaler Endwert der Beschleunigung	⑭
Energieinhalt	$\text{VDV}_{FJ}$	Vibration Dose Value des ersten Rucks	⑮
	$\text{VDV}_{\text{Surge}}$	Vibration Dose Value der Nachschwingphase	⑯
	$\text{VDV}_{\text{Full}}$	Vibration Dose Value des Gesamtmanövers	-

**Tabelle 3.3:** Zusammenfassung der objektiven Kriterien für das Tip-In-Manöver

angesprochenen Gruppen eingeteilt.

Hat man die charakteristischen Phänomene der Messdatenverläufe mit Blick auf die zugrunde liegende Physik definiert, müssen die Algorithmen zunächst mit dem Ziel einer zuverlässigen Auswertung entwickelt und getestet werden. Allerdings stellt dies noch nicht die Tauglichkeit der berechneten Zahlen für das Ziel der effizienteren Applikation sicher. Die Zahlen müssen klaren Aufschluss über unterschiedliches Fahrzeugverhalten liefern, genauer müssen diese statistisch stabil und signifikant sein. Zuerst erfordert dies, dass trotz Ungenauigkeiten durch Rauschen, Unebenheiten, Alterung, etc. robuste Werte entstehen. Robustheit bezieht sich hierbei jedoch nicht mehr auf die Funktionalität der Algorithmen<sup>32</sup>, sondern eher auf das robuste Verhalten des Fahrzeugs selbst. Es ist wahrscheinlich, dass bei der ersten Auswahl der zu betrachtenden Phänomene potentielle Charakteristika ausgesucht wurden, von denen einige im Rahmen der Reproduktionsgenauigkeit Aussagen liefern, die in statistischem Sinne nicht ausreichend stabil sind. Zur Bewertung dessen kann der Variationskoeffizient  $\text{VarK}(X)$  als

<sup>32</sup>Es wird also angenommen, dass die Algorithmen die Phänomene exakt nach ihrer Definition detektieren, wie sie auch ein erfahrener Applikationsingenieur in den Messdaten ausmachen würde.

relative Standardabweichung, d.h.

$$\text{VarK}(X) = \frac{\sqrt{\text{Var}(X)}}{E(X)} < \varepsilon_{\text{VarK}} \quad (3.2)$$

mit  $\sqrt{\text{Var}(X)} = \sigma$  als Standardabweichung und  $E(X)$  als Erwartungswert der Zufallsvariable  $X$  [28, 65, 66] herangezogen werden. Der Grenzwert, für den ein Ergebnis als stabil anzusehen ist, wurde in den vorliegenden Untersuchungen zu  $\varepsilon_{\text{VarK}} = 10\%$  definiert. Des Weiteren müssen die berechneten Zahlenwerte signifikant mit Bezug zu Änderungen des Fahrzeugverhaltens und somit Änderungen der Applikationsparameter sein. Eine Möglichkeit dies zu prüfen besteht darin, verschiedene Datensätze der Parameter anzufertigen, die subjektiv „noch klar“ bzw. „nicht zweifelsfrei“ voneinander unterschieden werden können<sup>33</sup>. Im Allgemeinen sind diese drei Applikationen  $C_i, i = 1, 2, 3$  ausreichend, um eine Analyse der Signifikanz durchzuführen. Für eine ausgeweitete Analyse können auch mehr Datensätze Anwendung finden. Führt man mit diesen nun Wiederholungsversuche, so muss an einem Betriebspunkt mit zusammengehörigen Applikationen

$$\varepsilon_\sigma < \begin{cases} |(E(X)_{C_i} + \sigma_{C_i}) - (E(X)_{C_j} - \sigma_{C_j})|, & \forall i \neq j \wedge E(X)_{C_i} < E(X)_{C_j} \\ |(E(X)_{C_i} - \sigma_{C_i}) - (E(X)_{C_j} + \sigma_{C_j})|, & \forall i \neq j \wedge E(X)_{C_i} > E(X)_{C_j} \end{cases}$$

gelten, wobei  $\varepsilon_\sigma$  einen zu definierenden Grenzwert der erlaubten Überlappung darstellt. Diese Analyse kann mehr oder weniger ausführlich, also an einer mehr oder weniger großen Anzahl Betriebspunkte, durchgeführt werden. Die genannten speziellen Applikationen sollten dabei zunächst im Bereich des angestrebten Verhaltens des Fahrzeugs angesiedelt sein. Um tieferes Verständnis zu erlangen könnte man die Analyse jedoch auch an jedem Betriebspunkt für verschiedene Charakteristiken des Fahrzeugs wiederholen. Inwieweit dieser Mehraufwand im jeweiligen Anwendungsumfeld begründet werden kann, bleibt spezifisch zu entscheiden.

Auf Basis dieser Auswertungen müssen dann in der Regel Teile der Algorithmen verfeinert werden. Unter Umständen ergibt sich sogar, dass einige der entwickelten Kennzahlen die gerade definierten Kriterien nicht erfüllen können und man sich vollständig von ihnen trennen muss. Abbildung 3.7 illustriert beispielhafte Ergebnisse von Untersuchungen für das Tip-In-Manöver, wie sie im Rahmen dieser Arbeit entstanden. Unter Verwendung der in Kapitel 4 beschriebenen

---

<sup>33</sup>Der Begriff „noch klar“ entsprach dabei einer etwa 10% Änderung der Parameter, während „nicht zweifelsfrei“ mit einer etwa 3...5% Änderung einher ging.

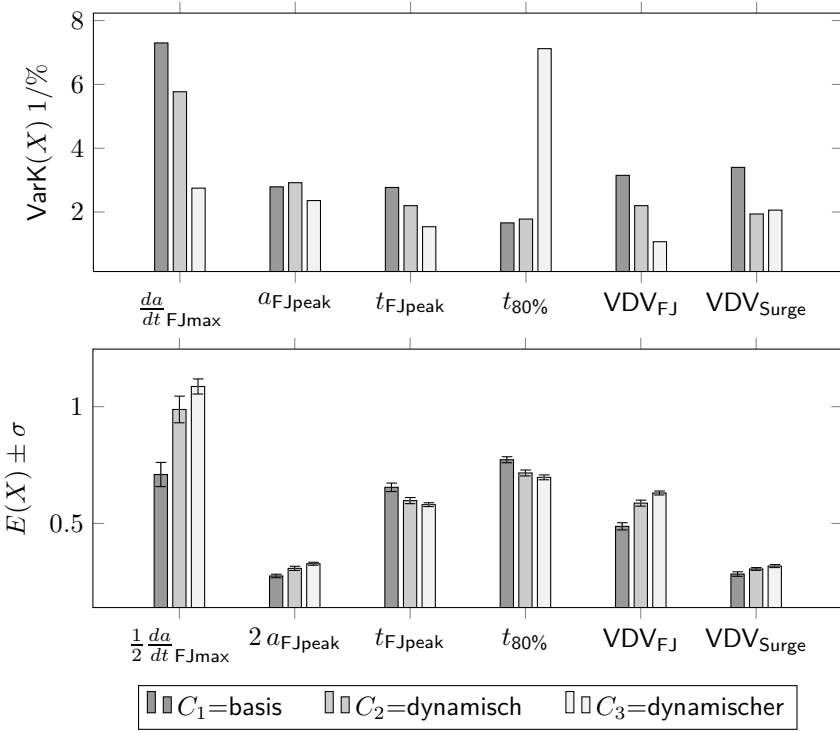


Abbildung 3.7: Auswertung der Stabilität und Signifikanz von Wiederholungsversuchen ausgewählter Kennzahlen des Tip-In-Manövers

Möglichkeiten zur Automatisierung wurden die notwendigen Messungen für mehrere Fahrzeuge in einer Testmatrix verschiedener Betriebspunkte<sup>34</sup> durchgeführt. Jeder Datensatz eines Betriebspunkts unterlief dabei zwanzig Wiederholungen. Abbildung 3.7<sup>35</sup> zeigt den  $\text{VarK}(X)$  sowie  $E(X) \pm \sigma$  für ausgewählte Kriterien am Betriebspunkt  $2000 \frac{1}{\text{min}}$  mit 50 % Pedalposition. Im Detail sind die Ergebnisse für den maximalen Ruck  $\frac{da}{dt} F_{Jmax}$ , die Beschleunigungsspitze des ersten Rucks  $a_{FJpeak}$ , die Verzögerungszeit bis zur Beschleunigungsspitze  $t_{FJpeak}$ , die Zeit bis zum Erreichen von 80% der maximalen Beschleunigung  $t_{80\%}$  und abschließend der VDV des ersten Rucks  $VDV_{FJ}$  sowie des Nachruckelns  $VDV_{Surge}$  dargestellt. Das

<sup>34</sup>Die Aufteilung betrug dabei: Pedal = [20, 40, 60, 80, 100]% und Motordrehzahl = [1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500]  $\frac{1}{\text{min}}$ .

<sup>35</sup>Es sei darauf hingewiesen, dass im Graphen der Erwartungswerte die numerischen Ergebnisse für  $\frac{da}{dt} F_{Jmax}$  und  $a_{FJpeak}$  mit skaliert wurden, um gemeinsam mit den anderen Ergebnissen dargestellt werden zu können, was jeweils an der Gruppenbezeichnung vermerkt ist.

obere Balkendiagramm veranschaulicht die Variationskoeffizienten dieser Werte. Es ist gut erkennbar, dass alle gezeigten Werte unterhalb der gestellten Grenze von  $\varepsilon_{\text{VarK}} = 10\%$  liegen. Das untere Balkendiagramm zeigt die Erwartungswerte der Applikationen mit entsprechenden  $\pm\sigma$  Indikatoren. Diese sollten sich für zweifelsfreie Differenzierung der Datensätze nicht überlagern. Außerdem kann diese Art der Analyse der Erwartungswerte dazu genutzt werden, um die Konsistenz zwischen verschiedenen Applikationen zu validieren. So entsprechen die Trends der Erwartungswerte der steigenden Dynamik der Applikationen. Wie in den Diagrammen ersichtlich ist, erfüllen demnach alle aufgeführten Kennwerte die gestellten Anforderungen am betrachteten Betriebspunkt<sup>36</sup>. Es wird jedoch in Kapitel 5 gezeigt, dass selbst dies nicht notwendig zu einer erfolgreichen Modellierung führt. In den Diagrammen ist auffällig, dass vor allem die beiden VDV-Kriterien außerordentlich gute statistische Kennzahlen aufweisen. Da er sich im Verlaufe der hier gemachten Untersuchungen als eine der Größen mit zentraler Bedeutung herauskristallisiert hat, soll im nachfolgenden Abschnitt kurz etwas ausführlicher auf dieses Mittel zur Objektivierung eingegangen werden.

### 3.2.2 Zum Vibration Dose Value und dessen Legitimität

Ein wesentliches Maß zur Objektivierung stellt in dieser Arbeit der Vibration Dose Value (VDV) [44] dar. Griffin legt in seinem Buch zunächst seine Abneigung gegen „Magic Numbers“ zur Bestimmung von Resonanzfrequenzen<sup>37</sup> sowie gegen die fälschliche Vereinfachung dar, dass bestimmte Vibrationen mit jeweiligen physiologischen Reaktionen einhergehen<sup>38</sup>. Neben allgemein gebräuchlichen Größen wie Mittelwert  $\bar{x}$  Standardabweichung  $\sigma$  und Root Mean Square (RMS) gibt er unter anderem die so genannte Kurtosis oder auch Wölbung<sup>39</sup>  $w$  als Maßzahl für die Steilheit bzw. „Spitzigkeit“ einer Wahrscheinlichkeitsfunktion, statistischen

---

<sup>36</sup>Da dieses Kapitel eine Entwicklungsmethodik für objektive Kriterien zum Ziel hat, wird auf die vollständige Protokollierung der Ergebnisse des gesamten Betriebsbereichs verzichtet.

<sup>37</sup>„While the investigation of resonances is interesting, the use of „magic numbers“ to summarize knowledge of the dynamic response of the body is of little help: the dynamic response of the body must be considered as a continuous function throughout the range of frequencies of interest.“ (S. 335)

<sup>38</sup>„... caution against the simple interpretation of studies of human performance during exposure to vibration and the assumption that effects can be modelled accurately by a simple change in the transfer of information between input and output.“(S. 125)

<sup>39</sup>Die Wölbung als zentrales Moment 4. Ordnung wird oft als Maß der Abweichung von der Normalverteilung benutzt. Verteilungen mit geringer Wölbung streuen relativ gleichmäßig, bei Verteilungen mit hoher Wölbung resultiert die Streuung mehr aus extremen, aber seltenen Ereignissen [36].

Dichtefunktion oder Häufigkeitsverteilung an [36]

$$w = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma} \right)^4, \quad (3.3)$$

mit  $x_i$  als  $i$ -ter Stichprobe und Anzahl der Stichproben  $n$ . Diese dient als Grundlage für die Definition des VDV

$$\text{VDV} = \sqrt[4]{T_s w} \cdot \sigma = \sqrt[4]{\frac{T_s}{n} \sum_{i=1}^n x_i^4}, \quad (3.4)$$

mit  $T_s = \tau_e - \tau_a$  als Dauer des betrachteten Zeitintervalls<sup>40</sup>. Im Gegensatz zur Anwendung von „Magic Numbers“ sind diese Maße zur Beschreibung von Schwingungen legitim, da sie ein ganzes Frequenzband umfassen [44].

In [61] wird eine Schlussfolgerung aus [44] proklamiert, nämlich der sinkende Nutzen solcher Maßzahlen bei einer wachsenden Schar an Probanden. Als Begründung wird hierfür die fehlende Abbildung personenbezogener Erscheinungen und Vorlieben herangezogen. Diese als Nachteil charakterisierte Eigenschaft wird im Rahmen dieser Arbeit im Gegenteil sogar als Vorteil der angewandten Methodik gesehen, da somit die bereits mehrfach kritisierten Schwankungen zwischen unterschiedlichen Fahrern erfolgreich reduziert werden können. Nach ISO 2631 werden zusätzlich spezielle Wichtungen und Filterungen angewandt, um die relative Empfindlichkeit des Menschen bezüglich verschiedener Frequenzen im Allgemeinen darzustellen [42]<sup>41</sup> und dabei gerade keine Unterscheidung zwischen persönlichen Gemütslagen zu machen. In diesen Untersuchungen wurden mit 30 Teilnehmern paarweise Vergleiche zufälliger Abfolgen unterschiedlicher Anregungen durchgeführt. Die Probanden wählten die als unangenehmer empfundene Anregung aus. Für die aufgezeichneten Messdaten untersuchte man anschließend VDV und RMS als Bewertungsmaße mit und ohne vorheriger Filterung. Als Ergebnis wird gezeigt, dass die Anwendung der Filter und Wichtung die Korrelation zum subjektiven Empfinden entscheidend verbessert. Zusätzlich konnte die naheliegende Vermutung bestätigt werden, dass harmonische Anregungen gegenüber zufälligen bevorzugt werden<sup>42</sup>.

<sup>40</sup>Die hier angegebene Notation ist die diskrete Darstellung von Gleichung 3.1 mit  $T_s = \tau_e - \tau_a$ , wobei in der dortigen Form bereits auf die praktisch notwendige Filterung und Wichtung in Form von  $\tilde{a}(t)$  hingewiesen wird, die aber nicht zur Definition des VDV selbst gehört.

<sup>41</sup>So hat es sich in der Praxis sogar durchgesetzt, genau diese Wichtungskurven auch zu verwenden, um von Vibrationen hervorgerufene kritische Auswirkungen auf die Gesundheit des Menschen abzuschätzen, obwohl die Haltbarkeit dessen nie wirklich validiert wurde [99].

<sup>42</sup>Außerdem wird eine RMS-Amplitude von  $0.6 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$  als niedrigster Wert genannt, der unter den

Problematisch für die praktische Nutzung des VDV ist jedoch dessen korrekte Berechnung. Die bereits angesprochenen Filter und Wichtungsfunktionen haben seit 1985 mehrmalige Anpassungen durchlaufen, die dazu führten, dass die RMS-Werte der Beschleunigung um bis zu 20% schwankten [123]. Schwerwiegender ist aber der Umstand, dass die in der ISO 2631 gegebenen Funktionen zunächst als Amplituden

$$W(\omega)|_{\omega=2\pi f_i} = W_i, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3.5)$$

für Frequenzen  $f_i$  mit  $\frac{1}{3}$  Oktave Bandbreite zwischen den Frequenzen gegeben waren. In der neuesten Version von 1997 wurden für die praktische Anwendung Übertragungsfunktionen der Form

$$W(s) = \frac{b_m s^m + \dots + b_1 s + b_0}{s^n + \dots + a_1 s + a_0} \quad (3.6)$$

definiert. Diese sind spezifisch für verschiedene Wirkungsachsen der Beschleunigungsmessung aufgeführt und in Tabelle 3.4 zusammengefasst [60]. Für die in dieser Arbeit angestellten Untersuchungen des Ansprechverhaltens in Längsrichtung eines Kraftfahrzeugs muss der Filter  $W_d$  Anwendung finden, der sich aus der Kaskade eines Hochpasses, eines Tiefpasses sowie eines Ruck-Übertragungsfilters zu

$$\begin{aligned} W_d(s) &= H_h(s) \cdot H_l(s) \cdot H_t(s) \\ &= \frac{s^2}{s^2 + \frac{\omega_1}{Q_1} s + \omega_1^2} \frac{\omega_2^2}{s^2 + \frac{\omega_2}{Q_2} s + \omega_2^2} \frac{\frac{\omega_4^3}{\omega_3} s + \omega_4^2}{s^2 + \frac{\omega_4}{Q_4} s + \omega_4^2} \end{aligned} \quad (3.7)$$

ergibt [60]. Neben dem Nachteil, dass die Funktionen nur für kontinuierlich (analog) aufgenommene Messdaten und in hoher Ordnung angegeben sind (siehe Gleichung 3.6), werden Messdaten heute in der Regel digital aufgezeichnet<sup>43</sup>. Um zu korrekten Ergebnissen zu gelangen müssen die Funktionen aus dem  $\mathcal{L}$ -Bereich in den  $\mathfrak{z}$ -Bereich transformiert werden. Die entsprechenden Filterkoeffizienten  $a_k$  und  $b_k$  auf direktem Wege zu bestimmen, ist jedoch ein nichtlineares Problem, für das keine analytische Lösung besteht. Weder in der Norm [60] noch in [26] wird beschrieben, wie mit digital aufgezeichneten Messdaten zu verfahren ist.

gegebenen Laborbedingungen von Hintergrundstörungen unterschieden werden konnte. Obwohl die zitierte Veröffentlichung mit nicht trainierten Probanden arbeitet, erscheint dieser Wert als relativ groß. In der vorliegenden Arbeit wurden mit erfahrenen Applikationsingenieuren unterscheidbare Spitze-Spitze Amplituden im Bereich  $0.1 \frac{m}{s^2}$  ermittelt. Der Unterschied einer Größenordnung ist hierbei nicht durch fehlende Erfahrung erklärbar. Es wurden allerdings keine zusätzlichen Untersuchungen mit unerfahrenen Probanden durchgeführt, da diese nicht das Ziel der hier entwickelten Methodik sind.

<sup>43</sup>Hierbei muss unter Berufung auf das Shannon-Theorem mindestens mit der doppelten Abtastrate der höchsten zu betrachtenden Frequenz gearbeitet werden. Für den bereits mehrfach angesprochenen interessanten Frequenzbereich von 1...30 Hz bedeutet dies also eine Abtastrate von mindestens 60 Hz.

Filter	Richtung	Anwendungsfall	Standard
$W_b$	vertikal	Sitzvibration	BS 6841
$W_c$	longitudinal	Vibrationen der Rückenlehne	ISO 2631, BS 6841
$W_d$	longitudinal, lateral	Sitzvibration	ISO 2631, BS 6841
$W_e$	Rollen, Nicken, Gieren	Sitzbewegung (rotierend)	ISO 2631, BS 6841
$W_f$	vertikal	Übelkeit (Seekrankheit)	ISO 2631, BS 6841
$W_g$	vertikal	aktivitätsrückwirkend	BS 6841
$W_h$	longitudinal, lateral, vertikal	Hand-Arm-Vibrationen	ISO 5349-1
$W_j$	vertikal	Kopfvibration	ISO 2631-1
$W_k$	vertikal	Sitzvibration	ISO 2631-1
$W_m$	alle	Vibration von Gebäuden	ISO 2631-2

**Tabelle 3.4:** Frequenzwichtungen nach BS 6841, ISO 2631-1, ISO 2631-2 [26, 60, 90]

In [123] wird vorgeschlagen die Methode der bilinearen Transformation [81]

$$s \mapsto 2 \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}} \quad (3.8)$$

anzuwenden. Deren numerische Ergebnisse für die Wichtungsfunktionen sind dort exemplarisch bis zur fünften Ordnung berechnet und es wird nachgewiesen, dass im Vergleich zu üblichen Verfahren der Modellreduktion auf diese Art geringere Abweichungen entstehen. Als Erweiterung dessen wird in [90] zusätzlich ein Frequenz-Warping

$$\omega'_s \mapsto 2 \tan\left(\frac{\omega_n}{2}\right) \quad (3.9)$$

durchgeführt, wobei  $\omega_n = 2\pi\omega_c/\omega_s$  die normalisierte Frequenz für das Filterdesign,  $\omega_c$  die Mittenfrequenz und  $\omega_s$  die Samplingfrequenz darstellen. Das Ergebnis der Substitution von Gleichung 3.8 in 3.6 und die sich ergebenden Filterkoeffizienten des entstehenden *IIR*-Filters<sup>44</sup> werden in geschlossener Form angegeben. Es wird außerdem gezeigt wie die Gleichungen aus ISO 2631 in die Gleichungen aus BS 6841 überführt werden können.

<sup>44</sup>Infinite Impulse Response Filter: Filter mit unendlicher Impulsantwort

Es wurde vorangehend bereits auf die guten statistischen Eigenschaften des VDV hingewiesen. Die hier aufgeführten Untersuchungen zur zudem herausragenden Korrelation mit menschlichem Empfinden rückt den VDV in eine zentrale Rolle zur Objektivierung von schwingenden Bewegungen und Bewegungen mit Stößen. Dennoch besteht eine Schwierigkeit in der Verwendung dieser Größe in der nicht direkt erfassbaren Bedeutung des Zahlenwerts mit seiner Einheit  $\frac{m}{s^{1.75}}$ . Eine Abbildung subjektiver Bewertungen von Fahrbarkeitseigenschaften auf entsprechende VDV-Werte wird diesem Problem Abhilfe schaffen. So ist auch für andere objektive Kriterien, wie etwa die Spitze der Beschleunigung des ersten Rucks, oder die Zeitspanne bis zu dieser, aus der täglichen Applikationsarbeit meist nur ein vages Gefühl für „gute“ und „schlechte“ Werte vorhanden. Wie nachfolgend gezeigt wird, müssen den neu entwickelten objektiven Kriterien somit neben diesem auch aus einem weiteren Grund zumindest abschließend einmal subjektive Bewertungen gegenüber gestellt werden.

### 3.2.3 Validierung der objektiven Kriterien

Neben der Verifikation der objektiven Kennzahlen auf Stabilität und Signifikanz, müssen diese einer Prüfung auf Vollständigkeit unterzogen werden. Nur wenn alle ursprünglich subjektiv bewerteten Phänomene des physikalischen Prozesses durch die objektiven Kennzahlen abgebildet werden können, ist eine Vollständigkeit bestätigt und die objektive Methodik könnte die subjektive Vorgehensweise ersetzen. Vollständigkeit ist ein notwendig zu erfüllendes Kriterium an einen Satz objektiver Kennzahlen.

Um eine derartige Prüfung durchführen zu können, ist es entsprechend notwendig, in diesem Schritt subjektive Bewertungen an einem Fahrzeug vorzunehmen. Je nach Grad des angestrebten Erkenntnisgewinns sind die Messreihen wieder mit entsprechendem Aufwand verbunden. Um die im Sinne von Abschnitt 3.2.1 erwartbaren Grenzwerte der objektiven Kennzahlen überblicken zu können, müssen zumindest Grenzapplikationen erzeugt werden, an denen Versuche mit zugehörigen subjektiven Bewertungen durchgeführt werden. Die Zusammenhänge innerhalb des so aufgespannten Wertebereichs offenbaren sich auf dieser Basis allerdings nicht. Hierfür sind auch innerhalb des Wertebereichs entsprechende Messungen zu realisieren. Man könnte dabei dem Trugschluss aufsitzen, dass separate Variationen der Applikationsparameter von einem Ende des Wertebereichs zum anderen ausreichend sein sollten. Solche Kampagnen laufen zwar einmal komplett durch den Wertebereich der objektiven Kennzahlen, sind aber nicht für derlei Untersuchungen geeignet. Immerhin bewirkt der jeweils variierte Applikationsparameter eine Veränderung der objektiven Kennzahlen (wenn er keinen Einfluss hätte, wäre

er nicht ausgewählt worden), allerdings beinhaltet die eindimensional variierte Charakteristik der Messungen gleich mehrere Probleme. Geht man von einem erfahrenen Applikationsingenieur aus, so hat dieser eine klare Erwartung an das schrittweise veränderte Verhalten des Fahrzeugs, welche sich in seinen subjektiven Bewertungen widerspiegeln wird<sup>45</sup>. Bereits in Osgood „The measurement of meaning“ von 1952 ([82]) wird beschrieben, wie subjektive Bewertungen von ihrer Natur aus immer vergleichend sind [83]. Diese Einschränkung der kognitiven Fähigkeiten des Menschen hat in geordneten Versuchen einen erheblich größeren Einfluss, als in zufällig verteilten, da ein sich selbst verstärkender Drift auftreten kann. Dieser ist zudem mit dem zuvor angesprochenen Problem der forcierten Erwartungskonformität überlagert und deswegen nicht mit statistischen Mitteln im Datensatz korrigierbar.

Ideal wäre es, für diese Untersuchungen einen Testplan in den Ausgangsgrößen der Applikation erstellen zu können. Dafür sind explizit entweder bestimmte subjektive Bewertungen oder objektive Kennzahlen in einer raumfüllenden Variante<sup>46</sup> zu planen. Auf diese Weise wäre sichergestellt, dass der Datensatz für den interessanten Zusammenhang zwischen subjektiven Bewertungen und objektiven Kennzahlen keine dünn oder übermäßig dicht besiedelten Anteile enthält. Beide Aspekte wären für eine gute Modellierung dieses Zusammenhangs abträglich. Dass die tatsächliche Umsetzung dieses Ansatzes jedoch schwer fallen würde, ist leicht nachvollziehbar. Fahrbarkeitsversuche müssen in Einzelwiederholungen durchgeführt werden. Es wäre mit immensem Aufwand verbunden in iterativer Art und Weise die Applikationsparameter so abzustimmen, dass spezifisch geplante Kombinationen im Zielgrößenraum der subjektiven Bewertungen nach Tabelle 3.1 angenommen werden. Umso weniger denkbar ist eine Umsetzung im Raum der objektiven Kriterien nach Tabelle 3.3, da deren Umfang um einiges größer ist. Entsprechend bestehen zwei alternative Möglichkeiten solche Versuche durchzuführen. Die erste besteht darin, die Messungen auf Basis der Eingangsgrößen, also der Applikationsparameter selbst, zu planen und zu realisieren<sup>47</sup>. Als zweite Möglichkeit könnte man nicht auf exakt umgesetzte subjektive Bewertungen abstellen, sondern stattdessen auf prinzipielles subjektives Verhalten. Dies soll anhand von Abbildung 3.8

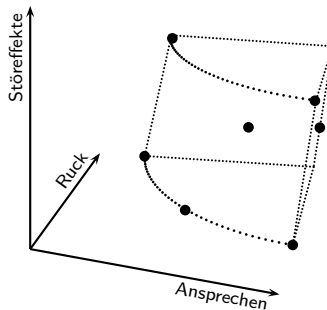
---

<sup>45</sup>In vielen Fällen enthalten die Daten plötzlich lineare Zusammenhänge, weil mit jedem Schritt der veränderten Eingangsgröße ebenfalls mit einem Schritt in die jeweilige Richtung der Ausgangsgröße (die subjektive Bewertung) fortgefahren wurde.

<sup>46</sup>Mögliche Methoden sind zum Beispiel nachfolgend in Abschnitt 5.2.3 ab S. 74 beschrieben.

<sup>47</sup>Führt man diese Messreihen durch und nimmt sowohl subjektive Bewertungen als auch objektive Kennzahlen auf, wäre theoretisch eine direkte Modellierung des Zusammenhangs zwischen den Applikationsparametern und den subjektiven Bewertungen möglich. Derartige Anwendungen mit dem Ziel der direkten Vorhersage der subjektiven Bewertungen sind patentrechtlich durch [97] geschützt. Obwohl dieses Patent mit Urteil vom 08.05.2015 [19] erstinstanzlich für nichtig erklärt wurde, soll hier explizit auf die Existenz des Patents im Zusammenhang mit diesem Anwendungsfall hingewiesen werden.

kurz erklärt werden. Die Darstellung zeigt einen dreidimensionalen Raum aus



**Abbildung 3.8:** Prinzipieller subjektiver Versuchsplan für Validierung der objektiven Kriterien

den beiden subjektiven Kriterien Ruck und Ansprechen nach Tabelle 3.1 in der Grundebene und der verallgemeinerten dritten Dimension der Störeffekte<sup>48</sup>. Es ist leicht nachvollziehbar, dass das realisierbare Verhalten entsprechend der beiden Größen in der Grundebene durch die illustrierte Pareto-Front begrenzt ist. Das dynamische Ansprechverhalten eines Fahrzeugs kann nicht beliebig erhöht werden, ohne dabei spürbare Komforteinbußen hinnehmen zu müssen. Die Störeffekte sind davon in weiten Bereichen unabhängig, wobei auch hier nicht alle möglichen Kombinationen realisierbar sein werden. Es ist zum Beispiel schwierig, bei einem sehr komfortabel abgestimmten ersten Ansprechen des Fahrzeugs trotzdem noch erhebliche Nachschwingungen zu applizieren, da diese in den allermeisten Fällen als Folge eines zu motivierten Umlegens des Antriebsstrangs entstehen. Die Abbildung zeigt außerdem die zu realisierenden Kombinationen des subjektiven Verhaltens im Raum der subjektiven Bewertungsgrößen. So ist ein dynamisches Ansprechen bei gutem sowie schlechtem Komfort, jeweils ohne störende Effekte, zu applizieren. Außerdem sind entsprechende Applikationen in den weiteren Grenzkombinationen der Darstellung sowie einige dazwischen liegende Realisierungen vorzubereiten. All dies muss zudem für unterschiedliche Betriebspunkte und Gänge wiederholt werden.

Hat man die Datensätze für die gerade angesprochenen Zielverhalten erzeugt, müssen durch unterschiedliche Personen entsprechende Messungen mit zugehörigen subjektiven Bewertungen durchgeführt werden. Hierbei ist darauf zu achten, dass die Versuchspläne gemäß der bereits in den Anfängen der statistischen Versuchsplanung entwickelten Grundsätze von R.A. Fisher, nämlich Randomisierung,

<sup>48</sup>Diese sind die übrigen vier Spalten der Tabelle 3.1 und wurden dort bereits als solche verallgemeinert eingeführt.

Wiederholung und Blockbildung [40, 100], aufgebaut sind. Genauer bedeutet dies, dass durch eine zufällige Verteilung der zu bewertenden Punkte ausgeschlossen wird, dass die bereits angesprochenen Probleme der Erwartungskonformität auftreten. Zudem müssen bestimmte Applikationen wiederholt angefahren werden. Es ist dabei nicht ausreichend, mehrmals hintereinander den gleichen Versuch zu wiederholen und entsprechende subjektive Bewertungen aufzunehmen. Mindestens ein Punkt des Versuchsplans muss verteilt über den gesamten Versuch mehrmals realisiert werden, um nachfolgend anhand dessen Aussagen zur Genauigkeit der Realisierung der Messkampagne treffen zu können. Zudem ist die so genannte Blockbildung zur Reduktion systematischer Fehler ein abschließender wichtiger Aspekt. Im Wesentlichen geht es darum, von außen nicht beeinflussbare Faktoren auszuschließen, die eine Verzerrung der Ergebnisse hervorrufen können [40, 100]. Wenn zum Beispiel anzunehmen ist, dass die Versuchskampagne nicht vollständig an einem Tag abgearbeitet werden kann, wäre es nicht förderlich, den gesamten Versuchsplan inklusive der Gänge zu randomisieren. Wie bereits früher angesprochen wurde, unterscheidet sich das dynamische Verhalten eines Fahrzeugs aufgrund unterschiedlicher Eigenfrequenzen in den verschiedenen Gängen erheblich. Das Ziel der Blockbildung besteht in diesem Fall darin, zusammengehörige Messungen eines Ganges an einem Tag und somit unter gleichen äußeren Wetterbedingungen durchführen zu können, also den Einfluss äußerer Faktoren zu eliminieren.

Sobald die entsprechenden Messreihen zur Verfügung stehen, sind zunächst einige Eingangsuntersuchungen notwendig. So sollte man zunächst prüfen, ob die subjektiven Bewertungen in sich konsistent sind. Eine Möglichkeit dies zu tun besteht darin, mittels einer Korrelations-Analyse deren Abhängigkeiten zu prüfen. Man mag zunächst denken, dass die subjektiven Kriterien alle unabhängig voneinander sein sollten, dies kann aber nicht im Allgemeinen angesetzt werden, da sie sich tatsächlich je nach Manöver aufgrund der physikalischen Zusammenhänge gegenseitig beeinflussen können. Dies soll mit der nachfolgenden Tabelle 3.5 kurz erklärt werden. Sie zeigt die Wahrscheinlichkeiten  $p_{ij}^{\text{subj}}$  mit denen die Korrelationskoeffizienten der subjektiven Bewertungen untereinander signifikant sind<sup>49</sup>, was durch kleine Werte des Eintrags  $p_{ij}^{\text{subj}}$  angezeigt wird. Zunächst soll hierbei Augenmerk auf die fünfte Zeile, also das Stocken, gelegt werden. Hier ist nur ein Eintrag signifikant klein, nämlich der für den Rückstoß. Hält man sich noch einmal Abbildung 3.4 mit der Definition der subjektiven Bewertungen von Seite 28 vor Augen, so beschreibt das Stocken eine zeitliche Unterbrechung zur an-

---

<sup>49</sup>Als Datensatz wurde ein im Eingangsgrößenraum der Applikationsparameter raumfüllend berechnetes Design mit 100 Punkten genutzt. Zu diesen Applikationen wurden entsprechende Messungen mit subjektiven Bewertungen aufgenommen. Die zugehörige Korrelationsmatrix findet sich im Anhang A.3.

$p_{ij}^{\text{subj,subj}}$	Ansprechen	Ruck	Zögern	Rückstoß	Stocken	Ruckeln
Ansprechen	1	1.11e-15	4.45e-13	1.48e-07	0.0027	0.0099
Ruck	1.11e-15	1	0.0005	4.21e-12	0.2280	4.53e-06
Zögern	4.45e-13	0.0005	1	0.0230	0.0633	0.8108
Rückstoß	1.48e-07	4.22e-12	0.0230	1	8.73e-05	8.37e-08
Stocken	0.0027	0.2280	0.0633	8.73e-05	1	0.0691
Ruckeln	0.0099	4.53e-06	0.8108	8.37e-08	0.0691	1

**Tabelle 3.5:** Matrix der Wahrscheinlichkeiten  $p_{ij}^{\text{subj}}$  für eine signifikante Abweichung der Korrelationskoeffizienten zw. den subjektiven Bewertungen von 0

schließenden Beschleunigung nach dem ersten Ruck, wobei diese prinzipbedingt nur eintreten kann wenn ein Rückstoß enthalten ist. Dass die Bewertung des Stockens unabhängig von allen anderen Bewertungen ist, ist somit naheliegend. Ähnlich verhält es sich mit der dritten Zeile des Zögerns. Dieses ist offenbar ausschließlich mit der Bewertung für das Ansprechverhalten korreliert. Auch dieser Zusammenhang ist, ebenso wie die Unabhängigkeit von den übrigen Bewertungsgrößen, physikalisch sinnvoll und somit erklärbar. Ohne die Zusammenhänge hier alle zur Gänze zu subsumieren, soll abschließend noch der Ruck in Zeile zwei kurz betrachtet werden. Bei großem Ruck wird das Ansprechverhalten in der Regel als sehr dynamisch bewertet. Außerdem ist davon auszugehen, dass bei starkem Ruck auch ein entsprechender Rückstoß auftreten und entsprechend bewertet wird. Beides führt in der Regel zu einem Nachruckeln, womit auch die Werte in Zeile zwei aus physikalischen Zusammenhängen erklärbar sind. Ein weiterer möglicher Test validiert die Verteilung der subjektiven Bewertungen. Zwar konnte [112] experimentell zeigen, dass in den meisten Fällen solcher Versuche mit Probanden eine Normalverteilung der Datenpunkte sehr gut angenommen werden kann, dies ist jedoch nicht a-priori anzunehmen.

Nachdem die subjektiven Bewertungen auf ihre intrinsische Plausibilität geprüft wurden, besteht der zweite und wichtigere Schritt darin, ihre Zusammenhänge zu den objektiven Kriterien zu prüfen. Hierfür kann man wieder eine Korrelations-Analyse durchführen. Die nachfolgende Tabelle 3.6 enthält analog zum vorange-

gangenen Schritt nun die Wahrscheinlichkeiten  $p_{ij}^{\text{obj,subj}}$ , mit denen die Korrelationskoeffizienten zwischen objektiven Kriterien zu subjektiven Bewertungen signifikant sind. Diese Tabelle ist für die hier betrachtete Zielstellung spaltenweise zu lesen, wobei eine Markierung der signifikanten Komponenten je Spalte vorgenommen wurde. Betrachtet man die markierten Elemente, und vergleicht zwischen den verschiedenen Spalten, so fällt direkt auf, dass diese in verschiedenen Größenordnungsbereichen liegen. In der Literatur werden Werte von  $p = 0.01 \dots 0.05$  als hoch signifikant bezeichnet [28, 75]. Mithin sind sämtliche Korrelationen des betrachteten Beispiels als signifikant anzusehen und können bestätigt werden. In der ersten, zweiten und vierten Spalte wurde ein Wert von  $10e-10$  als Signifikanzgrenze angesetzt. In der dritten Spalte ist die Unterscheidung klar durch die Größenunterschiede gegeben. Für die fünfte Spalte des Stockens wurde  $p = 0.01$  als Signifikanzgrenze gewählt. Weiterhin ist auffällig, dass  $t_{F,\text{Jend}}$  zu keiner subjektiven Bewertung einen signifikanten Zusammenhang aufweist. Es wäre zu vermuten gewesen, dass diese Größe wesentlich für das Ansprechverhalten ist, was anhand dieser Ergebnisse jedoch ausgeschlossen werden kann. Betrachtet man die Spalte des Ansprechens noch etwas genauer, fällt auf, dass  $t_{80\%}$  hier offensichtlich die wesentliche Komponente ist. Dies hat eine nicht direkt offensichtliche, aber wichtige Auswirkung auf die Durchführung sämtlicher weiterer Messungen, die in späteren Schritten der modellbasierten Applikation notwendig werden. So kann das objektive Kriterium  $t_{80\%}$  nur dann korrekt bestimmt werden, wenn die maximale Endbeschleunigung  $a_{\text{max}}$  überhaupt erreicht wird. Es genügt also nicht, nur eine bestimmte Drehzahldifferenz abzuwarten und dann die Messdatenaufnahme abubrechen, sondern ein Manöver muss tatsächlich bis zur Sättigung der Beschleunigung ausgefahren werden. Ein weiterer auffälliger Aspekt in Tabelle 3.6 besteht darin, dass die beiden Spalten der Hauptkomponenten des Ansprechens und des Rucks im Wesentlichen zu denselben objektiven Kriterien in Zusammenhang stehen. Um die Plausibilität dieser Auffälligkeit zu untermauern sei auf die nachfolgend gegebene reduzierte Tabelle der Korrelationskoeffizienten zwischen objektiven Kriterien und subjektiven Bewertungen verwiesen. In dieser sind nur die beiden Hauptkomponenten als Spalten sowie die in Tabelle 3.6 bereits zugehörig markierten Zeilen enthalten<sup>50</sup>. Man kann gut erkennen, wie die beiden Hauptkomponenten jeweils in entgegengesetztem Zusammenhang zu den objektiven Kriterien stehen, was das erwartete gegenläufige Verhalten auch im Raum der objektiven Kriterien untermauert. Auf die übrigen Zusammenhänge soll hier nicht weiter im Detail eingegangen werden, da diese unter Zuhilfenahme von Abbildung 3.6 (S. 31) und der erklärenden Tabelle 3.3 (S. 32) eingängig sind.

Eine abschließende Validierung besteht darin, die objektiven Kriterien in ihrem Zusammenhang zu den variierten Eingangsgrößen, also den Applikationsparametern,

---

<sup>50</sup>Die vollständige Tabelle der Korrelationskoeffizienten ist ebenfalls in Anhang A.3 gegeben.

$p_{ij}^{\text{obj,subj}}$	Ansprechen	Ruck	Zögern	Rückstoß	Stocken	Ruckeln
$\frac{da}{dt}^+_{FJmax}$	3.55e-18	1.92e-31	0.0001	2.17e-09	0.2737	7.32e-09
$t^+_{\max \frac{da}{dt}}$	6.81e-12	1.93e-06	0.0011	2.25e-05	0.2978	0.0100
$\frac{da}{dt}^-_{FJmax}$	5.42e-10	2.16e-27	0.1194	4.09e-14	0.7207	4.50e-10
$t^-_{\max \frac{da}{dt}}$	0.0001	6.17e-07	0.3173	2.26e-05	0.1800	0.0345
$\frac{da}{dt}_{FJav}$	1.08e-08	0.0004	2.04e-06	0.7327	0.0072	0.0067
$a_{FJpeak}$	1.50e-16	3.32e-22	1.99e-05	0.0003	0.0460	6.47e-07
$t_{FJpeak}$	2.90e-06	5.79e-06	0.9813	6.53e-10	0.0475	0.0059
$\Delta a_{FJkick}$	1.70e-06	3.97e-17	0.8911	1.28e-20	0.1207	1.19e-06
$\frac{da}{dt}_{FJkick}$	1.81e-07	4.72e-12	0.9088	1.58e-16	0.1725	4.57e-08
$\Delta t_{FJkick}$	6.72e-06	5.26e-14	0.3116	8.11e-05	0.2613	0.0001
$t_{FJend}$	0.7506	0.0039	0.9997	0.3322	0.7585	0.9686
$t_{80\%}$	1.55e-26	1.35e-19	1.19e-07	3.33e-06	0.7976	0.0024
$VDV_{FJ}$	1.57e-21	3.06e-30	6.40e-05	1.30e-08	0.2462	2.33e-08
$VDV_{Surge}$	6.05e-09	2.15e-10	0.0099	0.4594	0.0058	0.0004

**Tabelle 3.6:** Matrix der Wahrscheinlichkeiten  $p_{ij}^{\text{obj,subj}}$  für eine signifikante Abweichung der Korrelationskoeffizienten zwischen den subjektiven Bewertungen und objektiven Kriterien von 0

zu plausibilisieren. Dies könnte wiederum mit Hilfe einer Korrelation geschehen. Eine andere Möglichkeit besteht darin den Zusammenhang zwischen den Applikationsparametern und den objektiven Kriterien direkt zu modellieren<sup>51</sup>, was im Grunde einem lokalen DoE des Betriebspunkts an dem die jeweilig Validierung durchgeführt wurde, entspricht. Da genau diese Modelle später in Kapitel 5 noch speziell im Fokus stehen werden, soll an dieser Stelle nicht im Detail darauf eingegangen werden. Stattdessen wird ein weiteres Mal auf Anhang A.3 verwiesen, in dem die Ergebnisse der Modellierung in entsprechenden Bildern und statistischen

<sup>51</sup>Dies wäre auch für die vorherigen beiden Schritte möglich gewesen, es sollten aber beide Alternativen dargestellt werden.

$\rho_{ij}^{\text{obj,subj}}$	Ansprechen	Ruck
$\frac{da}{dt}_{FJ\text{max}}^+$	0.6936	-0.8363
$\frac{da}{dt}_{FJ\text{max}}^-$	-0.5212	0.8014
$a_{FJ\text{peak}}$	0.6730	-0.7568
$t_{80\%}$	-0.7952	0.7296
$\text{VDV}_{FJ}$	0.7395	-0.8275

**Tabelle 3.7:** Reduzierte Matrix der Korrelationskoeffizienten  $\rho_{ij}^{\text{obj,subj}}$  zwischen den subjektiven Hauptkomponenten und signifikanten objektiven Kriterien

Kennwerten dokumentiert sind.

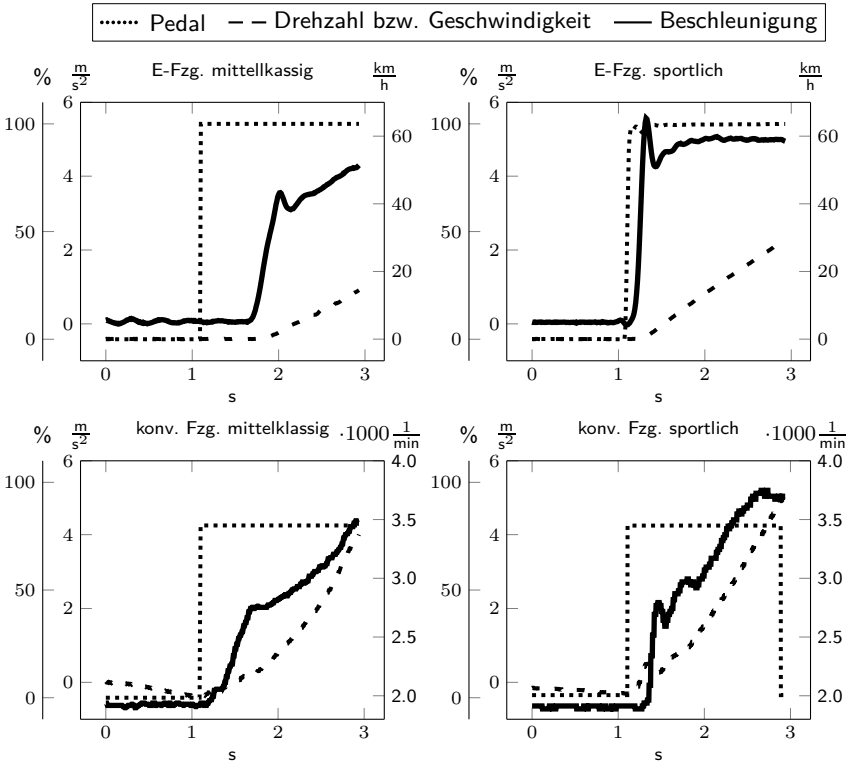
Es bleibt festzuhalten, dass die entwickelten objektiven Kriterien für das Tip-In-Manöver sämtliche zu Beginn gestellten Forderungen an Stabilität, Signifikanz, Plausibilität und Vollständigkeit erfüllen. Sie sind somit gut geeignet, die subjektiven Bewertungen zu ersetzen und auf ihrer Basis weitere Schritte der modellbasierten Applikation durchzuführen. Die hier aufgezeigte Methodik der Entwicklung solcher Kriterien ist universell und beliebig auf anderen Manöver übertragbar.

### 3.2.4 Übertragbarkeit der objektiven Kriterien auf andere Antriebskonzepte

Neben der Übertragbarkeit auf andere Manöver ist ein weiterer Aspekt natürlich die Anwendbarkeit dieser Kriterien auf andere Antriebskonzepte, wie sie immer weiter Verbreitung finden. Die nachfolgende Abbildung 3.9 zeigt das Ansprechverhalten von vier Fahrzeugen, je ein mittelklassiges sowie ein sportliches Fahrzeug mit Elektroantrieb bzw. konventioneller Ausstattung mit Verbrennungsmotor<sup>52</sup>. Vergleicht man die gezeigten Darstellungen, so ist gut zu erkennen, dass die grundsätzlichen Charakteristiken gleich sind<sup>53</sup>. Nach der sprunghaftigen Momentenanforderung durch die Fahrpedalverstellung ergibt sich zunächst eine Totzeit.

<sup>52</sup>Die Daten für die beiden Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor entsprechen denen aus Abbildung 3.5 auf Seite 29.

<sup>53</sup>Es sei darauf hingewiesen, dass Elektrofahrzeuge in der Regel nur einen Gang besitzen. Aus diesem Grund ist eine Betrachtung von Drehzahlen untypisch, weswegen hier für beide Fahrzeuge die Fahrzeuggeschwindigkeit angegeben ist.



**Abbildung 3.9:** Vergleich von Tip-In-Manövern von mittelklassigen und sportlichen Fahrzeugen mit Verbrennungs- bzw. Elektromotor

Danach erfolgt der bereits im Detail diskutierte erste Ruck, sowie eine anschließende Phase der Beschleunigung. Die jeweilige Ausprägung unterscheidet sich verständlicherweise je nach Motorisierung und Applikation, dies jedoch nur im Detail. So hat das sportliche Elektrofahrzeug die kürzeste Reaktionszeit da hier das Moment prinzipbedingt direkt aufgebaut werden kann. Auffällig ist die lange Reaktionszeit des mittelklassigen Elektrofahrzeugs, was hier auf eine entsprechende Applikation hindeutet. Dieses Verhalten würde durch das Kriterium  $t_{\max \frac{da}{dt}}^+$  erfasst werden. Die entwickelten objektiven Kriterien sind auf allen Fahrzeugen gleich anwendbar und bieten somit direkte Vergleichbarkeit, was ein weiterer Vorteil gegenüber subjektiver Bewertungen ist, welche aufgrund der unterschiedlichen Erwartungen an verschiedene Fahrzeugklassen dies nicht ohne weiteres zulassen.

Natürlich sind bei speziellen Hardwareauslegungen potentiell weitere Kriterien einzuführen, wenn dadurch auftretendes spezielles Verhalten abgedeckt werden soll. Ist ein Fahrzeug zum Beispiel mit der, zwar seltenen, aber im Markt befindlichen, sequentiellen Biturbo-Aufladung ausgestattet, so ist es naheliegend, das Zuschalten des zweiten Turboladers während des Ansprechens objektiv zu bewerten. Hierfür muss diese Situation zunächst zuverlässig erkannt und anschließend mit einem geeigneten Maß bewertet werden. Die Entwicklung und Absicherung solcher neuen Kriterien findet dann wieder nach der zuvor vorgestellten Methodik statt.

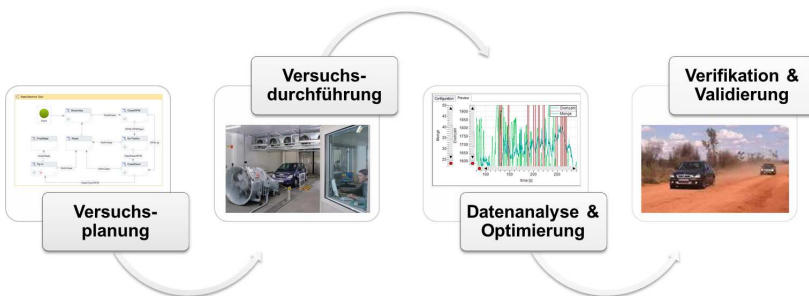
# Automatisierte Fahrzeugapplikation

Die umfangreiche Automatisierung in der Prüfstandsapplikation hat zu einer signifikanten Effizienzsteigerung der Versuchsdurchführung und der darauf aufbauenden Applikation geführt. Leistungsfähige Automatisierungssysteme erlauben einen weitgehend unbemannten Prüfstandsbetrieb und ermöglichen in Verbindung mit einem Automatic Calibration System (ACS) und durch Einsatz modellbasierter Verfahren eine teilautomatisierte Bedatung. Hierdurch können der Ressourceneinsatz minimiert und Entwicklungszeiten verkürzt werden.

Die Fahrzeugapplikation ist hingegen durch eine weitgehend manuelle Versuchsdurchführung sowie Offline-Tools zur Datenauswertung und Applikationsableitung gekennzeichnet. Trotz des Trends, Aufgaben der Fahrzeugapplikation an den Prüfstand zu verlagern, erscheint ein vollständiger Ersatz des Fahrversuchs unrealistisch. Entsprechend sind weitere Anstrengungen zur Effizienzsteigerung notwendig. Hierbei ist ein Ansatzpunkt, die bei der Prüfstandsapplikation erfolgreich eingesetzten Möglichkeiten der Automatisierung auf die Fahrzeugapplikation zu übertragen. Das nachfolgende Kapitel beleuchtet anhand des typischen Fahrzeugapplikationsprozesses, wo entsprechende Potenziale durch eine Adaption des vom Prüfstand bekannten Vorgehens gehoben werden können.

## 4.1 Modellbasierter Applikationsprozess

Die Applikationsarbeit im Versuchsträger wird auf absehbare Zeit entscheidender Bestandteil der Entwicklung neuer Fahrzeuge bleiben. Um die Anforderungen an Funktionalität und Qualität zu erfüllen, bedarf dies eines weiten Spektrums an unterschiedlichen Tests, Prüfprozeduren und Fahrversuchen. Hierbei sind parallele Arbeiten verschiedener Gewerke aufgrund immer enger werdender Entwicklungszeiträume unumgänglich. Neben den Vorteilen des permanenten Feedbacks und kontinuierlicher Abstimmung, bringt dies (aufgrund von Quereinflüssen der vorgenommenen Änderungen auf andere Funktionen) die Notwendigkeit mit sich, regelmäßig bestimmte Prozeduren zu wiederholen und so deren korrekte Funktionalität abzusichern. Aber auch während einer isolierten Applikationsaufgabe bedarf die Arbeit im Fahrzeug in der Regel mehrerer Wiederholungen des gleichen Versuchs, um iterativ die Applikation zu optimieren oder um - aufgrund der variierenden äußeren Randbedingungen - eine statistische Absicherung der Ergebnisse zu gewährleisten. Abbildung 4.1 zeigt schematisch die Bestandteile



**Abbildung 4.1:** Modellbasierter Applikationsprozess

eines modellbasierten Applikationsprozesses. Schritt 1 umfasst zunächst die systematische Planung der durchzuführenden experimentellen Untersuchungen am Versuchsträger. Diese Versuchsplanung umfasst die Beschreibung des generellen Ablaufs der Prüfprozedur, die Festlegung der im Test zu variierenden Parameter inklusive ihrer Variationsbereiche sowie die Bestimmung einer geeigneten Variationsstrategie. Die einzelnen Teilschritte sind je nach Applikationsaufgabe unterschiedlich stark ausgeprägt. Die Versuchsplanung vorab trägt aufgrund der damit möglichen Standardisierung wesentlich zur Effizienz- und Qualitätssteigerung in der Applikation bei, da fehlerhafte bzw. unvollständige Messkampagnen reduziert werden. Darüber hinaus ermöglicht die Anwendung statistischer Verfahren bei der

Festlegung der Variationsstrategie eine signifikante Reduktion des Aufwandes und die damit einhergehende Senkung der Kosten.

Schritt 3 umfasst die modellbasierte Messdatenauswertung und Optimierung der Applikation. In Abhängigkeit der Applikationsaufgabe kommen hierbei in unterschiedlichem Umfang und Ausprägung Modelle zum Einsatz. Prinzipiell kann zwischen (Teil-)Modellen des zu applizierenden Antriebsstrangs (z.B. Modelle für Emission oder der Regelstrecke) und (Teil-)Modellen der Steuerungssoftware<sup>54</sup> unterschieden werden. Schritt 3 ist der zentrale Baustein eines modellbasierten Applikationsprozesses. Da dieser Arbeitsschritt mitunter sehr aufwändig ist, wird er in der Regel unter Zuhilfenahme von entsprechenden Software-Tools durchgeführt. Durch die Verwendung geeigneter Modelle können die Auswirkungen von Änderungen an der Applikation bereits am Schreibtisch untersucht und systematisch optimiert werden, wodurch die notwendigen experimentellen Untersuchungen auf ein Minimum reduzierbar sind und die Applikation deutlich beschleunigt werden kann. In Schritt 4 erfolgt die Verifikation der Ergebnisse im realen Versuch. Hierfür gelten die bereits zu Schritt 2 gemachten Ausführungen analog.

## 4.2 Automatisierung als Schlüssel zur Effizienzsteigerung

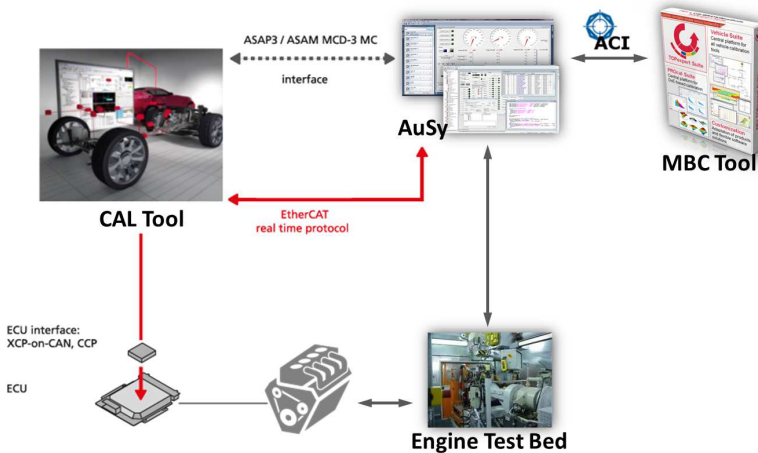
Ein wesentlicher Schlüssel zur Steigerung von Effektivität und Effizienz des gesamten Applikationsprozesses liegt in einer durchgängigen Automatisierung. Manuelle Fehlerquellen werden vermieden und sich wiederholende Aufgaben können standardisiert und effizient abgearbeitet werden. Der in Abbildung 4.1 beschriebene modellbasierte Applikationsprozess erlaubt dies nun in unterschiedlichen Ausbaustufen. In einer Basisvariante erfolgt nur die Versuchsdurchführung (Schritte 2 und 4) automatisiert. Versuchsplanung und Messdatenauswertung werden unter Verwendung geeigneter Tools manuell gesteuert. Eine erweiterte Variante koppelt die automatische Versuchsdurchführung an eine automatische Datenauswertung und Optimierung der Applikation. Diese Erweiterung erfordert die Beschreibung der zugrunde liegenden Applikationslogik in der ursprünglichen Versuchsplanung. Darüber hinaus ist eine Kopplung des Automatisierungssystems mit der Werkzeugkette für modellbasierte Applikation<sup>55</sup> notwendig. Sind diese Grundlagen geschaffen, so ist es naheliegend, in einer zusätzlichen Erweiterung die Automatisierung

---

<sup>54</sup>Zum Beispiel für ECU, Transmission Control Unit (TCU), Hybrid Control Unit (HCU), etc.

<sup>55</sup>Solche Werkzeuge werden meist unter dem Oberbegriff Model based Calibration (MBC)-Tools zusammengefasst.

der gesamten Prozesskette vorzunehmen und an die Datenauswertung ebenfalls automatisiert die Verifikation anzuschließen sowie iterative Rückwirkungen aus der Datenauswertung, Applikationsänderung und Verifikation auf die Planung neuer Versuche zu automatisieren. Diese letzte Variante führt zu einer vollautomatischen Applikation mit beträchtlichen Vorteilen für Applikationskosten und -zeit.



**Abbildung 4.2:** State-of-the-art Systemaufbau bei Aufgaben der Prüfstandsapplikation

Abbildung 4.2 zeigt vor dem Hintergrund der vorangegangenen Ausführungen das typische Setup bei der Prüfstandsapplikation. Es lässt sich feststellen, dass die Basisvariante einer automatisierten Versuchsdurchführung Stand der Technik ist. Die Erweiterungen (Varianten 2 und 3) sind - in unterschiedlichen Abstufungen - ebenfalls bereits im Einsatz bzw. Gegenstand aktueller Entwicklungen. Das AuSy betreibt den Prüfling sowie alle dafür notwendigen externen Stelleinrichtungen und Manipulatoren. Außerdem liegt es in der Verantwortung des AuSys alle notwendigen Messsysteme zu verwalten, anzusprechen, sowie deren produzierte Messdaten zu sammeln und strukturiert abzulegen. Der Zugriff auf die Applikationsparameter, wie auch auf die im Steuergerät anfallenden gemessenen und berechneten Signale, erfolgt über das Applikationssystem (in der Abbildung das CAL Tool). Zur Beeinflussung, Vermessung und Überwachung des Prüflings ist dementsprechend eine Schnittstelle zwischen AuSy und CAL Tool notwendig. Hierfür verfügen die Applikationssysteme in der Regel neben ihrem proprietären Application Programming Interface (API) über standardisierte Schnittstellen wie ASAP3 oder deren Weiterentwicklung ASAM MCD3 zur externen Automatisierung. Optional wird dieses Setup erweitert durch eine direkte Ankopplung der

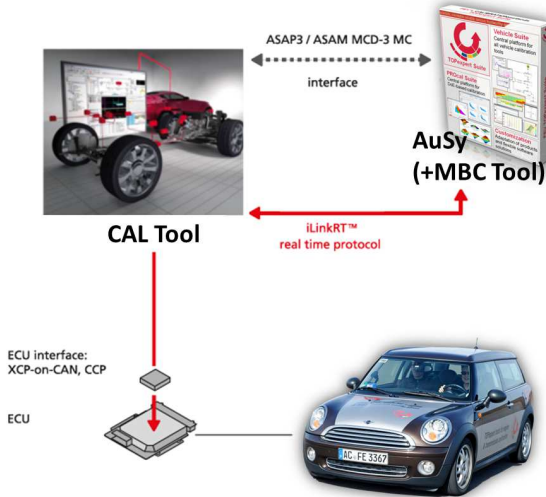
Software zur modellbasierten Applikation (MBC-Tool). Dieses erhält Messergebnisse vom AuSy und CAL Tool und gibt dynamisch angepasste Testvorgaben an das AuSy zurück. Für die Kommunikation zwischen MBC Tool und AuSy wird bei Prüfstandsauflagen häufig die standardisierte Automatic Calibration Interface (ACI)-Schnittstelle genutzt.

### 4.3 Automatisierung von Fahrversuchen

Vergleicht man dies nun mit der Fahrzeugapplikation, so lässt sich feststellen, dass der Automatisierungsgrad hier sehr gering ist. Die Beschreibung des Versuchsablaufs für die Fahrzeugapplikation ist aufgrund der vorliegenden komplexeren transienten Manöver im Allgemeinen aufwändiger als bei der Prüfstandsapplikation mit den dort überwiegenden stationären Untersuchungen. Versuchsdurchführung und Bedienung des CAL Tools erfolgen überwiegend manuell durch einen Testingenieur. Die aufgezeichneten Messergebnisse werden offline mithilfe des MBC-Tools verwertet. Im folgenden Abschnitt sollen Ansätze und Möglichkeiten zu einer Steigerung des Automatisierungsgrades der Fahrzeugapplikation aufgezeigt und diskutiert werden.

Die Durchführung eines Fahrzeugtests lässt sich in zwei Anteile aufspalten: zum einen die Realisierung eines bestimmten Fahrzustandes und zum anderen das Einstellen bestimmter Applikationsparameter. Das automatisierte plangetreue Einstellen der Applikationsparameter ist durch die bereits angesprochenen Automatisierungsschnittstellen der Applikationstools relativ einfach realisierbar. Konventionelle Lösungen zur automatisierten Realisierung eines bestimmten Fahrzustandes sind typischerweise zusätzliche Hardware wie zum Beispiel Fahrroboter oder Fahrzeugprüfstände, die schon seit geraumer Zeit zum Einsatz kommen [54]. Diese zusätzliche Hardware ist jedoch in der Regel kostenintensiv und birgt Probleme bei der Anpassung auf den jeweiligen Versuchsträger. Durch den stetig steigenden Anteil elektronischer Steuerungen im Fahrzeug eröffnet sich eine Alternative zur tatsächlichen physikalischen Manipulation von Fahrpedal, Bremspedal, Gangschaltung und Lenkrad durch softwareseitige Manipulation. Die zur Automatisierung notwendigen Aktuatoren können durch gezielte Änderungen von Steuergeräteparametern und Signalvertrimmung in gewünschter Weise angesprochen werden. Damit lässt sich auch die Realisierung eines Fahrzustands auf das Einstellen von Applikationsparametern also eine Automatisierung des Applikationstools zurückführen. Entsprechend ergibt sich das in Abbildung 4.3 dargestellte System-Setup. Dieser Ansatz hat im Vergleich zur Nutzung zusätzlicher Hardware den Vorteil, dass er deutlich flexibler und kostengünstiger ist. Ein Nachteil

hingegen ist, dass er sich auf die durch die Steuergerätesoftware vorgegebenen Manipulationsmöglichkeiten beschränkt, was (je nach Gegebenheiten des Systems) zum Beispiel einen Eingriff ins Brems- oder Lenksystem ausschließt. Da sich die überwiegende Zahl der Versuchsaufgaben in der Fahrzeugapplikation jedoch auf den Antriebsstrang im angetriebenen Zustand fokussieren, stellt dies keine große Einschränkung dar. Wird (im Gegensatz zur Prüfstandsapplikation) die Fern-



**Abbildung 4.3:** Systemaufbau für Fahrzeugautomatisierung mittels per Software realisierter Verstellung

steuerung des CAL Tools auch zur Automatisierung des Fahrzustandes genutzt, kommt der Kommunikationsschnittstelle zum CAL Tool eine entscheidende Bedeutung zu. Insbesondere vor dem Hintergrund stark transienter Manöver ist die Kommunikationsgeschwindigkeit entscheidend. Grundsätzlich kann man hierbei zwei Anwendungsfälle unterscheiden. Auf der einen Seite besteht die Möglichkeit einer auf Events basierenden, also eher unregelmäßigen, Verstellung von Applikationsparametern beim Eintreten bestimmter Fahrzustandsbedingungen. Als Beispiel sei hier etwa das Auslösen eines Pedalsprungs beim Erreichen einer vorbestimmten Drehzahl genannt. In solchen Szenarien sind die gängigen Schnittstellen ASAP3 bzw. MCD3 ausreichend. Die hierbei auftretenden Latenzzeiten lassen sich durch entsprechende Vorhaltezeiten (z.B. Eventdefinition bereits  $x \frac{1}{\text{min}}$  vor Erreichen der eigentlichen Zieldrehzahl) kompensieren. Ein zweiter, komplexerer, Anwendungsfall besteht in einer kontinuierlichen Verstellung von Applikationsparametern. Dies ist unter anderem zur Trajektorienfolge oder zur Einregelung von Fahrzuständen notwendig. Auf diese Weise besteht die Möglichkeit, auffällige Abschnitte aus ei-

ner Messdatei zu wiederholen, die zum Beispiel während einer Testfahrt erzeugt wurde. Durch eine zeitkontinuierlich exakte Reproduktion der durch die Messdaten beschriebenen Situation können dann weitere Analysen durchgeführt und eventuell notwendige Applikationsänderungen vorgenommen werden. Dieser zweite Anwendungsfall hat im Vergleich zur eventbasierten Nutzung eine wesentlich höhere Anforderung an die Kommunikationsgeschwindigkeit zwischen Automatisierungs- und Applikations-Tool sowie anfallende Laufzeiten. Vor allem deren Schwankung auf Nicht-Echtzeit-Systemen (wie sie in der Regel im Applikationsumfeld Anwendung finden) stellt ein wesentlich größeres Problem dar. Zur exakten Reproduktion sind Schwankungen der Laufzeit nur in sehr geringem Maße akzeptabel, da sonst auf diesem Weg ungewolltes dynamisches Verhalten in das Fahrzeug und das zu realisierende Manöver eingebracht wird. Die bisher üblichen Schnittstellen ASAP3 und MCD3 haben sich im Rahmen dieser Arbeit für solche Anwendungszwecke als ungeeignet herausgestellt, da der Overhead zu groß ist, was zu signifikanten Latenzzeiten bei der Verstellung führt. Schnelle Schnittstellen zur Datenübertragung wie das iLinkRT stellen hier eine aussichtsreiche Alternative dar und bieten einen signifikanten Geschwindigkeitsvorteil. So benötigt eine Verstellanforderung eines 16x16-Kennfeldes mittels MCD3 ca. 150 ms, während dieselbe Aufgabe mittels iLinkRT in 5 ms realisiert werden kann.

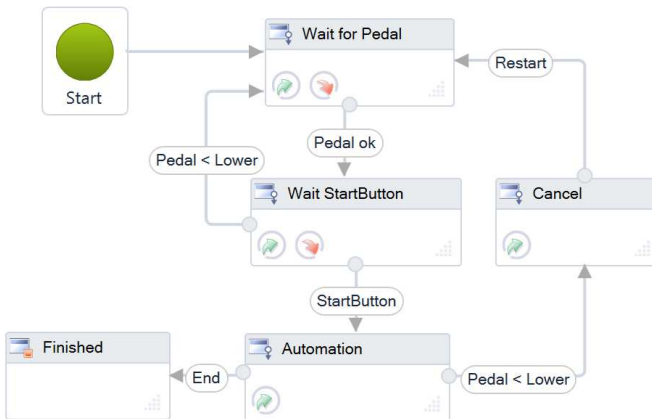
Neben der schnellen Schnittstelle zur Automatisierung des CAL Tools benötigt die Automatisierung von Applikationsaufgaben im Fahrzeug eine Umgebung zur Spezifikation und Ablaufsteuerung des Manövers. Diese müssen durch den Applikateur frei definierbar sein, um die Vielfalt unterschiedlicher Aufgaben abbilden zu können. Aus Gründen einfacherer Bedienung wurde im Rahmen dieser Arbeit für die Beschreibung der Testabläufe ein Werkzeug zur grafischen Programmierung entwickelt<sup>56</sup>. Eine Festlegung auf diese Art hat den Vorteil, dass auch mit der Programmierung unerfahrene Anwender schnell und komfortabel zu den angestrebten Ergebnissen kommen. In weiterführenden Untersuchungen hat sich dabei gezeigt, dass eine zustandsbasierte Beschreibung des zu automatisierenden Fahrmanövers für Applikationsingenieure wesentliche Vorteile mit sich bringt und sehr intuitiv ist. Dies liegt daran, dass sie der natürlichen sprachlichen Beschreibungsform entspricht, die in der Art „Beschleunige bei konstantem Pedal bis eine gewisse Drehzahl erreicht ist.“, „Sobald die Tip-In Drehzahl erreicht ist, betätige das Fahrpedal.“ oder „Wenn die Katalysator-Temperatur einen Grenzwert übersteigt, muss ...“ gestaltet ist. Die Struktur dieser Aussagen ist leicht erkennbar und meist in der Form „Tue etwas bis eine Bedingung erfüllt ist, dann tue etwas anderes.“. Zustandsmaschinen erleichtern die Abbildung solcher Zusammenhänge um ein Vielfaches und werden deswegen bevorzugt im Vergleich zu

---

<sup>56</sup>Die generelle Idee der grafischen Programmierung ist seit Langem zur Beschreibung von Mess- und Prüfaufgaben etabliert [4].

Flussdiagrammen oder anderen sequentiellen Beschreibungsformen eingesetzt, da dort zum Beispiel die Überprüfung von aktuellen Signalzuständen in aufwändigen Schleifenkonstruktionen realisiert werden müsste.

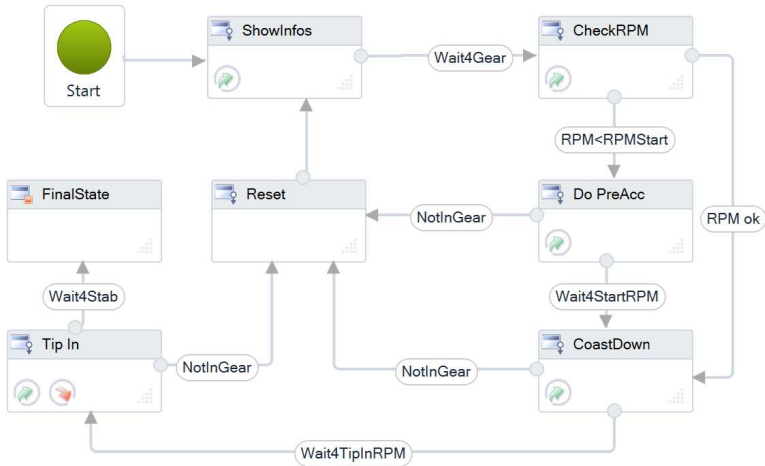
Für die Erstellung solcher Zustandsmaschinen hat sich ein Top-Down-Ansatz am geeignetsten herausgestellt. Das bedeutet, dass die zu beschreibenden Versuche in mehreren Automatisierungsebenen realisiert werden. Die nachfolgende Abbildung 4.4 zeigt hierzu beispielhaft die oberste Ebene der Automatisierung eines Tip-In-Manövers. Diese oberste Zustandsmaschine beinhaltet nur wenige Zustände und enthält lediglich Bedingungen für den Start und die Unterbrechung der Automatisierung sowie notwendige Sicherheitsszenarien. Die Automatisierung des Manövers beginnt in diesem Fall, nachdem der Fahrer das Fahrpedal über eine definierte Mindestschwelle betätigt und mittels eines Start-Knopfes bestätigt hat, dass er für die Übernahme des Fahrzeugs durch das Automatisierungswerkzeug bereit ist. Sobald der Fahrer den Fuß vom Fahrpedal nimmt, wird die Automatisierung unterbrochen. Die zweite Ebene der Automatisierung wird durch die



**Abbildung 4.4:** Zustandsmaschine für das Tip-In-Manöver: Sicherheitsebene der Automatisierung im Fahrzeug

tatsächliche Beschreibung des Manövers gebildet und ist in Abbildung 4.5 zu sehen. Zunächst wird darauf gewartet bis der benötigte Gang, in dem das Manöver gefahren werden soll, eingelegt ist. Sobald dies passiert ist, wird die Kontrolle über das Fahrpedal übernommen und, wenn nötig (*CheckRPM*), zunächst automatisch auf die Tip-In Startdrehzahl beschleunigt (*Do PreAcc*). Nachdem diese erreicht wurde, startet innerhalb des Zustandes *CoastDown* die Aufzeichnung der Messdaten und die Fahrpedalanforderung wird auf 0 gesetzt. In der anschließenden

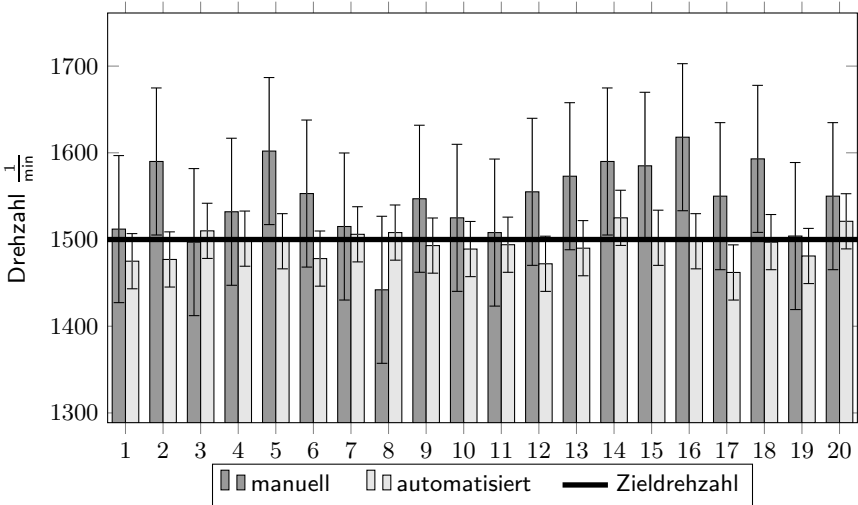
den Transition *Wait4TipInRPM* wartet das System nun, bis das Fahrzeug auf die Tip-In Drehzahl verzögert hat. Sobald diese erreicht ist, geschieht der automatisierte Pedalsprung. Nach Eintreten eines Abbruchkriteriums (z.B. Zeitdauer der Beschleunigung oder Erreichen der Enddrehzahl) werden Beschleunigung sowie Messung beendet.



**Abbildung 4.5:** Zustandsmaschine für das Tip-In-Manöver: Ebene zur vollautomatischen Tip-In-Realisierung

Durch ein umfangreiches Set an Standardblöcken, die speziell auf die Nutzung im Applikationsumfeld ausgelegt sind, wird die Erstellung von Prüfprozeduren erheblich erleichtert. Neben der Interaktion mit Kalibrierparametern und Messkanälen, besteht zum Beispiel die Möglichkeit zur Verarbeitung von externen Messplandateien, zum Aufrufen von externen Schnittstellen oder zur Interaktion mit anwendereigenen kompilierten Simulinkmodellen. Die Automatisierung von Mess- und Kalibrieraufgaben auf dem Fahrzeugrollenprüfstand oder auf der Straße ist damit in kurzer Zeit realisierbar. Die Workflow Engine erlaubt die Nutzung und dynamische Verarbeitung von Variablen zur Laufzeit des Versuchs. Dies ermöglicht es, entsprechende Prozeduren so generisch aufzusetzen, dass der Übertrag auf eine neue Motorsteuerung mit anderer Softwarestruktur leicht durch den Austausch von Signalnamen realisierbar ist.

Um die Vorteile der Automatisierung zu quantifizieren, wird das bereits mehrfach als Beispiel herangezogene Tip-In-Manöver aufgegriffen. Die nachfolgende Abbildung 4.6 zeigt die Ergebnisse von Untersuchungen, bei denen erfahrene Test-



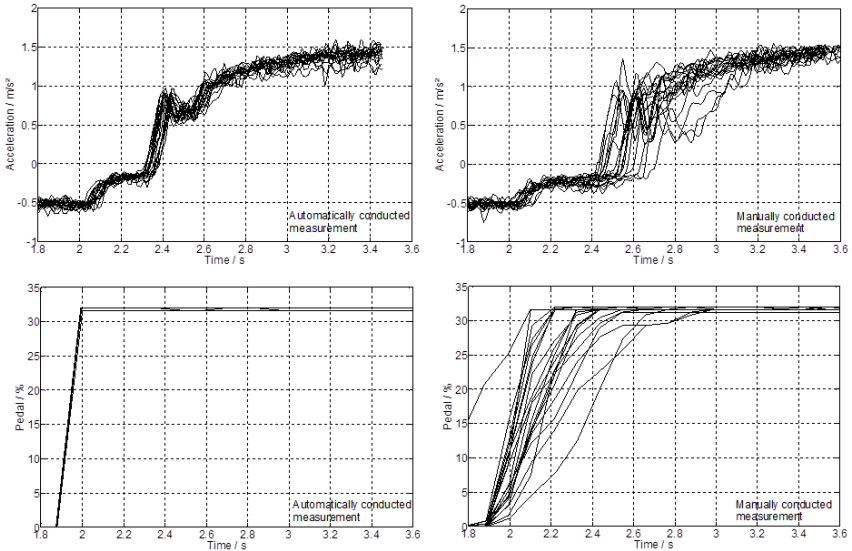
**Abbildung 4.6:** Vergleich der erzielten Tip-In Drehzahl bei manueller und automatisierter Durchführung mit  $2\sigma$ -Bereich für beide Messreihen

fahrer das besagte Manöver 20 Mal wiederholen mussten. Ziel war es, zu vergleichen, wie exakt die Zieldrehzahl von  $1500 \frac{1}{\text{min}}$  realisiert werden kann. Für die Automatisierung wurde als Kommunikationsschnittstelle zum Applikationssystem MCD3 eingesetzt. Zusätzlich wurden für die automatisierten Versuche deutlich unerfahrenere Testfahrer eingesetzt. Man erkennt die signifikant höhere Reproduziergenauigkeit der automatisierten Durchführung. Der Mittelwert ( $1493 \frac{1}{\text{min}}$ ) und die Standardabweichung ( $\pm 15.9 \frac{1}{\text{min}}$ ) der erzielten Tip-In-Drehzahl der automatisiert gefahrenen Messungen sind deutlich näher an der Zieldrehzahl, als die manuellen Messungen ( $1547 \pm 42.4 \frac{1}{\text{min}}$ ). Bei genauer Betrachtung der Darstellung ist zu erkennen, dass der Mittelwert der automatisiert gefahrenen Messungen (dunkel) leicht unter der Zieldrehzahl von  $1500 \frac{1}{\text{min}}$  liegt. Dies ist in den bereits angesprochenen Kommunikationslaufzeiten begründet. Bei den manuell gefahrenen Manövern fällt auf, dass diese mit wenigen Ausnahmen zu früh (teilweise bis zu  $100 \frac{1}{\text{min}}$ ) ausgelöst wurden. Abbildung 4.7 zeigt für die zuvor betrachteten Versuche eine Überlagerung aller Messungen. In den oberen beiden Bildern sind die Beschleunigungsmessungen und in den unteren die Pedalverläufe nebeneinander dargestellt. Als numerisches Maß für die Reproduziergenauigkeit wurde der Kreuzkorrelationskoeffizient der Beschleunigungsmessungen gemäß

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T_F \rightarrow \infty} \frac{1}{T_F} \int_{-\frac{T_F}{2}}^{\frac{T_F}{2}} x(t) \cdot y(t - \tau) dt \quad (4.1)$$

### 4.3 Automatisierung von Fahrversuchen

berechnet, wobei  $x(t)$  und  $y(t)$  die beiden zu korrelierenden Signale sind und  $T_F$  die Dauer des betrachteten Zeitintervalls bezeichnet. Werte von  $0.0936 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^4}$  für manuell und  $0.0556 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^4}$  für die automatisiert durchgeführten Versuche zeigen den Unterschied in der inneren Ähnlichkeit der beiden Messkampagnen. Der Vorteil der höheren Reproduzierbarkeit der automatisierten Versuche zeigt sich deutlich



**Abbildung 4.7:** Vergleich von Beschleunigung und Pedalverlauf in 20 wiederholten Tip-In-Messungen bei automatisierter (links) und manueller (rechts) Durchführung

in den Beschleunigungsverläufen (oberes linkes Teilbild). Die Beschleunigung als Antwort des Antriebsstrangs auf den Tip-In hat einen wesentlichen Einfluss auf die Fahrbarkeitsbewertung des Fahrzeugs. Die besser reproduzierbaren Versuche führen damit letztendlich zu einer besser wiederholbaren sowie stabileren Fahrbarkeitsbewertung und damit höherer Applikationsqualität. Ein weiterer Vorteil der Automatisierung ist, dass auch weniger erfahrene Testfahrer qualitativ hochwertige Messungen produzieren können.

## 4.4 Aspekte zur softwaretechnischen Umsetzung der Automatisierung

Die hier vorliegende Automatisierungslösung wurde auf Basis der Programmiersprache C#.NET 4.5 entwickelt und ist somit für Windows®-Systeme vorgesehen. Dies impliziert einen entscheidenden Faktor, der bereits kurz angeführt wurde, aber noch einmal herausgestellt werden soll: Das System ist nicht echtzeitfähig. Diese Einschränkung wird hier im Vergleich zu Automatisierungssystemen für Prüfstände explizit betont, um die abgedeckten Aufgaben abgrenzen zu können. So wird die in dieser Arbeit betrachtete Form der Automatisierung nicht dafür zuständig sein, für die Sicherheit auf einer dem Motor nahen oder gar internen Ebene zu sorgen. Für solche Anwendungen sind die realisierbaren Reaktionszeiten aufgrund der zeitlich nicht determinierten Arbeitsweise von Windows® prinzipbedingt zu lang. Natürlich sind motorferne Mechanismen der Überwachung und Sicherung desselben realisierbar. Hierbei sei zum Beispiel an überhöhte Temperaturen im Katalysator, mittlere Spitzendrücke oder ähnliche Mechanismen, auf die mit längeren Antwortzeiten reagiert werden kann, gedacht.

Entsprechend der Kriterien zur Bewertung der Qualität von Software [2, 10]<sup>57</sup> sollte diese die wesentlichen Aspekte Funktionalität, Zuverlässigkeit, Effizienz, Benutzbarkeit, Übertragbarkeit und Änderbarkeit erfüllen. Die ersten drei Punkte sind sofort einleuchtend und bedürfen für ein Automatisierungssystem keiner weiteren Erklärung. Dass mit dem Mittel der Workflows entscheidende Maßnahmen zur Erleichterung der Benutzbarkeit ergriffen wurden, ist vorangehend bereits ausführlich erläutert worden. Auch eine Übertragbarkeit im Sinne anderer Hardware ist für Zielsysteme mit Windows®-Betriebssystem sichergestellt. Obwohl eine spezielle Kompilierung unter Mono und somit eine Nutzung unter Linux theoretisch möglich wäre, wurde dies hier nicht in die Praxis umgesetzt. Schaut man zum Thema der Übertragbarkeit außerdem auf die erstellten Abläufe zur Applikation und Automatisierung, so wird durch den Autor dieser Arbeit aktuell im Rahmen der Association for Standardisation of Automation and Measuring Systems (ASAM) an einer Standardisierung der Workflow-Beschreibungssprache federführend gearbeitet<sup>58</sup>. Die Abläufe können damit später zwischen den Produkten verschiedener Hersteller ausgetauscht werden.

---

<sup>57</sup>Die Normenreihe ISO250xx ersetzt die Vorgänger ISO/IEC 9126 und ISO/IEC 14598. Sie umfasst zudem die DIN-Norm DIN 66272, welche 2006 ersatzlos zurückgezogen wurde.

<sup>58</sup>Das Projekt begann im Oktober 2014 und sollte laut Antrag im Juni 2015 abgeschlossen sein. Die aktuellen Arbeiten lassen aber eine Verlängerung prognostizieren. Weitere Informationen dazu sind unter [4] zu erhalten.

Der letzte wesentliche Aspekt ist die so genannte Änderbarkeit. Dieser wurde bisher noch nicht betrachtet und soll hier mit einigen Erläuterungen versehen werden. Zunächst ist die Frage zu stellen, welche Teile einer solchen Software überhaupt regelmäßiger Änderungen bedarf. Im Falle von auftretenden Fehlern ist es eine einleuchtende Forderung, diese effizient beheben zu können. Zudem existieren verschiedene Komponenten, für die eine Änderung oder Erweiterung so in die Entwicklung der Software eingeplant werden muss, dass diese später leicht umgesetzt werden kann. Die nachfolgende Abbildung 4.8 zeigt schematisch den Aufbau der entwickelten Automatisierungssoftware. Hierin wurde spezielles Gewicht auf die Schnittstellen und Komponenten gelegt, die mit Fokus auf dieses Qualitätskriterium entwickelt wurden. Man identifiziert im Wesentlichen die folgenden Komponentengruppen, nämlich Schnittstellen

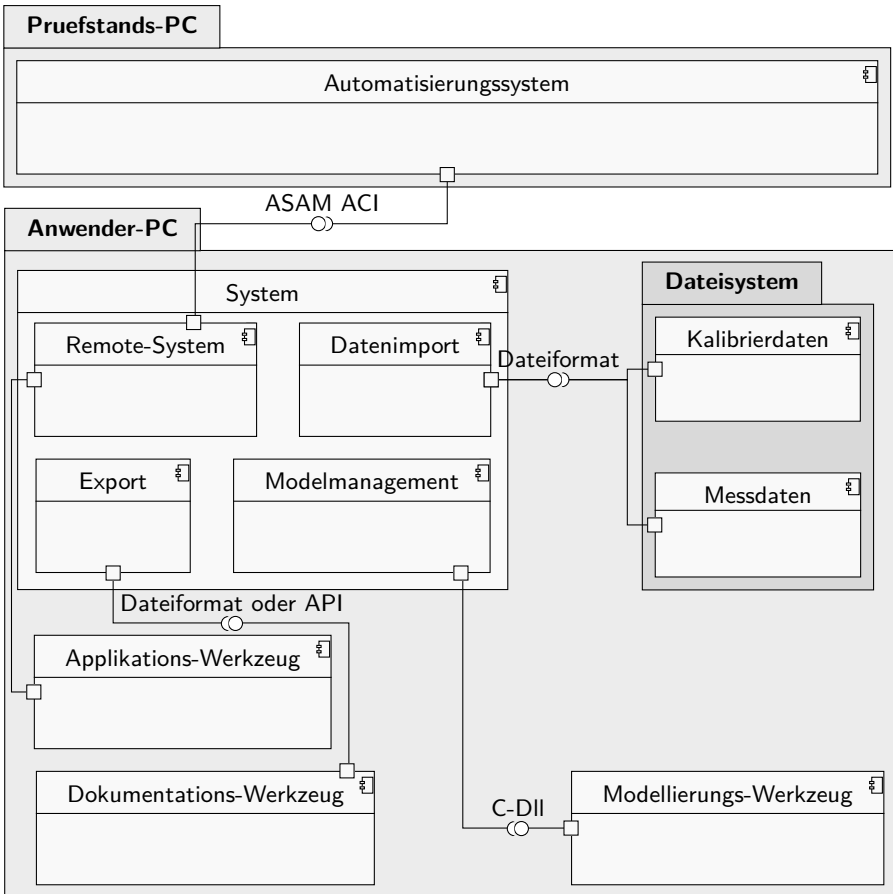
- zum Importieren und Exportieren von Mess- und Kalibrierdaten,
- zur Kommunikation mit Messsystemen,
- zur Einbindung bzw. Erstellung von Prozeduren zur Applikation bzw. Automatisierung,
- zur Einbindung externer Algorithmen<sup>59</sup> sowie
- zur Dokumentation und Definition von Reports.

Mess- und Kalibrierdaten sind die elementaren Arbeitsergebnisse von Applikationsingenieuren. Sie müssen während ihrer Arbeit häufig zwischen verschiedenen Programmen in Form von Dateien ausgetauscht werden, wobei verschiedene Formate Anwendung finden. Mithin ist ein essenzieller Erweiterungspunkt, so viele Formate wie möglich zu unterstützen und so die Abläufe zu erleichtern. Aus softwaretechnischem Blickwinkel sind die Import- und Export-Routinen so zu gestalten, dass sie sich zur Datenschicht hin identisch verhalten, um Entwicklungsaufwand zu sparen. Als Messsysteme werden in der obigen Aufzählung sowohl die bereits mehrfach angesprochenen Applikationswerkzeuge, als auch zusätzliche Hardware zur Erfassung von Messdaten verstanden. Es ist selbstverständlich, dass auch hier verschiedenste Systeme am Markt und in Anwendung sind. Die meisten der Applikationswerkzeuge unterstützen Standards (wie die bereits mehrfach angesprochene ASAM MCD3 Schnittstelle) zur Fernsteuerung, Messdatenerfassung und Verstellung der Kalibrierparameter. Auch hier ist es ratsam, ein intern vereinheitlichtes Interface für die Integration solcher Systeme zu definieren und dieses

---

<sup>59</sup>Hierbei ist es im Sinne des Entwicklerteams, diese Algorithmen zur Auswertung von Daten auch zur Nutzung innerhalb der Applikations- und Automatisierungsprozeduren verwendbar zu machen.

jeweils für ein Messsystem spezifisch zu implementieren. Zentraler Aspekt einer Automatisierungslösung ist deren Anwendbarkeit für unterschiedlichste Aufgaben und Anwendungsfälle. Dem Anwender die Möglichkeit zu geben, die benötigten Prozeduren auf der Basis von Grundelementen, den sogenannten Aktivitäten, zu entwickeln, stellt den Schwerpunkt des Systems dar. Es ist somit naheliegend, dass eine Erweiterung des Umfangs an Aktivitäten leicht möglich sein muss. So können



**Abbildung 4.8:** Schema-Darstellung der Automatisierungssoftware mit Schnittstellen und Komponenten deren Erweiterbarkeit bzw. Änderbarkeit speziell in Betracht gezogen werden muss

im Laufe der Anwendung zum Beispiel domänenspezifische Aktivitäten erstellt

werden, die die Nutzung des Systems zusätzlich erleichtern. Unter Umständen möchte sogar der Anwender seine eigenen Meta-Aktivitäten konstruieren und wiederverwenden.

Ein weiterer, vor allem für den Anwender und Kunden eines solchen Systems bedeutender, Gesichtspunkt, ist der Schutz des eigenen Engineering-Know-How's. So kann die vorgestellte Automatisierungslösung selbst immer nur ein Rahmenwerk für die tatsächliche Anwendung in einer speziellen Domäne bilden und muss als solches allgemein konzipiert und gehalten werden. Das eigene schätzenswerte Wissen in Form von bereits bestehenden Algorithmen trotzdem integrieren zu können und gleichzeitig in eigener Hoheit zu behalten, ist bei der Konzeptionierung einer Kundenlösung nicht zu vernachlässigen. Im vorliegenden Fall wurde dem durch die Schaffung einer Schnittstelle zu MATLAB Rechnung getragen. Mit der Integration dieses im Ingenieurwesen sehr weit verbreiteten Werkzeugs zur Entwicklung von Algorithmen wird ein substantieller Beitrag zur Flexibilität über die hier im Detail besprochene Domäne der Fahrbarkeitsapplikation hinaus geleistet. Mit den bereits herausgestellten Möglichkeiten zur Einbindung beliebiger anderer Messsysteme ist einer Anwendung außerhalb der Applikation oder sogar außerhalb der Fahrzeugentwicklung der Grundstein gelegt.

Auch der letzte Punkt der obigen Auflistung, nämlich die Dokumentation und das Reporting, sind nicht von unbedeutender Natur und werden mit großer Wahrscheinlichkeit in Zukunft noch mehr Gewicht erlangen. Wo in der Softwareentwicklung<sup>60</sup> streng definierte Prozesse nach standardisierten Modellen gelten, in denen sämtliche Änderungen von ihren Anforderungen über die Entwicklung bis hin zu Test und Validierung nachvollziehbar dokumentiert werden müssen, gibt es in der Applikation keine vergleichbaren Vorgehensweisen oder Vorgaben. Es ist festzustellen, dass sich ein Großteil der Probleme an Fahrzeugen auf fehlerhafte Elektronik und somit zum Teil auf fehlerhafte Software und Kalibrierung zurückführen lassen. Es kann also jetzt schon vermutet werden, dass eine Umstellung der Arbeitsweisen und Prozesse im Bereich der Fahrzeugapplikation, hin zu vollständig dokumentierten und nachvollziehbaren Arbeitsergebnissen, nur eine Frage der Zeit ist. Auch hier weist die vorgestellte Arbeitsweise mit standardisierten Prozeduren auf Basis des Workflow-Gedankens jetzt bereits eine Richtung, mit der solche Szenarien leicht umsetzbar sind. Der Workflow ist dabei bereits selbst die Dokumentation der enthaltenen Arbeitsanweisung, kann zudem automatisch abgearbeitet werden und bildet den ersten Anteil einer vollständigen Berichterstattung. Hierfür werden in vielen Fällen Standard-Programme, wie die der Microsoft® Office Familie, verwendet. Häufig sind die Ergebnisse dort in ebenso

---

<sup>60</sup>Hier wird neben der Anwendersoftware, so wie sie in diesem Fall vorliegt, vor allem auf die Entwicklung der Echtzeit-Software für xCUs abgestellt.

standardisierte Vorlagen einzutragen und zu beschreiben. Es ist daher naheliegend, eine Schnittstelle zu genau diesen Programmen zu schaffen und die Möglichkeit zu liefern, Grafiken und andere Ergebnisse in die beschriebenen Vorlagen direkt hinein exportieren zu können.

# Fahrbarkeitsapplikation mit Design of Experiment

Die stetig steigende Anzahl an abzustimmenden Parametern einer ECU verbietet heutzutage eine rein manuelle Vorgehensweise der Kalibrierung, da dies mit unverhältnismäßig großem Aufwand verbunden wäre. Weil zudem immer mehr Fahrzeughersteller Teile ihrer Entwicklung von Plattformstrategien auf „Baukasten“-Konzepte umstellen, ist aufgrund der verschiedenen Hardwarekombinationen außerdem eine kontinuierlich wachsende Variantenvielfalt zu verzeichnen. Diese beiden Aspekte lassen den Aufwand vor allem für übergreifende Aufgabengebiete, wie das der Fahrbarkeitsapplikation, drastisch ansteigen. Im nachfolgenden Kapitel wird dargestellt, wie die bereits in der Motorenapplikation erfolgreich eingesetzten modellbasierten Methoden und Vorgehensweisen adaptiert werden, um auch im Bereich der Fahrbarkeitsapplikation zu entscheidenden Vorteilen und Einsparungen zu führen. Das Kapitel bildet den dritten zentralen Bestandteil dieser Arbeit und beschreibt weiterführend am Beispiel der Tip-In-Applikation detailliert, in welchen Schritten und unter Beachtung welcher Gesichtspunkte die Methodik des Design of Experiment erfolgreich eingesetzt werden kann.

## 5.1 Funktionsweise der Lastschlagdämpfung und ihre traditionelle Applikationsmethodik

Ein bedeutender Aspekt der applikativen Abstimmung des Fahrbarkeitsverhaltens bezieht sich auf die Dynamik des Fahrzeugs in Längsrichtung. Die dabei am häufigsten auftretenden Manöver sind Momentenanforderungen mit daraus folgender Beschleunigung des Fahrzeugs, sowie Momentenreduktion mit entsprechend folgender Verzögerung. Da die erste Situation mit einer Betätigung des Fahrpedals verbunden ist, wird sie im Applikationsumfeld in der Regel als Tip-In bezeichnet, während die umgekehrte Prozedur typischerweise Tip-Out genannt wird. Je nach Ausgangssituation vor dem entsprechenden Manöver sind vor allem diejenigen Ausprägungen von Interesse, bei denen ein Vorzeichenwechsel des Antriebsmoments stattfindet. Die Übergänge

- nicht angetriebener Zustand  $\xrightarrow{\text{Tip-In}}$  angetriebener Zustand, sowie
- angetriebener Zustand  $\xrightarrow{\text{Tip-Out}}$  nicht angetriebener Zustand

bilden also einen entscheidenden Anteil der Fahrzeugcharakteristik. Hierbei finden jeweils Änderungen des Vorspannungszustands des Antriebsstrangs und der entsprechenden Lager statt, welche zu unangenehm empfundenen Schwingungsreaktionen führen können. Wenn diese Vorzeichenänderung der Momentenanforderung in einem sehr kurzen Zeitraum ( $\leq 150$  ms) stattfindet, spricht man von einem sogenannten Lastschlag. Ziel der Applikationsarbeit ist es, angemessenes dynamisches Beschleunigungsvermögen zu realisieren ohne dabei Einbußen im Komfort hinnehmen zu müssen. Um dies zu erreichen wird in vielen Fällen eine Strategie angewandt, die auf einer speziellen Formung der Momentenanforderung basiert und sich je nach ECU-Hersteller meist nur in ihrer speziellen Ausführung unterscheidet. Als Erweiterung der bereits bekannten Darstellung 3.6 zeigt Abbildung 5.1 den qualitativen Verlauf eines Tip-In-Manövers mit den Signalen Pedalposition, Motordrehzahl, Momentenanforderung sowie die resultierende Beschleunigung des Fahrzeugs. Die aufgrund der sprunghaften Änderung der Pedalposition berechnete Momentenanforderung wird hier zum Beispiel in mehreren Phasen bis zum Endwert geführt. In einer ersten kurzen Phase des Anstellens ① wird der Motor durch Anlegen des Moments  $\text{Trq}_2$  gegenüber dem Triebstrang beschleunigt. Darauf folgt ein oft linearer Übergangsbereich ② dessen Anstieg durch die beiden kalibrierbaren Größen  $\Delta\text{Trq}_2$  und  $T_s = \tau_e - \tau_a$  charakterisiert ist. Hier besteht das Ziel, die Spiele und Lager innerhalb des Triebstrangs kontrolliert und möglichst ruckfrei umzulegen. Anschließend wird so schnell wie möglich kurz vor das Zielmoment geformt ③. Hierbei wird im illustrierten Beispiel der Abbildung

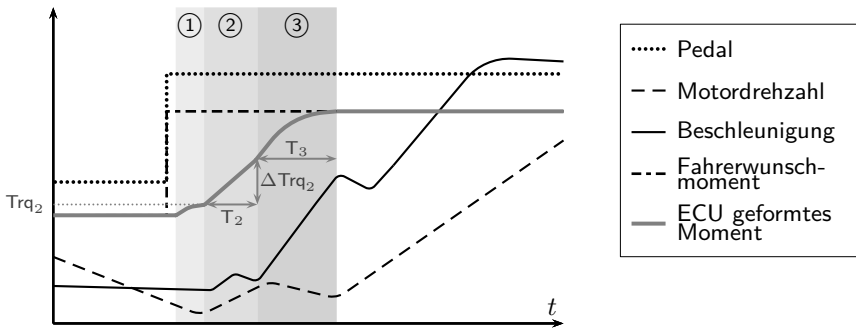


Abbildung 5.1: Qualitativer Verlauf wichtiger Größen während eines Tip-In

5.1 ein vorgefertigter Verlauf verwendet, für den lediglich eine Übergangsdauer  $T_3$  kalibriert wird. Um dabei keinen Ruck zu induzieren, wird am Ende die Änderungsrate des Moments möglichst gleichmäßig auf Null reduziert.

In welcher Art die Formung mittels Applikationsparametern beeinflusst werden kann, hängt von der Strategie des ECU-Herstellers ab. Es gibt Varianten, in denen mit Verzögerungsgliedern erster und zweiter Ordnung gearbeitet wird. Es existieren aber auch Verfahren wie in Abbildung 5.1, in denen explizite Übergangskurven kalibriert werden, die man dann mit Parametern an die vom Fahrer gewünschte Momentendifferenz anpasst. Die Applikationsparameter sind häufig spezifisch für einen Gang hinterlegt. Dieses Vorgehen ist darin begründet, dass Trägheit und Steifigkeit (somit die Eigenfrequenz) des Antriebsstrangs je nach Gang<sup>61</sup> unterschiedlich ist. Das Fahrzeugverhalten muss also individuell für einen Gang abgestimmt werden. Die Applikationsparameter wie Zeitkonstanten, Gradienten oder Zeitfenster, sind dann in Form von Kennfeldern definiert und vielfach über Pedalposition und in einer weiteren Komponente mit Bezug zur Geschwindigkeit (z.B. Motordrehzahl oder Fahrzeuggeschwindigkeit) aufgespannt. Die zweite Abhängigkeit ist darauf zurückführbar, dass je nach Geschwindigkeit das gewünschte Ansprechverhalten bei gleicher Pedalposition oftmals unterschiedlich sein soll. So müssen kleine Pedalwerte bei niedrigen Geschwindigkeiten gut kontrollierbar sein und nicht ruckeln (z.B. Stop & Go während einer Verkehrsstauung). Entsprechend benötigt man in diesem Fall auch nur kleine Momentenanforderungen, die vorsichtig geformt werden. Bewegt sich das Fahrzeug hingegen bei hoher Geschwindigkeit kurz vor der Vollast, werden bei gleicher Pedalposition vergleichsweise höhere Momentenanforderungen benötigt, welche scharf geformt werden, um eine spürbare Fahrzeugreaktion zu erzielen.

<sup>61</sup>Für Continuous Variable Transmission (CVT)-Getriebe gestaltet sich die Applikation unterschiedlich, da hier keine expliziten Übersetzungsverhältnisse bestehen.

Der traditionelle Tip-In-Applikationsprozess gestaltet sich derart, dass ein Fahrer aus dem Schubbetrieb manuell für verschiedene Drehzahlen unterschiedliche Pedalsprünge forciert und sich einen subjektiven Eindruck über das Fahrzeugverhalten verschafft. Zunächst wird der Bereich mittlerer Pedalanforderungen wie oben beschrieben geformt, um die grundlegende Dynamik des Ansprechverhaltens markenspezifisch zu definieren. In manchen ECUs werden Teile der Applikationsparameter für ein gesamtes Drehzahlband gemeinsam genutzt. In diesem Fall wird die zuvor erarbeitete Applikation in diesem Drehzahlband validiert. Anschließend erfolgt die Abstimmung des Verhaltens an der Vollast sowie des Bereichs kleiner Pedalwerte. In vielen Fällen beinhaltet die Funktionsstruktur der ECU neben den Formungsparametern der Fahrbarkeit zusätzlich eine Anti-Ruckel-Funktion. Diese kompensiert dynamisch Schwingungen, die durch externe Störungen in den Triebstrang induziert werden. Die Funktion wird spezifisch für einen Gang mit Hilfe eines Sprungversuchs abgestimmt, indem die Eigenfrequenz des Triebstrangs für diesen Gang ermittelt und anti-phasig entgegengewirkt wird.

Abhängig davon, wie akkurat der Fahrer die Zielwerte der Motordrehzahl und Pedalsprungweite manuell realisieren kann, werden die applizierten Parameter exakt oder interpoliert für die Umsetzung des Fahrzeugverhaltens von der ECU berechnet. Hieraus folgt, dass die notwendigen Änderungen der Parameter meist nur inkrementell und iterativ vom Ingenieur vorgenommen werden. Zusätzlich zu den zuvor im Detail diskutierten Problemen der manuellen Durchführung und subjektiven Bewertung wird der traditionelle Applikationsprozess vor allem dann zeit- und kostenintensiv, wenn mehrere Varianten des Fahrverhaltens für diverse Kundenprofile, Fahrmodi oder Zielmärkte realisiert werden sollen. In diesem Fall müssen häufig alle Versuche und Arbeiten für jede Variante bzw. jeden Fahrmodus neu durchgeführt werden um das individuelle Zusammenspiel der Parameter neu zu optimieren. Eine entscheidende Effizienzsteigerung würde also dann erreicht werden, wenn der Einfluss der Applikationsparameter auf das Fahrzeugverhalten modelliert würde. Anhand des Modells wäre die zusätzliche Möglichkeit gegeben, das Fahrverhalten simulativ im Detail für Parameterkombinationen zu untersuchen, für die bisher keine Messungen durchgeführt wurden. Weiterhin kann man mit Hilfe des Modells manuell oder automatisiert entsprechende Varianten einer Applikation ableiten. Eine mögliche Vorgehensweise zur Realisierung eines solchen Verfahrens basiert auf der Methodik des Design of Experiment (DoE) und bildet (nach den bereits diskutierten Themen der Objektivierung und Automatisierung) nachfolgend den dritten Schwerpunkt dieser Arbeit<sup>62</sup>.

---

<sup>62</sup>Die Automatisierung wird in Abschnitt 5.2.6 wieder aufgegriffen, da sich durch eine automatisierte Modellbildung Möglichkeiten zur vollständig automatisierten Applikation eröffnen.

## 5.2 Überführung der DoE-Methodik auf die Fahrbarkeitsapplikation am Beispiel Tip-In

### 5.2.1 Einleitung und grundlegendes Konzept

Das verfolgte Konzept der Überführung von DoE auf die Domäne der Fahrbarkeitsapplikation ist in Abbildung 5.2 verdeutlicht. Wie bei jeder Modellbildung eröffnet sich ein erster entscheidender Aspekt bereits bei der Notwendigkeit der Festlegung der Systemgrenzen und somit der Definition der Eingangs- und Ausgangsgrößen des später zu erstellenden Modells. Zunächst soll hierbei auf die Wahl der zu modellierenden Ausgangsgrößen näher eingegangen werden. Während



Abbildung 5.2: Grundidee der Fahrbarkeitsapplikation mittels DoE

der Durchführung eines Fahrbarkeitsversuchs werden, im Gegensatz zu stationär gemittelten Messwerten am Prüfstand, transiente Messdaten aufgenommen. Es entstehen Zeitreihen, die in Zusammenhang mit den beeinflussenden Parametern gebracht werden müssen. Die schlussendlich relevanten Aussagen des hier zu erstellenden Modells werden aber nicht in Form der Übergangsverläufe von Beschleunigungen, Drehzahlen oder Momenten benötigt. Stattdessen bedarf es charakteristischer Eigenschaften die das Fahrverhalten widerspiegeln. Folglich ist es naheliegend, die Messdaten mit den in Kapitel 3 entwickelten Algorithmen zu verarbeiten und die Ergebnisse als virtuelle Messgrößen für die Modellierung zu verwenden. Diese Modelle können dann genutzt werden, um den Einfluss der Applikationsparameter auf die Fahrbarkeitseigenschaften zu untersuchen und deren Trade-Off-Verhalten zu analysieren. Nachfolgend können diese mittels numerischer Optimierer auf gewünschte Zielwerte abgestimmt werden.

Wie bei allen Methoden, bei denen Modelle Verwendung finden um reales Verhalten abzubilden, besteht auch im vorliegenden Fall eine wesentliche Herausforderung darin, mit so wenig Aufwand wie möglich, eine Abstimmung auf vertrauenswürdige Vorhersagen zu erlangen. Der Aufwand zur Gewinnung einer Applikation muss sich für den effizienten Einsatz im Projektalltag bedeutend von dem für

eine manuelle Applikation abheben. Wäre dies nicht der Fall, würde eine solche Methodik kaum Akzeptanz finden. Im hier betrachteten Zusammenhang ergibt sich der anfallende Aufwand im Wesentlichen aus drei Anteilen:

1. der Gewinnung der benötigten Messdaten und deren Aufbereitung,
2. der darauf folgenden Abstimmung der Modelle, sowie
3. der abschließenden Optimierung und Validierung der Optima.

Während der zweite Aspekt hauptsächlich von der Qualität der Messergebnisse abhängt und somit bis auf statistische Schwankungen meist konstant bleibt<sup>63</sup>, hängt der dritte hauptsächlich von der gewünschten Anzahl unterschiedlicher Varianten ab. Der Aufwand zur Gewinnung der Messdaten ist hingegen direkt von der Anzahl der benötigten Messpunkte abhängig. Diese wiederum wird von der Komplexität der zu modellierenden Zusammenhänge, also der Anzahl der beeinflussenden Parameter und deren Interaktion zur Herausbildung der physikalischen Phänomene, geprägt. Eine erste Fragestellung ergibt sich dahingehend, wie dieser Aufwand reduziert werden kann, genauer: welche Eingangsgrößen, Modellierungsform und Anzahl an Messpunkten Verwendung finden sollten.

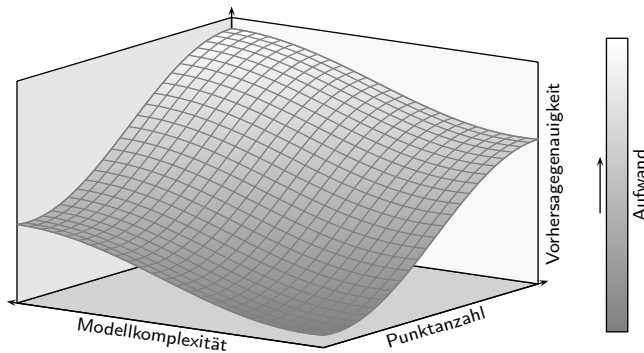
### **5.2.2 Wahl der richtigen Eingangsgrößen und Modellierungsform**

Bevor mit der Gewinnung der Messdaten begonnen werden kann, muss eine Entscheidung über die verwendeten Eingangsgrößen getroffen werden. In erster Instanz sind dies die Applikationsparameter, mit denen Einfluss auf die Fahrbarkeit des Fahrzeugs genommen werden kann. Da die Anzahl dieser Parameter in der Regel umfangreich ist, besteht meist die Notwendigkeit, eine auf Erfahrung basierende Auswahl entsprechend ihrer Relevanz zu treffen. Sollte die Auswahl nicht auf Basis von Erfahrung getroffen werden können, bieten sich Voruntersuchungen und die Verwendung von Methoden zur Signifikanzanalyse [75, 100] an. Für die weiteren Überlegungen ist es notwendig, sich erneut zu vergegenwärtigen, dass die Parameter zur Abstimmung der Fahrbarkeit gewöhnlich in Bezug zum Betriebspunkt des untersuchten Fahrzeugs stehen. Sie bestimmen somit individuell dessen Verhalten spezifisch für eine Kombination aus aktueller Drehzahl und angelegter Last.

---

<sup>63</sup>Dies gilt unter der Voraussetzung gleicher Art der Modellierung, Komplexität und Anzahl der Modelle, etc.

Eine sich direkt offenbarende Möglichkeit, Eingangsgrößen für die Modellierung auszuwählen, ist die reine Verwendung der Applikationsparameter. Im Umfeld der Kalibrierung von Motorsteuergeräten hat es sich etabliert, diese Art der Modellierung als „lokal“ zu bezeichnen, da man sie in der Regel für genau eine Position im Betriebsbereich des betrachteten Systems durchführt, indem zum Beispiel die Einträge in den Kennfeldern und Kennlinien nacheinander abgestimmt werden<sup>64</sup>. Als Erweiterung ist es naheliegend, eine oder sogar beide Komponenten des Betriebspunkts mit in die Erstellung des Modells als Eingangsgrößen aufzunehmen. Im zweiten Fall spricht man von „globaler“ Modellierung, wohingegen für den ersten Fall in dieser Arbeit weiterführend die Bezeichnung „semi-global“ verwendet werden soll. Je mehr Parameter in die Menge der Eingangsgrößen aufgenommen werden, umso komplexer wird das entstehende Modell. Je genauer dessen Vorhersagen werden sollen, umso mehr Messungen müssen aufgenommen werden. Die nachfolgende Abbildung 5.3 soll genau diesen Zusammenhang zwischen Aufwand, Komplexität der Modellierung und Genauigkeit der zu erreichenden Vorhersagen illustrieren. Dass die Genauigkeit der Vorhersage bei komplexeren Modellen (un-



**Abbildung 5.3:** Veranschaulichung des Trade-Off zwischen Komplexität, Aufwand und Genauigkeit der Vorhersage

ter der Randbedingung gleicher Anzahl der zur Modellierung verwendeten Messpunkte) abnimmt, ist sofort nachvollziehbar. Die Genauigkeit der Vorhersage eines Modells wiederum wird mit zunehmender Punktzahl im Trend ansteigen. Es ist jedoch eingängig, dass dieser Trend eine Sättigung aufweisen wird, die Hinzunahme weiterer Messpunkte im Rahmen der erwarteten Genauigkeit des Modells also irgendwann keine signifikante Auswirkung mehr hat. Die Ausprägung dieses

<sup>64</sup>In speziellen Fällen umspannt ein solcher Eintrag auch mehrere Betriebspunkte (z.B. ein Eintrag für den gesamten Drehzahlbereich bei einer spezifischen Pedalposition). Für die Erläuterung des Begriffs lokaler Applikation wurde hier der einfachste Fall vollständig unabhängig voneinander einstellbarer Applikationsparameter für jeden Betriebspunkt herangezogen.

Sättigungsverhaltens ist je nach Modellierungsform unterschiedlich, hier deshalb nur qualitativ skizziert. Der Aufwand für Datenaufbereitung, Modellierung und Optimierung zur Erlangung einer Applikation<sup>65</sup> ist in der Darstellung zusätzlich anhand der verwendeten Farbskala verdeutlicht. Geringere Einsätze sind durch dunkle Schattierung repräsentiert, wogegen höhere durch helle Schattierung gekennzeichnet sind. Es soll zudem darauf hingewiesen werden, dass diese Abbildung für die verallgemeinerten Fälle dargestellt ist, dass

1. ein globales Modell weniger genaue Vorhersagen liefert als eine Kombination vieler lokaler Modelle,
2. ein globales Modell genauere Vorhersagen liefert als ein lokales Modell,
3. der Aufwand zur Abstimmung eines globalen Modells geringer ist als derjenige für viele lokale Modelle sowie
4. der Aufwand zur Abstimmung eines globalen Modells größer ist als derjenige für ein lokales Modell.

Außerdem wurde die zuvor genannte Charakterisierung in einem Punkt bereits im Sinne globaler Modellansätze vorgenommen. Sollte nämlich der Gesamtaufwand zur Abstimmung eines globalen Modells nicht signifikant kleiner sein als der zur Abstimmung einer entsprechend benötigten größeren Anzahl lokaler Modelle, kann die Nutzung globaler Methoden nicht argumentiert werden. Zudem ist zu beziffern, in welchem Maße Abweichungen der Genauigkeit für globale Modelle akzeptiert werden können.

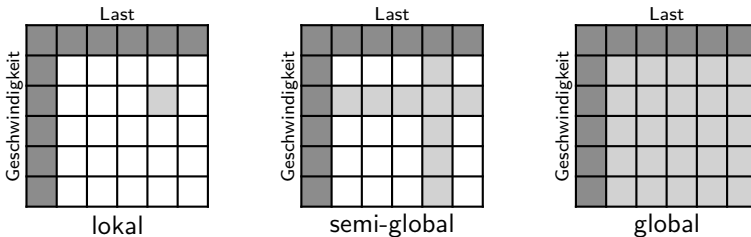
Bezieht man sich nun zurück auf die miteinander in Einklang zu bringenden Kennfelder als Ziel der Arbeit, so ergeben sich mit den drei bisher angesprochenen Möglichkeiten der Modellbildung folgende Auswirkungen. Um die Kennfelder vollständig mit Daten versehen zu können, muss bei lokaler Modellierung für jede Kombination an Stützstellen ein Modell erstellt werden. Dieser Schritt ist für mehrere Gänge zu wiederholen. Geht man beispielsweise von einem 6-Gang-Getriebe mit drei abzustimmenden Parametern aus, die hierfür der Einfachheit halber in gleichgroßen Kennfeldern der Dimension  $10 \times 10$  in der ECU vorliegen sollen, ergeben sich daraus 600 Modelle, deren

1. Grenzen des Versuchsraums bestimmt,
2. Versuchspläne berechnet,
3. Versuche durchgeführt und Messdaten erzeugt,

<sup>65</sup>Der hier gemeinte Aufwand ist nunmehr vom Anteil zur Gewinnung der Messdaten befreit.

4. Messergebnisse mit Hilfe der objektiven Kriterien aufbereitet,
5. Modelle anhand dieser Ergebnisse erstellt,
6. Optimierung der Parameter durchgeführt sowie
7. Ergebnisse validiert

werden müssen. Dass dieser Aufwand nur für einen hohen Automatisierungsgrad bei zudem erheblich gesteigerter Genauigkeit (im Vergleich zur manuellen Durchführung) gerechtfertigt sein könnte, ist offenkundig. Unter Berücksichtigung der Möglichkeiten zur Automatisierung der Fahrversuche, wie sie in Kapitel 4 beschrieben wurden, liegt die größte Herausforderung im angebrachten Beispielszenario also vor allem in der unverhältnismäßig großen Anzahl an Modellen. Unter der Prämisse, dass ein semi-globales Modell weniger Messpunkte



**Abbildung 5.4:** Möglichkeiten der Modellbildung auf Basis der zu applizierenden Kennfelder mit dabei optimierbaren Kennfeldbereichen

zur Abstimmung benötigt als die notwendige Menge lokaler Modelle, besteht eine Option zur Reduktion des Aufwands nun darin, komplexer zu modellieren. Hierfür lässt man die den Betriebspunkt bestimmenden Größen Geschwindigkeit und Last als zusätzliche Eingangsgrößen in das Modell einfließen. Wie sich dies in Bezug auf die Kennfelder grafisch darstellt, ist in Abbildung 5.4 verdeutlicht. Die semi-globale Variante ist dort durch eine markierte Spalte bzw. Zeile repräsentiert, welche mittels des erstellten Modells komplett kalibriert werden könnte. Im Falle der globalen Modellierung ist dann das gesamte Kennfeld anhand des Modells optimierbar. Dieser grundlegenden Idee mag entgegengehalten werden, dass die Menge der notwendigen Modellpunkte wesentlich vom Modelltyp selbst bestimmt wird. Ein Modell mit mehr Eingangsgrößen benötigt mehr Messdaten um die freien Parameter zu identifizieren. Unter Umständen ist es sogar notwendig eine gänzlich andere Modellstruktur zu verwenden. Genau diese beiden Aspekte werden später im Detail beleuchtet.

Mit Bezug zu Abbildung 5.1 wird die Wahl der applikativen Eingangsgrößen für die DoE-Berechnung diejenigen Applikationsparameter umfassen, welche die dort gezeigte Formung beeinflussen. Für diese Vorgehensweise der Applikation wären dies zum Beispiel der Endwert des Moments von Phase ① sowie der Anfangswert von Phase ②<sup>66</sup>, der Anstieg und die Dauer von Phase ② sowie die Dauer von Phase ③ - in Summe also fünf Parameter. Sie sind hier als hauptsächlich beeinflussende Faktoren aufgeführt und erheben nicht den Anspruch auf Vollständigkeit. So gibt es in der Regel einen beträchtlichen Satz an Applikationsparametern, die zur Feinabstimmung dienen und mit einbezogen werden könnten. Je nach Ansatz wird die so entstandene Gruppe applikativer DoE-Eingangsgrößen schließlich durch die Hinzunahme von Größen komplettiert, die den Betriebspunkt beschreiben.

Es bleibt jedoch zu bedenken, dass eine Expansion der Dimensionalität der Aufgabe mit entscheidendem Mehraufwand aufgrund steigender Anzahl der benötigten Messpunkte verbunden wäre. Je nach Umfang ist es dann erfolgversprechender einen zwei- oder gar mehrstufigen Ansatz zu verfolgen. Bei diesem würde der vollständige Satz an identifizierten Applikationsparametern zunächst entsprechend ihrer Relevanz und Signifikanz in Gruppen geteilt. Der hier vorgestellte Prozess der modellbasierten Fahrbarkeitsapplikation mittels DoE würde dann schrittweise für die jeweiligen Gruppen durchgeführt. Angefangen wird die Modellierung und Optimierung für die Gruppe mit größter Relevanz. Aufbauend auf den erzielten Ergebnissen wird dann (in absteigender Reihenfolge ihrer Relevanz) ebenso mit den weiteren Gruppen verfahren.

Bevor für die ausgewählten Eingangsgrößen ein Versuchsplan erstellt werden kann, ist es in vielen Fällen sinnvoll sich zunächst Gedanken darüber zu machen, in welchen Bereichen möglicher Kombinationen überhaupt Untersuchungen notwendig sind - es muss der so genannte Versuchsraum definiert werden.

### 5.2.3 Bestimmung des Versuchsraums und Berechnung des Versuchsplans

Der Begriff Versuchsraum wird hier als Gesamtheit aller möglichen Kombinationen der variierbaren Parameter einer Messkampagne verstanden. Welche Kombinationen dieser Gesamtheit sinnvoll sind und welche kaum Erfolg auf ein gutes Verhalten versprechen, kann durch den Applikationsingenieur aufgrund seiner Erfahrung häufig gut abgeschätzt werden. Aber auch ohne direkte Sachkenntnis im Bereich

---

<sup>66</sup>Häufig wird man den Endwert des Moments von Phase ① identisch zum Anfangswert der Phase ② gestalten. Dies ist aber nicht notwendig.

der Applikation ist leicht nachzuvollziehen, dass nicht alle möglichen Kombinationen im Parameterraum der Eingangsgrößen funktional sein werden. Es ist also aus rein praktischen Gründen der Reduktion des Aufwands sinnvoll, den Versuchsraum so gut wie möglich auf die interessanten und potentiell erfolgversprechenden Bereiche einzugrenzen. Im Laufe der letzten zehn bis fünfzehn Jahre wurden verschiedene Methoden entwickelt, um die Erkundung des Versuchsraums zu automatisieren und dessen Grenzen zu modellieren bzw. abzuschätzen [25, 89, 94]. Dies hat den Vorteil, dass selbst komplexe Zusammenhänge vollautomatisch bestimmt werden. Es gibt jedoch keine offiziellen Untersuchungen, die deren tatsächliche Durchdringung in der Serienapplikation namhafter Hersteller aufzeigen. So kann vermutet werden, dass der überwiegende Teil der Grenzbeschreibungen für DoE-Versuche in diesem Umfeld auf Abschätzungen und Erfahrungswerten basiert.

Unter dieser Voraussetzung liegt ein wesentlicher Aspekt zur erfolgreichen Anwendung von DoE in der angemessenen Beschreibung des Versuchsraums. Zur notwendigen Theorie der Darstellung konvexer und konkaver Räume sei auf einschlägige Stellen der Standardliteratur verwiesen [12, 16, 72, 74]. In den meisten Fällen werden Versuchspläne mit spezialisierten Softwarewerkzeugen berechnet. Diese verbergen vor dem Anwender die dahinter liegende Theorie und versuchen mit geeigneten Mitteln eine Konfiguration der entsprechenden Zusammenhänge möglichst einfach zu gestalten. Ob nun lineare Ungleichungen, nichtlineare Nebenbedingungen, Kennfelder, konvexe Hüllen oder andere Formen der Beschreibung und Eingabe in das Softwaretool genutzt werden, ist dabei unerheblich. Trotzdem muss sich der Anwender Gedanken um die Konstellation der Parameter (die Randpunkte) machen, was bereits für Räume mit einer Dimension  $d > 3$  keine einfache Aufgabe darstellt [53]. Nachfolgend soll dazu kurz das in dieser Arbeit verwendete Vorgehen beschrieben werden, welches in der Zusammenarbeit mit Applikationsingenieuren gut geeignet war. Es basiert auf einer Rückwendung zu lokalen Beschreibungen der Grenzen und anschließender Ableitung der globalen Grenzen mit Hilfe von Kombinatorik.

Besinnt man sich ein weiteres Mal darauf, dass die Applikationsparameter häufig für einen Betriebspunkt spezifisch eingestellt werden müssen, so kann an einer solchen Stelle für jeden der Parameter in der Regel eine untere sowie obere Grenze angegeben werden. In Tabelle 5.1 ist dies beispielhaft für Parameter  $P_0, P_1, \dots, P_n$  dargestellt, wobei hier zum besseren Verständnis bereits eine Unterteilung derart vorgenommen wurde, dass die Parameter  $P_0$  und  $P_1$  als Last und Drehzahl interpretiert werden und in der angegebenen Art und Weise ein Gitter an Betriebspunkten definieren<sup>67</sup>. Fasst man diese Definition in Form von Matrizen auf, kann

---

<sup>67</sup>Hier ist ohne Beschränkung der Allgemeinheit ein Gitter gewählt worden. Die Betriebspunkte könnten jedoch auch frei in der entsprechenden Ebene verteilt werden.

$P_0$	$P_1$	$P_2$	...	$P_n$
$p_{0,1}$	$[p_{1,1}^u, p_{1,1}^o]$	$[p_{2,1}^u, p_{2,1}^o]$	...	$[p_{n,1}^u, p_{n,1}^o]$
$p_{0,2}$	$[p_{1,2}^u, p_{1,2}^o]$	$[p_{2,2}^u, p_{2,2}^o]$	...	$[p_{n,2}^u, p_{n,2}^o]$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$p_{0,m}$	$[p_{1,m}^u, p_{1,m}^o]$	$[p_{2,m}^u, p_{2,m}^o]$	...	$[p_{n,m}^u, p_{n,m}^o]$

**Tabelle 5.1:** Allgemeine lokaler Parametergrenzen für die Definition des Versuchsraums

man durch Kombinatorik für jede Laststelle  $p_{0,i}$  eine  $[2^{n-1} \times (n - 1)]$  Matrix  $\mathbf{P}$  berechnen, die in ihren Zeilen die den Unterraum bestimmenden Punkte enthält. Die gesamte Menge der  $m \cdot 2^{n-1}$  Grenzpunkte<sup>6869</sup> kann dann zum Beispiel durch Anwendung des Quickhull Algorithmus [11] in lineare Ungleichungen überführt werden, um so den Versuchsraum zu beschreiben. In manchen Fällen sind lineare Nebenbedingungen jedoch nicht ausreichend um das vorliegende Problem korrekt einzugrenzen. Treten zum Beispiel „Löcher“ im Versuchsraum auf, an denen ein Betrieb des Prüflings nicht gewährleistet werden kann, so können solche Zusammenhänge in der Regel nur mit nichtlinearen Ungleichungen beschrieben werden. Für weiterführende Literatur zu diesem Thema sei auf [12, 24, 74] verwiesen.

Nachdem der Versuchsraum definiert ist, existieren verschiedene Möglichkeiten Punkte zu platzieren, an denen anschließend die benötigten Messungen zu gewinnen sind. Zur Diskussion der Vorteile und Voraussetzungen der unterschiedlichen Vorgehensweisen sei abermals auf entsprechende Literaturstellen [23, 75, 76] verwiesen. Sie unterscheiden sich zunächst grundsätzlich dadurch, ob sie auf statistischen Verfahren oder der Ausfüllung des zu untersuchenden Raums basieren. In der vorliegenden Arbeit wurde sich explizit für die Nutzung raumfüllender Versuchspläne entschieden. Sie benötigen keinerlei vorherige Festlegung auf Level oder Diskretisierung. Außerdem können keine Bereiche entstehen, die nahezu leer sind, in denen also eine spätere Modellbildung aufgrund von ungenügend vielen Messdaten ungenauer wird. Verschiedene effiziente Algorithmen zur Erzeugung von raumfüllenden Zahlenmengen basieren auf Pseudo-Zufallszahlen-Generatoren. Dies sind in der Regel Funktionen  $\Phi : [0, 1) \mapsto [0, 1)$ , die ausgehend von einem

<sup>68</sup>Ein MATLAB Skript zur Erzeugung der Grenzpunkte mit Hilfe dieser Methodik findet sich im Anhang A.2.

<sup>69</sup>Die Methodik zu deren Berechnung ist im Kern die Erzeugung eines voll-faktorierten Designs für  $n$  Eingangsgrößen, wobei für jede Größe zwei sogenannte Level genutzt werden.

Startwert  $\gamma_0$  iterativ angewandt werden, um eine Folge von Werten

$$\gamma_k = \Phi(\gamma_{k-1}), \quad \forall k = 1, 2, \dots \quad (5.1)$$

zu erhalten [23]. Im Speziellen wurden hier die auf den ursprünglichen Arbeiten von Sobol [104]<sup>70</sup> basierenden Niederreiter-Sequenzen verwendet [78, 79], da diese eine noch gleichmäßigere Verteilung der Punkte im Raum realisieren und sehr effizient berechnet werden können. Zudem sind sie dazu geeignet, evolutionär Teile eines Versuchsraums im Laufe ihrer Entwicklung dichter zu füllen. Dies ist vor allem dann von Vorteil, wenn die gleichen Algorithmen für die online<sup>71</sup> wie offline Erstellung von Versuchen benutzt werden sollen.

Um die Potenziale und Möglichkeiten der DoE-Methodik für die Fahrbarkeitsapplikation umfassend untersuchen zu können wurden lokale, semi-globale und globale Versuchspläne erstellt. Als Betriebspunktgrößen finden die Pedalposition als Indikator der angelegten Last sowie die Motordrehzahl bei Start des Tip-In als Geschwindigkeitskomponente Verwendung. Es ergibt sich die Frage, wie viele Messdaten und somit Modellpunkte benötigt werden, um Vorhersagen mit ausreichender Güte sicherstellen zu können. Abbildung 5.5 zeigt das globale Design, welches für den zweiten Gang eines mittelklassigen Fahrzeugs berechnet wurde und die auf Seite 74 genannten Applikationsparameter variiert. Der Versuchsraum ist, entsprechend der vorangehend beschriebenen Methodik, mit den Werten aus Tabelle 5.2 eingegrenzt. Die ausgewählten Projektionen in 3-dimensionale Subräume sind so dargestellt, dass sie genau diese Beschränkung verdeutlichen. An den Zahlenwerten ist erkennbar, dass die wesentliche Beschränkung in der Dimension  $\text{Trq}_2$  notwendig war. In den Graphen sind die Modellpunkte hellgrau, der Wiederholungs-

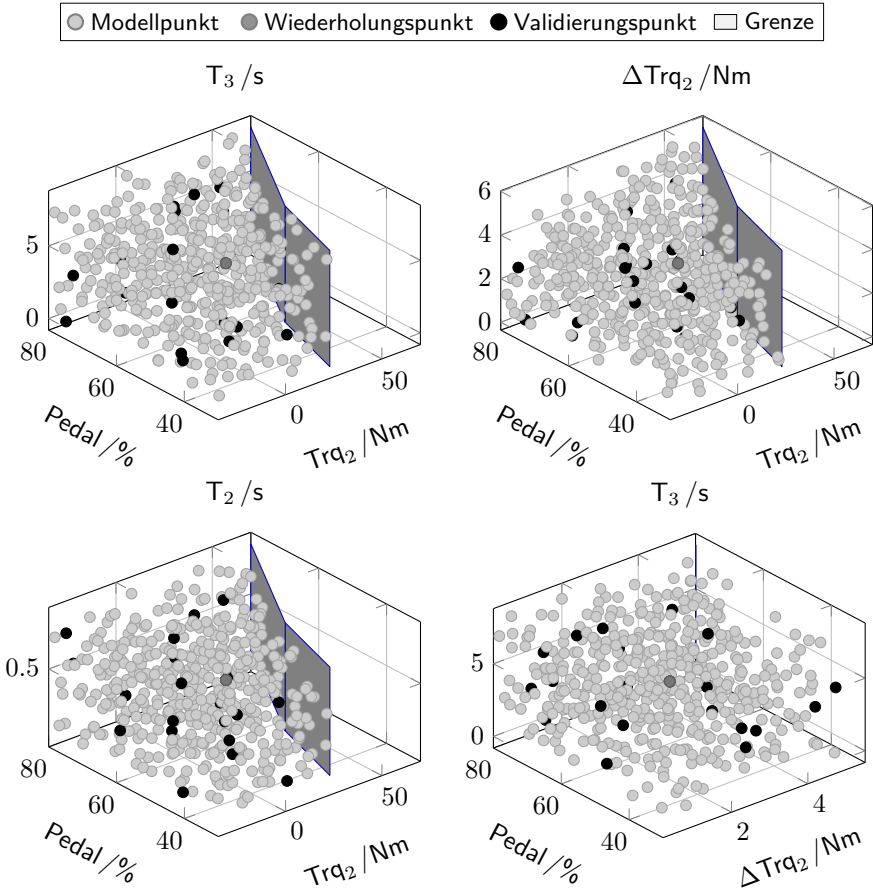
Pedal/%	Drehzahl/ $\frac{1}{\text{min}}$	$\text{Trq}_2/\text{Nm}$	$T_2/\text{s}$	$\Delta\text{Trq}_2/\text{Nm}$	$T_3/\text{s}$
30	[1500, 3000]	[-35, 23]	[0.15, 0.80]	[0.17, 5.00]	[0.30, 8.00]
50	[1500, 3000]	[-35, 35]	[0.15, 0.80]	[0.23, 5.00]	[0.30, 8.00]
80	[1500, 3000]	[-35, 70]	[0.15, 0.80]	[0.23, 5.50]	[0.00, 8.00]

**Tabelle 5.2:** Beispiel lokaler Parametergrenzen für die Definition des Versuchsraums

<sup>70</sup>Für interessierte Leser mit Kenntnis der russischen Sprache ist das Original unter dem folgenden Link erhältlich [http://www.mathnet.ru/php/getFT.phtml?jrnid=zvmmf&paperid=7334&what=fullt&option\\_lang=eng](http://www.mathnet.ru/php/getFT.phtml?jrnid=zvmmf&paperid=7334&what=fullt&option_lang=eng).

<sup>71</sup>Online bezeichnet hierbei die dynamische Fortentwicklung eines Versuchs. Aufgrund der Effizienz der verwendeten Algorithmen ist es möglich, diese direkt während der Versuchsdurchführung auszuwerten und somit unmittelbaren Einfluss auf die weitere Versuchsdurchführung zu nehmen.

punkt dunkelgrau, die Validierungspunkte schwarz sowie die begrenzenden Ebenen eingezeichnet. Sie bilden keine konvexe Hülle, sondern müssen mit Methoden der Beschreibung konkaver Versuchsräume [93] definiert werden, was durch das verwendete Softwarewerkzeug unterstützt wurde. Für die Berechnung des Designs



**Abbildung 5.5:** Globales raumfüllendes Design aus 500 Punkten im beschränkten Versuchsraum aus den Größen Pedal, Drehzahl,  $Trq_2$ ,  $\Delta Trq_2$ ,  $T_2$  und  $T_3$

wurde der bereits angesprochene Ansatz  $Trq_1 = Trq_2$  angewandt. Somit reduziert sich die Dimensionalität auf  $n = 4 + 2$ , wobei ein Betriebsbereich von 30...80% Pedalposition sowie ein Drehzahlbereich von 1500...3000  $\frac{1}{\text{min}}$  abgedeckt waren. Da im Gegensatz zur Modellierung mittels Polynomen keine analytisch abgeleitete

Aussage zur Frage der Anzahl notwendiger Modellpunkte gemacht werden kann, wurden auf Basis von Angaben aus der Literatur und mit Blick auf einen ausreichenden Datenbestand Versuchspläne mit 500 Modellpunkten für das globale Modell im 6-dimensionalen Raum berechnet. Das lokale Modell sowie die beiden semi-globalen Modelle waren auf 100 bzw. 200 Punkte angesetzt.

## 5.2.4 Modellierung des Fahrbarkeitsverhaltens anhand objektiver Kriterien

In den letzten Jahren haben sich bei DoE-Anwendungen für das Emissionsverhalten von Verbrennungsmotoren immer häufiger weiter entwickelte Modellierungsverfahren wie Gauß-Prozess (GP) Modelle oder gar semi-physikalische Ansätze etabliert, was vor allem durch den Trend zur globalen Modellierung getrieben war. Die zuvor benutzten Polynome waren in vielen Fällen nicht mehr geeignet, das erwartete und beobachtete Verhalten ausreichend abzubilden. Da auch bei den vorliegenden Untersuchungen als möglicher Ansatz zur Effizienzsteigerung die globale Modellierung (siehe Abschnitt 5.2.2, S. 70) im Fokus steht, wurde die Entscheidung zur Verwendung von GP Modellen getroffen.

Gauß-Prozesse sind eine einfache und generelle Klasse von Modellen für Funktionen. Genauer, ein GP ist jede Verteilung über Funktionen derart, dass jede abgeschlossene Menge von Funktionswerten  $\mathbf{f} = \{f(\mathbf{x}_1), f(\mathbf{x}_2), \dots, f(\mathbf{x}_N)\}$  über den Eingängen  $\mathbf{X} = \{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_N\}$  einer gemeinsamen Gauß-Verteilung

$$p(\mathbf{f}|\mathbf{X}) = \mathcal{N}(\mu, k) \quad (5.2)$$

folgen [34, 87]. Dabei ist ein GP-Modell, bevor es an Daten gefittet wird, bereits vollständig durch seine Erwartungswertfunktion

$$E[f(\mathbf{x})] = \mu(\mathbf{x}) \quad (5.3)$$

und seine Kovarianzfunktion (oder auch Kernel)

$$\begin{aligned} \text{Cov}[f(\mathbf{x}), f(\mathbf{x}')] &= E\left[(f(\mathbf{x}) - E[f(\mathbf{x})]) \cdot (f(\mathbf{x}') - E[f(\mathbf{x}')])\right] \\ &= k(\mathbf{x}, \mathbf{x}') \end{aligned} \quad (5.4)$$

über den beiden Eingängen  $\mathbf{x}$  und  $\mathbf{x}'$  definiert. Es ist gebräuchlich anzunehmen, dass der GP erwartungswertfrei ist, also  $\mu(\mathbf{x}) = 0$  gilt. Hieraus folgt nun, dass durch die Kovarianzfunktion vollständig bestimmt ist, welche Strukturen durch das entsprechende GP-Modell beschrieben werden können, denn sie kann frei so

gewählt werden, dass sie Annahmen über die Struktur der zu modellierenden Funktion widerspiegelt. Somit ist durch deren geschickte Definition eine große Bandbreite unterschiedlichen Verhaltens realisierbar [88], allerdings besteht auch gerade in der Wahl der passenden Kovarianzfunktion die entscheidende Herausforderung. Am häufigsten wird die quadriert-exponentielle (QE) Form

$$K_{QE}(\mathbf{x}, \mathbf{x}') = a^2 \exp\left(-\frac{(\mathbf{x} - \mathbf{x}')}{2\lambda^2}\right) \quad (5.5)$$

mit  $a$  als Amplituden- und  $\lambda$  als Längenskalierung verwendet [34]. Diese beiden Parameter werden im Allgemeinen als Hyperparameter bezeichnet, da sie eine Verteilung über Funktionsparametern definieren, anstatt Parameter darzustellen, welche direkt eine Funktion bestimmen [34, 88]. Eine anders gewählte Kovarianzfunktion kann entsprechend eine Vielzahl jeweiliger Parameter aufweisen. Verschiedene Veröffentlichungen beschäftigen sich auf theoretischer Basis mit der Wahl und Konstruktion geeigneter Funktionen [15, 17, 71, 87, 88, 103], aber auch im Anwendungsgebiet der Motorapplikation [62, 110] wurden GP Modelle vielfach mit speziell angepassten Kovarianzfunktionen erfolgreich eingesetzt<sup>72</sup>.

Die Hyperparameter selbst werden automatisch anhand eines Trainingsdatensatzes über ein Optimierungsproblem entsprechend der „Maximum Likelihood“-Methode bestimmt [88, 103]. Nutzt man Kovarianzfunktionen mit unabhängigen Längenskalierungsparametern  $\lambda_d$  für jede Eingangsdimension  $d = 1, \dots, D$ , so wird währenddessen automatisch die Relevanz der Eingangsgrößen bestimmt. Dies geschieht, indem eine Eingangsgröße durch ein steigendes  $\lambda_d$  ausgefiltert wird, wenn diese für die Modellbestimmung keine Relevanz hat [103]<sup>73</sup>. Man kann zudem zeigen, dass die Modellvorhersageverteilung eines GP-Modells ebenfalls einen vollständigen Gauß-Prozess darstellt. Die Vorhersage eines GP-Modells beinhaltet in Form der Varianz damit eine direkte Aussage über seine Genauigkeit am entsprechenden Punkt. Dies ist ein entscheidender Vorteil gegenüber parametrischen Modellen, da das Wissen über deren Vertrauenswürdigkeit ein wichtiger Aspekt während einer Modellierung ist.

An dieser Stelle soll nicht im Detail auf die Theorie und Eigenschaften von GP-Modellen eingegangen, sondern auf weiterführende detaillierte Literatur [15, 17,

---

<sup>72</sup>Tatsächlich sind GP-Modelle bereits seit langem in anderen Gebieten erforscht und verwendet.

So ist zum Beispiel in der Geostatistik und Meteorologie die GP-Regression als *Kriging* bekannt. In ähnlicher Weise können Kalman Filter und radiale Basisfunktionen als Formen von GP-Modellen angesehen werden [15, 87].

<sup>73</sup>Genau diese Eigenschaft motivierte ursprünglich die in Abschnitt 3.2.3 am Ende angesprochene Nutzung von GP-Modellen für die Modellierung des Zusammenhangs zwischen subjektiven Bewertungen und objektiven Kriterien, denn aus diese Weise findet eine direkte Auswahl der letzten statt.

71, 87, 88, 103] verwiesen werden. Stattdessen wird nachfolgend die praktische Anwendung von GP-Modellen für die Abbildung der Zusammenhänge zwischen objektiven Kriterien und Applikationsparametern entsprechend des Versuchsplans aus dem vorangegangenen Abschnitt weiter betrachtet.

Aus der Menge der objektiven Kriterien wurden diejenigen zur Modellierung ausgewählt, welche sich aufgrund der Untersuchungen aus Abschnitt 3.2.3 als signifikant zur Abbildung der subjektiven Bewertung herausstellten (siehe Tabelle 3.6, S. 45). Dabei wurden Messdaten mit einem  $R_{\text{LOO}}^2 > 3\sigma$  schrittweise entfernt<sup>74</sup>. Die Quote der so gestrichenen Datentupel überstieg dabei für keines der Modelle einen Wert von 5% und lag somit in einem akzeptablen Bereich. Trotz der vollständigen Automatisierung der Messreihen liegt der Ursprung solcher Ausreißer in zufällig auftretenden Unsauberkeiten der Interaktion zwischen Fahrer, Fahrzeug und Fahrbahn. Aufgrund dieser werden charakteristische Punkte in den Messdatenverläufen nicht korrekt erkannt, was zu Ergebnissen für die objektiven Kriterien führt, die nicht dem übrigen Trend der Daten entsprechen.

Aus numerischen Gründen fanden für alle Eingänge außer  $\text{Trq}_2$  logarithmische Eingangstransformationen Anwendung (aufgrund des geplanten Wertebereichs von  $\text{Trq}_2 \in -35 \dots 70$  konnte diese dort nicht angewendet werden). Diese führten zu teilweise erheblich besseren statistischen Kennwerten und somit besseren Ergebnissen der Modellierung. In der Regel ist dies vor Allem für Daten mit einer weiten Spreizung besonders hilfreich, aber auch hier waren entsprechende Vorteile signifikant. Zudem wurde speziell darauf geachtet, die modellierten Datenbereiche so zu reduzieren, dass nur applikationstechnisch sinnvolle Werte einbezogen waren. Durch die raumfüllend geplanten Designs sind prinzipbedingt auch Kombinationen der Applikationsparameter enthalten, die diesem Kriterium nicht entsprechen. Die daraus folgenden Phänomene des Fahrverhaltens sind zwar physikalisch plausibel, werden durch die Algorithmen korrekt erkannt und liefern valide objektive Kriterien, allerdings liegen sie weit entfernt von einem späteren Zielbereich einer Optimierung und sind somit nicht von Interesse.

In den langen Messkampagnen der globalen Modellierung musste zudem signifikanter Drift der Zahlenwerte in Richtung komfortablerem Ansprechverhalten korrigiert werden. Dies ist damit zu begründen, dass während eines solchen globalen DoEs von 4.5 Stunden Dauer und ständig wiederkehrender sprunghafter Belastung, eine Aufweichung der Lager und weiteren Verbindungselemente zu beobachten ist, welche selbst subjektiv wahrgenommen werden kann. Aufgrund des

---

<sup>74</sup>Zur Definition gebräuchlicher statistischer Größen, mit denen die Qualität von Modellen bewertet werden kann, sei auf Anhang A.4 verwiesen.

Treibstoffverbrauchs<sup>75</sup> würde theoretisch ein Drift zu dynamischerem Ansprechverhalten bewirkt. Der entsprechende Masseverlust fällt aber im Verhältnis zu Gesamtmasse und Zuladung des Fahrzeugs kaum ins Gewicht und ist somit nicht in den Messdaten auffindbar oder wird durch den zuvor beschriebenen Effekt entscheidend überlagert.

Um die Qualität der so entstehenden globalen Modelle untersuchen und bewerten zu können, wurden, wie in Abschnitt 5.2.3 bereits angesprochen, zusätzlich unabhängige lokale und semi-globale Testpläne mit daraus resultierenden Modellen erstellt. Die laut Tabelle 3.7 für die subjektiven Bewertungen signifikantesten objektiven Kriterien  $t_{\max}^+ \frac{da}{dt}$ ,  $a_{FJpeak}$ ,  $VDV_{FJ}$  und  $t_{80\%}$  sind in Abbildung 5.6 vergleichend dargestellt, wobei die Größen in den jeweiligen zweidimensionalen Subräumen der Applikationsparameter visualisiert sind<sup>76</sup>, welche den größten Wertebereich der Modellantworten überstreichen. Als Betriebspunkt wurde hier beispielhaft  $2000 \frac{1}{\min}$  Drehzahl bei 50% Pedalposition ausgewählt. In der Darstellung ist erwartungskonform gut erkennbar, dass die Modelle an diesem Überlagerungspunkt die gleiche Aussage liefern. Dabei ist davon auszugehen, dass die lokale Modellierung die genauesten Einblicke in das Systemverhalten erlaubt. Es ist also zu bewerten, inwieweit die semi-globalen und globalen Modelle quantitativ davon abweichen.

Um dies bemessen zu können, und damit die Frage zu beantworten, ob das gemessene Verhalten des Fahrzeugs korrekt durch die jeweiligen Modelle abgebildet wird, sind in den voraus berechneten Testplänen spezielle Punkte zur Validierung vorgesehen. Die dort ermittelten Messdaten werden nicht zur Modellierung genutzt, sondern stattdessen verwendet, um auf Basis von Gleichung A.9 (angewandt auf die Validierungspunkte) den Kennwert

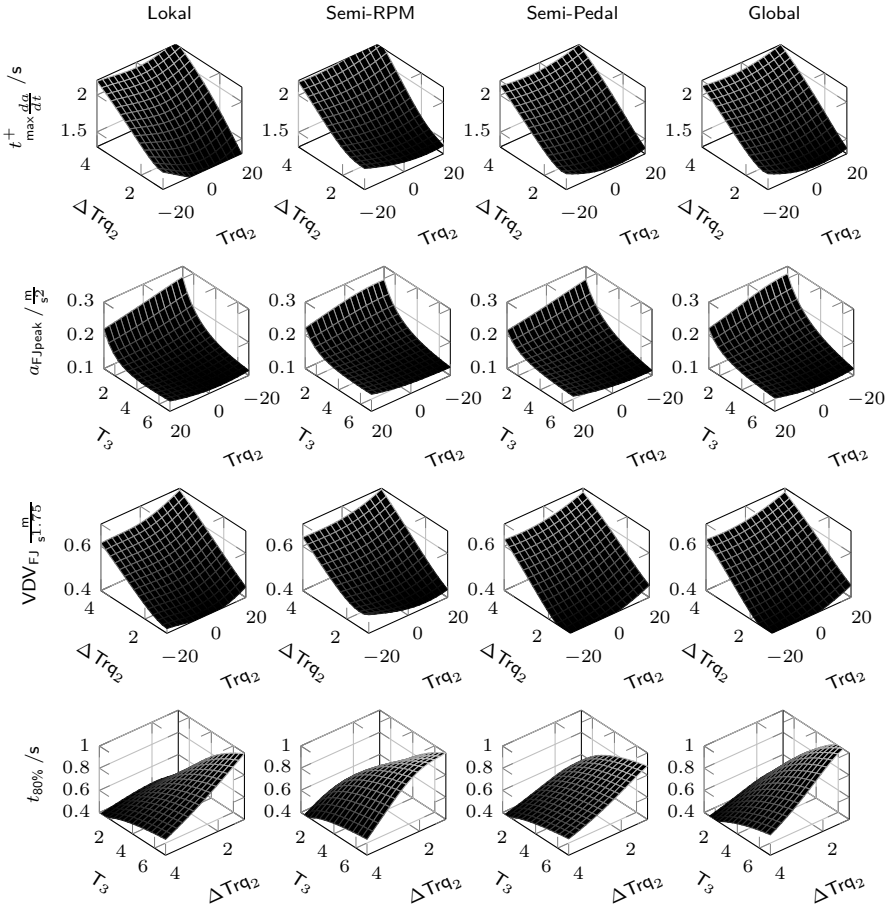
$$MS_{\text{val}} = \frac{1}{n_{\text{val}}} \sum_{i=1}^{n_{\text{val}}} (y_{i,\text{val}} - \hat{y}_{i,\text{val}})^2 \quad (5.6)$$

der Vorhersagequalität eines Modells zu berechnen. Um dabei so etwas wie einen unteren Schrankenwert zu erhalten, wurden die Validierungspunkte so platziert, dass sie möglichst weit von den Modellpunkten entfernt liegen, da angenommen wird, dass dort die Genauigkeit der Modellierung am geringsten ist.

Die Auswertung der Modellqualität ist in Form von Modellvorhersage über Messdaten zusammen mit den statistischen Kennwerten in Abbildung 5.7 für die be-

<sup>75</sup>Während eines solchen Versuchs im zweiten Gang mit 500 Messpunkten und 4.5 h Gesamtdauer werden etwa 150 km Wegstrecke zurückgelegt.

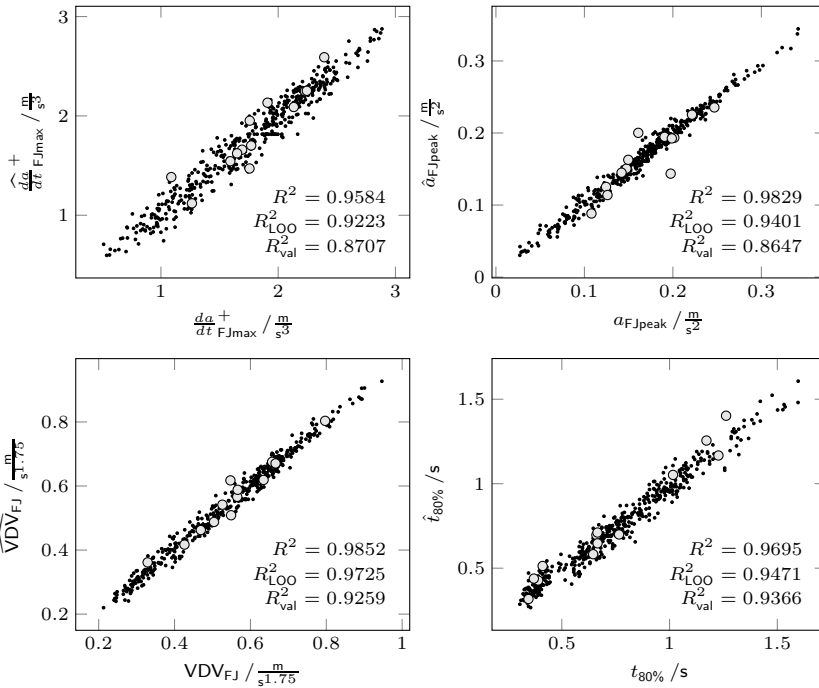
<sup>76</sup>Die Bezeichnung Semi-XYZ steht hierbei für ein semi-globales DoE mit variiertem Parameter XYZ.



**Abbildung 5.6:** Vergleich lokaler, semi-globaler und globaler Modellierung der nach Abschnitt 3.2.3 in Tabelle 3.7 (S. 46) identifizierten signifikanten objektiven Kriterien zur Beschreibung der Hauptkomponenten der subjektiven Bewertungen am Betriebspunkt mit Drehzahl  $2000 \frac{1}{\text{min}}$  und Pedalposition 50%. Der Übersichtlichkeit halber wurden die Einheiten an den x- und y-Achsen weggelassen und lauten  $\text{Trq}_2/\text{Nm}$ ,  $\Delta \text{Trq}_2/\text{Nm}$ ,  $T_3/\text{s}$ .

reits in Abbildung 5.6 gezeigten Größen dargestellt. Zusätzlich zu den Modellpunkten in schwarz sind die Validierungspunkte in grau eingezeichnet. Obwohl die statistischen Kennwerte nicht ganz das Niveau der Ergebnisse von stationären Prüfstandsmessungen erreichen, können die Modelle die Messdaten sowohl an

## 5.2 Überführung der DoE-Methodik auf die Fahrbarkeitsapplikation am Beispiel Tip-In



**Abbildung 5.7:** Modellvorhersage- vs. Messung-Plots der objektiven Kriterien  $\frac{da^+}{dt}_{FJmax}$ ,  $\alpha_{FJpeak}$ ,  $VDV_{FJ}$  und  $t_{80\%}$  von Modellpunkten (schwarz) und Validierungspunkten (grau).

den Modellierungspunkten des Testplans, als auch an den Validierungspunkten gut vorhersagen und qualifizieren diese damit aus rein numerischem Blickwinkel für weitere Schritte der Optimierung. Neben diesen Werten ist jedoch zuvor die applikationstechnische Aussagekraft der Modelle zu prüfen. Hierfür dienen in der Regel Trade-Off-Darstellungen, wie sie in Abbildung 5.8 gezeigt sind. Es sind dieselben Größen  $\frac{da^+}{dt}_{FJmax}$ ,  $\alpha_{FJpeak}$ ,  $t_{80\%}$  und  $VDV_{FJ}$  aus den vorangegangenen Illustrationen zu sehen, wobei hier alle möglichen Kombinationen der genannten Ausgangsgrößen abgebildet sind. Naheliegende Zusammenhänge sind gut in den einzelnen Teilbildern belegbar. So stehen die drei Größen  $\frac{da^+}{dt}_{FJmax}$ ,  $\alpha_{FJpeak}$  und  $VDV_{FJ}$  in proportionalen Zusammenhängen zueinander, was oben links, oben rechts als auch im Teilbild unten in der Mitte zu sehen ist. Alle drei Größen sind charakteristisch für die Intensität des ersten Rucks und quantifizieren somit den Komfortaspekt. Im Gegensatz dazu bilden sich markante Trade-Offs heraus, wenn

diese drei Größen jeweils zusammen mit der Zeit  $t_{80\%}$  dargestellt sind. Diese beschreibt wesentlich die Dynamik des Ansprechverhaltens, kann also nicht beliebig verbessert werden, ohne Einbußen im Komfort hinnehmen zu müssen. Auf eine explizite Darstellung des Trade-Off-Verhaltens mit Bezug zu den Eingangsgrößen wird hier verzichtet, da dies in globalem Sinne kaum Einblick in das jeweilige lokale Verhalten erlaubt. Für entsprechende beispielhafte Darstellungen der Trade-Offs am in Abbildung 5.6 gezeigten Betriebspunkt mit Drehzahl  $2000 \frac{1}{\text{min}}$  und Pedalposition 50% sei auf Anhang A.5 verwiesen.

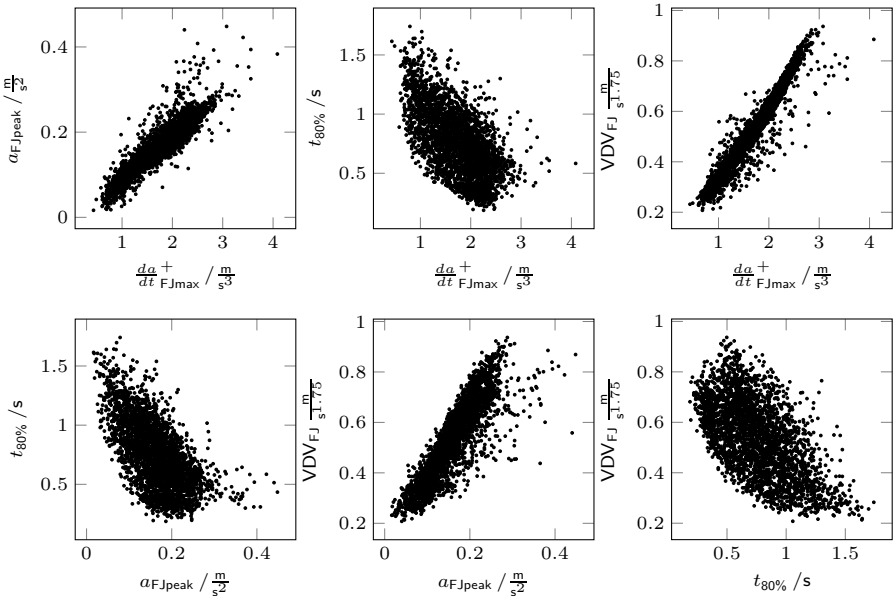


Abbildung 5.8: Trade-Off-Darstellungen der Größen  $\frac{da}{dt}_{FJmax}$ ,  $\alpha_{FJpeak}$ ,  $t_{80\%}$  und  $VDV_{FJ}$ .

### 5.2.5 Optimierung der Applikationsparameter

Neben der Möglichkeit zur detaillierten Analyse der Systemzusammenhänge zwischen kontrollierbaren Einflussparametern und Ausgangsgrößen ist ein wesentliches Ziel der modellbasierten Applikation die Optimierung der Systemeigenschaften. Es sind Einflussparameter gesucht, welche ausgewählte Zielgrößen für den

angestrebten Systemeinsatz optimieren [100]. Dies formuliert man häufig verallgemeinert in der Form

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{x}} f(\mathbf{x}) \\ \mathbf{x} \in S, \end{aligned} \quad (5.7)$$

mit

$$S = \{ \mathbf{x} \in \mathbb{R}^n : g_j(\mathbf{x}) \leq b_j, h_k(\mathbf{x}) = c_k \}, \quad (5.8)$$

$$j = 1, \dots, n_g, k = 1, \dots, n_h.$$

Hierbei sind  $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)^T$  der Vektor der Eingangsgrößen,  $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  die Zielfunktion,  $g_j : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $j = 1, \dots, n_g$  die Funktionen der Ungleichheitsnebenbedingungen,  $b_1, \dots, b_{n_g}$  die Grenzwerte der Ungleichheitsnebenbedingungen,  $h_k : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $k = 1, \dots, n_h$  die Funktionen der Gleichheitsnebenbedingungen und  $c_1, \dots, c_{n_h}$  die Grenzwerte der Gleichheitsnebenbedingungen [16]. In praktischen Anwendungsfällen sind in der Regel mehrere Funktionen  $f_i(\mathbf{x})$ ,  $i = 1, \dots, n_f$  zu erfüllen, was als multikriterielle Optimierung bezeichnet wird. Aufgrund der verschiedenen und unter Umständen konkurrierenden Zielgrößen, ist einer Lösung des gestellten Problems nie eindeutig, sondern es existieren vielmehr unendlich viele Lösungen. Dies wird als sogenanntes *Pareto-Prinzip* bezeichnet, wobei ein Lösungsvektor  $\mathbf{x}^* \in S$  als Pareto-optimal für ein multikriterielles Problem bezeichnet wird, wenn alle anderen Vektoren  $\mathbf{x} \in S$  zumindest für eine der Funktionen  $f_i$  einen höheren Wert annehmen, oder den gleichen Wert für alle Funktionen  $f_i$  erzielen [21]. Um dem zu begegnen werden die Funktionen  $f_i(\mathbf{x})$  zu einer neuen Zielgröße  $F : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  aggregiert, welche häufig in Form einer gewichteten Summe<sup>77</sup>

$$F(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^{n_f} w_i \frac{f_i(\mathbf{x})}{\psi_i} \quad (5.9)$$

definiert wird. Sie wird als Kostenfunktion bezeichnet, wobei  $w_1, \dots, w_{n_f}$  entsprechende Wichtungsfaktoren und  $\psi_1, \dots, \psi_{n_f}$  zusätzliche Normierungsfaktoren sind, die einen einheitlichen Beitrag der individuellen Zielgrößen sicherstellen. Auf eine detailliertere Aufbereitung der mathematischen Theorie zur Optimierung, entsprechende Algorithmen und numerische Vorgehensweisen wird hier verzichtet und stattdessen auf entsprechende Stellen der Literatur [12, 16, 24, 74] verwiesen.

---

<sup>77</sup>Es existieren auch Verfahren bei denen die entsprechenden Anteile anders zu einer skalaren Größe kombiniert werden. Eine weitere Methode ist zum Beispiel die Bildung eines Produkts  $F(\mathbf{x}) = \prod_{i=1}^{n_f} w_i f_i(\mathbf{x})$ .

Um dies nun auf die Optimierung der Applikationsparameter für das Tip-In-Manöver anzuwenden, ist die Frage zu stellen, wie die Funktionen  $f_i$  aussehen müssen, um gewünschtes marken- und kundenspezifisches Verhalten zu erzielen. Vor allem bei der Einführung einer solchen neuen Methodik wird es schwierig sein, ohne entsprechende Erfahrung die Funktionen  $f_i$  bzw.  $g_j$  und  $h_k$  mit zugehörigen Grenzwerten derart zu definieren, dass sie direkt einem der nach Abschnitt 5.2.4 entwickelten Modelle entsprechen. Hier bringen jedoch die in Abschnitt 3.2.3 bereiteten Grenzapplikationen Abhilfe. Man verwendet sie dazu, die Ergebnisse der objektiven Kriterien zu den dabei aufgenommenen Grenzwerten der subjektiven Bewertungen zuzuordnen. Diese dienen dann dazu die  $b_j$  und  $c_k$  zu definieren. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die in diesem Abschnitt ebenfalls angesprochene Option der Modellierung der Zusammenhänge zwischen den objektiven Kriterien und subjektiven Bewertungen zu gebrauchen. Man formuliert dabei die Kostenfunktionsanteile  $f_i$  sowie die Nebenbedingungen  $g_j$  und  $h_k$  in Form der subjektiven Bewertungen und kann so die Grenzwerte direkt im Zahlenbereich 1...10 angeben. Beide Vorgehensweisen sind mathematisch gleichwertig und je nach Belieben zu verwenden. Unter Umständen müssen die  $f_i$  sogar spezifisch pro Betriebspunkt aufgeschlüsselt werden, wenn die Wichtung an diesen unterschiedlich sein soll. Die Kennfelder werden dann auf dieser Basis optimiert. Je nachdem ob die Modelle in lokaler, semi-globaler oder globaler Form erstellt wurden, wird auch der Optimierungsvorgang in entsprechender Art möglich sein. Es soll hier nochmal darauf hingewiesen werden, dass „global“ in diesem Zusammenhang nicht als global im Sinne des Optimierungsproblems, also nicht als absolut beste Kombination der Eingangsgrößen zu verstehen ist. Stattdessen ist der Betriebsbereich des Fahrzeugs gemeint, was gleichbedeutend damit ist, ob einzelne Kennfeldstützstellen (lokal), Bereiche (semi-global) oder gesamte Kennfelder (global) vom Algorithmus bearbeitet werden.

Außerdem besteht im hier betrachteten Anwendungsfall der Fahrbarkeitsapplikation eine weitere Besonderheit der globalen Optimierung im Vergleich zu Verbrauchs- oder Emissionsoptimierungsaufgaben, wie sie in verschiedensten Veröffentlichungen dokumentiert sind. Diese besteht darin, dass dort in den meisten Fällen Summen- bzw. Integralkriterien als Optimierungsziele angesetzt werden, wie zum Beispiel der Gesamtverbrauch oder die Gesamtemissionen während eines Zyklus. Dass solche Forderungen für das empfundene Fahrzeugverhalten keine Anwendung finden, ist leicht ersichtlich. So kann kaum sinnvoll gefordert werden, dass die aufsummierte Ansprechverzögerung im betrachteten Betriebsbereich einen Gesamtwert nicht übersteigen darf und dabei zum Beispiel bei hohen Drehzahlen größere Werte akzeptiert werden, weil in niedrigen Bereichen sehr kleine Werte realisiert sind. Vielmehr sind alle Betriebspunkte des Fahrzeugs mit Bezug zum Fahrbarkeitsverhalten unter diesem Aspekt zunächst als unabhängig

voneinander anzusehen. Die zugehörige Optimierungsaufgabe kann als Menge unabhängiger lokaler Optimierungen aufgefasst werden. Neben den direkt auf die applikative Abstimmung bezogenen Anteilen der Kostenfunktion darf jedoch ein weiterer Anteil nicht unbeachtet bleiben - die geometrische Glattheit der zu applizierenden Kennfelder. Obwohl diese Notwendigkeit in den oben angesprochenen Anwendungsfällen der Emissionierung meist allgemein aus Gründen der Fahrbarkeit argumentiert wird, ist damit genauer die Kontinuität und Konsistenz des Fahrzeugverhaltens gemeint. So wäre ein, aufgrund von Sprüngen im Kennfeld entstehendes, plötzlich ruckartiges Ansprechverhalten bei 60% Pedalposition, während dies bei 40% und 80% nicht charakteristisch ist, nicht erwartet und unerwünscht. In den meisten modernen Werkzeugen zur modellbasierten Applikation und Optimierung sind bereits Algorithmen zur Realisierung solcher Anforderungen integriert, sodass diese nicht manuell in der Definition der Kostenfunktion berücksichtigt werden müssen. Dabei dienen häufig eine Vielzahl von Parametern (z.B. zur Justierung zwischen Glattheit und Genauigkeit oder der Erfüllung bestimmter Gradienten in entsprechenden Kennfeldrichtungen) dazu, das gewünschte Ergebnis zu beeinflussen. Der genannte Aspekt der Konsistenz kann im vorliegenden Fall der Fahrbarkeitsapplikation allerdings nicht ausschließlich mit Hilfe von Glattheit allein gelöst werden. Zur Erklärung dessen sei nochmal das gerade genannte Beispiel der Pedalpositionen herangezogen. In der Regel wird erwartet, dass sich das Ansprechverhalten mit steigender Pedalposition dynamischer gestaltet. Das bedeutet, dass für die Form der Kennfelder in den entsprechenden Richtungen eine Art Form oder Erfüllung eines Trends erwartet wird. Diese Anforderung kann in die Optimierung mit einbezogen werden, indem man entsprechende Kostenterme aufnimmt, deren Anteil an den Gesamtkosten steigt, je weiter das berechnete Kennfeld von der Zielform entfernt ist.

Die vorangegangenen Überlegungen führen zu einer Optimierungsaufgabe aus einer Kompromissabstimmung zwischen den subjektiven Bewertungen Ansprechen  $f_1(\mathbf{x})$  und Ruck  $f_2(\mathbf{x})$ , repräsentiert durch die sie charakterisierenden objektiven Kriterien. Die Wahl dieser Funktionen ist nicht einfach, da trotz der Untersuchungen zur Validierung aus Abschnitt 3.2.3 eine direkte Modellierung der subjektiven Bewertungen in Abhängigkeit von den objektiven Kriterien nur schwer auf Basis dieser kleinen Datenmenge möglich ist. Dies ist darin begründet, dass die subjektiven Bewertungen nur in einer groben Quantisierung von einem Notenpunkt (teilweise werden auch halbe Noten vergeben) vorliegen. Ein Ersatz basiert hier auf den ebenfalls in Abschnitt 3.2.3 bestimmten Korrelationskoeffizienten. Multipliziert man diese mit dem Verhältnis der Standardabweichungen der subjektiven Bewertungen und objektiven Kriterien  $\frac{\sigma_{\text{subj}}}{\sigma_{\text{obj}}}$ , erhält man die Anstiege für die linearen Anteile des jeweiligen Zusammenhangs. Für die Funktionen  $f_1(\mathbf{x})$  und  $f_2(\mathbf{x})$

wurden nur die am höchsten signifikanten Anteile aus Tabelle 3.7 verwendet<sup>78</sup>, welche in den nachfolgenden Gleichungen 5.10 und 5.11 gegeben sind. Die dort enthaltenen objektiven Kriterien stehen für die Vorhersagen der zuvor bestimmten GP-Modelle. Sie sind weiterhin abhängig vom Eingangsvektor  $\mathbf{x}$  aus Applikationsparametern sowie den beiden Anteilen des Betriebspunkts, also:

$$\begin{aligned} f_1(\mathbf{x}) &= f_1\left(t_{80\%}(\mathbf{x})\right) \\ &= -0.795 \frac{\sigma_{\text{Ansprechen}}}{\sigma_{t_{80\%}}} t_{80\%} \end{aligned} \quad (5.10)$$

und

$$\begin{aligned} f_2(\mathbf{x}) &= f_2\left(\frac{da^+}{dt}_{\text{FJmax}}(\mathbf{x}), \text{VDV}_{\text{FJ}}(\mathbf{x})\right) \\ &= -0.836 \frac{\sigma_{\text{Ruck}}}{\sigma_{\frac{da^+}{dt}_{\text{FJmax}}}} \frac{da^+}{dt}_{\text{FJmax}} - 0.828 \frac{\sigma_{\text{Ruck}}}{\sigma_{\text{VDV}_{\text{FJ}}}} \text{VDV}_{\text{FJ}}. \end{aligned} \quad (5.11)$$

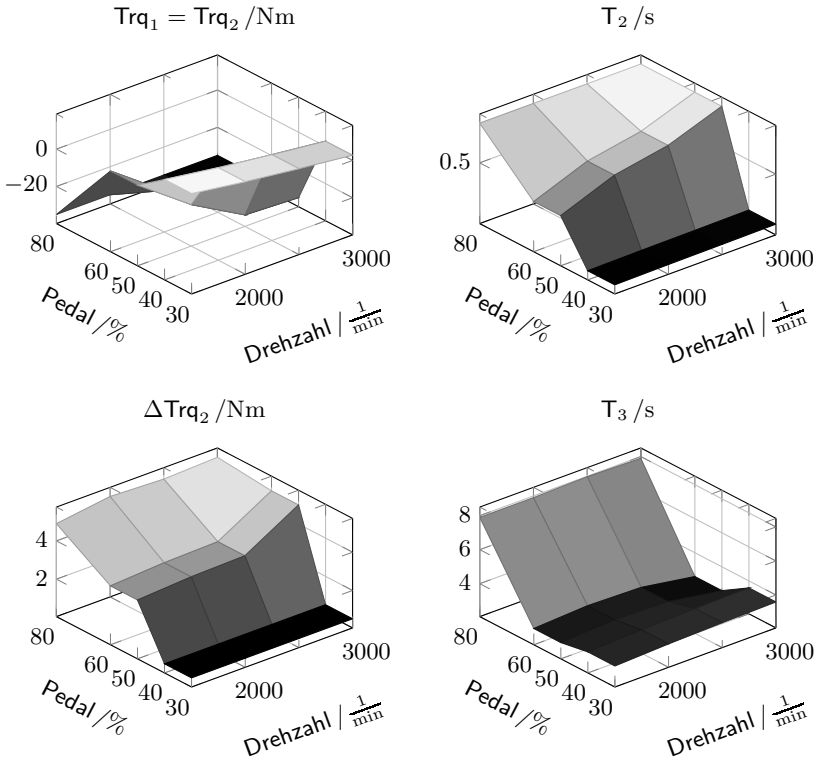
Neben den Hauptkomponenten der subjektiven Bewertungen werden die Störfekte als Nebenbedingungen oder mittels weiterer Kosten einbezogen, je nachdem ob diese minimiert werden oder nur bestimmte Grenzwerte nicht überschreiten sollen. Hier wurde speziell eine Minimierung von  $f_3(\mathbf{x}) = \text{VDV}_{\text{Surge}}$  angewandt. Die letztlich aufgestellte Kostenfunktion ergab sich dann zu

$$F(\mathbf{x}) = 1.00 \cdot f_1(\mathbf{x}) + 0.70 \cdot f_2(\mathbf{x}) + 0.05 \cdot f_3(\mathbf{x}). \quad (5.12)$$

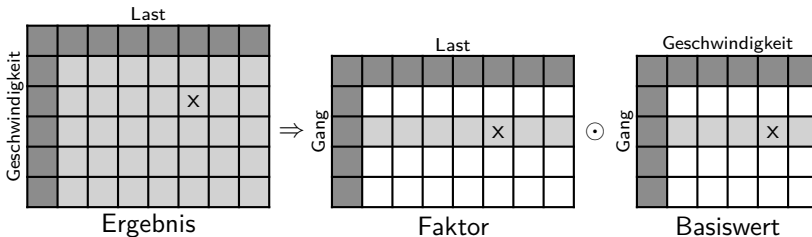
Abbildung 5.9 zeigt die Ergebnisse entsprechend der vorangehend beschriebenen Optimierungsaufgabe. Diese sind dort über dem Betriebsbereich aus Drehzahl und Fahrpedal aufgetragen. Da dies jedoch in manchen Fällen nicht der Struktur entspricht, in der die Parameter in der ECU definiert und abgelegt sind, sind die Ergebnisse in diesem Fall zunächst nur virtuelle Zwischenwerte, die noch auf die letztendlich kalibrierbaren Kennfelder umgerechnet werden müssen.

Genau dieser Umstand ist in Abbildung 5.10 illustriert. Die numerischen Ergebnisse der linken Seite  $r_{ij}$  entsprechen den gerade zuvor optimierten Ergebnissen. Sie ergeben sich in der ECU aus der Multiplikation eines Basiswerts mit einem entsprechenden Korrekturfaktor. Die letztendlichen Kennfeldeinträge der entsprechenden Gang-Zeile des Basiskennfelds ( $g_j$ ) und Faktorkennfelds ( $l_i$ ) bestimmen

<sup>78</sup>Bezieht man hier zu viele Anteile ein, gelangt man zu rein linearen Zusammenhängen, welche für eine Optimierung nicht angemessen sind. Dies ist in der Charakteristik des Korrelationskoeffizienten begründet, welcher ein Maß für das Vorliegen eines linearen Zusammenhangs zwischen den betrachteten Datensätzen darstellt.



**Abbildung 5.9:** Optimierungsergebnisse der Einflussparameter für die Abstimmung des Tip-In-Manövers entsprechend der gewählten Gewichtungen aus den Gleichungen 5.10 bis 5.12



**Abbildung 5.10:** Beispiel für die Überführung der Ergebniswerte auf entsprechende ECU Kalibrierparameter

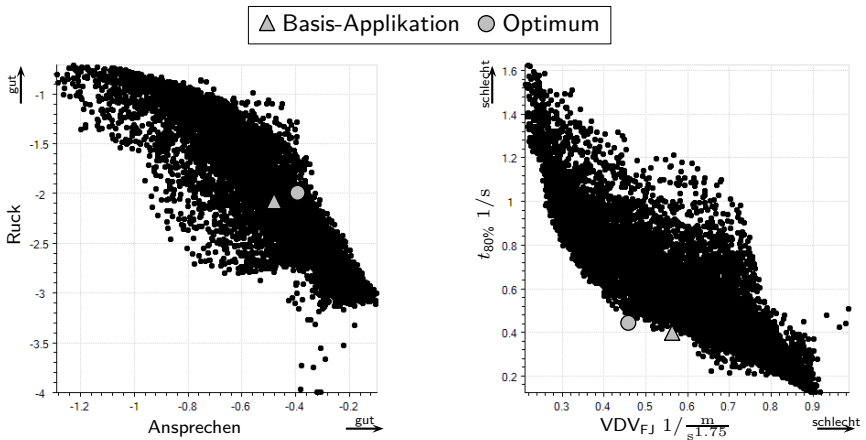
sich dann pro Gang und Applikationsendwert aus einer Optimierungsaufgabe fol-

gender Form

$$\min \sum_i \sum_j (l_i \cdot g_j - r_{ij})^2. \quad (5.13)$$

Diese kann mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate gelöst werden. Im gezeigten Beispiel werden die gangspezifischen Kennfeldeinträge des Basiswerts jeweils mit einem Faktor der Laststellung des Pedals verrechnet und entsprechend angewandt. Demzufolge haben die Basiswerte eines Gangs Einfluss auf mehrere Bereiche der ermittelten Optimierungsergebnisse.

Abbildung 5.11 zeigt einen Vergleich des Optimierungsergebnisses mit der Basisapplikation am bereits mehrfach exemplarisch verwendeten Betriebspunkt mit Drehzahl  $2000 \frac{1}{\text{min}}$  und Pedalposition 50%. Die beiden Applikationen sind gemeinsam in Trade-Off-Darstellungen von Ruck über Ansprechen (links) und  $t_{80\%}$



**Abbildung 5.11:** Vergleich des Optimierungsergebnisses mit der Basisapplikation am Betriebspunkt mit Drehzahl  $2000 \frac{1}{\text{min}}$  und Pedalposition 50%

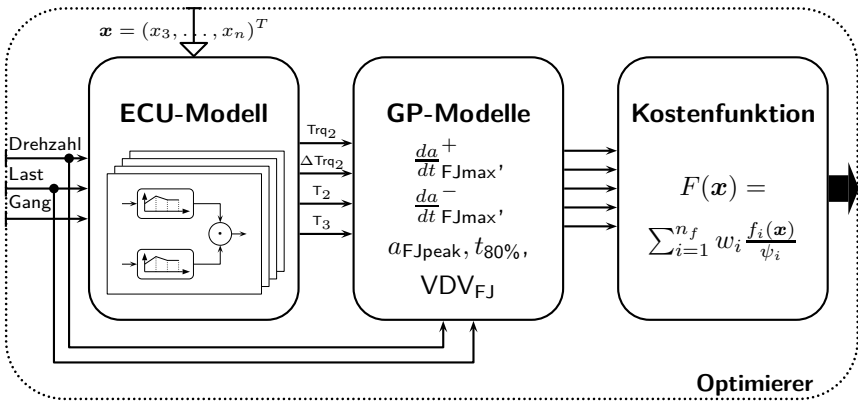
über  $VDV_{FJ}$  (rechts) gezeigt. Der Punkt wurde ausgewählt da er einen Effekt gut illustriert. Mit Parametern, die verhältnismäßig weit von den üblichen Werten der manuellen Abstimmung entfernt liegen (siehe Tabelle 5.3) konnte hier unter geringfügig schlechterer Ansprechzeit  $t_{80\%}$  eine entscheidende Verbesserung im  $VDV_{FJ}$  erreicht werden.

Eine weitere Möglichkeit die Optimierungsaufgabe zu formulieren besteht darin, die ECU-Struktur direkt in diese mit einzubeziehen. Dabei werden im Vektor  $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)^T$  der Eingangsgrößen nicht mehr die Eingänge der GP-Modelle verwendet, sondern die tatsächlichen Kennfeldeinträge der Applikationsparameter

	Trq <sub>2</sub>	ΔTrq <sub>2</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>
Basis-Applikation	11.000	3.000	0.200	2.500
Optimum (2000 $\frac{1}{\text{min}}$ , 50%)	22.000	0.575	0.207	0.849

**Tabelle 5.3:** Vergleich des Optimierungsergebnisses mit der Basisapplikation am Betriebspunkt mit Drehzahl 2000  $\frac{1}{\text{min}}$  und Pedalposition 50%

zusammen mit Drehzahl und Last<sup>79</sup>. Der Optimierer variiert den Vektor  $\mathbf{x}$ , wobei die Elemente mit einem geeigneten Algorithmus in die entsprechenden Kennfelder des ECU-Teilmodells verteilt werden. Das Teilmodell der ECU wird an verschie-



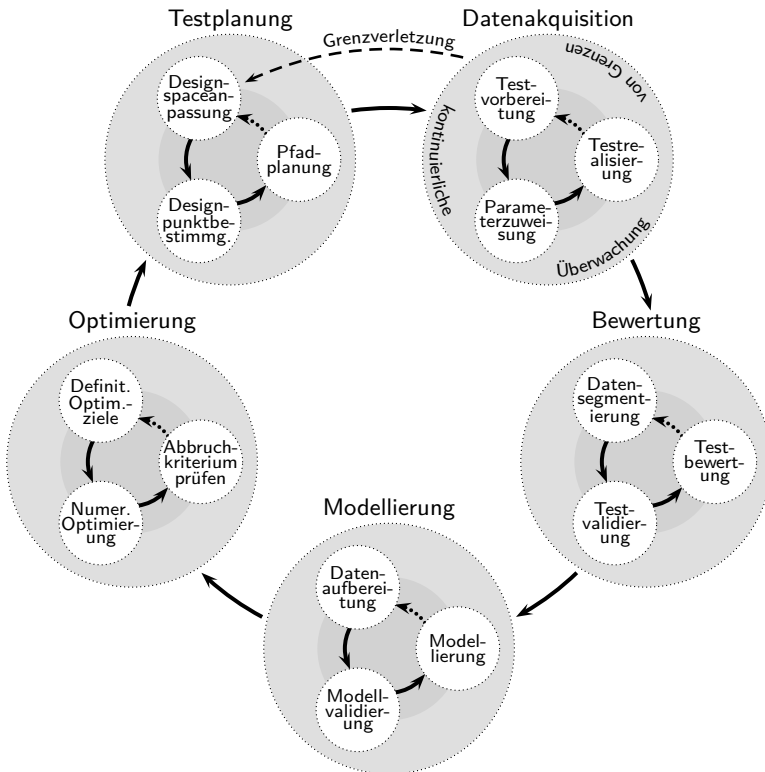
**Abbildung 5.12:** Schema zur Erklärung der Möglichkeit die ECU-Struktur direkt in die Optimierung einzubeziehen

denen Betriebspunkten für den Optimierer als Blackbox ausgewertet. Die daraus entstehenden Formungsparameter werden auf die GP-Modelle angewandt, deren Anteile dann über die Gleichungen  $f_i(\mathbf{x})$  mit den jeweiligen Wichtungen in die Gesamtkosten (schwarzer dicker Pfeil rechts) eingehen.

<sup>79</sup>In Abbildung 5.12 ist zusätzlich der Gang als Einflussgröße eingezeichnet, welcher aber im vorliegenden Beispiel nur einen Konfigurationsparameter darstellt. Dies ergibt sich daraus, dass es nicht angebracht ist, globale Modelle zu erstellen, die mehrere Gänge umspannen.

### 5.2.6 Online DoE

In Abschnitt 5.1 wurde darauf hingewiesen, dass auf Basis der Methoden aus Kapitel 4 weitere Schritte der vollständigen Automatisierung von ganzen Applikationsprozeduren möglich sind. Wie dies umgesetzt werden kann, wird in diesem Abschnitt betrachtet. Die Grundidee ist nachfolgend als Abwandlung der Abbildung 2.1 des modellbasierten Applikationsprozesses gezeigt. Ausgehend von



**Abbildung 5.13:** Grundschaema vollständig automatisierter modellbasierter Applikationsprozesse

einem initialen Design<sup>80</sup> muss dynamisch der Pfad zum Erreichen des nächsten Punkts geplant werden. Um die Messung durchführen zu können, sind in

<sup>80</sup>Das initiale Design wurde hier aus Gründen der Allgemeinheit aufgenommen. Es könnte auch leer sein.

der Regel entsprechende Vorbereitungen wie das Anfahren und Stabilisieren eines Betriebspunkts notwendig. Danach werden die Applikationsparameter laut der Planung eingestellt und die Messung durchgeführt. Die Messzeit kann stark reduziert werden, wenn Methoden zur Endwertvorhersage [67] Anwendung finden. Im Falle von sicherheitskritischen Versuchen müssen kontinuierlich entsprechende Grenzen überwacht werden. Nachdem aus den aufgenommenen Messdaten die relevanten Bereiche extrahiert sind, ist zu prüfen, ob der Versuch konform zu den gestellten Anforderungen durchgeführt wurde. Sofern dies bestätigt wird, schließt sich die Bewertung des Tests und damit der Applikationsqualität an. Daraufhin müssen die gewonnenen Daten häufig in der Art aufbereitet werden, dass zusätzlich Filter, Berechnungen virtueller Größen oder ähnliche Prozeduren angewandt werden. Wenn bereits ein Modell für das zu untersuchende Verhalten vorliegt, ist es sinnvoll dieses mit den neuen Messdaten zu validieren, bevor sie danach in die Modellierung einbezogen werden [63]. Je nach Art der Modellierung wird der Versuchsraum dabei dynamisch in unterschiedliche Bereiche aufgeteilt um die Qualität der Modelle dort lokal zu verbessern, wo zum Beispiel kritische Bereiche mit starken Nichtlinearitäten erkannt werden [52, 64]. Auf Basis der aktualisierten Modelle wird anschließend optimiert und falls das formulierte Abbruchkriterium noch nicht erfüllt ist, beginnt der Prozess unter Nutzung der neuen Ergebnisse von vorn.

Die in der Abbildung angedeutete Schließung der inneren Abläufe innerhalb eines Hauptschritts repräsentiert die Möglichkeit, diese jeweils blockförmig zu bearbeiten. So ist es in einigen Anwendungsfällen nützlich, einen Satz an Punkten zu planen, gemeinsam zu vermessen, zu modellieren und abschließend auf eine Optimierung durchzuführen. Da dies als Option anzusehen ist, wurden die entsprechenden Pfeile gepunktet dargestellt. In manchen Fällen ist es außerdem sinnvoll, zwei oder mehrere der Prozessabläufe gleichzeitig laufen zu lassen und sie gegeneinander zu verschränken [67]. Dies ist dann als Möglichkeit der Effizienzsteigerung in Betracht zu ziehen, wenn die datenverarbeitenden Schritte der Bewertung, Modellierung und Optimierung nicht vernachlässigbare Rechenaufwände in Anspruch nehmen. Dann können, während der Phase der Berechnungen auf Basis des letzten Messdatensatzes, parallel bereits neue Messungen realisiert werden.

Einen besonderen aber wichtigen Fall stellt in diesem Ablauf die Situation dar, dass sich der Motor während des Anfahrens eines Punkts oder während der Messungen in den Grenzbereich sicherheitsrelevanter Motorgrößen begibt, somit also ein gefahrfreier Betrieb nicht garantiert werden kann. Als einfachste Reaktion wird der Punkt dann verworfen und stattdessen mit der nächsten Kombination an Eingangsgrößen fortgefahren. Für komplexere Methoden existieren verschiedene Ansätze in der Literatur. Sie nutzen dabei zum Teil motorisches Verständnis

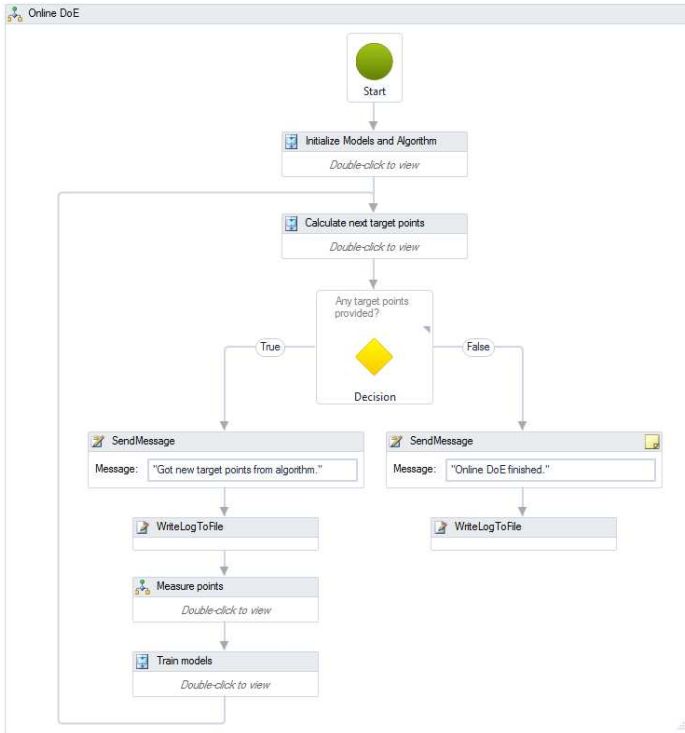
und entsprechend geschicktes Anfahren bestimmter Raumrichtungen [25] oder Screening-Algorithmen mit adaptiven Schrittweiten und konvexer Modellierung des Verlaufs der Grenze [20, 89, 121]. Andere erweitern diese häufig genutzte Methode hin zu konkaven Räumen mit entsprechend angepassten Strategien zur Platzierung der Punkte [93]<sup>81</sup>.

Für den Anwendungsfall der Tip-In-Abstimmung werden Grenzen des Versuchsraums nicht durch sicherheitskritische Konstellationen markiert, da der Motor mit entsprechenden Sicherheitsmechanismen vollständig appliziert ist und der Grenzbereich während der Abstimmung selten überhaupt berührt wird. Vielmehr sind die Grenzen dadurch gegeben, dass zum Beispiel in manchen Drehzahlbereichen bei kleinen Pedalsprungweiten gar keine spürbare Fahrzeugreaktion entsteht (z.B. in höheren Gängen). Es bringt Vorteile diese Konstellationen zu erkennen und während der dynamischen Berechnung weiterer Punkte zu berücksichtigen, um so die Anzahl nicht realisierbarer Versuche auf ein Minimum zu reduzieren. Aufgrund der bereits angesprochenen Charakteristik der Fahrbarkeitsapplikation, einzelne Versuche mit dynamischen Übergängen aufzunehmen, ist eine genaue Bestimmung der Grenzwerte durch iteratives Antasten jedoch nicht zielführend. Stattdessen wurden im Falle der Nicht-Fahrbarkeit diese Punkte als äußerer Rand markiert, so dass in der folgenden Kampagnendurchführung keine neuen Punkte außerhalb angeboten wurden. Sobald ein weiterer Punkt innerhalb des bisher als fahrbar erachteten Bereichs nicht realisierbar ist, wird die Grenze entsprechend bis zu diesem nach innen verschoben. Auf diese Weise entsteht eine gute Beschreibung des Grenzbereichs.

Abbildung 5.14 zeigt den Workflow der zur Anwendung kam, um den entwickelten Algorithmus im Fahrzeug zu testen, nachdem er für verschiedene Referenzprobleme in simulativer Umgebung vorbereitet war. Er ist in MATLAB umgesetzt, über die bereits angesprochene Schnittstelle eingebunden und nutzt auch während der Online-Modellierung GP-Modelle. Als Testsetup im Fahrzeug wurde zunächst ein Problem mit zwei Applikationsparametern sowie Drehzahl und Last gestellt. Die Grenzen wurden nach unten durch Mindestanforderungen an Dynamik ( $t_{80\%}$ ) und nach oben durch nicht zu überschreitende Werte für Komfort ( $VDV_{FJ}$ ) definiert. Außerdem kam ein initial raumfüllend berechneter Testplan mit 20 Punkten zum Einsatz. Entscheidender Aspekt bei allen Algorithmen des aktiven Lernens ist die Berechnung des nächsten Versuchspunkts in der Art, dass die Modellqualität schrittweise verbessert wird. Ein Ansatz ist die Aufteilung des Versuchsraums in

---

<sup>81</sup>Weitere rückläufige Pfade, die zu innerem iterativen Verhalten führen (z.B. die Situation, dass eine Versuchsdurchführung als nicht valide eingestuft wird und der Messpunkt wiederholt oder verworfen werden müsste), sind in der Darstellung aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht eingeführt.



**Abbildung 5.14:** Workflow zur Realisierung der Online-DoE Methodik mit automatischer Modellierung

Teilmodelle und der Bestimmung ihrer Qualität zum Beispiel mittels  $R^2$  [67]. Andere Verfahren nutzen dieselben Methoden, die zur offline Planung herangezogen wurden, wobei auf Basis der Fisher-Informationsmatrix eine Schätzung für die Modellqualität herangezogen wird [107, 122]. Im Vergleich dazu bieten die hier verwendeten GP-Modelle den Vorteil, dass bei der Berechnung der Modellvorhersagen bereits entsprechende Informationen für deren Vertrauenswürdigkeit entstehen.

Der Algorithmus modelliert während des Verfahrens simultan das Verhalten des Fahrzeugs als auch den Verlauf der Grenzen. Eine direkte Optimierung wird bisher nicht durchgeführt. Selbst ohne Anteile zur lokalen Verfeinerung des Messrasters (es wird ausschließlich raumfüllend geplant) konnte der Algorithmus seine Funktionalität im Fahrzeug in ersten Versuchen beweisen und muss nun weiteren Erweiterungen unterzogen werden.

# Zusammenfassung und Ausblick

Der heutige Fahrzeugapplikationsprozess ist stark durch manuelle Arbeiten und iteratives Vorgehen geprägt. Strukturiert methodische Herangehensweisen sind selten veröffentlicht und wenig in der Praxis angewandt. Dies führt dazu, dass die erzielten Ergebnisse wesentlich von den Fähigkeiten und der Erfahrung der bearbeitenden Ingenieure abhängen. Am Beispiel der Fahrbarkeitsapplikation, bei der im traditionellen und heute noch weit verbreiteten Vorgehen die Qualität des Applikationsergebnisses zudem mittels subjektiver Bewertungen ermittelt wird, liefert die vorliegende Arbeit eine durchgängige Methodik um dem entgegenzutreten.

Zunächst wird ein Vorgehensmodell zur Entwicklung objektiver Kriterien abgeleitet. Bei diesem werden die nicht-stationären Messdaten der durchgeführten Fahrmanöver auf physikalisch motivierte charakteristische Kennwerte reduziert. Es wird gezeigt, wie Anwärter für solche Kennwerte mittels statistischer Methoden systematisch untersucht, verfeinert und validiert werden können, um so zu einem Satz objektiver Kriterien zu gelangen, die das Verhalten des Versuchs vollständig beschreiben. Für die betrachtete Domäne der Fahrbarkeitsapplikation wird dies am Manöver des Tip-In exemplarisch diskutiert. Eine wesentliche Größe der Objektivierung stellt hierbei der sogenannte Vibration Dose Value (VDV) dar, dessen korrekte Anwendung im Detail besprochen wird.

Eine wesentliche Grundlage zur weiteren Verwendung solcher Kriterien ist die reproduzierbare Durchführung der benötigten Messkampagnen. Hierfür wird eine Möglichkeit zur Automatisierung beschrieben, die vollständig auf zusätzliche Hardware wie Fahrroboter oder Pedalaktuatoren verzichtet. Stattdessen wird die teil- und vollautomatische Durchführung von Fahrmanövern und ganzen Kalibrieraufgaben rein auf Basis von Software über die Fernsteuerung des Applikationstools realisiert. In diesem Zusammenhang wurde ein Werkzeug zur Verfügung gestellt, welches die grafische Modellierung derartiger Aufgaben ermöglicht und so einen wesentlichen Vorteil gegenüber der textuell programmierten Beschreibung von Automatisierungsaufgaben aufweist.

Auf Basis dieser beiden Komponenten der Objektivierung und Automatisierung wird anschließend dargelegt, wie das strukturierte Vorgehen der Prüfstandsapplikation konsistent auf die Arbeit im Fahrzeug übertragen werden kann. Es wird erläutert welche Schritte zu gehen sind, um die Methodik des Design of Experiment (DoE) in der Praxis der Applikation im Fahrzeug anwendbar zu machen. Nach der angepassten Beschreibung des Versuchsraums und anschließender globaler Modellierung mit Gaußprozess-Modellen wird die Optimierung gesondert betrachtet. Die möglicherweise anfängliche Schwierigkeit der Formulierung von Optimierungszielen im Raum der objektiven Kriterien wird dadurch getilgt, dass ersatzweise die subjektiven Bewertungsgrößen (ausgedrückt als Funktionen der objektiven Kriterien) Verwendung finden. Zudem wird kurz auf die angepasste Distribution der Ergebniswerte in die tatsächlich bestehenden Strukturen der verwendeten Motorsoftware eingegangen.

Den Abschluss der Arbeit bildet der Übertrag online-adaptiver Verfahren auf die Anwendung im Fahrzeug. Die in den letzten Jahren erlangten Vorteile in der Prüfstandsarbeit bieten auch bei der Applikation im Fahrzeug erhebliches Potential für Einsparungen an Entwicklungszeit und -kosten. Obwohl die gegenwärtigen Trends, die unter dem Namen „From road to rig to desktop“<sup>82</sup> gerade in aller Munde sind, inhaltlich nicht aufgeworfen werden, stehen die Ergebnisse dieser Arbeit doch in mittelbarem Zusammenhang mit dieser Thematik. So wird es auf nicht absehbare Zeit trotz der angesprochenen Bestrebungen weiterhin unumgänglich sein, Versuche sowie Anteile der Arbeit im Fahrzeug durchzuführen. Die Arbeit leistet einen Beitrag, um auch hier möglichst hohe Effizienz zu erreichen und so den Gesamtprozess in Richtung eines Optimums zu lenken.

Die hier entwickelte Methodik ist jedoch keinesfalls auf die im Detail untersuchte Domäne der Fahrbarkeitsapplikation beschränkt. Bei vielen Aufgaben haben die entsprechenden Applikationsingenieure aus ihrer Erfahrung zugehörige Kriterien

---

<sup>82</sup>deutsch: „Von der Straße auf den Prüfstand an den Schreibtisch.“

zur Gütebewertung der Applikation zur Verfügung. Die Zusammenhänge zwischen Eingangsparametern und Ergebnisgrößen auf dieser Grundlage zu modellieren und anschließend numerisch zu optimieren ist auf jedwede dieser Aufgaben übertragbar. Entscheidend ist hierbei ein strukturiertes Vorgehen.

Während der Bearbeitung des Themas ergab sich auch eine allgemeiner angesiedelte nicht-technische Herausforderung, die auf viele andere Aspekte unserer heutigen Welt übertragbar ist. Sie besteht in der Aggregation, Konservierung und Weitervermittlung des bestehenden Wissens. Im hier bearbeiteten Fall eröffnete sich diese Problematik vor allem in der Ableitung der Algorithmen zur Objektivierung sowie der diskutierten Möglichkeit einer zielgerichteten strategischen Optimierung. In nicht wenigen Fällen ist die jahrelange Erfahrung und das daraus gewachsene Bauchgefühl ein entscheidender, wenn nicht sogar der Erfolg bringende, Faktor. In der Regel ist diese nur in glücklichen Gegebenheiten bereits in Form kleiner Tools als Algorithmus existent. Dieses Wissen erfahrener Spezialisten zu sammeln und für spätere Arbeiten und Generationen zu konservieren, ist ein aktuelles Thema der Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung. Das Ergebnis der vorliegenden Arbeit, das neben der schriftlichen Ausarbeitung in der parallel entwickelten und professionalisierten Software besteht, versucht dies durch die bereits diskutierte Workflow-Lösung sowie leichte Integration eigener Algorithmen aufzugreifen. Die darin erarbeiteten grafischen Beschreibungsformen bieten neben ihrer vollständigen Automatisierbarkeit genau den Vorteil, eine bildliche Dokumentation des Wissens darzustellen. Der Transfer und das Erlernen der Zusammenhänge wird neu einzuführenden Mitarbeitern dadurch wesentlich vereinfacht.

Abschließend soll ein weiterer Vorteil dieser Dokumentationsform kurz angerissen werden, falls diese kontinuierlich und stringent verfolgt wird. Während des Prozesses der Entwicklung der Motorsteuergeräte-Software, muss jede vorgenommene Änderung, von der auslösenden Anforderung bis zum validierenden Test, genau dokumentiert werden. Im Gegensatz dazu steht der Prozess der Applikation. Betrachtet man sich unter diesem Hintergrund den Abgas-Skandal des VW-Konzerns [55, 85, 106], so hat sich daraus ergeben, dass die angewandten Methoden zur Erlangung einer Kalibrierung nun auch detailliert aufgezeichnet und dokumentiert werden müssen. Sie werden dadurch nachweisbar und wiederholbar. Es hat sich bereits gezeigt, dass das zum Beispiel das beschriebene Workflow-System dabei entsprechende Beiträge leisten kann.

Im Laufe der Arbeit wurde mehrfach angeführt, dass die Anwendung des vorgestellten Vorgehens nur innerhalb eines Gangs sinnvoll ist, also für alle Gänge wiederholt werden muss. Dies ist prinzipbedingt auf jegliche Art der Änderung

von Hardwarekomponenten eines Fahrzeugs verallgemeinerbar. Es können leicht verschiedene applikative Varianten mittels numerischer Optimierung berechnet werden. Allerdings würde zum Beispiel die Änderung der Fahrzeugmasse oder der Getriebeübersetzung dazu führen, dass Testdurchführung, Modellierung und Optimierung neu durchgeführt werden müssen. So könnte ein Ziel weiterführender Untersuchungen sein, einmal erstellte Modelle mittels physikalischer Ansätze umrechnen zu können. Hierdurch würde zudem die Formulierung von Optimierungszielen leichter fallen und genauere Ergebnisse liefern, wenn diese von einem Referenzfahrzeug mit anderer Hardwareausstattung abgeleitet werden können.

# Anhang

## A.1 Subjektive Kriterien in Originalform

Nachfolgend finden sich die Quellen<sup>83</sup> und originalen englischen Bezeichnungen der subjektiven Bewertungskriterien aus Tabelle 3.1:

Quelle	1	2	3	4	5	6
A	Response	-	QotM <sup>84</sup>	Smoothness	-	-
B	Response	Hesitation	Rise Rate	Stumble	Overshoot	Oscill.
C	Delay	-	Roughness	Stumble	Overshoot	Oscill.
D	-	Hesitation	-	Stumble	Backfire	Surge
E	Delay	-	Jerk	-	Kick	Surge
F	Delay	Shuffle	Jerk	-	Overshoot	Surge
G	Delay	Shuffle	Jerk	Stumble	Kick	Jerks
H	Delay	Hesitation	Jerk	-	-	Surge
General	Delay	Hesitation	Jerk	Stumble	Kick	Surge
deutsch	Ansprechen	Zögern	Ruck	Stocken	Rückstoß	Ruckeln

**Tabelle A.1:** Vereinheitlichung subjektiver Kriterien für die Tip-In Bewertung (englische Originalbezeichnungen)

<sup>83</sup>Referenzen A: [83] (2001), B: [32] (1999), C: [33] (2000), D: [48] (1975), E: [68] (2011), F: [70] (1985), G: [96] (2002), H: [116] (2004)

<sup>84</sup>Quick of the mark

## A.2 Matlab Skript zur Bestimmung der Grenzpunkte entsprechend der Methode aus Abschnitt 5.2.3

```
function corners = CreateCorners5Params

% — Pedal = 30% —————
%   RPM   Trq2   T2   DltTrq2   T3
lb = [1500  -35   0.15  0.17   0.3];
ub = [3000   23   0.8   5     8];
corners30 = MakeCornersFromBounds(lb , ub);

% — Pedal = 50% —————
%   RPM   Trq2   T2   DltTrq2   T3
lb = [1500  -35   0.15  0.23   0.3];
ub = [3000   35   0.8   4.8   8];
corners50 = MakeCornersFromBounds(lb , ub);

% — Pedal = 80% —————
%   RPM   Trq2   T2   DltTrq2   T3
lb = [1500  -35   0.15  0.23   0];
ub = [3000   70   0.8   5.5   8];
corners80 = MakeCornersFromBounds(lb , ub);

corners = [ones(size(corners30 ,1),1)*30 corners30 ;
           ones(size(corners50 ,1),1)*50 corners50 ;
           ones(size(corners80 ,1),1)*80 corners80 ];

end

function corners = MakeCornersFromBounds(lb , ub)
    dim = numel(lb);

    bounds = mat2cell([lb(:) ub(:)],ones(dim,1),2);
    % make a grid out of this data an concatenate it
    % to get the points
    [grid{1:dim}] = ndgrid(bounds{:});
    corners = zeros(2^dim ,dim);
    for i=1:dim
        corners(:, i) = grid{i}(:);
    end
end
```

**Listing A.1:** Listing der Funktion MakeCornersFromBounds

## A.3 Zusätzliche Daten zur Validierung der objektiven Kriterien

Als Datensatz wurde ein im Eingangsgrößenraum der Applikationsparameter raumfüllend berechnetes Design mit 100 Punkten genutzt. Hierzu wurden Messungen mit subjektiven Bewertungen aufgenommen. Nachfolgend ist die Korrelationsmatrix  $\varrho^{\text{subj,subj}}$  der subjektiven Bewertungen:

$\varrho_{ij}^{\text{subj,subj}}$	Ansprechen	Ruck	Zögern	Rückstoß	Stocken	Ruckeln
Ansprechen	1	-0.65733	0.60821	-0.46471	-0.27590	-0.23864
Ruck	-0.65733	1	-0.32022	0.58732	0.11280	0.41123
Zögern	0.60821	-0.32022	1	-0.21096	-0.17302	-0.02246
Rückstoß	-0.46471	0.58732	-0.21096	1	0.356115	0.47280
Stocken	-0.27590	0.11280	-0.17302	0.35612	1	-0.16937
Ruckeln	-0.23864	0.41123	-0.02246	0.47280	-0.16937	1

**Tabelle A.2:** Korrelationsmatrix  $\varrho^{\text{subj,subj}}$  der subjektiven Bewertungen untereinander

sowie die  $p$ -Matrix der subjektiven Bewertungen:

$p_{ij}^{\text{subj}}$	Ansprechen	Ruck	Zögern	Rückstoß	Stocken	Ruckeln
Ansprechen	1	1.11e-15	4.45e-13	1.48e-07	0.0027	0.0099
Ruck	1.11e-15	1	0.0005	4.21e-12	0.2280	4.53e-06
Zögern	4.45e-13	0.0005	1	0.0230	0.0633	0.8108
Rückstoß	1.48e-07	4.22e-12	0.0230	1	8.73e-05	8.37e-08
Stocken	0.0027	0.2280	0.0633	8.73e-05	1	0.0691
Ruckeln	0.0099	4.53e-06	0.8108	8.37e-08	0.0691	1

**Tabelle A.3:**  $p$ -Matrix der subjektiven Bewertungen untereinander

gegeben.

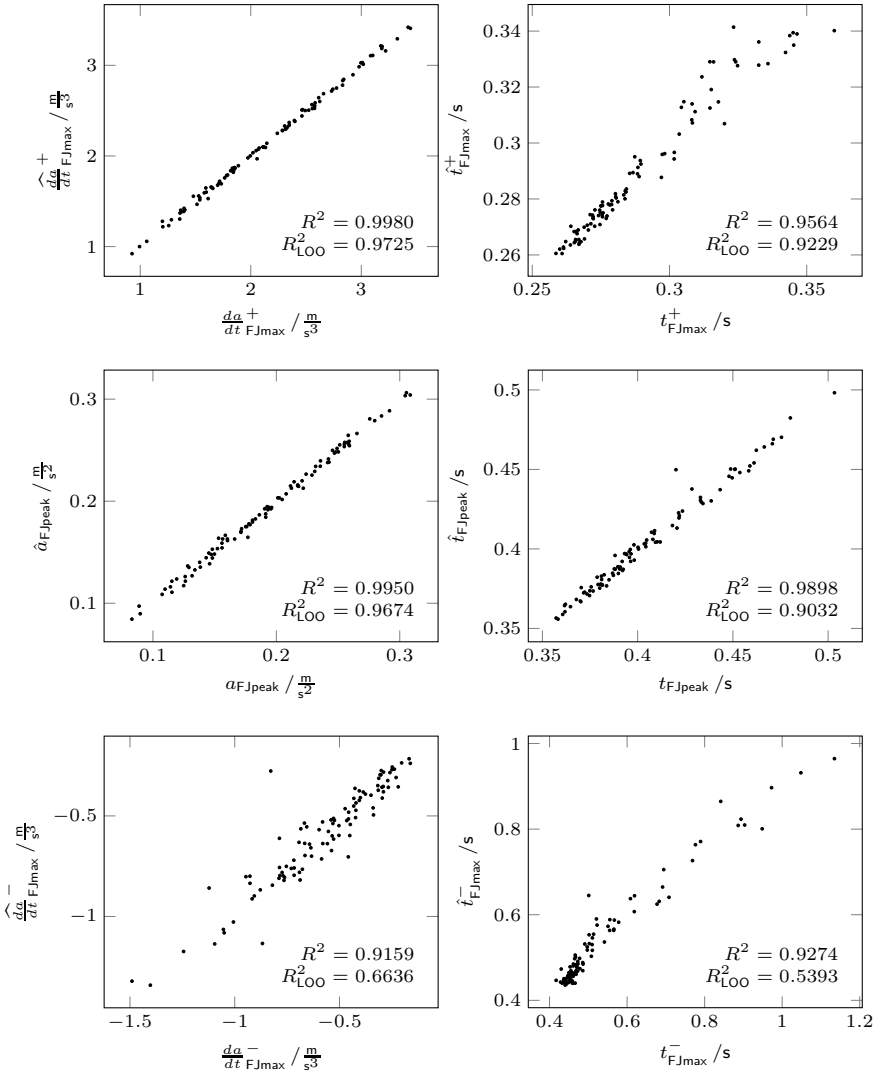
Weiterhin zeigt die nachfolgende Tabelle die vollständige Matrix der Korrelationskoeffizienten zwischen den objektiven Kriterien und den subjektiven Bewertungen:

$\rho_{ij}^{\text{obj,subj}}$	Ansprechen	Ruck	Zögern	Rückstoß	Stocken	Ruckeln
$\frac{da}{dt}^+_{FJmax}$	0.6936	-0.8363	0.3332	-0.5482	0.1096	-0.5131
$t^+_{\max \frac{da}{dt}}$	-0.5768	0.4110	-0.2767	0.3729	0.0897	0.2391
$\frac{da}{dt}^-_{FJmax}$	-0.5212	0.8014	-0.1241	0.6616	-0.0395	0.5414
$t^-_{\max \frac{da}{dt}}$	-0.3466	0.4315	0.1168	0.4069	0.1297	0.2114
$\frac{da}{dt}_{FJav}$	0.5110	-0.3232	0.4232	0.0216	0.2250	-0.2418
$a_{FJpeak}$	0.6730	-0.7568	0.3754	-0.3577	0.1965	-0.4446
$t_{FJpeak}$	-0.4110	0.3900	0.0311	0.5274	0.1774	0.2589
$\Delta a_{FJkick}$	0.4122	-0.6685	-0.0293	-0.7375	-0.1272	-0.4330
$\frac{da}{dt}_{FJkick}$	0.4515	-0.5656	-0.0258	-0.6769	-0.1047	-0.4775
$\Delta t_{FJkick}$	0.4152	-0.6280	0.0975	-0.3530	0.1300	-0.3460
$t_{FJend}$	0.0110	-0.2716	-0.0024	-0.1074	0.0171	-0.0045
$t_{80\%}$	-0.7952	0.7296	-0.4470	0.4717	-0.0050	0.2961
$VDV_{FJ}$	0.7395	-0.8275	0.3465	-0.5205	0.1185	-0.4939
$VDV_{Surge}$	0.5105	-0.5568	0.2234	-0.0808	0.2718	-0.3231

**Tabelle A.4:** Matrix der Korrelationskoeffizienten zwischen den objektiven Kriterien und den subjektiven Bewertungen

Zusätzlich wurden zur Validierung die objektiven Kriterien in Abhängigkeit von den Applikationsparametern modelliert. Hierzu ist im Anschluss eine Auswahl der Modelle gegeben, wobei jeweils Modellvorhersage über Messung dargestellt wurden.

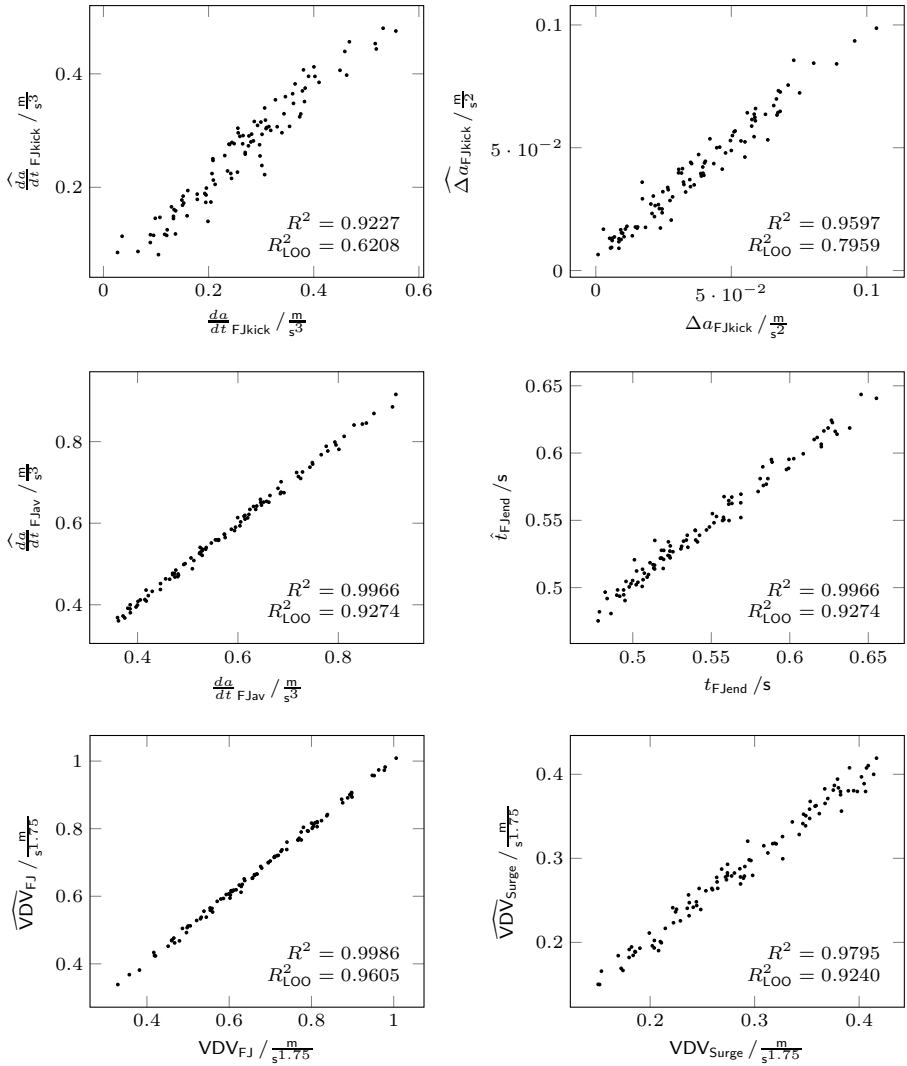
### A.3 Zusätzliche Daten zur Validierung der objektiven Kriterien



**Abbildung A.1:** Modellvorhersage- vs. Messungs-Plots der objektiven Kriterien  $\frac{da^+}{dt} \text{ FJmax}$ ,

$$t^+_{\text{FJmax}}, \alpha_{\text{FJpeak}}, t_{\text{FJpeak}}, \frac{da^-}{dt} \text{ FJmax}, t^-_{\text{FJmax}}$$

### A.3 Zusätzliche Daten zur Validierung der objektiven Kriterien



**Abbildung A.2:** Modellvorhersage- vs. Messung-Plots der objektiven Kriterien  $\frac{da}{dt}_{FJkick}$ ,  $\Delta a_{FJkick}$ ,  $\frac{da}{dt}_{FJav}$ ,  $t_{FJend}$ ,  $VDV_{FJ}$ ,  $VDV_{Surge}$

## A.4 Gebräuchliche Größen der Statistik zur Bewertung der Modellgüte

Ein entscheidender Schritt während der Modellbildung ist es, die Eignung des Modells zur Approximation der zugrunde liegenden Daten und die Einhaltung der Grundannahmen der Modellbildung (z.B. Gleichverteilung der Daten) zu prüfen [76]. Hierfür stehen verschiedene diagnostische Hilfsmittel der Statistik zur Verfügung, die nachfolgend kurz zusammengefasst werden sollen.

Zunächst sind hier die gewöhnlichen Residuen

$$e_i = y_i - \hat{y}_i \quad (\text{A.1})$$

als Differenz zwischen Messwert  $y_i$  und Modellvorhersagewert  $\hat{y}_i$  zu nennen. Sie bilden ein direktes Maß für die Modellabweichung. Unter der Annahme eines gültigen Modells, welches die Physik richtig abbildet, dienen Residuen dazu die Gültigkeit einer Messung  $i$  zu bestätigen oder diese als Ausreißer zu identifizieren. Die gewöhnlichen Residuen sind größenbehaftet und erlauben deswegen weder die Definition eines allgemeinen Grenzwertes für  $e_i$  noch einen Vergleich unterschiedlicher Größen. Berechnet man die Varianz

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-z} \sum_{i=1}^n e_i^2 \quad (\text{A.2})$$

mit  $n$  als Anzahl der Modellpunkte und  $z$  als Anzahl der zu bestimmenden Modellparameter, so kann man die Residuen darauf normieren und erhält die standardisierten Residuen

$$d_i = \frac{e_i}{\sigma} \quad \forall \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (\text{A.3})$$

Diese sind nicht mehr einheitenbehaftet, haben einen Erwartungswert von Null und approximativ eine Varianz von Eins. Sie sind somit als allgemeines Bewertungskriterium geeignet. Für  $d_i > 1$  ist die Modellabweichung am Punkt  $i$  größer als die Standardabweichung  $\sigma$  der Residuen aller betrachteten Punkte. Der Punkt  $i$  lässt sich demnach im Vergleich zur mittleren Modellgenauigkeit schlechter vorhersagen.

Falls die  $i$ -te Messung deutlich aus dem Rahmen der anderen Messungen fällt, wird das Regressionsmodell (welches auf allen Messungen basiert) übermäßig stark von dieser Messung beeinflusst und es entsteht ein kleines gewöhnliches Residuuum. Somit ist es schwierig anhand der gewöhnlichen Residuen Ausreißer zu identifizieren

[76]. Um dem entgegen zu wirken, betrachtet man die Abweichung  $e_{(i)}$  zwischen einer Messung und der Modellvorhersage, ohne dass der Messpunkt selbst in die Modellberechnung eingeht. Dabei ist es sinnvoll, diese Messung auch aus der Berechnung der Varianz zu entfernen und stattdessen eine geschätzte Varianz<sup>85</sup>

$$\sigma_{(i)}^2 = \frac{1}{n-1-z} \sum_{l=1, l \neq i}^n e_l^2 \quad (\text{A.4})$$

zu verwenden. Auf diese Art erhält man das so genannte extern studentisierte Residuum

$$t_i = \frac{e_{(i)}}{\sigma_{(i)}}. \quad (\text{A.5})$$

Die Residuen werden verwendet, um Gütemaße für die Übereinstimmung der Modelle mit der zugrunde liegenden Datenmenge zu definieren. Als einfachstes Gütemaß dient

$$R^2 = \frac{SS_{\text{Reg}}}{SS_{\text{Tot}}} = 1 - \frac{SS_{\text{Res}}}{SS_{\text{Tot}}} \quad (\text{A.6})$$

und gibt an, welcher Anteil der Daten vom Modell gegenüber dem Mittelwert der Daten erklärt wird. Dazu wird die Quadratsumme der Abweichungen zwischen Modellvorhersagen und Mittelwert der Messungen  $SS_{\text{Reg}}$  zur Quadratsumme  $SS_{\text{Tot}}$  aller Abweichungen der Messwerte zum Mittelwert ins Verhältnis gesetzt.  $R^2$  ist ein reines Übereinstimmungsmaß ohne eine Aussage bezüglich der Vorhersagekraft eines Modells.

$$SS_{\text{Reg}} = \sum_i (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2 \quad (\text{A.7})$$

$$SS_{\text{Tot}} = \sum_i (y_i - \bar{y}_i)^2 \quad (\text{A.8})$$

$$SS_{\text{Res}} = \sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (\text{A.9})$$

$$SS_{\text{LOO}} = \sum_i (y_i - \hat{y}_{(i)})^2 \quad (\text{A.10})$$

Nutzt man den zweiten Teil der Gleichung A.6 und bezieht die vorher angesprochenen Studentisierung mit ein, so erhält man

$$R_{\text{LOO}}^2 = 1 - \frac{SS_{\text{LOO}}}{SS_{\text{Tot}}}, \quad (\text{A.11})$$

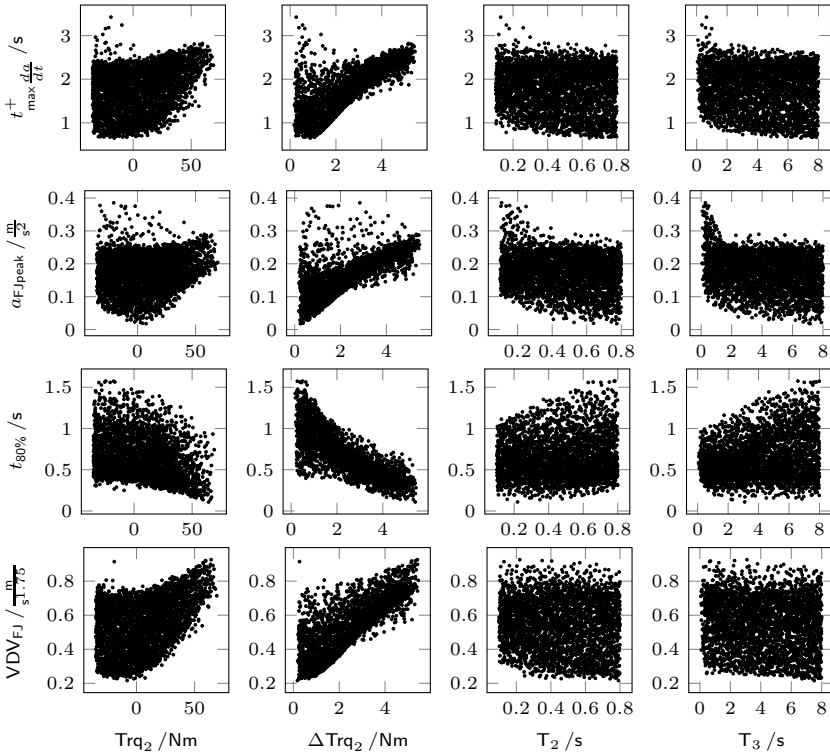
---

<sup>85</sup>Dementsprechend unterscheidet sich der in Gleichung A.4 verwendete Freiheitsgrad  $n-1-z$  von dem der allgemeinen Varianz  $n-z$  aus Gleichung A.2

was nun eine Bewertung des Vorhersagevermögens eines Modells ermöglicht, indem die Abweichung der Messung  $i$  zu Modellvorhersagen ohne den Punkt ( $i$ ) betrachtet wird.

## A.5 Ergänzende Trade-Off Darstellungen zu Abschnitt 5.2.4

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Trade-Off-Zusammenhänge der in Abbildung 5.6... 5.8 gezeigten Modellgrößen über den Eingangsgrößen am Betriebspunkt mit Drehzahl  $2000 \frac{1}{\text{min}}$  und Pedalposition 50%.



**Abbildung A.3:** Trade-Off-Zusammenhänge der wesentlichen objektiven Modelle  $\frac{da^+}{dt}_{FJ,max}$ ,  $a_{FJ,peak}$ ,  $VDV_{FJ}$  und  $t_{80\%}$  in Abhängigkeit von den Applikationsparametern  $Trq_2$ ,  $\Delta Trq_2$ ,  $T_2$  und  $T_3$

# Literaturverzeichnis

- [1] Zeit - Das ZEIT-Lexikon in 20 Bänden, Hamburg: Zeitverlag, 2005, S. 508, Sp.2
  
- [2] International Organization for Standardization: *Systems and software engineering – Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) – Guide to SQuaRE*. [http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue\\_ics/catalogue\\_detail\\_ics.htm?csnumber=64764](http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_ics/catalogue_detail_ics.htm?csnumber=64764).  
Version: 03 2014
  
- [3] ALTENSTRASSER, H. ; VITALE, G. ; WINSEL, T. ; KEUTH, N. ; PFLÜGL, H. : Multi-layer global DoE for Automated Optimization of Shift Quality for Automatic Transmissions. In: *Design of Experiments (DoE) in Engine Development, IV: Modern Development Methods to Meet New Challenges* Bd. 4 IAV GmbH, Karsten Röpke, 2009, S. 151–161
  
- [4] ASAM: *P2014-03 ASAM CSL (Calibration Sequence Language), BS, V1.0.0*. <https://www.asam.net/home/projects/current-projects/p2014-03-asam-csl.html>, . – Stand 2015-06-06
  
- [5] ASSMANN, B. ; SELKE, P. : *Technische Mechanik. 3. Kinematik und Kinetik*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2004. – 30 S. – ISBN 3–486–27294–2

- [6] BACHINGER, M. ; KNAUDER, B. ; STOLZ, M. : Automotive Vehicle Launch Optimization based on Differential Evolution Approach for Increased Driveability. In: *EngOpt 2012 - International Conference on Engineering Optimization*. Rio de Janeiro, Brazil, 1-5 July 2012
- [7] *Kapitel The Psychology of Memory*. In: BADDELEY, A. D.: *The Essential Handbook of Memory Disorders for Clinicians*. John Wiley & Sons, 2004, S. 1–13. – Department of Psychology, University of York, UK
- [8] BALFOUR, G. ; DUPRAZ, P. ; RAMSBOTTOM, M. ; SCOTSON, P. : Diesel Fuel Injection Control for Optimum Driveability / SAE International. Detroit Michigan, March 2000 (SAE 2000-01-0265). – Forschungsbericht
- [9] BALLUCHI, A. ; BENVENUTI, L. ; LEMMA, C. ; MURRIERI, P. ; SANGIOVANNI-VINCENTELLI, A. L.: Hybrid Models of an Automotive Driveline / Sapienza, Università di Roma. PARADES, Via di S.Pantaleo, 66, 00186 Roma, Italy, February 2005. – Forschungsbericht
- [10] BALZERT, H. ; BALZERT, H. ; KOSCHKE, R. ; LÄMMEL, U. ; LIGGESMEYER, P. ; QUANTE, J. : *Lehrbuch der Softwaretechnik*. Spektrum Akademischer Verlag (Lehrbücher der Informatik). <https://books.google.de/books?id=vmfIb9R2QikC>. – ISBN 9783827422477
- [11] BARBER, C. B. ; DOBKIN, D. P. ; HUHDANPAA, H. : The Quickhull algorithm for convex hulls. In: *ACM Transactions of mathematical Software* Bd. 22, 1996, S. 469–483
- [12] BERTSEKAS, D. P.: *Constrained Optimization and Lagrange Multiplier Methods*. Belmont, Massachusetts : Athena Scientific, 1996
- [13] BIALEK, W. : Physical Limits to Sensation and Perception. In: *Annual Review of Biophysics and Biophysical Chemistry* Bd. 16. Annual Reviews, 455-478
- [14] BIERMANN, J.-W. ; REITZ, A. ; SCHUMACHER, T. : The Clonk Phenomenon - a Load Change Reaction to be Balanced in Terms of Comfort and Engine Response. In: *Seoul 2000 FISITA World Automotive Congress*. Seoul, Korea, June 12-15 2000
- [15] BISHOP, C. M. ; JORDAN, M. (Hrsg.) ; KLEINBERG, J. (Hrsg.) ; SCHÖLKOPF, B. (Hrsg.): *Pattern Recognition and Machine Learning*. Springer, 2006 (Information Science and Statistics)

- [16] BOYD, S. ; VANDENBERGHE, L. : *Convex Optimization*. Cambridge University Press, 2004. – ISBN 978–0–521–83378–3
- [17] BOYLE, P. : *Gaussian Processes for Regression and Optimisation*, Victoria University of Wellington, Diss., 2007
- [18] BROL, S. ; MAMALA, J. : Assessment of passenger car driveability with use of two axis accelerometer mounted on car body. In: *Journal of Ultragarsas* 59 (2006), S. 31–36
- [19] BUNDESPATENTGERICHT: *Urteil in der Patentnichtigkeitssache betreffend das europäische Patents 0 846 945 (DE 597 07 553)*. 2015
- [20] BUZY, A. ; GRALL, S. ; COTTE, P. : A new generation of Online Adaptive Design of Experiments: Application to Emissions development and Full Load Calibration. In: RÖPKE, D. K. (Hrsg.) ; GÜHMANN, P. C. (Hrsg.) ; IAV (Veranst.): *Design of Experiments (DoE) in Engine Development* Bd. 3. Berlin, 2005
- [21] *Kapitel Multi-objective Optimization*. In: CARAMIA, M. ; DELL'OLMO, P. : *Multi-objective Management in Freight Logistics*. Springer, 2008, S. 11–36
- [22] CASTAGNÉ, M. ; BENTOLILA, Y. ; CHAUDOYE, F. ; HALLÉ, A. ; NICOLAS, F. ; SINOQUET, D. : Comparison of Engine Calibration Methods Based on Design of Experiments. Version: 2008. <http://dx.doi.org/10.2516/ogst:2008029>. In: *Oil & Gas Science and Technology - Revue d'IFP Energies nouvelles* Bd. 63. Institut français du pétrole, IFP. – DOI 10.2516/ogst:2008029
- [23] *Kapitel Chapter 2*. In: CAVAZZUTI, M. : *Design of Experiments*. Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 13 – 42
- [24] CHACHUAT, B. C.: *Nonlinear and dynamic Optimization - From Theory to Practice*. Laboratoire d'Automatique and École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2006
- [25] CHAUDOYE, F. ; CASTAGNÉ, M. ; SINOQUET, D. ; WAHL, F. : Modelling engine operating space for DoE calibration methods. In: RÖPKE, D. K. (Hrsg.) ; GÜHMANN, P. C. (Hrsg.) ; IAV (Veranst.): *Design of Experiments (DoE) in Engine Development* Bd. 5. Berlin, June 2009

- [26] COMMITTEE, M. E. S. P.: Guide to measurement and evaluation of human exposure to whole-body mechanical vibration and repeated shock. / British Standards Institution. London, England, 1987 (6841 (1987)). – Standard
- [27] COOMBS, C. H. ; GREENBERG, M. ; ZINNEST, J. : A double law of comparative judgement for the analysis of preferential choice and similarities data. In: *Psychometrika* 26 (1961), June, S. 165–171
- [28] COWAN, G. : *Statistical Data Analysis*. 1. Oxford University Press, 1998. – ISBN 0198501552
- [29] COWAN, N. : Evolving Conceptions of Memory Storage, Selective Attention, and their mutual Constraints within the Human Information-Processing System. In: *Psychological Bulletin* 104 (1988), Nr. 2, S. 163–191. – University of Missouri, Columbia
- [30] CROWTHER, A. R. ; SINGH, R. ; ZHANG, Z. ; CHAPMAN, C. : Impulsive response of an automatic transmission system with multiple clearances: Formulation, simulation and experiment. In: *Journal of Sound and Vibration* 306 (2007), July, S. 444–466. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2007.05.053>. – DOI 10.1016/j.jsv.2007.05.053
- [31] DEMIĆ, M. ; LUKIĆ, J. : Investigation of the transmission of fore and aft vibration through the human body. In: *Applied Ergonomics* 40 (2009), S. 622–629. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apergo.2008.05.002>. – DOI 10.1016/j.apergo.2008.05.002
- [32] DOREY, R. E. ; HOLMES, C. : Vehicle Driveability - It's Characterisation and Measurement / SAE International. 1999 (SAE 1999-01-0949). – Forschungsbericht. – Ricardo Consulting Engineers
- [33] DOREY, R. E. ; MARTIN, E. J.: Vehicle Drivability - The Development of an objective Methodology / SAE International. 2000 (SAE 2000-01-1326). – Forschungsbericht. – Ricardo Consulting Engineers
- [34] DUVENAUD, D. K.: *Automatic Model Construction with Gaussian Processes*, University of Cambridge, Diss., 2014
- [35] EVERETT, R. : Measuring Vehicle Driveability / SAE International. 1971 (SAE 710137). – Forschungsbericht. – Research Labs., General Motors Corp

- [36] EVERITT, B. : *The Cambridge Dictionary of Statistics*. Cambridge University Press, 2002. – ISBN 9780521810999
- [37] EXXONMOBILE: 2013 The Outlook for Energy: A View to 2040 / Exxon-Mobile. Version: 2013. [http://www.exxonmobil.com/Corporate/files/news\\_pub\\_eo.pdf](http://www.exxonmobil.com/Corporate/files/news_pub_eo.pdf). – Forschungsbericht
- [38] FEUERSÄNGER, D. C.: *Manual for Package pgfplots 2D/3D Plots in L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X, Version 1.12.1*, 2015. <http://sourceforge.net/projects/pgfplots>
- [39] FEUERSÄNGER, D. C.: *Manual for Package pgfplotstable Component for pgfplots, Version 1.7*, 2015. <http://sourceforge.net/projects/pgfplots>
- [40] FISHER, S. R. A.: *The design of experiments*. Hafner Publishing Company, 1971
- [41] FVV: Optimierte schnelle Motorvermessung mit Online-Methoden zur Bestimmung von statischen und dynamischen Modellen. In: *Online-Methoden*, 2013 (2013 987)
- [42] GIACOMIN, J. ; HACAAMBWA, T. M.: Performance of ISO and BS6841 Comfort Criteria for Evaluating Automobile Road Vibrations / Department of Mechanical Engineering The University of Sheffield. Mappin Street, Sheffield S1 3JD, UK, 1983 (01A1083). – Forschungsbericht
- [43] GMBH, S. : *Statista-Lexikon: Definition von Objektivität*. <http://de.statista.com/statistik/lexikon/definition/97/objektivitaet/>. <http://de.statista.com/statistik/lexikon/definition/97/objektivitaet/>. – Stand 2015-06-06
- [44] GRIFFIN, M. J.: *Handbook of Human Vibration*. Academic Press <http://books.google.de/books?id=tBaCH0bL-XQC>. – ISBN 9780123030412
- [45] GÖRLACH, K. : *Wissenschaftliches Publizieren in L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X- Indexerstellung*, Juni 2004
- [46] GROUP, C. M. V.: Driveability Evaluation in cool Weather / Motor Vehicle Fuel, Lubricant, and Equipment Research Committee of the Coordinating Research Council, Inc. 30 Rockefeller Plaza - New York, N.Y. 10020, December 1970 (CRC Report No. 439). – Forschungsbericht. – CRC Project No. CM-76-68

- [47] GROUP, C. M. V.: Driveability Performance of 1975 Passenger Cars at high Ambient Temperatures / Motor Vehicle Fuel, Lubricant, and Equipment Research Committee of the Coordinating Research Council, Inc. 30 Rockefeller Plaza - New York, N.Y. 10020, November 1976 (CRC Report No. 490). – Forschungsbericht. – CRC Project No. CM-106-75
- [48] GROUP, C. M. V.: Driveability Performance of 1975 Passenger Cars at Intermediate Ambient Temperatures / Motor Vehicle Fuel, Lubricant, and Equipment Research Committee of the Coordinating Research Council, Inc. 30 Rockefeller Plaza - New York, N.Y. 10020, May 1976 (CRC Report No. 486). – Forschungsbericht. – CRC Project No. CM-102-74
- [49] GROUP, C. M. V.: Driveability Performance of 1977 Passenger Cars at Intermediate Ambient Temperatures / Motor Vehicle Fuel, Lubricant, and Equipment Research Committee of the Coordinating Research Council, Inc. 30 Rockefeller Plaza - New York, N.Y. 10020, September 1978 (CRC Report No. 499). – Forschungsbericht. – CRC Project No. CM-109-76
- [50] GUNSTON, T. P.: The apparent Mass of the seated human Body in response to lateral and roll Vibration. In: *38th United Kingdom Conference on Human Response to Vibration*. Institute of Naval Medicine, Alverstoke, Gosport, PO12 2DL, England, September 2003
- [51] GURM, J. S. ; CHEN, W. J. ; KEYVANMANESH, A. ; ABE, T. ; CROWTHER, A. R. ; SINGH, R. : Transient Clunk Response of a Driveline System: Laboratory Experiment and Analytical Studies / SAE International. 2007 (SAE 2007-01-2233). – Forschungsbericht
- [52] HARTMANN, B. ; NELLES, O. : Adaptive Test Planning for the Calibration of Combustion Engines - Methodology. In: RÖPKE, D. K. (Hrsg.) ; GÜHMANN, P. C. (Hrsg.) ; IAV (Veranst.): *Design of Experiments (DoE) in Engine Development* Bd. 7. Berlin, 2013, S. 1–16
- [53] HAUKAP, C. ; HEGMANN, M. ; KÖHLER, B.-U. : Strategies for Improving the Process of Test Design and Test Plan Computation for High Dimensional Designs. In: RÖPKE, K. (Hrsg.) ; IAV GmbH (Veranst.): *6th Conference: Design of Experiments (DoE) in Engine Development*. Berlin : Renningen / Expert-Verl., 2011
- [54] HERRMANN, M. : Vehicle Testing on Chassis and Dynamometers / HORIBA European GmbH. 2010 (13). – Forschungsbericht

- [55] HEUTE.DE: *Abgas-Skandal in den USA - VW-Chef Winterkorn unter Druck*. online: <http://www.heute.de/abgas-skandal-in-den-usa-vw-chef-winterkorn-unter-druck-40201428.html>. <http://www.heute.de/abgas-skandal-in-den-usa-vw-chef-winterkorn-unter-druck-40201428.html>. Version: September 2015
- [56] HORSTE, K. : Objective Measurement of Automatic Transmission Shift Feel using Vibration Dose Value / SAE International. Version: May 1995. <http://dx.doi.org/10.4271/951373>. Ford Motor Co., May 1995 (951373). – SAE Technical Paper
- [57] HUNG, W.-L. ; YANG, M.-S. : Similarity measures of intuitionistic fuzzy sets based on  $L_p$  metric. In: *International Journal of Approximate Reasoning* Bd. 46, 120-136
- [58] IEA (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY): Key World Energy Statistics 2012 / OECD/IEA. Version: 2012. <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/kwes.pdf>. Paris, 2012. – Forschungsbericht
- [59] IEA (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY): World Energy Outlook 2012 - Executive Summary / OECD/IEA. Version: 2012. <http://www.worldenergyoutlook.org/media/weowebseite/2012/exsum/German.pdf>. Paris, 2012. – Forschungsbericht
- [60] ISO: Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration. Part 1: General Requirements, 1997 and Part 2: Vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz) / International Organization for Standardization. Geneva, Switzerland, 2003 (ISO 2631 (1997-2003)). – ISO
- [61] JOHNSTON, M. J.: *Development and Evaluation of Vehicle Suspension Tuning Metrics*. Ontario, Canada, University of Windsor, Diplomarbeit, September 2010
- [62] KLAR, D. H. ; KLAGES, D. B. ; GUNDEL, D. ; KRUSE, D. T. ; HUBER, T. ; ULMER, D. H.: New processes for efficient, model-based engine calibration. In: CHRISTIAN BEIDL, P. D. (Hrsg.): *5. Internationales Symposium für Entwicklungsmethodik*, 2013
- [63] KLAR, H. ; KLAGES, B. ; GUNDEL, D. : Automation of Model-Based Calibration in Engine Development. In: RÖPKE, K. (Hrsg.) ; IAV GmbH (Veranst.): *6th Conference: Design of Experiments (DoE) in Engine Development*. Berlin : Renningen / Expert-Verl., 2011

- [64] KLEIN, P. ; KIRSCHBAUM, F. ; HARTMANN, B. ; BOGACHIK, Y. ; NELLES, O. : Adaptive Test Planning for the Calibration of Combustion Engines - Application. In: RÖPKE, D. K. (Hrsg.) ; GÜHMANN, P. C. (Hrsg.) ; IAV (Veranst.): *Design of Experiments (DoE) in Engine Development* Bd. 7. Berlin, 2013, S. 17–30
- [65] KOHN, W. : *Statistik: Datenanalyse und Wahrscheinlichkeitsrechnung*. Springer, 2004 (Statistik und ihre Anwendungen). – ISBN 9783540216773
- [66] KOHN, W. ; ÖZTÜRK, R. : *Statistik für Ökonomen - Datenanalyse mit R und SPSS*. Springer, 2013. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-37352-7>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-37352-7>. – ISBN 978-3-642-37351-0
- [67] KOWALCZYK, M. ; ISERMANN, R. : Online-Methods for the Integration of Measurements, Modeling and Map Optimization at Engine Test Benches. In: RÖPKE, D. K. (Hrsg.) ; GÜHMANN, P. C. (Hrsg.) ; IAV (Veranst.): *Design of Experiments (DoE) in Engine Development* Bd. 7. Berlin, 2013, S. 107–124
- [68] KRAUSE, M. ; PISCHINGER, S. ; KÖRFER, T. ; KINOO, B. ; SCHLOSSER, A. ; KIRSCHSTEIN, S. ; HAVERKORT, G. : Target oriented driveability calibration through standardized processes and tailored tool support. In: RÖPKE, K. (Hrsg.) ; IAV GmbH (Veranst.): *6th Conference: Design of Experiments (DoE) in Engine Development*. Berlin : Renningen / Expert-Verl., 2011
- [69] KRAUSE, M. ; SENTIS, T. ; PISCHINGER, S. ; NANJUNDASWAMY, H. ; MAYER, A. ; TOMAZIC, D. ; BECK, R. ; KINOO, B. : DoE Methodology for Drivability Calibration. In: *2nd US Conference: Design of Experiments (DoE) in Vehicle and Engine Development*. Plymouth, MI : IAV Automotive Engineering Inc., 2012
- [70] KRENZ, R. A.: Vehicle Response to Throttle Tip-In/Tip-Out / SAE International. Version: May 1985. <http://dx.doi.org/10.4271/850967>. Ford Motor Co., May 1985 (850967). – SAE Technical Paper
- [71] KUSS, M. : *Gaussian Process Models for Robust Regression, Classification, and Reinforcement Learning*, Fachbereich Informatik der Technischen Universität Darmstadt, Diss., März 2006
- [72] LAURITZEN, N. : *Lectures on convex sets*. Department of mathematical science university of Aarhus, 2009

- [73] LIST, H. ; SCHOEGGL, P. : Objective Evaluation of Drivability / SAE International. 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA 15096-0001 U.S.A., February 1998 (SAE 980204). – Forschungsbericht. – AVL List GmbH
- [74] LUENBERGER, D. G. ; YE, Y. : *Linear and nonlinear programming*. 3. Springer, 2008
- [75] MASON, R. L. ; GUNST, R. F. ; HESS, J. L.: *Statistical Design and Analysis of Experiments: With Applications to Engineering and Science*. John Wiley & Sons, Inc., 2003
- [76] MONTGOMERY, D. C.: *Design and Analysis of Experiments*. John Wiley & Sons, Inc., 2000
- [77] NESSLER, A. ; SCHAUM, S. ; KNAAK, M. ; RÖPKE, K. : Fast basic combustion engine calibration with „Rapid Measurement“ . In: RÖPKE, D. K. (Hrsg.) ; GÜHMANN, P. C. (Hrsg.) ; IAV (Veranst.): *Design of Experiments (DoE) in Engine Development* Bd. 4. Berlin, 2007
- [78] NIEDERREITER, H. : Low-Discrepancy and Low-Dispersion Sequences. In: *Journal of Number Theory* 30 (1988), S. 51–70
- [79] NIEDERREITER, H. : *Random Number Generation and Quasi-Monte Carlo Methods*. Philadelphia, Pennsylvania : Society for industrial and applied mathematics, 1992
- [80] NORMAN, K. D.: Objective Evaluation of On-Center Handling Performance / SAE International. Version: February 1984. <http://dx.doi.org/doi:10.4271/840069>. GM Proving Ground, Milford, MI, February 1984 (840069). – Forschungsbericht
- [81] OPPENHEIMER, A. V. ; SCHAFER, R. W. ; BUCK, J. R.: *Discrete-Time Signal Processing*. 2nd. Upper Saddle River, NJ, USA : Prentice Hall Press, 1999
- [82] OSGOOD, C. E.: The nature and measurement of meaning. In: ILLINOIS PRESS, U. of (Hrsg.): *Psychological Bulletin* Bd. 49, 1952
- [83] PASSMORE, M. A. ; PATEL, A. ; LORENTZEN, R. : The influence of engine demand map design on vehicle perceived performance. In: *International Journal of vehicle design* (5 26), 509-522

- [84] PREM, H. ; AYTON, G. : Improved techniques for assessing ride quality on concrete pavements / Mechanical System Dynamics Pty Ltd. 2003. – Forschungsbericht
- [85] PRESS@EPA.GOV: *EPA, California Notify Volkswagen of Clean Air Act Violations - Carmaker allegedly used software that circumvents emissions testing for certain air pollutants.* online: <http://yosemite.epa.gov/opadmpress.nsf/d0cf6618525a9efb85257359003fb69d/dfc8e33b5ab162b985257ec40057813b!OpenDocument>. <http://yosemite.epa.gov/opa/admpress.nsf/d0cf6618525a9efb85257359003fb69d/dfc8e33b5ab162b985257ec40057813b!OpenDocument>. Version: September 2015
- [86] RAKHEJA, S. ; DONG, R. G. ; PATRA, S. ; BOILEAU, P.-. ; MARCOTTE, P. ; WARREN, C. : Biodynamics of the human body under whole-body vibration: synthesis of the reported data. In: *International Journal of Industrial Ergonomics* Bd. 40, 2010, S. 710–732
- [87] RASMUSSEN, C. E. ; WILLIAMS, C. K. I.: *Gaussian Processes for Machine Learning*. Massachusetts Institute of Technology : MIT Press, 2006
- [88] RASMUSSEN, C. E.: *Evaluation of Gaussian Processes and other Methods for non-linear Regression*, Graduate Department of Computer Science in the University of Toronto, Diss., 1996
- [89] RENNINGER, P. ; ALEKSANDROV, M. : A new method to determine the design space for model based approaches. In: RÖPKE, D. K. (Hrsg.) ; GÜHMANN, P. C. (Hrsg.) ; IAV (Veranst.): *Design of Experiments (DoE) in Engine Development* Bd. 2. Berlin, 2003
- [90] RIMELL, A. N. ; MANSFIELD, N. J.: Design of Digital Filters for Frequency Weightings Required for Risk Assessments of Workers Exposed to Vibration. In: *Industrial Health* 45 (2007), S. 512–519. – Department of Human Sciences, Loughborough University, Loughborough, Leicestershire, LE11 3TU, UK
- [91] RÖNITZ, R. : Objektive Prüfverfahren zum Fahrverhalten von Kraftfahrzeugen und ihre internationale Normung / Automobile-Industrie. 1986. (Automobile-Industrie). – Forschungsbericht
- [92] ROMPE, K. : Möglichkeiten und Grenzen objektiver Fahrverhaltens-Tests von Kraftfahrzeugen / Automobile-Industrie. 1982 (Automobile-Industrie 1). – Forschungsbericht

- [93] SANDMEIER, N. P. ; RÖPKE, K. : Efficient online test plan calculation with integrated boundary detection for modern model based engine calibration. In: RÖPKE, D. K. (Hrsg.) ; GÜHMANN, P. C. (Hrsg.): *Design of Experiments in Powertrain Development* Bd. 8, 2015, S. 15–29
- [94] SCHMIDGAL, J. ; WILHELM, C. ; WINSEL, T. ; THEUERKAUF, H. J.: A model-independent test planning method for iterative data acquisition combined with structured process modelling. In: RÖPKE, D. K. (Hrsg.) ; GÜHMANN, P. C. (Hrsg.) ; IAV (Veranst.): *Design of Experiments (DoE) in Engine Development* Bd. 5. Berlin, June 2009
- [95] SCHOEGGL ; KRIEGLER ; BOGNER: Virtual Optimization of Vehicle and Powertrain Parameters With Consideration of Human Factors / SAE International. Detroit, Michigan, April 11-14 2005 (2005-01-1945). – Forschungsbericht. – 2005 SAE World Congress
- [96] SCHOEGGL, P. ; KOEGELER, H. M. ; GSCHWEITL, K. ; KOKAL, H. ; WILLIAMS, P. ; HULAK, K. : Automated EMS Calibration using Objective Driveability Assessment and Computer Aided Optimization Methodes / SAE International. Detroit Michigan, March 2002 (SAE 2002-01-0849). – Forschungsbericht. – AVL LIST GmbH
- [97] SCHOEGGL, P. : *Verfahren und Vorrichtung zur Analyse des Fahrverhaltens von Kraftfahrzeugen*. 11 1997
- [98] SCHOEGGL, P. ; RAMSCHAK, E. : Vehicle Driveability Assessment using Neural Networks for Development, Calibration and Quality Tests / SAE International. Detroit, Michigan, March 6-9 2000 (2000-01-0702). – Forschungsbericht. – 2000 SAE World Congress
- [99] SCHUST, M. ; KREISEL, A. ; SEIDEL, H. ; BLÜTHNER, R. : Examination of the frequency-weighting curve for accelerations measured on the seat and at the surface supporting the feet during horizontal whole-body vibrations in x- and y-directions. In: *Industrial health* 48 (2010), Nr. 5, 725-742. <http://pubmed.gov/20953088>. ISBN 1880–8026
- [100] SIEBERTZ, K. ; BEBBER, D. van ; HOCHKIRCHEN, T. : *Statistische Versuchsplanung - Design of Experiment (DoE)*. Springer, 2010
- [101] SIMON, D. : *Entwicklung eines effizienten Verfahrens zur Bewertung des Anfahrverhaltens von Fahrzeugen*, Universität Rostock, Diss., 2010

- [102] SIMON, H. A.: Invariants of human behavior. In: *Annual Reviews of Psychology* Bd. 41, Annual Reviews Inc., 1990, S. 1–19
- [103] SNELSON, E. L.: *Flexible and efficient Gaussian process models for machine learning*. 17 Queen Square, London WC1N 3AR, United Kingdom, University of Cambridge, UK, Diss., 2007
- [104] SOBOLOV, I. : On the distribution of points in a cube and the approximate evaluation of integrals. In: *{USSR} Computational Mathematics and Mathematical Physics* 7 (1967), Nr. 4, 86 - 112. [http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/0041-5553\(67\)90144-9](http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/0041-5553(67)90144-9). – DOI [http://dx.doi.org/10.1016/0041-5553\(67\)90144-9](http://dx.doi.org/10.1016/0041-5553(67)90144-9)
- [105] SOMMERFELD, A. : *Mechanik*. Nachdruck der 8. durchgesehenen Auflage. Verlag Harri Deutsch, 1977. – ISBN 3–87144–374–2
- [106] SPIEGEL.DE: *Abgasaffäre bei Volkswagen*. online: [http://www.spiegel.de/thema/abgasaffaere\\_bei\\_volkswagen/](http://www.spiegel.de/thema/abgasaffaere_bei_volkswagen/). [http://www.spiegel.de/thema/abgasaffaere\\_bei\\_volkswagen/](http://www.spiegel.de/thema/abgasaffaere_bei_volkswagen/). Version: September 2015
- [107] STADLBAUER, M. ; DIDCOCK, N. ; HAMETNER, C. ; JAKUBEK, S. ; RAINER, A. ; KOEGELER, H.-M. : Online Design of Experiments in the Relevant Output Range. In: RÖPKE, D. K. (Hrsg.) ; GÜHMANN, P. C. (Hrsg.) ; IAV (Veranst.): *Design of Experiments (DoE) in Engine Development* Bd. 7. Berlin, 2013, S. 43–58
- [108] STORN, R. ; PRICE, K. : Differential Evolution - A simple and efficient adaptive scheme for global optimization and over continuous spaces / International Computer Science Institute. 1947 Center Street, Berkeley, CA 94704-1198, March 1995 (TR-95-012). – Forschungsbericht
- [109] SUGITA, M. ; WATANABE, S. ; OHATA, A. ; EHARA, M. ; KAIZAWA, K. : A new generation of Online Adaptive Design of Experiments: Application to Emissions development and Full Load Calibration. In: RÖPKE, D. K. (Hrsg.) ; GÜHMANN, P. C. (Hrsg.) ; IAV (Veranst.): *Design of Experiments (DoE) in Engine Development* Bd. 4. Berlin, 2007
- [110] THEWES, S. ; LANGE-HEGERMANN, M. ; REUBER, C. ; BECK, R. : Advanced Gaussian Process Modeling Techniques. In: GÜHMANN, P. C. (Hrsg.) ; IAV GmbH (Veranst.): *Design of Experiments (DoE) in Powertrain Development* Bd. 8 IAV GmbH, 2015. – ISBN 978–3–8169–3316–8

- [111] THURNTON, M. ; JORGENSEN, S. ; EVANS, B. ; WRIGHT, K. : Cold-Start and Warm-Up Driveability Performance of Hybrid Electric Vehicles Using Oxygenated Fuels / SAE International. Pittsburgh, Pennsylvania, October 2003 (SAE 2003-01-3196). – Forschungsbericht
- [112] THURSTONE, L. L.: Psychophysical Analysis. In: *The American Journal of Psychology* 38 (1927), July, Nr. 3, S. 368–389
- [113] THURSTONE, L. L.: A law of comparative judgement. In: *Psychological Review* 101 (1994), April, Nr. 2, S. 266–270. <http://dx.doi.org/10.1037/0033-295X.101.2.266>. – DOI 10.1037/0033-295X.101.2.266. – Reprinted article originally appeared in *Psychological Review*, 1927, Vol 34, 273-286
- [114] VDI: Geräuschanteile von Straßenfahrzeugen - Meßtechnische Erfassung und Bewertung / VDI Verein Deutscher Ingenieure. Düsseldorf, 1990 (2563). – Forschungsbericht
- [115] VERLAG, G. : *Gabler Wirtschaftslexikon*. <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/8649/objektivitaet-v8.html>, . – Stand 2015-06-06
- [116] WEI, X. ; RIZZONI, G. : Objective Metrics of Fuel Economy, Performance and Driveability - A Review / Center for Automotive Research and Intelligent Transportation (CAR-IT), Ohio State University. 2004 (2004-01-1338). – Forschungsbericht
- [117] WICKE, V. ; BRACE, C. j. ; VAUGHAN, N. D.: The potential for simulation of driveability of CVT and vehicles / SAE International. University of Bath, 2000 (2000-01-0830). – Forschungsbericht
- [118] WILLIAMS, W. C.: Light-duty Vehicle Driveability Procedure Investigation / Amoco Oil Company, Research & Development Department. Naperville, Illinois 60566, April 1981 (EPA-460/3-81-009). – Forschungsbericht
- [119] YONEKAWA, T. ; OKADA, A. ; EHARA, M. ; OGASAWARA, T. : Analysis of Drivability on Diesel Vehicle / SAE International. Version: February 1984. <http://dx.doi.org/10.4271/840257>. Detroit, Michigan, February 1984 (SAE 840257). – Forschungsbericht. – Toyota Motor Corp.

- [120] YOO, J. ; LEE, H. ; JANG, J. W. ; HWANG, O. ; CHAE, C.-K. : Automated Optimizing Calibration of Engine Driveability on the Dynamic Powertrain Test Bed / SAE International. Version: 10 2013. <http://dx.doi.org/10.4271/2013-01-2588>. 2013 (2013-01-2588). – Forschungsbericht
- [121] YOSHIDA, S. ; EHARA, M. ; WATANABE, S. ; KURODA, Y. : Rapid Boundary Detection for Model Based Diesel Engine Calibration. In: RÖPKE, K. (Hrsg.) ; IAV GmbH (Veranst.): *6th Conference: Design of Experiments (DoE) in Engine Development*. Berlin : Renningen / Expert-Verl., 2011
- [122] ZAGLAUER, S. : Online Optimization of Physically Motivated Models. In: RÖPKE, D. K. (Hrsg.) ; GÜHMANN, P. C. (Hrsg.) ; IAV (Veranst.): *Design of Experiments (DoE) in Engine Development* Bd. 7. Berlin, 2013, S. 330–346
- [123] ZUO, L. ; NAYFEH, S. A.: Low order continuous-time filters for approximation of the ISO 2631-1 human vibration sensitivity weightings. In: *Journal of Sound and Vibration* Bd. 265. Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 77 Massachusetts Avenue, Cambridge, MA 02139, USA : Academic Press, 2003, S. 459–465

# Sachverzeichnis

- ACI, 52
- Anti-Ruckel-Dämpfung, 68
- Applikation, 3, 6
  - automatisiert, 14
  - iterativ, 50
  - Konsistenz, 33
  - modellbasiert, 51
    - Aufwand, 69
  - Varianten, 68
  - vollautomatisiert, 21, 51
- Applikationsmethodik
  - Simulation, 21
- Applikationsprozess
  - Automatisierung, 51
  - Dokumentation, 63
  - Standardisierung, 63
- Applikationstool
  - Automatisierung, 52
- ASAM, 60
- ASAM MCD3, 52
- ASAP 3, 52
- Automatisierung, 4, 7
  - Sicherheitsmechanismen, 60
- Bewertung
  - Skala, 13, 27
    - anpassen, 13
  - subjektive, 3, 10, 12
    - Abhängigkeit, 42
    - Haupteffekte, 27, 41
    - Konsistenz, 42
    - Korrelation, 42
    - Nachteile, 10, 14
    - Originalbezeichnungen, 101
    - Störeffekte, 27, 41
    - Tip-In, 27
    - Vereinheitlichung, 26
    - Zusammenhänge, 44
- Design of Experiment, 4, 8
  - Blockbildung, 41
  - Gütemaße
    - Residuen, 107
    - Varianz, 107
  - Modellierung
    - Gauß-Prozess-Modell, 79
  - online, 93
    - blockförmig, 94

- Grenzprüfung, 94
- Optimierung, 86
  - Zielfunktion, 86
- Randomisierung, 41
- Wiederholung, 41
- ECU, 6
- Elektrofahrzeug
  - Bewertung, 13
- Endwertvorhersage, 7
- Entwicklungsumgebung, 60
- Erwartung, 22
- Erwartungskonformität, 41
- Fahrbarkeit, 9
  - Aspekt, 26
  - Design of Experiment
    - Grundkonzept, 69
- Fahrbarkeitsapplikation
  - Aspekte, 17
- Fahrmanöver, 10
  - Phänomene, 24
  - standardisiert, 24
- Fahrroboter, 53
- Fahrverhalten, 2
  - Objektivierung, 3
  - Simulation, 20
- Fahrversuch, 50
- Fahrzeugvariante, 9
- Fernsteuerung, 4
- Gauß-Prozess-Modell, 79
  - Abstimmung, 80
  - Genauigkeit, 81
  - Kovarianzfunktion, 79
  - Hyperparameter, 80
- iLinkRT, 55
- Kommunikation
  - eventbasiert, 54
  - kontinuierlich, 54
- Kriterien
  - objektive, 4
    - Entwicklung, 23
    - Plausibilität, 44
    - Signifikanz, 33
    - Stabilität, 33
    - Tip-In, 30
    - Validierung, 40
    - Vollständigkeit, 26, 39
- Kurtosis, 35
- Lastschlag, 9
- Laufzeitschwankungen, 55
- Merkmale
  - erwartete, 25
  - kausale, 25
  - unerwartete, 25
- Messplan, 57
- Methoden
  - modellbasiert, 7
- Momentenformung, 66
- Nachruckeln, 10
- Nicht-Echtzeit-System, 54, 60
- Notenskala, 10
- Objektivität
  - Definition, 22
- Pareto, 41, 86
- Prüfstand
  - Motoren-, 7
- Primacy Effect, 12
- Programmiersprache, 60
- Programmierung
  - grafische, 55
- Prozessmodellierung
  - Top-Down, 56
- Quickhull, 76

- Rapid Measurement, 7
- Referenzsystem, 25
- Reproduzierbarkeit, 7
- Reproduziergenauigkeit
  - Kreuzkorrektation, 59
- Ruck, 9, 10, 33, 66
  
- Schubbetrieb, 9
- Signalvertrimmung, 53
- Softwarelösung
  - Schnittstellen, 60
- Softwarequalität, 60
- Steuergerät, 6
- Steuergerätemanipulation, 53
- Stocken, 10, 42
  
- Tip-In, 4, 9, 24, 66
  - Ablauf, 30
  - Applikation
    - Prozess, 67
    - Ziele, 67
  - Automatisierung, 56
  - Bewertung
    - subjektiv, 27
  - Design of Experiment
    - Eingangsgrößen, 74
  - Durchführung, 44
  - Eingangsgrößen
    - Transformation, 81
  - Kriterien
    - objektive, 30
  - modellbasiert
    - Eingangsgrößen, 70
    - lokal, semi-global, global, 71
  - Modellierung
    - Driftkorrektur, 81
    - Ersatzgrößen, 69
    - Validierung, 82
  - Optimierung, 87
    - global, 88
    - Kennfelder, 88
    - Nebenbedingungen, 89
    - Zielfunktion, 87, 89
  - Phasen, 28
  - Reproduzierbarkeit, 57
  - Wiederholungsversuch, 57
  - Workflow, 56
  
- Übergangsvorgang, 7
- Übertragungsverhalten
  - menschlicher Körper, 19
  
- Variationskoeffizient
  - Definition, 33
- Versuchsplan
  - raumfüllend, 77
  - Sobol-Sequenzen, 77
- Versuchsplanung, 50
- Versuchsraum, 75
  - Grenzen
    - Kombinatorik, 76
  - Quickhull, 76
  - Randpunkte, 75
  - raumfüllend
    - Niederreiter-Sequenzen, 77
- Verzögerung, 10, 33
- Vibration Dose Value, 4, 33
  - Definition, 18
  - diskrete Berechnung, 37
  - Filterung, 36
  - Herleitung, 35
  - ISO2631, 36
  - Wichtung, 36
  
- Wölbung, 35
- Werkzeugkette
  - Kopplung, 51
- Workflow, 55
  - ASAM, 60
  - Standardisierung, 60
  - Zustandsmaschine, 55
  
- Zustandsmaschine, 55



---

# Lebenslauf

Name: Matthias Günter Krause

Geburtsdatum: 11.06.1982, Plauen

## Schulbildung

1995 - 2001 Staatliches Gymnasium, Bad Liebenstein

## Studium

10.2002 - 07.2008 Technische Universität Dresden  
Studiengang: Mechatronik (M.Sc.)

## Berufstätigkeit

09.2008 - 12.2011 Product Owner und Lead-Entwickler  
FEV Europe GmbH

01.2012 - 12.2014 Product Owner und Teamleiter  
FEV Europe GmbH

01.2015 - 10.2017 Geschäftsentwicklung und Vertrieb  
FEV Europe GmbH

10.2017 - 04.2020 Senior Projektleiter  
FEV Software & Testing Solutions GmbH

05.2020 - 06.2021 Produktgruppenleiter  
FEV Software & Testing Solutions GmbH

06.2021 - 12.2022 Leiter Produkte und Mitglied des Lenkungsausschusses  
FEV Software & Testing Solutions GmbH

Seit 01.2023 Selbstständig als Teilhaber der DrySoc GmbH