

---

# **Objektive Qualitätsbewertung von Fahr dynamiksimulationen durch statistische Validierung**

Vom Fachbereich Maschinenbau an der  
Technischen Universität Darmstadt  
zur Erlangung des Grades eines  
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte

## **Dissertation**

vorgelegt von

**Michael Viehof, M.Sc.**  
aus Darmstadt

Berichterstatter: Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner

Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp

Tag der Einreichung: 06.02.2018

Tag der mündlichen Prüfung: 15.05.2018

Darmstadt 2018

D 17

Dieses Dokument wird bereitgestellt von TUpriints – Publikationsservice der TU Darmstadt.  
<https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/>

Bitte verweisen Sie auf:

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-74575

URI: <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/7457>

Lizenz: CC BY-NC-ND 4.0 International

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Fahrzeugtechnik (FZD) der Technischen Universität Darmstadt. Die Inhalte dieser Dissertation resultieren aus einem Forschungsprojekt, das in Kooperation mit der Opel Automobile GmbH durchgeführt wurde.

Meinen besonderen Dank möchte ich zuerst meinem Doktorvater, Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner, aussprechen, der mich frühzeitig zum Schritt der Promotion motivierte. Sein großes Vertrauen, die regelmäßigen und stets konstruktiven Rücksprachen sowie die kritischen Auseinandersetzungen mit meinen Forschungsergebnissen haben maßgeblich zum Entstehen dieser Arbeit beigetragen. Zudem haben mir seine Denkanstöße, die fachlichen Diskussionen, aber auch die Freiheiten und Pflichten, die ich als wissenschaftlicher Mitarbeiter seines Fachgebiets erfahren durfte, dabei geholfen, mich fachlich und persönlich weiterzuentwickeln.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp, dem Leiter des Lehrstuhls für Fahrzeugtechnik an der Technischen Universität München, möchte ich mich herzlich für die Übernahme des Korreferats und sein Interesse an meiner Forschungsarbeit bedanken.

Für die aktive Unterstützung des Forschungsprojekts bedanke ich mich bei der Opel Automobile GmbH. Mein besonderer Dank gilt der Abteilung Vehicle Dynamics CAE unter der Leitung von Herrn Dr.-Ing. Michael Kochem, in der ich über einen Zeitraum von drei Jahren als wertgeschätzter Kollege aufgenommen wurde und hervorragende fachliche sowie organisatorische Betreuung erfuhr. Ein großes Dankeschön geht an alle am Projekt beteiligten Mitarbeiter der Opel Automobile GmbH für ihre Unterstützung, für das mir entgegengebrachte Vertrauen, für die Freiräume, die mir insbesondere bei der Durchführung von Fahr- und Prüfstandsversuchen eingeräumt wurden, und für den fachlichen Austausch. Dieser sehr enge Kontakt zur Industrie hat in besonderem Maße zu der Ergebnisqualität des Forschungsprojekts beigetragen.

Ein herzliches Dankeschön gilt auch den zahlreichen Studenten, die großes Interesse und Einsatzbereitschaft für meine Forschungstätigkeiten zeigten und mich beim Erreichen der Projektziele tatkräftig unterstützten. Neben den vielfältigen Abschlussarbeiten, die ich betreute und die auch in dieser Dissertation Erwähnung finden, haben die große Zuverlässigkeit und das Engagement aller Studenten, einschließlich der Praktikanten und der studentischen Hilfskräfte, zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen.

Zudem bedanke ich mich bei allen Mitarbeitern des Fachgebiets Fahrzeugtechnik. Die Arbeitsatmosphäre sowie die Vielfältigkeit und die Qualität des fachlichen Austauschs sind besonders positiv hervorzuheben. Ich wünsche dem Fachgebiet, dass diese herausragenden Eigenschaften stets erhalten bleiben und noch viele zukünftige Doktoranden daran teilhaben und davon profitieren dürfen.

Bedanken möchte ich mich auch bei der Studienstiftung des deutschen Volkes inklusive meiner Vertrauensdozenten und bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Betzler, Leiter des Labors für Fahrwerk-/Simulationstechnik an der Technischen Hochschule Köln, ohne deren Rat und Unterstützung ich mein Studium vermutlich nicht in Darmstadt fortgesetzt und damit auch nicht den Weg der Promotion eingeschlagen hätte.

Zuletzt gilt ein besonders großer Dank meiner Familie, die mich stets unterstützt, die mir in jeder Lebenslage mit Rat und Tat zur Seite steht und mir immer ermöglicht hat, mein Leben nach eigenen Wünschen, Interessen und Entscheidungen zu gestalten. Ohne ihren Zuspruch, ihr Vertrauen und ihren Rückhalt wäre diese Arbeit nicht entstanden.

Michael Viehof

Darmstadt, im Februar 2018

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort.....</b>	<b>III</b>
<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>V</b>
<b>Abkürzungen.....</b>	<b>VIII</b>
<b>Formelzeichen und Indizes .....</b>	<b>IX</b>
<b>Abbildungen und Tabellen.....</b>	<b>XIII</b>
<b>Kurzzusammenfassung .....</b>	<b>XV</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation .....	2
1.2 Allgemeine Begriffsdefinitionen .....	3
1.3 Forschungsziele .....	5
1.4 Forschungsmethodik und Struktur der Arbeit .....	7
<b>2 Aktueller Forschungsstand .....</b>	<b>10</b>
2.1 Validierung .....	10
2.1.1 Terminologie der Modellierung und Simulation.....	10
2.1.2 Wissenschaftsphilosophische Betrachtung .....	14
2.1.3 Charakteristische Merkmale der Validierung.....	17
2.1.4 Überblick bestehender Fahrdynamik-Validierungsstudien .....	23
2.2 Fahrdynamiksimulation.....	27
2.3 Experimentelle Ermittlung und Beurteilung von Fahrzeugeigenschaften .....	29
2.4 Fazit zum derzeitigen Forschungsstand .....	31
<b>3 Ist-Stand-Analyse.....</b>	<b>33</b>
3.1 Struktur heute üblicher Validierungsansätze .....	33
3.2 Bewertung des Forschungsstands.....	35
3.3 Fazit zur Analyse des aktuellen Forschungsstands .....	38
<b>4 Neue Validierungsmethode.....</b>	<b>39</b>
4.1 Diversität der Anwendungsbereiche und Anforderungen an die Methode .....	39
4.2 Validierungskonzept .....	43
4.3 Validierungsprozess.....	47
4.4 Objektivierung und Verknüpfung der Teilprozesse .....	50
4.4.1 Anforderungsdefinition.....	50
4.4.2 Auslegung der Validierungsstudie .....	52
4.4.3 Versuchsvorbereitung.....	66
4.4.4 Versuchsdurchführung .....	78

4.4.5	Empirische Validitätsanalyse.....	79
4.4.6	Validierungsergebnis .....	98
4.5	Unsicherheiten und Gegenmaßnahmen .....	106
4.5.1	Konfigurationsstichproben und Modellparametrierung .....	107
4.5.2	Nicht kontrollierbare Einflussgrößen .....	108
4.5.3	Signalerfassung und -verarbeitung .....	110
4.5.4	Versuchsdurchführung in der Praxis.....	111
4.6	Fazit zur neuen Validierungsmethode.....	112
<b>5</b>	<b>Anwendbarkeitsanalyse in der Fahrdynamik .....</b>	<b>113</b>
5.1	Rahmenbedingungen der Validierungsstudien.....	113
5.1.1	Versuchsfahrzeug und Fahrzeugkonfigurationen .....	116
5.1.2	Messtechnik im Versuchsfahrzeug .....	117
5.1.3	Auswahl repräsentativer Simulationsanwendungen.....	120
5.1.4	Simulationsumgebung .....	121
5.2	Validierungsstudie der Querdynamik .....	124
5.2.1	Stufe 1: Anforderungsdefinition.....	124
5.2.2	Stufe 2: Auslegung der Validierungsstudie .....	125
5.2.3	Stufe 3: Versuchsvorbereitung.....	129
5.2.4	Stufe 4: Versuchsdurchführung .....	131
5.2.5	Stufe 5: Empirische Validitätsanalyse .....	132
5.2.6	Stufe 6: Validierungsergebnis.....	133
5.3	Validierungsstudie der Vertikaldynamik .....	135
5.3.1	Stufe 1: Anforderungsdefinition.....	136
5.3.2	Stufe 2: Auslegung der Validierungsstudie .....	138
5.3.3	Stufe 3: Versuchsvorbereitung.....	141
5.3.4	Stufe 4: Versuchsdurchführung .....	142
5.3.5	Stufe 5: Empirische Validitätsanalyse .....	142
5.3.6	Stufe 6: Validierungsergebnis.....	147
5.4	Fazit zur Methodenanwendung in der Fahrdynamik .....	152
<b>6</b>	<b>Ergebnisse, Bewertung und Diskussion .....</b>	<b>153</b>
6.1	Erfüllung der Konzeptanforderungen .....	153
6.2	Anwendungsbereiche.....	160
6.2.1	Anwendbarkeit der Vergleichsmethode.....	160
6.2.2	Validierungsmethode für die Fahrdynamik .....	162
6.3	Gesamtfazit zur neuen Validierungsmethode .....	163
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>165</b>
<b>A</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>170</b>
A.1	Validierungsprozess .....	170
A.1.1	Leitfragen der Anforderungsdefinition.....	170

A.1.2 Beispiel für die Komprimierung mittels Gewichtungsfunktionen.....	171
A.1.3 Beispiel für die Sensitivitätsanalysetechnik eFAST .....	172
A.1.4 Werte für den $t$ -Faktor.....	178
A.1.5 Übersicht zum $t$ -Test .....	179
A.1.6 Erstellung einer kumulativen Verteilungsfunktion .....	182
A.1.7 Fehleridentifikation mittels kumulativer Verteilungsfunktionen .....	183
A.2 Versuchsfahrzeug .....	187
A.2.1 Verschaltung der Messtechnik .....	187
A.2.2 Übersicht der Messgrößen .....	188
A.3 Validierungsstudien .....	190
A.3.1 Struktur der Sensitivitätsanalyse-Umgebung.....	190
A.3.2 Übertragungsfunktion auf dem Vierstempelprüfstand.....	191
A.3.3 Anregungsprofil des Vierstempelprüfstands.....	191
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>192</b>
<b>Eigene Veröffentlichungen .....</b>	<b>205</b>
<b>Betreute studentische Arbeiten.....</b>	<b>206</b>

# Abkürzungen

<b>Abkürzung</b>	<b>Beschreibung</b>
<i>ABS</i>	Antiblockiersystem
<i>Anf.</i>	Anforderung
<i>A/D</i>	analog / digital
<i>CAN</i>	Controller Area Network
<i>CDF</i>	cumulative distribution function   kumulative Verteilungsfunktion
<i>CS</i>	configuration sample   Konfigurationsstichprobe
<i>d. Verf.</i>	des Verfassers
<i>DoE</i>	design of experiments   statistische Versuchsplanung
<i>eFAST</i>	extended Fourier Amplitude Sensitivity Test   erweiterter FAST
<i>F</i>	factor   Faktor (Versuchsplanung)
<i>FAST</i>	Fourier Amplitude Sensitivity Test   Fourier-Amplituden-Sensitivitätstest
<i>FFT</i>	Fast Fourier Transformation
<i>FL</i>	factor levels   Faktorstufen (Versuchsplanung)
<i>FMEA</i>	failure mode and effects analysis   Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse
<i>H</i>	Hypothese
<i>HBZ</i>	Hauptbremszylinder
<i>IMU</i>	inertial measurement unit   Inertialmesseinheit
<i>KnC</i>	kinematic and compliance   Kinematik und Elastokinematik
<i>MF</i>	Magic Formula
<i>MKS</i>	Mehrkörpersimulation
<i>MVC</i>	metric validity criterion   metrisches Validitätskriterium
<i>OFAT</i>	one factor at a time   ein Faktor nach dem anderen (Versuchsplanung)
<i>P</i>	parameter   Variationsparameter bzw. Faktor (Versuchsplanung)
<i>PSD</i>	power spectral density   Leistungsspektraldichte
<i>SA</i>	sensitivity analysis   Sensitivitätsanalyse
<i>TA</i>	test application   Testanwendung
<i>TE</i>	test executions   Versuchsdurchführungen je Konfigurationsstichprobe
<i>TR</i>	test runs   Gesamtheit aller Versuche einer Validierungsstudie
<i>V</i>	Variante
<i>VAG</i>	Versuchsausgangsgröße
<i>VAM</i>	validity assessment map   Validitätsbewertungskarte
<i>VAR</i>	validity assessment report   Validitätsbewertungsbericht
<i>V&amp;V</i>	verification and validation   Verifikation und Validierung

# Formelzeichen und Indizes

Symbol	Einheit	Beschreibung
$a$	m/s <sup>2</sup>	Beschleunigung
$c$	N/m	Federsteifigkeit
$d$	Ns/m	Dämpfungskonstante
$df$	-	Freiheitsgrad ( $t$ -Statistik)
$f$	Hz	Frequenz
$f_0$	Hz	Eigenfrequenz
$f(x)$	-	Dichtefunktion bzw. Häufigkeitsverteilung von $x$
$i$	-	Laufvariable
$m$	kg	Masse
$m_i$	differierend	Elemente der Menge $M$
$n$	-	Anzahl
$r$	-	empirischer Korrelationskoeffizient
$s_i$	differierend	Elemente der Menge $S$
$s_x$	differierend	Varianz des Signalvektors $X$
$s_y$	differierend	Varianz des Signalvektors $Y$
$s_{xy}$	differierend	Kovarianz der Signalvektoren $X$ und $Y$
$t$	-	$t$ -Faktor, $t$ -Wert ( $t$ -Statistik)
$t$	s	Zeit
$v$	m/s	Geschwindigkeit
$v(f)$	differierend	Amplitudenspektrum von $f$ ermittelt durch eine FFT
$w$	-	Gewichtungsfaktor
$x$	differierend	Messgröße
$x$	differierend	Eingangsgröße (eFAST-Beispiel)
$x$	m	Weg in $x$ -Richtung
$y$	differierend	Ausgangsgröße (eFAST-Beispiel)
$y$	m	Weg in $y$ -Richtung
$z$	m	Weg in $z$ -Richtung
$A$	differierend	Amplitude
$B$	-	Bandbreite
$C$	-	Simulationsanzahl (eFAST)
$D$	-	Systemdämpfung
$F$	differierend	Faktor (eFAST)
$F$	N	Kraft
$F$	-	Übertragungsfunktion
$H$	-	Hypothese
$I$	-	Indexnummer
$K$	-	Proportionalitätsfaktor

<b>Symbol</b>	<b>Einheit</b>	<b>Beschreibung</b>
$K_{us}$	rad s <sup>2</sup> /m	Eigenlenkgradient
$M$	Nm	Drehmoment
$M$	-	Interferenzfaktor (eFAST)
$M$	differierend	Menge der referenzierten Messwerte (Vertrauens- bzw. Toleranzbereich)
$M_{sgn}$	-	Vorzeichenkennwert der Menge $M$
$MVC$	differierend	metrisches Validitätskriterium
$N_r$	-	Suchkurvenanzahl (eFAST)
$N_S$	-	Stichprobenanzahl (eFAST)
$P$	%	Wahrscheinlichkeit
$PSD$	differierend	Leistungsspektraldichte
$R$	m	Bahnradius
$R_V$	%	Auflösung der statistischen Validitätskennwerte
$S$	%	Schlupf
$S$	differierend	Menge der Simulationswerte (Vertrauensbereich)
$S_{sgn}$	-	Vorzeichenkennwert der Menge $S$
$S_V$	-	Signifikanzindikator der statistischen Validitätskennwerte $V_{abs}$ und $V_{rel}$
$T$	s	Versuchsdauer oder Messzeit
$U$	differierend	standardnormalverteilte Variable (Statistik)
$V_{abs}$	%	statistisches Validitätsmaß für die Prädiktion absoluter Kennwerte
$V_{rel}$	%	statistisches Validitätsmaß für die Prädiktion relativer Kennwertänderungen
$X$	differierend	beliebiger Signalvektor
$X$	differierend	normalverteilte Variable (Statistik)
$Y$	differierend	beliebiger Signalvektor
$\alpha$	%	Irrtumswahrscheinlichkeit, Signifikanzniveau
$\beta$	rad	Schwimmwinkel
$\gamma$	%	Vertrauensniveau
$\delta$	rad	Lenkwinkel
$\delta_H$	rad	Lenkradwinkel
$\mu$	differierend	arithmetischer Mittelwert
$\mu$	-	Reibbeiwert
$\sigma$	differierend	Standardabweichung
$\varphi$	rad	Phasenwinkel
$\varphi$	rad	Wankwinkel
$\psi$	rad	Gierwinkel
$\omega$	-	Faktorfrequenz (eFAST)
$\omega_0$	1/s	Eigenkreisfrequenz
$\Delta$	differierend	Differenz
$\emptyset$	-	leere Menge

<b>Index</b>	<b>Beschreibung</b>
8va	Oktavwert
A	Abtastung
A/D	Analog-Digital-Wandler
abs	absolut
Amp,Freq	Amplituden-Frequenz-Abhängigkeit
body	Fahrzeugaufbau
brake	Bremsen
c	momentan (current)
CAN	Controller Area Network
crit	kritisch (critical)
CS	Konfigurationsstichproben (configuration samples)
damper	Dämpfer
data	Daten
eff	Effektivwert
end	Ende
f	Vorderachse (front)
F	Faktor
FL	Faktorstufen (factor levels)
front	Vorderachse
fullfactorial	vollfaktoriell
H	Hand bzw. Lenkrad
high	hoch
hl	hinten links
hr	hinten rechts
IMU	Inertialmesseinheit (inertial measurement unit)
Label	Validitätsbewertungslabel
linear	linearer Bereich
low	tief
m	(Intervall-) Mitte
M	Messung
max	Maximum
MeasRim	Messfelgen (measurement rims)
min	Minimum
post	Prüfstandsstempel
r	Hinterachse (rear)
rear	Hinterachse
rel	relativ
s	Abtastung (sample)
S	Simulation
sample	Abtastung

<b>Index</b>	<b>Beschreibung</b>
sgn	Vorzeichen
Signal	Signal
spring	Feder
start	Start
TA	Validierungsversuche (test applications)
TE	Versuchsdurchläufe (test executions)
tol	Toleranz
TR	Versuchsanzahl (test runs)
US	Untersteuern (understeer)
V	Validität
VAM	Validitätsbewertungskarte (validity assessment map)
vl	vorne links
vr	vorne rechts
w	Gewichtung
w	Rad (wheel)
wheel	Rad
$x$	in $x$ -Richtung (entspricht Fahrzeug-Longitudinalrichtung)
$y$	in $y$ -Richtung (entspricht Fahrzeug-Lateralrichtung)
$z$	in $z$ -Richtung (entspricht Fahrzeug-Vertikalrichtung)

# Abbildungen und Tabellen

Abbildung 1-1: Forschungsprozess inklusive Kapitelzuweisung (links) und Forschungsfragen (rechts) .....	7
Abbildung 2-1: Dekomposition der Modellentwicklung.....	11
Abbildung 2-2: Unterschiedliche Arten von Validität.....	14
Abbildung 2-3: Merkmale der Validierung .....	17
Abbildung 2-4: Signaltoleranz nach Klemmer et al. ....	23
Abbildung 3-1: Einordnung und Struktur von Kapitel 3 .....	33
Abbildung 3-2: Heutiger Validierungsprozess .....	35
Abbildung 3-3: Prinzip der heute üblichen Validierungsstrategie.....	36
Abbildung 4-1: Einordnung und Struktur von Kapitel 4 .....	39
Abbildung 4-2: Prinzip der statistischen Validierung.....	43
Abbildung 4-3: Neuer anforderungsbasierter Prozess für die statistische Validierung .....	47
Abbildung 4-4: Übersicht der verfahrensbasierten Definition von Validierungsanforderungen .....	50
Abbildung 4-5: Beziehungsdreieck der Auslegungsmerkmale.....	53
Abbildung 4-6: Überlappende Gewichtung für frequenzbezogene Kennwerte im Oktavband .....	57
Abbildung 4-7: Gewichtungsfunktionen für querschleunigungsbezogene Größen .....	59
Abbildung 4-8: Prinzip der Konfigurationsstichprobendefinition .....	64
Abbildung 4-9: Teilfaktorielle Versuchspläne im Vergleich.....	70
Abbildung 4-10: Gaußsche Normalverteilung.....	71
Abbildung 4-11: Einflussfaktoren der Messtechnikauswahl .....	75
Abbildung 4-12: Datenerfassung und -verarbeitung .....	77
Abbildung 4-13: Erhebung eines Vertrauensintervalls aus den Stichprobenwerten.....	81
Abbildung 4-14: Ursachen formaler Datenfehler in der Vergleichsdatenerhebung .....	83
Abbildung 4-15: Eigenschaften der kumulativen Verteilungsfunktion .....	84
Abbildung 4-16: Versuchsdatenvalidierung – Beispiel für Anforderungserfüllung.....	86
Abbildung 4-17: Parametervalidierung – Beispiel für einzelne Parametervariation .....	88
Abbildung 4-18: Parametervalidierung – Beispiel für vollständige Parameterdatensatzvariation .....	89
Abbildung 4-19: Einfluss der Dämpfer-Konfigurationsstichproben auf die Systemdämpfung.....	90
Abbildung 4-20: Prinzip der Simulationsvalidierung.....	92
Abbildung 4-21: Bewertungslabels für Simulationsvalidität.....	95
Abbildung 4-22: Veranschaulichung der Labelvergabe anhand der Verteilungsfunktionen der MVC .....	96
Abbildung 4-23: Begründung der Labelvergabe anhand der Irrtumswahrscheinlichkeit .....	97
Abbildung 4-24: Validitätsbewertungskarte (VAM) eines metrischen Validitätskriteriums.....	99
Abbildung 4-25: Bestimmung des statistischen Maßes für Stichprobenvalidität aus der VAM .....	102
Abbildung 4-26: Schematischer Aufbau und Inhalte des Validitätsbewertungsberichts (VAR).....	106
Abbildung 4-27: $\mu$ -S-Kurve ermittelt aus einer Vollbremsung mit Messfelgen und Correvit-Sensor .....	109
Abbildung 5-1: Einordnung und Struktur von Kapitel 5 .....	113
Abbildung 5-2: Versuchsfahrzeug Opel Astra K.....	116
Abbildung 5-3: Messtechnik im Versuchsfahrzeug.....	118
Abbildung 5-4: Vergleich der Fahrwerkssteifigkeit zwischen Prüfstandssimulation und -messung.....	119
Abbildung 5-5: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zur Definition der Konfigurationsstichproben.....	128
Abbildung 5-6: Bestimmung des Eigenlenkgradienten bei veränderlicher Fahrzeuggeschwindigkeit .....	130
Abbildung 5-7: Validitätslabels der Schwimmwinkel-Prädiktion für eine Konfigurationsstichprobe .....	132
Abbildung 5-8: Validitätsbewertungsbericht der Querdynamikstudie .....	133

Abbildung 5-9: Reales und virtuelles Versuchsfahrzeug auf dem Vierstempelprüfstand.....	135
Abbildung 5-10: Systemdekomposition .....	138
Abbildung 5-11: Vergleich der kumulativen Verteilungsfunktion (CDF) eines Dämpferkraftsensors .....	143
Abbildung 5-12: Validitätsbewertungskarte für $a_{8va,eff,body,f}(1\text{ Hz})$ und Vergleichsdiagramme.....	145
Abbildung 5-13: Vergleichsdiagramm für alle $a_{8va,eff,body,f}(f_m)$ einer Konfigurationsstichprobe .....	146
Abbildung 5-14: Validitätsbewertungsbericht der Vertikaldynamikstudie.....	148
Abbildung 5-15: Einschränkung des Gültigkeitsbereichs auf Basis der Validitätsbewertungskarte .....	150
Abbildung 5-16: Konfigurationskontrolle im Validitätsbewertungsbericht .....	151
Abbildung A.1-1: Fragenkatalog zur Anforderungsdefinition .....	170
Abbildung A.1-2: Beispiel für die Kennwertkomprimierung mittels Gewichtungsfunktion .....	171
Abbildung A.1-3: eFAST-Beispiel – Stichprobendefinition .....	172
Abbildung A.1-4: eFAST-Beispiel – Ermittlung der Effekte .....	175
Abbildung A.1-5: Entscheidungsfindung im $t$ -Test.....	181
Abbildung A.1-6: Erzeugung einer CDF aus einem zeitdiskreten Messsignal .....	182
Abbildung A.1-7: Versuchsdatenvalidierung – Auswirkung fehlerhafter Lastfallübertragung .....	184
Abbildung A.1-8: Versuchsdatenvalidierung – Auswirkung fehlerhafter Modellparametrierung.....	185
Abbildung A.1-9: Versuchsdatenvalidierung – Auswirkung fehlerhafter Datenerfassung.....	186
Abbildung A.2-1: Verschaltung der Messtechnik.....	187
Abbildung A.3-1: Ablaufplan der Sensitivitätsanalyse.....	190
Abbildung A.3-2: Übertragungsfunktion Prüfstandstempel $\rightarrow$ Fahrzeugaufbau.....	191
Abbildung A.3-3: Frequenzexponentieller Gleitsinus mit konstanter Geschwindigkeitsamplitude .....	191

---

Tabelle 1-1: Vergleich des systemtechnischen Problemlösungszyklus mit dem Forschungsprozess .....	9
Tabelle 4-1: Beispielhafte Anwendungsbereiche der neuen Vergleichsmethode .....	40
Tabelle 4-2: Zusammenfassung des neuen Validierungsprozesses.....	49
Tabelle 5-1: Kategorisierung verbreiteter Fahrdynamikexperimente nach Anregungssignaltyp.....	121
Tabelle 5-2: Globale Hauptanforderungen der Querdynamik-Validierungsstudie .....	124
Tabelle 5-3: Metrische Validitätskriterien der Querdynamik-Validierungsstudie.....	126
Tabelle 5-4: Metrische Validitätskriterien der Vertikaldynamik-Validierungsstudie.....	139
Tabelle A.1-1: $t$ -Faktor in Abhängigkeit der Versuchsanzahl und des Vertrauensniveaus.....	178
Tabelle A.2-1: Messgrößen.....	188

## Kurzzusammenfassung

Simulationen gewinnen in der Entwicklung technischer Produkte stetig an Bedeutung. Insbesondere in der Automobilindustrie erfordern die Effizienz- und die Effektivitätssteigerung der Entwicklungsprozesse belastbare Simulationsergebnisse. Die Fahrdynamiksimulation nimmt hierbei eine wichtige Stellung ein. Bisherige Validierungsansätze führen zu einem ungenügenden Vertrauensnachweis, sodass häufig Zweifel an der Repräsentativität der Simulationsergebnisse in Bezug auf das reale Systemverhalten geäußert werden.

Diese Forschungsarbeit stellt eine neue Methode für den objektiven Vergleich und die Bewertung der Übereinstimmungsgenauigkeit zweier Systemabbildungen vor. Ein wichtiges Anwendungsgebiet dieser Methode ist die Simulationsvalidierung, in der die Simulation und die praktische Messung die beiden Systemabbildungen sind. Beschrieben wird die Methode in dieser Arbeit für die Validierung von Fahrdynamiksimulationen, wobei als Referenz für die Simulationsergebnisse Messdaten aus dem Realversuch herangezogen werden. Dies entspricht einem typischen Anwendungsfall in der Automobilentwicklung und in der Fahrdynamikforschung. Die Arbeit gliedert sich in drei Teile.

Im ersten Teil werden die Forschungsziele präzisiert. Auf Basis der Ist-Stand-Analyse und -Bewertung erfolgen eine Strukturierung des Validierungsprozesses und die Identifikation der Defizite, die den mangelhaften Vertrauensnachweis begründen.

Der zweite Teil beschäftigt sich mit der anwendungsneutralen Methodenentwicklung, d.h. ohne Fokussierung eines spezifischen Anwendungsgebiets. Die aus der Ist-Stand-Bewertung folgenden Anforderungen zur Überwindung der Defizite werden in der Konzeptdefinition und in der Prozessverbesserung berücksichtigt. Die Effektivität der neuen Validierungsmethode resultiert aus der gleichzeitigen Betrachtung der Simulationsqualität für verschiedene Systemvarianten, die in dieser Arbeit Fahrzeugen mit unterschiedlichen Eigenschaften entsprechen. Hierdurch wird das Simulationsmodell in mehreren Arbeitspunkten getestet, sodass über eine statistische Auswertung für jede Ausgangsgröße der Simulationsanwendung zwei statistische Validitätsmaße bestimmt werden können, die die Prädiktionsqualität für absolute Kennwerte und für Kennwertdifferenzen angeben.

Im dritten Teil erfolgt die Anwendbarkeitsanalyse in fahrdynamischen Validierungsstudien. Hier bewährt sich das neue Validierungskonzept und der überarbeitete Prozess ist ohne domänenspezifische Adaptionen durchführbar. Die Ergebnisse werden in einem Validitätsbewertungsbericht zusammengefasst, der neben der statistischen Validität auch Informationen über Versuchsunsicherheiten und zulässige Toleranzintervalle enthält.

Die Bewertung der neuen Validierungsmethode führt zu dem Ergebnis, dass sie die Anforderungen erfüllt und durch die Steigerung des Vertrauens zu einem größeren Nutzen simulationsbasierter Untersuchungen in der Fahrdynamikforschung beiträgt.

---

*„Mache die Dinge so einfach wie möglich – aber nicht einfacher.“*  
(Albert Einstein)<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Dieses Postulat wird (teilweise in leicht verändertem Wortlaut) Albert Einstein zugeschrieben. (Vgl. u.a. Focus Online: Einstein – Schlagfertiges Jahrhundert-Genie, 2006 / Rau, J.: Grußwort – 125 Jahre Albert Einstein, 2004 / Uni-Journal Jena: Einsteins Bedeutung für Ihre Wissenschaft, 2009).

---

# 1 Einleitung

Steigende Systemkomplexität, zunehmende Variantenvielfalt und das Bestreben, die Effizienz von Entwicklungsprozessen zu erhöhen, begründen den Trend des vermehrten Einsatzes virtueller Produktentwicklungsmethoden. Auch in der Fahrdynamikforschung steigt die Anzahl simulationsbasierter Untersuchungen, um bestimmte Fahrzeugeigenschaften analysieren und vorhersagen zu können. Die Fragestellung, ob eine Forschungs- bzw. Entwicklungsaufgabe mittels Simulationen bearbeitet werden kann oder ob alternativ praktische Versuche herangezogen werden müssen, resultiert in einem Abwägungsprozess. Während Simulationen Vorteile wie eine schnelle und kostengünstige Umsetzung aufweisen, wird ihren Ergebnissen ein grundlegend geringeres Vertrauen entgegengebracht als praktischen Messungen, die hingegen ungleich mehr Zeit erfordern und höhere Kosten verursachen. In frühen Entwicklungsphasen sind Simulationen häufig ohne Alternative, da Messungen aufgrund fehlender Realisierungen des betrachteten Systems, z.B. eines Prototypfahrzeugs, noch nicht möglich sind. Umso wichtiger ist es, die Qualität der Simulation für ihren Anwendungszweck zu kennen, um eine Entscheidung über ihre Eignung als Untersuchungsumgebung treffen zu können und Vertrauen in Simulationsergebnisse zu schaffen.<sup>2</sup>

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit einer neuen Form des Vertrauensnachweises von Simulationsergebnissen und fokussiert den Anwendungsbereich der Fahrdynamiksimulation. Die hierzu entwickelte Methode ist jedoch nicht ausschließlich für den Vergleich von Simulations- und Messdaten ausgelegt, sondern lässt weitere Abstraktionen für den Vergleich unterschiedlicher Systemabbildungen zu, wie z.B. zwei verschiedene Simulationsumgebungen, Messreihen, Theorien oder deren Kombinationen. Die folgenden Unterkapitel beschreiben die Motivation für das Forschungsthema und die sich daraus ergebenden Forschungsziele. Die Ausführungen zur Forschungsmethodik geben Aufschluss darüber, wie diese Ziele erreicht werden.

In diese Schrift fließen die Erkenntnisse mehrerer vorbereitender Arbeiten ein, die sich im Schwerpunkt mit der Forschungsmethodik<sup>3</sup>, mit dem aktuellen Forschungsstand<sup>4</sup>, mit der Ist-Stand-Analyse<sup>5</sup> und mit der Anwendbarkeit der entwickelten Validierungsmethode<sup>6</sup> beschäftigen. Die aus ihnen hervorgehenden Forschungsergebnisse tragen zur Motivation dieser Arbeit bei.

---

<sup>2</sup> Vgl. Viehof, M. et al.: Objektivierungspotenzial der operativen Validierung, 2016, S. 418 f.

<sup>3</sup> Viehof, M.; Winner, H.: Research Methodology for a New Validation Concept, 2018.

<sup>4</sup> Viehof, M.; Winner, H.: Forschungsstand der Validierung, 2017.

<sup>5</sup> Viehof, M. et al.: Objektivierungspotenzial der operativen Validierung, 2016.

<sup>6</sup> Viehof, M. et al.: Validierungskonzept für die Vertikaldynamik, 2017.

## 1.1 Motivation

Der Abwägungsprozess zwischen Simulationen und Messungen ist in vielen technischen Bereichen ein anhaltendes Thema. Während Messungen als Repräsentation der Realität ein grundlegend größeres Vertrauen entgegengebracht wird, wird für die simulationsbasierte Untersuchung ein Qualitätsnachweis gefordert. Hierdurch soll die Qualifikation – d.h. die Erfüllung sämtlicher Anforderungen – der Simulation für ihren Anwendungszweck aufgezeigt werden. Die *Validierung* ist ein Teilprozess innerhalb der Modellbildung, der sich mit der Frage, ob eine Simulation für ihren Anwendungszweck geeignet ist, beschäftigt und damit eine zentrale Rolle in der Qualitätssicherung einnimmt.<sup>7</sup>

Dass insbesondere auch im Bereich der Fahrdynamiksimulation die Genauigkeit der Ergebnisse angezweifelt wird, folgt aus der Tatsache, dass sich bis heute noch kein Validierungskonzept durchsetzen konnte, das einerseits praxistauglich und andererseits zielführend ist. Zielführend bedeutet in diesem Zusammenhang, dass durch eine objektive und praktikable Nachweisführung Vertrauen in die Simulationsergebnisse erzeugt wird. Weiterhin wird das Misstrauen durch negative Erfahrungen und die vielfältige Beeinflussbarkeit von Simulationsergebnissen gefördert. Insbesondere bei komplexen Simulationsmodellen, wie sie auch in der Gesamtfahrzeugentwicklung Anwendung finden, können durch kleine Modifikationen des Modells oder der Modellparametrierung Anpassungen der Ergebnisse herbeigeführt werden, die meist auf hohe Sensitivitäten, aber nicht auf eine methodische Vorgehensweise, zurückzuführen sind. Sogenanntes Parametertuning bzw. Parameteranpassungen werden nur selten mit einer physikalisch motivierten Korrektur der Modellparametrierung in Verbindung gebracht. Wirklich wertschöpfend ist die Simulation hingegen dann, wenn bekannt ist, welche Genauigkeit die Simulation ohne jegliche Adaptionen erzielt. Diese Erkenntnis wird jedoch bis heute in der Praxis nicht systematisch erhoben.<sup>8</sup>

Hinzu kommt, dass insbesondere für die Industrie ein Validierungsprozess keinen direkten Nutzen aufzeigt, aber Aufwand verursacht. Die Simulation kann auch ohne eine Validierung durchgeführt werden und liefert die geforderten Ausgangsinformationen. Doch der Wert dieser Ergebnisse ist gering, wenn keine Validierung dazu vorliegt. Erst durch den Validierungsprozess wird der notwendige Qualitätsnachweis erbracht, dass die Simulationsergebnisse die Realität widerspiegeln bzw. für den Anwendungszweck geeignet sind und für weitere Produktentwicklungsstufen herangezogen werden können. Die Zeit- und Kostenfaktoren führen in der Praxis dazu, dass Validität vielfach subjektiv anhand von Expertenmeinungen beurteilt wird und nur stichprobenweise Vergleichsmessungen zur Simulation durchgeführt werden, deren Erkenntnisse zumeist nicht systematisch für zukünftige Simulationsanwendungen genutzt werden. Dies ist jedoch eine Quelle für Fehlentscheidungen und wiederum Ursprung für das Misstrauen. Aus

---

<sup>7</sup> Vgl. Unterkapitel 2.1 (Validierung).

<sup>8</sup> Vgl. Kapitel 2 (Aktueller Forschungsstand) / Viehof, M.; Winner, H.: Forschungsstand der Validierung, 2017, S. 50 ff.

diesem Grund besteht die Forderung nach einem objektiven Validierungsvorgehen, das durchgängig anwendbar ist und damit Aufwand und Nutzen in ein praxistaugliches Verhältnis bringt.<sup>9</sup>

Die beschriebene Ausgangslage führt zu der Frage, welche Verbesserungen im Bereich der Validierung von Simulationen vorzunehmen sind, um virtuelle Fahrdynamikuntersuchungen stärker voranzutreiben. Denn hierin steckt großes Potenzial, die Effizienz kostenintensiver und zeitaufwändiger Realversuche für Fragestellungen, die in der Simulation nicht behandelt werden können, zu steigern und gleichzeitig Entwicklungskosten sowie -zeiten weiter zu senken. Der Grund hierfür ist, dass bei einmalig systematisch nachgewiesener Simulationsqualität auf vereinzelte Vergleichsmessungen, wie sie heute üblicherweise durchgeführt werden, verzichtet werden kann.<sup>10</sup> Da Nutzer von Simulationsergebnissen, wie die Ausführungen oben verdeutlichen, sehr sensibel auf subjektives und auf unmethodisches Vorgehen reagieren, ist ein Validierungskonzept gefordert, das größten Wert auf Objektivität und Transparenz legt. Genau hierauf liegt der Fokus dieser Arbeit.

Die beschriebene Ausgangslage führt zu der Forderung nach einer Methode, die durch stichprobenbasierte Nachweise die Simulation für einen definierten Anwendungszweck als Untersuchungsumgebung legitimiert. Im Fokus dieses Ansatzes steht die Prädiktionsfähigkeit als Haupteinsatzzweck von Simulationen. Dies bedeutet, dass qualitätsabgesicherte Vorhersagen über ein System, das in der Praxis nicht besteht bzw. keiner Vergleichsmessung unterzogen wurde, getroffen werden können. Dies ermöglicht, die Genauigkeit von Produktentwicklungen – insbesondere in frühen Phasen – weiter zu steigern.<sup>11</sup>

## 1.2 Allgemeine Begriffsdefinitionen

Die nähere Betrachtung wissenschaftlicher Publikationen zum Thema Validierung führt zu der Erkenntnis, dass die Komplexität der Zusammenhänge eindeutige Begriffsverwendungen erfordert. Für Begriffe mit direktem Bezug zur Modellbildung und zur Qualitätsbewertung liegen eindeutige Definitionen vor, wie sie z.B. in der Publikation *Terminology for model credibility*<sup>12</sup> von Schlesinger et al. aus dem Jahr 1979 zusammengefasst sind. Zur präzisen Beschreibung des Anwendungsgebiets hingegen werden in der Literatur<sup>13</sup> Begriffe und Formulierungen verwendet, die einen klaren Konsens erkennen lassen, aber keiner festen Definition in Bezug auf

---

<sup>9</sup> Vgl. Kapitel 3 (Ist-Stand-Analyse).

<sup>10</sup> Vgl. Unterkapitel 4.1 (Diversität der Anwendungsbereiche und Anforderungen an die Methode).

<sup>11</sup> Vgl. Unterkapitel 4.2 (Validierungskonzept).

<sup>12</sup> Schlesinger, S. et al.: *Terminology for model credibility*, 1979.

<sup>13</sup> Vgl. Viehof, M.; Winner, H.: *Forschungsstand der Validierung*, 2017.

die Validierung unterliegen. Um Missverständnisse zu vermeiden und um eine eindeutige Trennung der virtuellen Simulationsumgebung von der realen Versuchsumgebung vorzunehmen, werden hieraus folgende Definitionen für die vorliegende Arbeit festgelegt:

- *Versuchs- bzw. Untersuchungsumgebung*  
Bei der Validierung wird zwischen zwei Versuchs- oder Untersuchungsumgebungen unterschieden, der realen Versuchsumgebung (Durchführung von Messungen) und der virtuellen Versuchsumgebung (Durchführung von Simulationen).
- *Messung, Realversuch bzw. realer Versuch*  
In dieser Arbeit bezeichnet die Messung die Messdatenaufnahme in einem praktisch durchgeführten Versuch. Streng genommen kann auch innerhalb einer Simulationsumgebung gemessen werden, jedoch ist es nicht üblich, hierbei von Messungen zu sprechen. Im Rahmen der Validierung kann alternativ zur Messung auch vom Realversuch gesprochen werden, der stets mit der Aufzeichnung der Messdaten für den Vergleich mit der Simulation verbunden ist.
- *Simulation, virtueller Versuch*  
Die Simulation ist bei der Validierung das Pendant zum Realversuch und bezeichnet die Versuchsdurchführung in der virtuellen Umgebung. Deshalb wird synonym auch die Begrifflichkeit virtueller Versuch verwendet.
- *Versuch, Testanwendung*  
Als Versuch oder Testanwendung wird das Experiment bezeichnet, dem das System zum Zweck der Validierung unterzogen wird und das für die Validierung herangezogen wird. Es kann sich hierbei z.B. um ein Fahrmanöver oder einen Prüfstandsversuch handeln. Zur Erzeugung von Vergleichsdaten muss der Versuch in beiden Untersuchungsumgebungen übereinstimmend durchgeführt werden. In der Fahrdynamiksimulation spricht man auch von einem übereinstimmenden Lastfall.
- *System*  
Das System bezeichnet das Objekt, das im Validierungsprozess betrachtet wird. Es kann sich hierbei z.B. um ein Fahrzeug handeln. Der Begriff ist sowohl für die virtuelle als auch für die reale Untersuchungsumgebung zu verwenden. Bei der Validierung ist das System in der Messung und in der Simulation als identisch zu betrachten. Während das System für die Messung in der Realität bereitstehen muss, ist es in der Simulation als Modell abgebildet. Im Falle der Fahrdynamiksimulation ist kritisch zu hinterfragen, ob die Fahrbahn Teil des Systems oder ein äußerer Einflussfaktor ist.  
Schramm et al. definieren die Eigenschaften eines Systems: „Ein System bezeichnet eine Menge von Elementen (Teile, Komponenten), die sich gegenseitig durch interne Funktionszusammenhänge und physikalische Gesetze beeinflussen (Wechselwirkung), auf die Einflüsse von außen einwirken (Eingänge) und die Wirkungen nach außen abgeben (Ausgänge). Zu den wichtigsten Eigenschaften eines Systems gehören daher seine Veränderlichkeit (Bewegung) und seine Beeinflussbarkeit (Steuerbarkeit) durch eine passende Wahl der Eingänge (Kräfte und eingeprägte Bewegungen). Der Zusammenhang

zwischen externen Einwirkungen auf das System und den daraus resultierenden Änderungen des Systemzustands wird als [...] Systemdynamik bezeichnet.“<sup>14</sup>

- *Systemvarianten*  
Als Systemvarianten werden unterschiedliche Ausprägungen des Systems verstanden, deren funktionale Zusammenhänge sich nicht unterscheiden. Hierbei kann es sich beispielsweise um unterschiedliche Fahrzeugklassen (z.B. Kleinwagen, Kompaktwagen und Mittelklassewagen), unterschiedliche Fahrzeugtypen (z.B. Stufenhecklimousine, Coupé und Kombi) oder unterschiedliche Fahrzeugkonfigurationen (z.B. unbeladenes und beladenes Fahrzeug) handeln. Systemvarianten sind dadurch gekennzeichnet, dass sie in der Simulation durch das gleiche Modell, aber mit unterschiedlichen Modellparametrierungen abgebildet werden.
- *Validierungskonzept*  
Das Validierungskonzept definiert die Art der Validitätsbewertung und das dadurch erreichte Validierungsergebnis, ohne detailliert auf den Prozess einzugehen. In dieser Forschungsarbeit beschreibt das Konzept gemäß Unterkapitel 4.2 die Notwendigkeit einer statistischen Nachweisführung.
- *Validierungsprozess*  
Der Validierungsprozess definiert das Vorgehen und legt fest, wie das Validierungskonzept in der Praxis umgesetzt werden soll. Hierbei handelt es sich um eine Beschreibung der einzelnen Teilprozesse und eine Anleitung, wie diese Teilprozesse durchzuführen sind.
- *Validierungsmethode*  
Die Validierungsmethode fasst übergeordnet das Konzept und den Prozess zusammen. Die Methode begründet die Nachweisführung, die Prozessabfolge und die Auswahl sowie die Funktionsweise der im Prozess zur Anwendung kommenden Techniken. Entsprechend dieser Definition ist Kapitel 4 dieser Arbeit gegliedert.
- *Anwendungsdomäne bzw. Anwendungsbereich*  
Die Anwendungsdomäne bezeichnet den konkreten wissenschaftlichen oder technischen Bereich, in dem die Validierungsmethode zum Einsatz kommt. Die vorliegende Arbeit steht in Bezug zum Anwendungsbereich der Fahrdynamiksimulation und fokussiert insbesondere deren Einsatz im Entwicklungsprozess eines Kraftfahrzeugs.

## 1.3 Forschungsziele

Anknüpfend an die Motivation in Unterkapitel 1.1 ist das Hauptforschungsziel die Entwicklung einer Validierungsmethode, die insbesondere bei Fahrdynamiksimulationen im industriellen Umfeld zu größerer Effizienz und mehr Vertrauen führt, aber auch in anderen, vergleichbaren

---

<sup>14</sup> Schramm, D. et al.: Simulation der Dynamik von Kraftfahrzeugen, 2013, S. 5.

Einsatzgebieten Anwendung finden kann. Effizienz beschreibt in diesem Zusammenhang das Verhältnis von Validierungsnutzen zu -aufwand.

Das Einsatzgebiet dieser Methode ist charakterisiert durch folgende Rahmenbedingungen:

- Die Validierungsmethode wird entwickelt für Anwendungsdomänen mit zyklisch wiederkehrenden Simulationsaufgaben. Prädestiniert hierfür ist die Automobilentwicklung, bei der in den einzelnen Entwicklungsstufen fest definierte Untersuchungen durchzuführen sind, die sich für jeden Fahrzeugtyp und jede Fahrzeugvariante wiederholen. Dies umfasst z.B. die simulationsbasierte Lastdatenbestimmung für die Auslegung der Fahrwerkskomponenten oder die Untersuchung des Fahrverhaltens in standardisierten Fahrmanövern zur Abstimmung des Fahrwerks.
- Die zu untersuchenden Systemvarianten unterscheiden sich nicht in ihrer physikalischen Funktion, sondern lediglich in ihren Eigenschaftsausprägungen. Diese Anforderung ist in der Fahrdynamiksimulation weitestgehend erfüllt, da unterschiedliche Fahrzeuge mit dem gleichen Modell simuliert werden können. Die Repräsentation unterschiedlicher Fahrzeugtypen, -varianten und -konfigurationen erfolgt durch verschiedene Parametrierungen des gleichen Fahrzeugmodells. Auf Submodellebene müssen ggf. Modellanpassungen vorgenommen werden, z.B. wenn sich die Achstypen zwischen den Baureihen unterscheiden oder Fahrwerkskomponenten mit unterschiedlichen physikalischen Wirkungsweisen (z.B. Schraubenfeder und Luftfeder) zum Einsatz kommen.
- Es werden ausschließlich objektive Systemeigenschaften betrachtet.
- Für die Simulationen sind Genauigkeitsanforderungen der Ausgangsgrößen festgelegt.
- Die Systemvarianten werden in der Simulation durch unterschiedliche Parameterdatensätze abgebildet. Die Genauigkeit der Modellparametrierung für unterschiedliche Systemvarianten – auch als relative Datenvalidität bezeichnet – unterliegt keinen großen Schwankungen.
- Innerhalb von Validierungsstudien sind praktische Messungen zur Erhebung von Vergleichsdaten für die Simulation durchführbar.

Unter diesen Voraussetzungen werden folgende Forschungsziele festgelegt:

- Entwicklung eines unter den oben aufgeführten Rahmenbedingungen allgemein anwendbaren Validierungskonzepts, das ...
  - Vertrauen in Simulationsergebnisse erhöht, ...
  - sich durch Objektivität in der Prozessausführung auszeichnet, ...
  - eine Validierung von Simulationen ermöglicht, für die keine spezifischen Vergleichsmessungen vorliegen, ...
  - Praktikabilität unter Berücksichtigung von einschränkenden Anforderungen (z.B. Aufwand) und Rahmenbedingungen (z.B. Messtechnik) gewährleistet, ...
  - eine an spezifizierte Anforderungen ausgerichtete Qualitätsaussage ermöglicht, ...
  - ein aussagekräftiges Validitätsmaß für die Simulation als Ergebnis des Validierungsprozesses aufweist.

- Analyse der praktischen Anwendbarkeit bei der Implementation des allgemeinen Konzepts im Anwendungsbereich der Fahrdynamiksimulation.
- Bewertung anhand der formulierten Forschungsziele und der Methodenanforderungen<sup>15</sup>.

## 1.4 Forschungsmethodik und Struktur der Arbeit

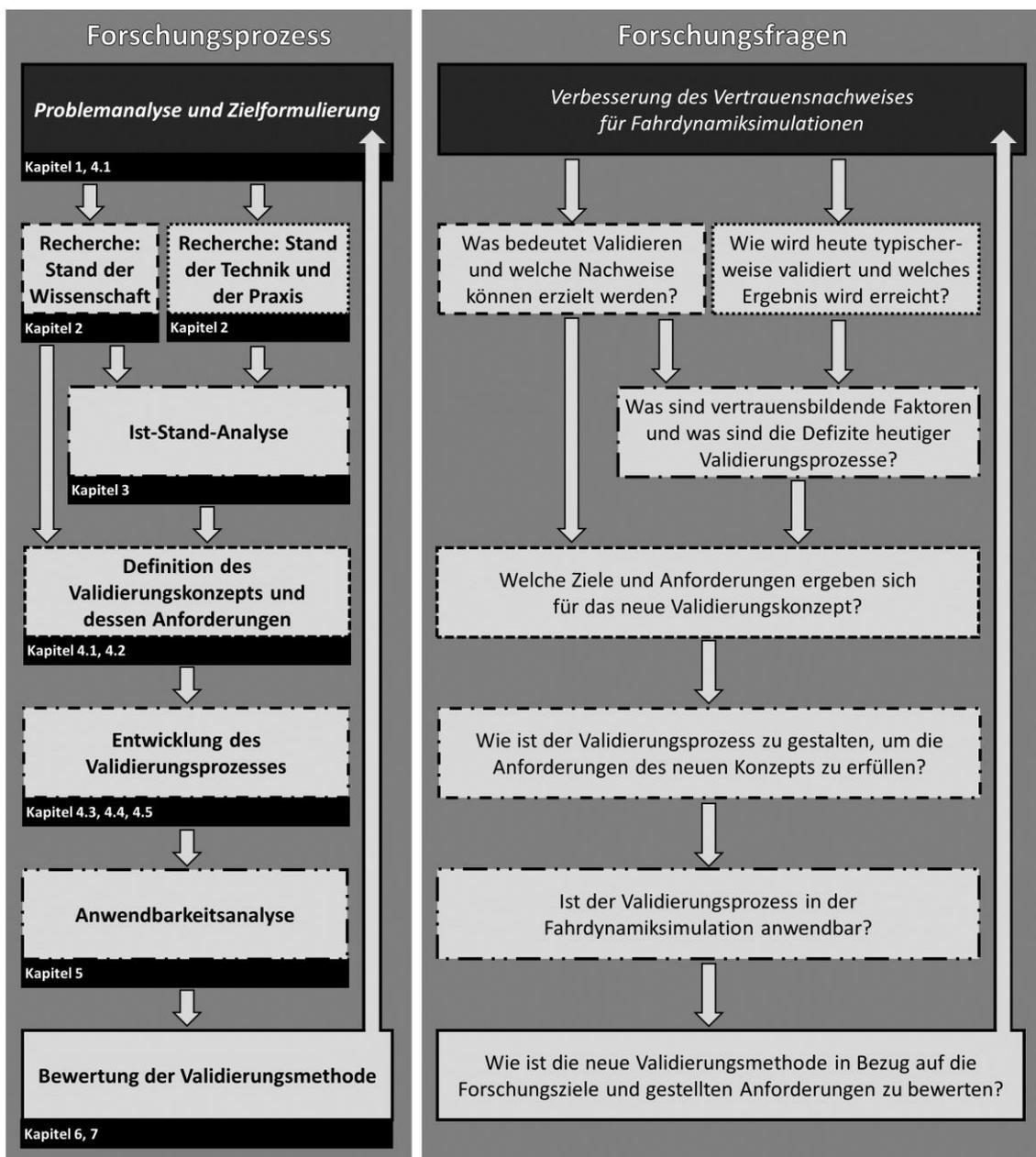


Abbildung 1-1: Forschungsprozess inklusive Kapitelzuweisung (links) und Forschungsfragen (rechts)<sup>16</sup>

<sup>15</sup> Vgl. Unterkapitel 4.1 (Diversität der Anwendungsbereiche und Anforderungen an die Methode).

<sup>16</sup> Vgl. Viehof, M.; Winner, H.: Research Methodology for a New Validation Concept, 2018, S. 2.

Ausgehend vom Ist-Zustand, wie er in Unterkapitel 1.1 beschrieben ist, leitet sich eine konsequente Forschungsmethodik<sup>17</sup> ab, um die Forschungsziele aus Unterkapitel 1.3 zu erreichen. Die Systematik des Forschungsprozesses baut auf der Logik aufeinanderfolgender Forschungsfragen auf und basiert auf dem systemtechnischen Problemlösungszyklus, wie er in VDI 2221<sup>18</sup> beschrieben ist.

Abbildung 1-1 zeigt den Forschungsprozess und die zu jedem Teilprozess gehörende Hauptforschungsfrage. Die Gliederung der vorliegenden Arbeit richtet sich an diesem Forschungsprozess aus. Die Kapitelzuweisung zu den einzelnen Teilprozessen ist ebenfalls Abbildung 1-1 zu entnehmen.

Das Forschungsziel ist die Potenzialsteigerung von Simulationen durch die Entwicklung einer Validierungsmethode, die effektiv Vertrauen in Simulationsergebnisse schaffen kann. Die Grundvoraussetzung zum Erreichen dieses Ziels ist eine *Recherche des aktuellen Stands der Technik und der Praxis* mit dem Schwerpunkt fahrdynamischer Simulationsanwendungen. Hieraus folgen Erkenntnisse über das heutige Validierungsvorgehen, die Art der Qualitätsbeurteilung sowie den Nutzen. Die Unzufriedenheit im Bereich der Validierung und das Misstrauen in Fahrdynamiksimulationen verdeutlichen, dass in diesen Punkten Defizite zu erwarten sind, die mit einer neuen Validierungsmethode adressiert bzw. kompensiert werden müssen.

Um diese Defizite herauszuarbeiten, erfolgt zunächst eine weitere *Recherche zum Stand der Wissenschaft*. Wie in Unterkapitel 2.1 aufgezeigt wird, beschäftigen sich unterschiedliche Wissenschaftsbereiche, so z.B. auch die Philosophie, mit Nachweisverfahren zur Verifizierung und Falsifizierung von Theorien und Modellen. Aus diesem bestehenden Wissen lassen sich Ansätze und vertrauensbildende Faktoren identifizieren, die als Optimierungsmaßnahmen bei der Entwicklung eines neuen Validierungskonzepts zu berücksichtigen sind.

Die *Analyse dieses Ist-Stands*, der einerseits Auskunft darüber gibt, was Validierung theoretisch leisten kann und andererseits, was im Bereich der Validierung von Fahrdynamiksimulationen heute erreicht wird, ermöglicht das Extrahieren der Defizite und die Ableitung vertrauensbildender Maßnahmen.

Diese Erkenntnis wird im Anschluss für die *Konzeptionierung und Anforderungsdefinition* einer verbesserten Validierungsmethode herangezogen.

An dieser Stelle des Forschungsprozesses stellt sich die Frage nach den notwendigen Anpassungen im Validierungsprozess. Die Beantwortung erfordert zunächst eine Analyse, welche Teilprozesse im heute üblichen Validierungsprozess verändert oder ergänzt werden müssen, um die zuvor definierten Anforderungen zu erfüllen. Hier erfolgt die *Entwicklung eines Validierungsprozesses*, der für sich betrachtet unter den in Unterkapitel 1.3 genannten Rahmenbedingungen in unterschiedlichsten Domänen anwendbar ist.

---

<sup>17</sup> Vgl. Viehof, M.; Winner, H.: Research Methodology for a New Validation Concept, 2018.

<sup>18</sup> Vgl. VDI 2221: Methodik zum Entwickeln technischer Produkte, 1993, S. 3 ff.

Die Entwicklung eines allgemeingültigen Validierungskonzepts wird um eine Anwendbarkeitsanalyse ergänzt. Diese Untersuchung dient der Beurteilung der Relevanz des allgemeinen Konzepts. Aus diesem Grund wird in Kapitel 5 eine *Anwendbarkeitsanalyse* in der Zielanwendungsdomäne Fahrdynamiksimulation durchgeführt. In diesem Forschungsprozess steht die Analyse, ob das theoretisch abgeleitete Vorgehen tatsächlich die Anforderungen für den Praxiseinsatz erfüllen kann, im Fokus.

Mit Rückblick auf die Ausgangssituation und die formulierten Anforderungen<sup>19</sup> erfolgt zuletzt auf Basis der Forschungsergebnisse die *Bewertung der neuen Validierungsmethode*.

Bezugnehmend auf den systemtechnischen Problemlösungszyklus, der „einen engen Zusammenhang zwischen Zielsetzung, Planung, Durchführung und Kontrolle [...], verbunden durch Entscheidungen“<sup>20</sup>, darstellt, zeigt Tabelle 1-1 die Zuordnung der in Abbildung 1-1 aufgeführten Forschungsprozesse zu den Vorgehensschritten des Problemlösungszyklus.

Tabelle 1-1: Vergleich des systemtechnischen Problemlösungszyklus mit dem Forschungsprozess

Vorgehensschritt im systemtechnischen Problemlösungszyklus <sup>21</sup>	Forschungsprozess <sup>22</sup>
Problemanalyse	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Recherche: Stand der Technik und der Praxis</li> <li>• Recherche: Stand der Wissenschaft</li> </ul>
Problemformulierung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Problemanalyse und Zielformulierung</li> <li>• Ist-Stand-Analyse</li> </ul>
Systemsynthese	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Definition des neuen Validierungskonzepts und dessen Anforderungen</li> <li>• Entwicklung des Validierungsprozesses</li> </ul>
Systemanalyse	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anwendbarkeitsanalyse</li> </ul>
Beurteilung und Entscheidung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bewertung der Validierungsmethode</li> </ul>

Die ganzheitliche Betrachtung der Validierungsmethode – ausgehend von der Analyse des Ist-Stands über die Entwicklung eines optimierten Konzepts sowie der zugehörigen allgemeingültigen Prozessdefinition bis hin zur Beurteilung der Anwendbarkeit in einer spezifischen Anwendungsdomäne – zur vollumfänglichen Bewertung der erzielten Forschungsergebnisse grenzt die vorliegende Forschungsarbeit von der Vielzahl bisheriger Publikationen ab.<sup>23</sup>

<sup>19</sup> Vgl. Unterkapitel 4.1 (Diversität der Anwendungsbereiche und Anforderungen an die Methode).

<sup>20</sup> VDI 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte, S. 3.

<sup>21</sup> Vgl. VDI 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte, S. 3f.

<sup>22</sup> Vgl. Abbildung 1-1.

<sup>23</sup> Vgl. Abschnitt 2.1.3.1 (Validierungsprozess) / Viehof, M.; Winner, H.: Forschungsstand der Validierung, 2017.

---

## 2 Aktueller Forschungsstand

Die nachfolgenden Unterkapitel fassen den Forschungsstand zu der wissenschaftlichen und der praktischen Sichtweise auf die Validierung, zu den Grundlagen der Fahrdynamiksimulation und zu der heutigen Vorgehensweise bei der experimentellen Erfassung und Beurteilung spezieller Fahrzeugeigenschaften zusammen. Diese Rechercheergebnisse werden in den nachfolgenden Kapiteln für die Entwicklung einer verbesserten Validierungsmethode herangezogen und bei der Auslegung der fahrdynamischen Validierungsstudien berücksichtigt.

### 2.1 Validierung

Dieses Unterkapitel beinhaltet eine Übersicht über die Terminologie und die Einordnung der Validierung in den Qualitätssicherungsprozessen der Modellierung und liefert einen domänenunabhängigen Einblick in das wissenschaftsphilosophische Verständnis von Validierung sowie die drei charakteristischen Merkmale. Diese sind die Validierungsprozesse, die Validierungstechniken und die Verfahren zu Validitätsbeurteilung. Zuletzt erfolgt eine Zusammenfassung heutiger Validierungsstudien in der Fahrdynamik mit Fokussierung der angewandten Prozesse und der erreichten Ziele.

#### 2.1.1 Terminologie der Modellierung und Simulation

Einen Standardsatz von Begriffsdefinitionen zum Thema Modellglaubwürdigkeit<sup>24</sup> hat das SCS Technical Committee im Jahr 1979 veröffentlicht.<sup>25</sup> Diese Definitionen sind bis heute in wissenschaftlichen Veröffentlichungen gebräuchlich.<sup>26</sup> Als Grundlage der Begriffsdefinitionen dient die Dekomposition der Modellentwicklung in ihre drei Kernelemente und die zugehörigen Qualitätssicherungsprozesse. Die in der Dekomposition aufgezeigten Beziehungen und die De-

---

<sup>24</sup> Englische Bezeichnung: model credibility.

<sup>25</sup> Vgl. Schlesinger, S. et al.: Terminology for model credibility, 1979.

<sup>26</sup> Vgl. Viehof, M.; Winner, H.: Forschungsstand der Validierung, 2017, S. 3 ff.

Definitionen finden allgemeine Akzeptanz in der Wissenschaft und werden auch von anderen Wissenschaftlern, wie z.B. Balci<sup>27</sup>, Birta und Özmizrak<sup>28</sup>, Refsgaard und Henriksen<sup>29</sup> sowie Sargent<sup>30</sup>, aufgegriffen. Abbildung 2-1 zeigt eine auf diese Forschungsarbeit adaptierte Darstellung inklusive der qualitätssichernden Prozesse.

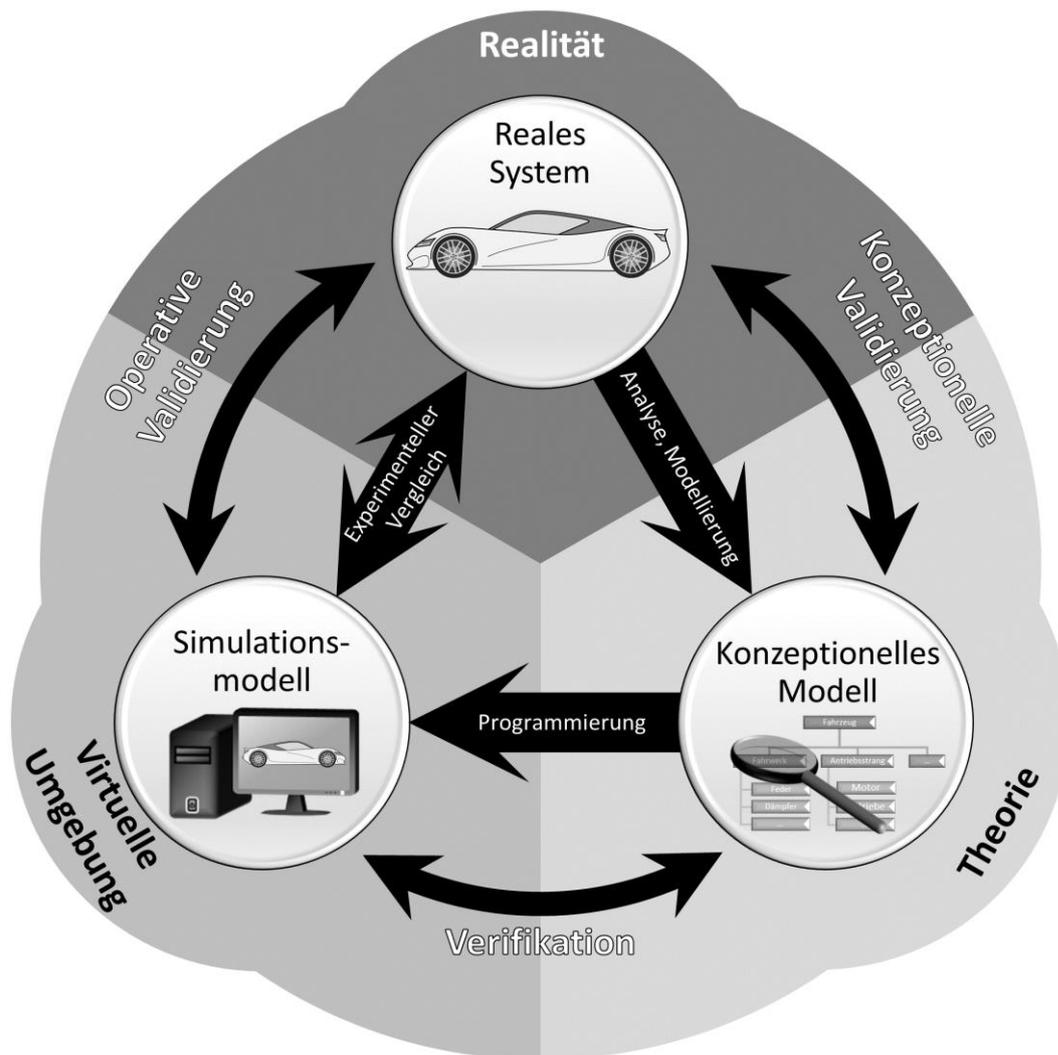


Abbildung 2-1: Dekomposition der Modellentwicklung<sup>31</sup>

<sup>27</sup> Vgl. Balci, O.: Requirements for Model Development Environments, 1986.

<sup>28</sup> Vgl. Birta, L.G.; Özmizrak, F.N.: Knowledge-Based Approach for Validation, 1996.

<sup>29</sup> Vgl. Refsgaard, J.C.; Henriksen, H.J.: Modelling guidelines, 2004.

<sup>30</sup> Vgl. Sargent, R.G.: Verification and validation of simulation models, 2009.

<sup>31</sup> Eigene Darstellung in Anlehnung an: Schlesinger, S. et al.: Terminology for model credibility, 1979, S. 103 / Sargent, R.G.: Verification and validation of simulation models, 2009, S. 164.

Die drei Kernelemente der Modellentwicklung sind das *System*, das *konzeptionelle Modell* und das *Simulationsmodell*.<sup>32</sup>

1. Das Ziel der Modellentwicklung ist die Abbildung des *realen Systems* als ausführbares Modell in der Simulation entsprechend der Definition in Unterkapitel 1.2. Das System ist in der Anwendbarkeitsanalyse dieser Arbeit stets ein Fahrzeug, das einem spezifischen Versuch unterzogen werden soll.
2. Das *konzeptionelle Modell* resultiert aus einer Systemanalyse im Modellierungsprozess. Es handelt sich in der Fahrdynamiksimulation um eine Extraktion überwiegend mathematisch-physikalischer Zusammenhänge. Diese sollen das Modell dazu befähigen, das Fahrzeugverhalten für den gewünschten Anwendungszweck realitätsnah darstellen zu können. Bei der Entwicklung eines Fahrzeugmodells ist es üblich, das Gesamtfahrzeug bis auf Komponentenebene bzw. auf Subsystemebene für die Modellierung zu unterteilen, wie es in Abbildung 2-1 durch die Baumstruktur angedeutet ist. Das Gesamtfahrzeugmodell resultiert dann aus der Komposition aller Subsystemmodelle.
3. Das Simulationsmodell ist das virtuelle Äquivalent zum realen System. Es ist das Ergebnis der Programmierung und kann als zeitlich ausführbares Modell ebenso für Experimente herangezogen werden wie das reale System. So sind – bezogen auf die Untersuchungsaufgabe – das reale Fahrzeug und das Fahrzeugmodell als gleichwertige Systemabbildungen zu betrachten.

Als wichtigste Qualitätssicherungsprozesse sind die Validierung und die Verifikation zu nennen. Der Literatur kann eine Vielzahl von Definitionen entnommen werden, die sich hinsichtlich ihrer Bedeutung nur unwesentlich unterscheiden.<sup>32</sup>

- Die *Verifikation* ist ein Prozess auf Modellebene. Hierbei handelt es sich um eine Überprüfung des Programmierungsprozesses. Die Verifikation beschäftigt sich mit der Frage, ob das Modell formal richtig ist.<sup>33</sup>

---

<sup>32</sup> Vgl. Viehof, M.; Winner, H.: Forschungsstand der Validierung, 2017, S. 5 ff.

<sup>33</sup> Vgl. u.a. Viehof, M.; Winner, H.: Forschungsstand der Validierung, 2017, S. 6 / Schlesinger, S. et al.: Terminology for model credibility, 1979, S. 104 / Kutluay, E.; Winner, H.: A Review on Validation, 2014, S. 187 / Sargent, R.G.: Verification and validation of simulation models, 2009, S. 164 / Babuska, I.; Oden, T.: V&V in Computational Engineering and Science, 2003, S. 3, 6 / Banks, J.: Principles of Simulation, 1998, S. 22 / Oberkampf, W.L.; Barone, M.F.: Validation metrics, 2006, S. 7 / Refsgaard, J.C.; Henriksen, H.J.: Modelling guidelines - terminology and guiding principles, 2004, S. 75 / Carson, J.S.: Model Verification and Validation, 2002, S. 52 / VDI 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme, 2004, S. 117.

- Die *Validierung* findet immer an der Schnittstelle von Modell und realem System statt.<sup>34</sup> Per Definition dient die Validierung der Untersuchung, ob das Modell für seinen Anwendungszweck geeignet ist – also, ob das richtige Modell verwendet wird.<sup>35</sup> Diese Formulierung verdeutlicht bereits, dass die Validitätsbeurteilung einer Anforderungsdefinition bedarf, sofern sie objektiven Kriterien unterliegen soll.

Die konzeptionelle Validierung wird von Schlesinger et al. auch als Modellqualifikation<sup>36</sup> bezeichnet und findet im Rahmen eines Modellierungsprozesses auf theoretischer und wissensbasierter Grundlage statt.

Die operative Validierung dient der Qualitätsbewertung des ausführbaren Simulationsmodells und hat in der Fahrdynamikforschung höchste Praxisrelevanz, weil sie unmittelbar das Verhalten des virtuellen Fahrzeugs mit dem des realen Fahrzeugs vergleicht. Für ihre Durchführung ist es nicht notwendig, das konzeptionelle Modell, das hinter dem Simulationsmodell steckt und sehr komplex sein kann, zu kennen. Da die operative Validierung auf einem experimentellen Vergleich von Simulations- und Messdaten basiert, ist sie auf jede Art von Simulationsmodell und -software bzw. -werkzeug gleichermaßen anwendbar.

Nach Abgleich der Forschungsziele<sup>37</sup> mit der beschriebenen Dekomposition kann diese Arbeit eindeutig in den Modellentwicklungsprozess eingeordnet werden. Der Fokus liegt auf der Entwicklung einer Methode zur operativen Validierung.

Es gilt zu berücksichtigen, dass in der Simulation zwei Fehlerquellen zu unterscheiden sind. Sowohl die Verwendung eines für den Anwendungszweck nicht geeigneten Modells als auch eine fehlerhafte Parametrierung können zu falschen Simulationsergebnissen führen. Man unterscheidet deshalb in diesem Zusammenhang die *Modellvalidität* und die *Datenvalidität*. Weiterhin ist zu beachten, dass sich die Auswirkungen von Daten- und Modellinvalidität superponieren, wie Abbildung 2-2 verdeutlicht. Diese Eigenschaft wird beim bereits erwähnten Parametertuning häufig genutzt, bei dem durch iterative Parameterwertanpassungen versucht wird, auftretende Abweichungen zwischen Messung und Simulation, die häufig auf Modellinvalidität

<sup>34</sup> Vgl. Abbildung 2-1.

<sup>35</sup> Vgl. u.a. Viehof, M.; Winner, H.: Forschungsstand der Validierung, 2017, S. 7 / Schlesinger, S. et al.: Terminology for model credibility, 1979, S. 104 / Kutluay, E.; Winner, H.: A Review on Validation, 2014, S. 187 / Klemmer, J. et al.: Validation Process for Vehicle Simulation Models, 2011, S. 744 f / Rabe, M. et al.: Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik, 2008, S. 15 / Oberkampf, W.L.; Barone, M.F.: Validation metrics, 2006, S. 7 / Refsgaard, J.C.; Henriksen, H.J.: Modelling guidelines, 2004, S. 75 / Babuska, I.; Oden, T.: V&V in Computational Engineering and Science, 2003, S. 3 / Carson, J.S.: Model Verification and Validation, 2002, S. 52 / Law, A.M.; McComas, M.G.: Valid and Credible Simulation Models, 2001, S. 26 / Banks, J.: Principles of Simulation, 1998, S. 22 / Miser, H.J.: Validation in operational research, 1993, S. 212 / Balci, O.: Requirements for Model Development Environments, 1986, S. 57 / VDI 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme, 2004, S. 117 / VDI 3633: Simulation von Produktionssystemen, 2013, S. 20 f.

<sup>36</sup> Vgl. Schlesinger, S. et al.: Terminology for model credibility, 1979, S. 103.

<sup>37</sup> Vgl. Unterkapitel 1.3 (Forschungsziele).

zurückzuführen sind, zu kompensieren. Auf diese Weise lässt sich für eine singuläre Anwendung *Simulationsvalidität* trotz Daten- und Modellinvalidität herstellen.<sup>38a</sup>

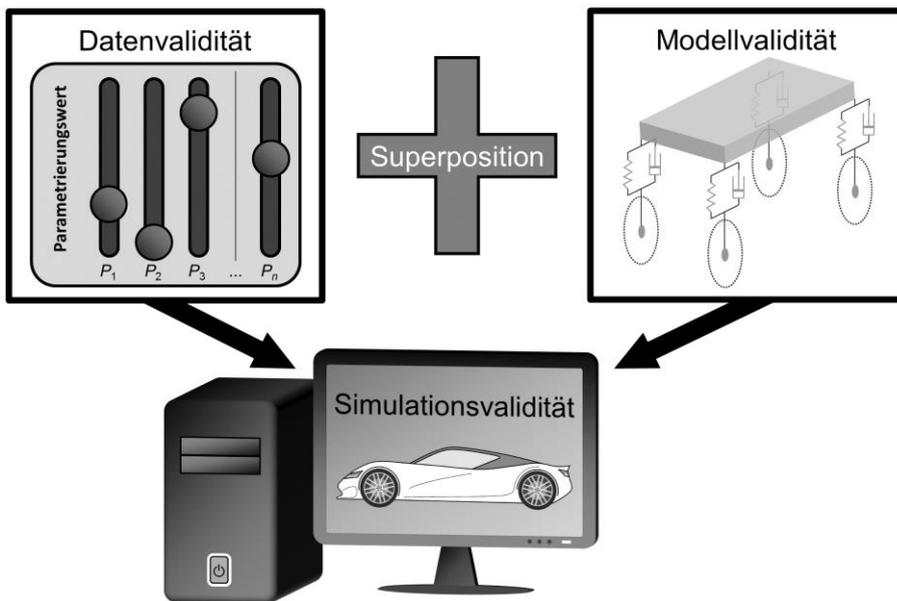


Abbildung 2-2: Unterschiedliche Arten von Validität

Für eine systematische und objektive Validierung ist es erforderlich, die drei Arten von Validität, wie sie in Abbildung 2-2 aufgeführt sind, begrifflich voneinander zu trennen. Wird Validität ausschließlich anhand der Übereinstimmungsgenauigkeit von Simulations- und Messergebnissen bewertet, sollte gemäß Abbildung 2-2 von Simulationsvalidität die Rede sein.

An dieser Stelle sei erwähnt, dass die Daten- und die Modellvalidität nicht die einzigen Einflussfaktoren auf die Simulationsvalidität sind. So beeinflussen beispielsweise auch die numerischen Berechnungsverfahren innerhalb der Simulationssoftware, z.B. durch die Art des Solvers oder durch die Berechnungsschrittweite, die Güte der Simulationsergebnisse. Jedoch ist in Fahrdynamiksimulationen mit kommerzieller Software davon auszugehen, dass die Daten- und die Modellvalidität die stärksten Einflussfaktoren für die Simulationsvalidität sind.<sup>38b</sup>

Die Fragen, wann Validität vorliegt und wie mit dem Begriff *Validität* umzugehen ist, werden im folgenden Abschnitt 2.1.2 thematisiert.

## 2.1.2 Wissenschaftsphilosophische Betrachtung

Bezüglich der Validierung zeigen sich in der Literatur und in der Praxis zwei unterschiedliche Betrachtungsweisen. Während in der Wissenschaftsphilosophie die Methodik der Nachweisführung höchste Priorität hat, werden in der Simulationspraxis sehr pragmatische Ansätze gewählt, was sich auch darin äußert, dass üblicherweise eine binäre Beurteilung vorgenommen

<sup>38</sup> Vgl. Viehof, M.; Winner, H.: Forschungsstand der Validierung, 2017, (a) S. 50 ff | (b) S. 12 ff.

wird. Sofern die Simulation im Validierungsprozess zufriedenstellend abgeschnitten hat, wird sie als *valide* akzeptiert und andernfalls als *invalide* oder *nicht valide* bezeichnet.<sup>39a</sup>

Klein und Herskovitz weisen 2005 auf die Diskrepanz zwischen der technologischen sowie wissenschaftlichen Erfahrungheit, die zum schnellen Fortschreiten der Computersimulationen führt, und dem auf einem unterentwickelten Stand verharrenden Theorieverständnis, das die Simulationen untermauert, hin.<sup>40</sup> Kleindorfer et al. zeigen eine Übersicht von zehn philosophischen Positionen, denen unterschiedliche Nachweismethoden und Validierungsansätze zugrunde liegen. Darunter ist auch der Falsifikationismus zu finden, der auf Theorien anzuwenden ist, die für Prädiktionen und Tests herangezogen werden.<sup>41a</sup> Hierin besteht eine Analogie zur Simulation technischer Systeme.

Die Wissenschaftsphilosophie liefert eine wichtige Grundlage für die Validierung, die auf den Erkenntnissen von Karl Poppers Theorie des Falsifikationismus<sup>42</sup> basiert und besagt, dass Simulationen bzw. Modelle wie wissenschaftliche Theorien zu behandeln sind.<sup>41b</sup>

*„Die wichtigste Grundlage des Falsifikationismus ist, dass Theorien falsifizierbar sein müssen und solange falsifizierbar sind, bis sie durch einen Beweis falsifiziert wurden. Das heißt, dass das Auftreten eines einzigen Gegenbeweises jederzeit zur Falsifikation der Theorie führt – unabhängig davon, wie viele Ereignisse die Theorie vorher bekräftigt haben.“<sup>43</sup>*

Als Beispiel wird in der Literatur die Theorie, dass alle Schwäne weiß sind, aufgeführt.<sup>44</sup> Die Validierung dieser Theorie erfolgt durch die gezielte Beobachtung von Schwänen. Jedoch kann die Theorie nicht verifiziert werden, da es nicht möglich ist, alle existierenden Schwäne zu erfassen. Die zunehmende Anzahl beobachteter weißer Schwäne stärkt das Vertrauen in die Theorie, sodass sie sich zunehmend bewährt. Diese Art der Nachweisführung wird als Induktion bezeichnet und ist auch für die heutige Validierung von Fahrdynamiksimulationen relevant. Induktion beschreibt die Methode, aus empirischen Beobachtungen auf eine Allgemeingültigkeit einer Theorie bzw. einer Modellbeschreibung zu schließen. Jedoch führt bereits das Auftreten eines einzigen Gegenbeweises – hier also eines einzigen nicht weißen Schwans – zu sofortiger Falsifikation der gesamten Theorie.<sup>39b</sup>

Es werden universelle und existenzielle Hypothesen unterschieden. Universelle Hypothesen (z.B.: Alle Schwäne sind weiß.) können sich gemäß der vorherigen Ausführungen bewähren.

<sup>39</sup> Vgl. Viehof, M.; Winner, H.: Forschungsstand der Validierung, 2017, (a) S. 2 | (b) S. 2 f.

<sup>40</sup> Vgl. Klein, E.E.; Herskovitz, P.J.: Philosophical foundations of validation, 2005, S. 303.

<sup>41</sup> Vgl. Kleindorfer, G.B. et al.: Validation: Positions in the Philosophy of Science, 1998, (a) S. 1090 | (b) S. 1087.

<sup>42</sup> Vgl. Popper, K.: The Logic of Scientific Discovery, 2005.

<sup>43</sup> Viehof, M.; Winner, H.: Forschungsstand der Validierung, 2017, S. 2.

<sup>44</sup> Vgl. Popper, K.: The Logic of Scientific Discovery, 2005, S. 4, 82 f, 376 ff, 442 ff / Klein, E.E.; Herskovitz, P.J.: Philosophical foundations of validation, 2005, S. 307.

Zudem können sie durch einen einzigen Nachweis falsifiziert werden. Bei existenziellen Hypothesen (z.B.: Es gibt schwarze Schwäne.) verhält es sich genau umgekehrt. Sie können durch einen einzigen Beweis verifiziert, aber niemals falsifiziert werden.<sup>45</sup>

Der Validierungsprozess hat die Aufgabe, die universelle Hypothese, dass die Simulation für den definierten Anwendungsfall die geforderte Genauigkeit aufweist, zu bekräftigen, indem empirisch nach Falsifikationen gesucht wird.<sup>46</sup> Die beschriebenen Grundlagen führen zu der Erkenntnis, dass Validität niemals verifiziert werden kann und somit streng genommen nie von einer validen Simulation gesprochen werden darf. Die wissenschaftlich richtige Formulierung hingegen lautet, dass der Simulation keine Invalidität nachgewiesen werden konnte oder dass auf Basis der bisherigen Beobachtungen die Simulation nicht invalide ist. Invalidität kann durch eine einzige Falsifikation verifiziert werden. Wie die Recherche zeigt, ist es in der Praxis akzeptiert und gebräuchlich, von einem validen Modell oder einer validen Simulation zu sprechen, solange keine Falsifikation stattgefunden hat.<sup>47</sup>

Dieses Grundlagenwissen führt in der Fahrdynamik, in der Prädiktionen mittels Simulation durchgeführt werden sollen, zu einer im Vergleich zu heute gänzlich veränderten Betrachtungsweise der Validierung. Diese muss durch das neue Validierungskonzept, das in Kapitel 4 entwickelt wird, vertreten werden. Da es in dieser Anwendungsdomäne nicht möglich ist, die Simulation für alle möglichen Fälle mit der Realität, d.h. mit messdatenbasierten Größen, zu vergleichen, kann der Validierungsprozess zwar durch Falsifikation einen verifizierten Nachweis dessen erbringen, welche Kombination aus Systemvariante und Testanwendung nicht mit der gewünschten Genauigkeit simuliert werden kann. Für alle anderen möglichen Kombinationen aus Fahrzeug und Versuch kann der Validierungsprozess jedoch lediglich über die Art und die Anzahl stichprobenartiger Beobachtungen ein Vertrauensmaß liefern. Eine verifizierte Aussage und damit absolute Sicherheit, dass die Simulation in jedem Fall die Genauigkeitsanforderungen erfüllt, kann aus den genannten Gründen nicht erzielt werden.

Eine weitere wichtige Erkenntnis aus der Wissenschaftsphilosophie für die Validierung in der Praxis betrifft daher die Art der Nachweisführung. Gefordert ist eine Versuchs- bzw. Stichprobenauswahl, die die Wahrscheinlichkeit von Falsifikationen maximiert. Auf diese Weise erzielt das auf empirischen Beobachtungen basierende Validierungsergebnis höhere Relevanz – wenn keine Falsifikationen auftreten – und der Validierungsprozess die höchste Effizienz, da der Versuchsaufwand minimiert wird. Hieraus leitet sich unmittelbar die Frage ab, wie in einem neuen Validierungskonzept die Auslegung der Validierungsstudie erfolgen muss, um diese Anforderung zu erfüllen. Eine Antwort liefert die Auslegung der Validierungsstudie, die in Abschnitt 4.4.2 beschrieben wird.

---

<sup>45</sup> Vgl. Online Lexikon für Psychologie und Pädagogik: Hypothese, 2018 / Popper, K.: Logik der Forschung, 1994, S. 39 ff.

<sup>46</sup> Vgl. Viehof, M.; Winner, H.: Forschungsstand der Validierung, 2017, S. 3.

<sup>47</sup> Vgl. Viehof, M.; Winner, H.: Forschungsstand der Validierung, 2017, S. 4 / Klein, E.E.; Herskovitz, P.J.: Philosophical foundations of validation, 2005, S. 309.

### 2.1.3 Charakteristische Merkmale der Validierung

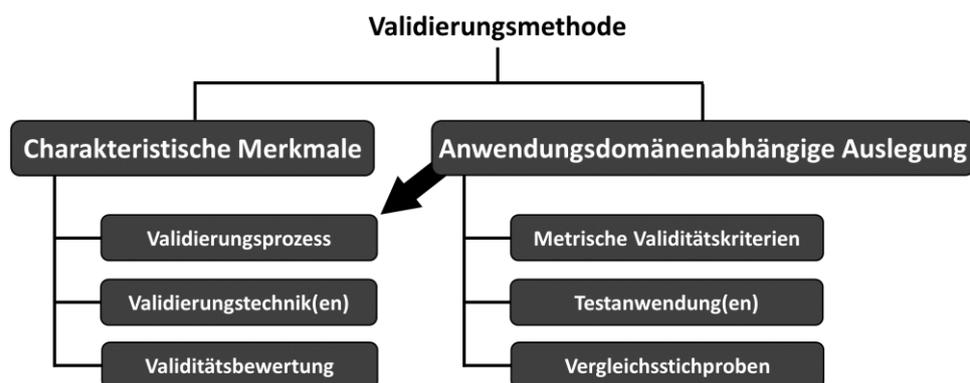


Abbildung 2-3: Merkmale der Validierung

Die Analyse des Stands der Technik führt zu der Erkenntnis, dass eine Validierungsmethode entsprechend Abbildung 2-3 allgemeine charakteristische Merkmale sowie von der Anwendungsdomäne abhängige Auslegungsmerkmale aufweist.<sup>48</sup>

Zu den charakteristischen Merkmalen gehören der Validierungsprozess, die darin zur Anwendung kommenden Techniken und das Verfahren der Validitätsbewertung.<sup>49a</sup> Der Validierungsprozess legt das Vorgehen innerhalb der Validierungsstudie fest. Validierungstechniken werden zum methodischen Treffen von Entscheidungen und für anwenderneutrale Prozessgestaltungen eingesetzt. Die Validitätsbewertung betrifft die Aussage, die eine Validierungsstudie als Ergebnis liefert. Diesen drei Merkmalen gemein ist, dass sie in jeder Validierungsstudie essentiell sind. Aus diesem Grund liefert die Literatur eine Vielzahl von Ausführungen und Definitionen, die im aktuellen Forschungsstand, wie in den nachfolgenden Unterkapiteln beschrieben ist, sehr verschieden ausfallen.

Als Input für den Validierungsprozess fließen in der Anwendung die domänenabhängigen metrischen Validitätskriterien, die Testanwendungen und die Vergleichsstichproben ein.<sup>49b</sup> Metrische Validitätskriterien sind die objektiven Bewertungsgrößen anhand derer der Vergleich von Realversuch und Simulation durchgeführt wird. Die Vergleichsstichprobe beschreibt eine bestimmte Konfiguration als Kombination aus Systemvariante und Testanwendung, die in der Validierung untersucht wird. Wie diese Auslegungskriterien üblicherweise in der Fahrdynamiksimulation definiert sind, wird in Abschnitt 2.1.4 näher beschrieben.

Der Publikation von Viehof und Winner kann eine ausführliche Übersicht des Stands der Technik für die charakteristischen Merkmale entnommen werden.<sup>50</sup> In den nachfolgenden Unterkapiteln wird ein Überblick über die Rechercheergebnisse gegeben.

<sup>48</sup> Vgl. Viehof, M.; Winner, H.: Forschungsstand der Validierung, 2017, S. 65 ff / Viehof, M. et al.: Objektivierungspotenzial der operativen Validierung, 2016, S. 419 ff.

<sup>49</sup> Vgl. Abbildung 2-3 (a) links | (b) rechts.

<sup>50</sup> Viehof, M.; Winner, H.: Forschungsstand der Validierung, 2017, S. 1 ff.

### 2.1.3.1 Validierungsprozess

Bisherige Forschungsarbeiten zum Thema Validierungsprozesse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

*„[Publizierte] Prozessdefinitionen und Vorgehensweisen zeigen, wie vielfältig und wie unterschiedlich die Sichtweisen und vorgeschlagenen Prozesse für die Modellentwicklung und insbesondere für die Modellvalidierung sind. Die Forscher auf diesem Gebiet legen unterschiedliche Schwerpunkte. Diese sind die Komplexität und Praktikabilität des Prozesses, die Prozessstruktur und der Erkenntnisgewinn, der Vertrauens- und Qualitätsnachweis, die Modellanwendungen und die Modelloptimierung. Dennoch besteht ein gemeinsames Verständnis, dass nur ein systematisches Vorgehen, welches das Modell hinsichtlich unterschiedlicher Eigenschaften kritisch hinterfragt, zu einem Nachweis von Glaubwürdigkeit und damit zu einem gesteigerten Vertrauen in die Simulationsergebnisse führt. Die zeitliche Entwicklung [...] [zeigt], dass die frühen Veröffentlichungen zunächst die Validierung des Modells in den Prozessbeschreibungen und Prozessanforderungen adressierten. In den 90er Jahren wuchs dann die Bedeutung der Modellvalidität, sodass auch der Nutzen valider Modelle in den Prozessentwicklungen berücksichtigt wurde, was sich in den Ausführungen zur praktischen Prozessgestaltung widerspiegelt. In den jüngsten Veröffentlichungen stehen zunehmend die Systematisierung und Objektivierbarkeit von Entscheidungen im Vordergrund.“<sup>51</sup>*

Die meisten Forschungsarbeiten, die sich mit dem Validierungsprozess auseinandersetzen, verlassen die Ebene der theoretischen Betrachtung nicht und beleuchten damit auch nicht Aspekte der Anwendbarkeit, des praktischen Nutzens und Herausforderungen bzw. Probleme, die sich durch Implementation auf eine spezifische Domäne ergeben.<sup>52</sup> Sargent und fünf weitere Simulationsexperten beschäftigen sich mit der Diversität der Validierungsprozesse. Sie vertreten die Meinung, dass das Anwendungsgebiet auf den Validierungs-, den Verifikations- und den Akkreditierungsprozess einen starken Einfluss hat.<sup>53</sup>

Bis heute hat sich in der Praxis der Fahrdynamikforschung noch kein zufriedenstellendes Validierungskonzept durchgesetzt.<sup>54</sup> Eine Analyse der letztjährigen Forschungspublikationen und veröffentlichter sowie praktisch durchgeführter Validierungsstudien führt aber zu der Erkenntnis, dass sich das heutige Vorgehen in dieser Anwendungsdomäne einer typischen Prozessstruktur gemäß Unterkapitel 3.1 zuordnen lässt.<sup>55</sup>

Dass die operative Validierung per Definition mit dem experimentellen Vergleich von Simulations- und Realversuchsergebnissen verbunden ist,<sup>56</sup> liegt zum einen daran, dass Messdaten die repräsentativsten Daten für das reale Systemverhalten sind, die der Simulation als Referenz

---

<sup>51</sup> Viehof, M.; Winner, H.: Forschungsstand der Validierung, 2017, S. 24 f.

<sup>52</sup> Vgl. Viehof, M.; Winner, H.: Forschungsstand der Validierung, 2017, S. 12 ff.

<sup>53</sup> Vgl. Sargent, R.G. et al.: Strategic Directions in Validation, 2000, S. 909.

<sup>54</sup> Vgl. Klemmer, J. et al.: Validation Process for Vehicle Simulation Models, 2011, S. 743 / Kutluay, E.: Validation Methodology for Lateral Dynamics, 2012, S. 27 / Viehof, M.; Winner, H.: Forschungsstand der Validierung, 2017, S. 25, 50 ff.

<sup>55</sup> Vgl. Viehof, M. et al.: Objektivierungspotenzial der operativen Validierung, 2016, S. 419 ff.

<sup>56</sup> Vgl. Abschnitt 2.1.1 (Terminologie der Modellierung und Simulation).

zugrunde gelegt werden können. Zum anderen weisen sie für den Menschen die größte Glaubwürdigkeit auf, wengleich auch die Aspekte Messunsicherheiten, Messfehler und Interpretationsfehler stärker als bisher in der Validierung berücksichtigt werden müssen.<sup>57</sup> Sowohl die Praxis als auch die Literatur zeigen, dass ein Vergleich mit Messdaten die höchste Effektivität für einen Vertrauensnachweis von Simulationsergebnissen erbringt.<sup>58a</sup>

Oberkampf und Trucano schreiben hierzu:

*„The fundamental strategy of validation involves identification and quantification of the error and uncertainty in the conceptual and computational models, quantification of the numerical error in the computational solution, estimation of the experimental uncertainty, and finally, comparison between the computational results and the experimental data. That is, accuracy is measured in relation to experimental data, our best measure of reality. This strategy does not assume that the experimental measurements are more accurate than the computational results. The strategy only asserts that experimental measurements are the most faithful reflections of reality for the purposes of validation.“*<sup>59, 60</sup>

Diese Ausführung begründet, warum in den meisten Validierungsprozessen und -studien Realversuche als wichtigster Bestandteil vorgesehen sind.

### 2.1.3.2 Validierungstechniken

Validierungstechniken beschreiben Verfahren, die im Vergleich von Simulations- und Referenzdaten Anwendung finden, um eine Information über die Qualität der Simulation zu erhalten. Viehof und Winner geben in ihrer Publikation eine Übersicht über die Techniken für den Zweck der operativen Validierung.<sup>58b</sup>

Äußerst umfassende sowie detaillierte Beschreibungen von Verifikations- und Validierungstechniken – auch als V&V-Techniken bezeichnet – bieten die Veröffentlichungen von Balci.<sup>61</sup>

<sup>57</sup> Vgl. Abschnitt 2.1.4 (Überblick bestehender Fahrdynamik-Validierungsstudien) und Kapitel 4 (Neue Validierungsmethode).

<sup>58</sup> Vgl. Viehof, M.; Winner, H.: Forschungsstand der Validierung, 2017, (a) S. 3 | (b) S. 26 ff.

<sup>59</sup> Oberkampf, W.L.; Trucano, T.G.: Validation in computational fluid dynamics, 2002, S. 218.

<sup>60</sup> Übersetzung d. Verf.: Die grundlegende Strategie der Validierung beinhaltet die Identifikation und Quantifizierung des Fehlers und der Unsicherheit des konzeptionellen Modells und des Simulationsmodells, die Quantifizierung von numerischen Fehlern des Berechnungsverfahrens, die Abschätzung experimenteller Unsicherheiten und zuletzt den Vergleich zwischen Ergebnissen der Simulation und des Realversuchs. Das heißt, dass die Genauigkeit [der Simulation] bezogen auf die Messdaten bewertet wird, die unser bestes Maß für die Realität darstellen. Diese Strategie unterstellt der Messung keine höhere Genauigkeit als den Simulationsergebnissen. Der Strategie liegt lediglich zugrunde, dass für den Zweck der Validierung Messungen die vertrauenswürdigsten Abbilder der Realität sind.

<sup>61</sup> Vgl. Balci, O.: Verification, Validation and Accreditation of Simulation Models, 1997, S. 138 ff / Balci, O.: Verification, Validation and Accreditation, 1998, S. 45 ff / Balci, O.: Verification, Validation and Testing, 1998, 335 ff / Balci, O.: Principles and Techniques of Simulation Validation, 1995, S. 151 ff / Balci, O.: Guidelines for Simulation Studies, 1990, S. 30 f / Balci, O.: Verification, Validation, and Certification, 2003, S. 155 f.

Unterteilt werden die mehr als hundert V&V-Techniken in grundsätzlich anwendbare Techniken und zusätzliche Techniken für objektorientierte Simulationen.<sup>62a</sup> Dabei ist zu beachten, dass hier keine strikte Trennung von Validierungs- und Verifikationstechniken vorgenommen wird.

Die Validierungstechniken für konventionelle Modelle werden nach Balci in vier Klassen unterteilt.<sup>62b</sup>

1. *Informelle V&V-Techniken* „basieren auf Argumentationen und subjektiven Entscheidungen ohne jegliche mathematische Formalisierung. Sie sind die derzeit am häufigsten angewendeten Verfahren. Dies ist nicht darin begründet, dass sie besonders glaubwürdig sind, sondern darin, dass sie schnell, mit wenig Aufwand und kostengünstig umzusetzen sind. Mathematische Entscheidungsgrundlagen gibt es nicht. Die Definition gibt das grundlegende Vorgehen vor, aber keine objektiven Validitäts- und Bewertungskriterien.“<sup>63</sup>

Beispiele: Augenscheinvalidierung, Turing-Test.

2. *Statische V&V-Techniken* „erfordern keine Ausführung des Modells. Damit steht bei diesen Verfahren die Verifikation im Vordergrund. Der Simulationscompiler selbst ist z.B. ein statisches V&V-Tool.“<sup>63</sup>

Beispiele: Semantikanalyse, strukturelle Analyse, Syntaxanalyse.

3. *Dynamische V&V-Techniken* „erfordern die Modellausführung und bewerten das Modell anhand dessen Verhaltens während der Ausführung. Diese formalen Techniken eignen sich besonders für die [...] [operative] Modellvalidierung.“<sup>63</sup>

Beispiele: Akzeptanztest, graphischer Vergleich, prädiktive Validierung, Sensitivitätsanalyse, Test spezieller Eingänge, statistische Techniken.

4. *Formale V&V-Techniken* „umfassen wiederum Verifikationstechniken, die die mathematische Prüfung des Modells durchführen.“<sup>63</sup>

Beispiele: Logische Deduktion, Genauigkeitsprüfung.

In einer Veröffentlichung von Whitner und Balci werden die Klassen nach den acht Kriterien (1) Kategoriedefinition, (2) Formalisierungslevel, (3) Komplexität, (4) Inanspruchnahme menschlicher Ressourcen, (5) Kosten für IT-Ressourcen, (6) Effektivität, (7) Erfordernis von Messtechnik sowie (8) Bedeutung für die Modellverifikation und -validierung charakterisiert. Diese Übersicht belegt, dass die dynamischen Techniken sowohl eine hohe Formalität als auch eine hohe Effektivität erzielen können.<sup>64</sup>

Die vorgestellte Taxonomie ist nicht die einzige Möglichkeit, Validierungstechniken zu gruppieren. Davis definiert die drei Klassen (1) empirische Bewertung, (2) theoretische Bewertung

---

<sup>62</sup> Vgl. Balci, O.: Verification, Validation and Accreditation of Simulation Models, 1997, (a) S. 139 f | (b) S. 138.

<sup>63</sup> Viehof, M.; Winner, H.: Forschungsstand der Validierung, 2017, S. 27.

<sup>64</sup> Vgl. Whitner, R.B.; Balci, O.: Guidelines for Verification Techniques, 1989, S. 560.

und (3) Bewertung durch andere Vergleiche.<sup>65</sup> Eine weitere Möglichkeit, die Techniken zu klassifizieren, ist die Einordnung in (1) subjektive und (2) objektive bzw. objektivierbare Validierungstechniken. Die Zuordnung erfolgt hierbei nach dem Bewertungsmaßstab, der für die Validitätsbewertung herangezogen wird.<sup>66a</sup>

Es gilt zu berücksichtigen, dass die verschiedenen Validierungstechniken nicht grundsätzlich untereinander austauschbar sind. Dies bedeutet, dass für verschiedene Techniken unterschiedliche Eingangs- und Ausgangsinformationen vorliegen. Dies ermöglicht jedoch auch, bestimmte Techniken miteinander zu verknüpfen. So ist es beispielsweise möglich, eine Sensitivitätsanalyse auf den Test spezieller Eingänge anzuwenden, sodass in der Analyse ausgewertet wird, auf welches Anregungssignal das System wie sensitiv reagiert.<sup>66b</sup>

Der Stand der Wissenschaft liefert eine Auswahl potenziell sinnvoller Validierungstechniken, die für die Objektivierung herangezogen werden können. In Unterkapitel 4.4 wird die Objektivierung des neuen Validierungsprozesses durch Einsatz ausgewählter Techniken dieser Kategorie beschrieben.

### 2.1.3.3 Validitätsbewertung

Gemäß Abbildung 3-2 und den Ausführungen in Abschnitt 2.1.3.1 wird jeder Validierungsprozess mit einer Qualitätsbewertung abgeschlossen, die meist in binärer Form – *valide* oder *nicht valide* – erfolgt.

Es gibt jedoch auch Ansätze in der Wissenschaft und Praxis, die Simulationsqualität in Form eines Validitätsmaßes zu bewerten.<sup>66c</sup>

- Gass und Joel haben ein Label<sup>67</sup> entwickelt, das die sieben Vertrauenskriterien (1) Definition, (2) Struktur, (3) Daten, (4) Verifikation, (5) Validierung, (6) Verwendbarkeit und (7) Herkunft bezogen auf ein Simulationsmodell jeweils auf einer Skala von eins bis fünf bewertet. Dieses Label zeigt auf, mit welcher Vertrauensstufe im Modellentwicklungsprozess das jeweilige Kriterium erfüllt wurde. Hierdurch soll eine Vergleichbarkeit von Modellen geschaffen werden, die eine begründete Auswahl für variierende Anwendungszwecke ermöglicht.<sup>68</sup>
- Logan und Nitta beschreiben eine Verifikations- und eine Validitätsskala. Die Validitätsskala<sup>69</sup> kann einen Wert zwischen null und zehn annehmen. Ein Wert von null bedeutet, dass keine Validierung durchgeführt wurde. Der Wert zehn wird erreicht, wenn die Simulation alle Qualitätsprüfungen bestanden hat. Die Skala ist auf einen fest definierten

<sup>65</sup> Vgl. Davis, P.K.: *Methods of Verification, Validation, and Accreditation*, 1992, S. 15 ff.

<sup>66</sup> Vgl. Viehof, M.; Winner, H.: *Forschungsstand der Validierung*, 2017, (a) S. 26 ff | (b) S. 28 | (c) S. 47 f.

<sup>67</sup> Entsprechende Abbildung siehe Gass, S.I.; Joel, L.S.: *Concepts of model confidence*, 1981, S. 345.

<sup>68</sup> Vgl. Gass, S.I.; Joel, L.S.: *Concepts of model confidence*, 1981, S. 343 ff.

<sup>69</sup> Entsprechende Abbildung siehe Logan, R.W.; Nitta, C.K.: *Verification & Validation*, 2002, S. 20.

Qualitätssicherungsprozess innerhalb des Modellentwicklungszyklus ausgelegt, der bestimmte Meilensteine, wie z.B. Lauffähigkeit der Simulation, Kalibrierung, qualitativ korrekte Sensitivitäten und vernachlässigbare Unsicherheiten, in einer definierten Reihenfolge vorsieht. Die Validitätsskala ist nicht absolut objektiv bzw. formal.<sup>70</sup>

- Klemmer et al. führen eine Metrik zur Berechnung eines Qualitätsmaßes ein. Dieses umfasst zwei Kennwerte, die Signalkorrelation<sup>71</sup> und die Validitätsabsicherung<sup>72</sup>.

Die *Signalkorrelation* quantifiziert auf einer Skala von null (sehr schlecht) bis zehn (sehr gut), wie gut zeitbezogene Signale aus der Simulation mit den referenzierten Signalen, die in der Regel aus Messungen stammen, übereinstimmen. Hierzu werden eine konstante Zeittoleranz und eine zeitabhängige Signaltoleranz definiert. Diese bilden gemäß Abbildung 2-4 im Signal-Zeit-Diagramm um jeden Wert des Referenzsignals einen rechteckförmigen Toleranzbereich. Angewendet auf alle Signalwerte ergibt dieses Vorgehen ein Toleranzband. Der Toleranzbereich wird schrittweise um ganzzahlige Faktoren (bis maximal zehn) vergrößert. Die Korrelationsrate<sup>73</sup> ist abhängig von der Anzahl der Datenpunkte des Simulationssignals, die mit dem Toleranzband übereinstimmen und von der notwendigen Vergrößerung des Toleranzbereichs, damit das simulierte Signal vollständig innerhalb des Toleranzbandes liegt. Unter Einbeziehung eines Gewichtungsfaktors für jedes metrische Validitätskriterium und eines Faktors, der die Datenqualität<sup>74</sup> beschreibt, wird die Signalkorrelation berechnet.

Der Kennwert *Validitätsabsicherung* stellt ein ergänzendes Signifikanzmaß für die Signalkorrelation dar. Er wird in Prozent angegeben und resultiert aus der Anzahl der metrischen Validitätskriterien – also der Anzahl der betrachteten Signale –, der Anzahl der

---

<sup>70</sup> Vgl. Logan, R.W.; Nitta, C.K.: *Verification & Validation*, 2002, S. 18 ff / Logan, R.W.; Nitta, C.K.: *Process and Levels Leading to Validation Statements*, 2004, S. 2 ff / Logan, R.W.; Nitta, C.K.: *Validation, Uncertainty, and Reliability*, 2003, S. 5 f / Logan, R.W. et al.: *Model Assessed Reliability*, 2005, S. 195 ff.

<sup>71</sup> Englische Bezeichnung: signal correlation.

<sup>72</sup> Englische Bezeichnung: validation coverage.

<sup>73</sup> Englische Bezeichnung: correlation rating.

<sup>74</sup> Englische Bezeichnung: data reliability.

Lastfallvarianten und der Datenzuverlässigkeit. Wenn keine Vergleichsdaten für die Simulation vorliegen, wird die Validitätsabsicherung mit 0 % angegeben. Ansonsten kann sie Werte bis 100 % erreichen.<sup>75</sup>

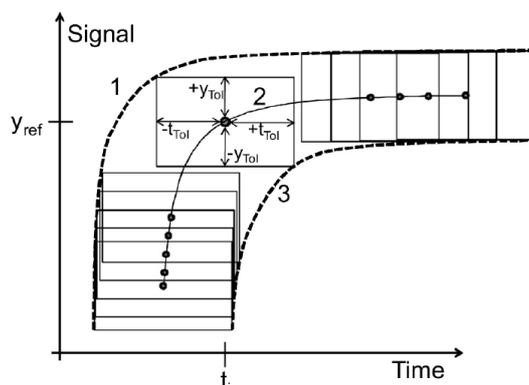


Abbildung 2-4: Signaltoleranz nach Klemmer et al.<sup>76</sup>

Die aufgeführten Beispiele verdeutlichen, dass es sehr unterschiedliche Herangehensweisen gibt, um die Qualität der Simulation detaillierter zu bewerten. In Unterkapitel 4.4 wird ein neues metrisches Bewertungsverfahren vorgestellt, dem – im Gegensatz zu den bisherigen Ansätzen – keine subjektiv festgelegte Skala oder Quantifizierung zugrunde liegt.

## 2.1.4 Überblick bestehender Fahrdynamik-Validierungsstudien

Der Veröffentlichung zum aktuellen Forschungsstand von Viehof und Winner ist eine detaillierte Übersicht über 20 publizierte Validierungsstudien in der Fahrdynamik zu entnehmen.<sup>77</sup>

Die Analyse dieser Studien führt zu der Erkenntnis, dass übereinstimmend mit jüngeren Forschungsarbeiten über Validierungsprozesse eine heute typische Prozessstruktur abgeleitet werden kann, wie sie in Unterkapitel 3.1 beschrieben ist.

Der Vergleich der Studien veranschaulicht jedoch auch, dass sie sich hinsichtlich des Validierungsziels sowie der metrischen Validitätskriterien, der Methodik, des Umfangs und der Art der Validitätsbewertung teilweise stark voneinander unterscheiden, was wiederum die auch in der Literatur geäußerte These bekräftigt, dass sich heute noch kein einheitliches und zufriedenstellendes Validierungskonzept durchgesetzt hat.<sup>78</sup> Die Gründe hierfür und die sich daraus ergebenden Defizite werden in Kapitel 3 zusammengefasst.

<sup>75</sup> Vgl. Klemmer, J. et al.: Validation Process for Vehicle Simulation Models, 2011, S. 746 ff.

<sup>76</sup> Quelle: Klemmer, J. et al.: Validation Process for Vehicle Simulation Models, 2011, S. 751.

<sup>77</sup> Vgl. Viehof, M.; Winner, H.: Forschungsstand der Validierung, 2017, S. 50 ff.

<sup>78</sup> Vgl. Unterkapitel 1.1 (Motivation) und Abschnitt 2.1.3.1 (Validierungsprozess).

Wichtige Erkenntnisse, die aus den Gemeinsamkeiten der Validierungsstudien hervorgehen, sind:<sup>79</sup>

- Sofern die Simulation für die Längs- und / oder die Querdynamik validiert werden soll, kommen Einzelfahrmanöver, die häufig sogar standardisiert sind, zum Einsatz. Welche Rolle Einzelfahrmanöver in der Eigenschaftsbewertung von Fahrzeugen spielen, wird in Unterkapitel 2.3 näher erläutert.
- Stationäres und transientes sowie Zeit- und Frequenz-Verhalten erfordern separate Betrachtungen und angepasste Testanwendungen.
- Die gemessenen Fahrereingaben bilden das Eingangssignal für die Simulation, damit auch in Closed-Loop-Manövern<sup>80</sup> die Validität anhand der Fahrzeugreaktion bewertet werden kann und gleichzeitig anregungsbedingte Schwankungen – z.B. die Reproduzierbarkeit der Lenkwinkleingabe durch einen realen Fahrer – gleichwertig auf die Simulation übertragen werden.<sup>81</sup>
- In der Praxis wird nur sehr selten eine explizite Trennung von Modell-, Daten- und Simulationsvalidität entsprechend den Ausführungen in Abschnitt 2.1.1 vorgenommen. Eine Ausnahme stellt beispielsweise die Studie von Bernard und Clover dar, in der die Modellgüte anhand der Modellvalidität, des Verifikationsprozesses und der Datenvalidität beurteilt wird.<sup>82</sup>
- Zumeist erfolgt der Vergleich von Simulation und realem System sehr rudimentär, indem zeitbezogene Messgrößen miteinander verglichen werden, ohne die Qualifikation dieser metrischen Validitätskriterien für den Anwendungszweck zu hinterfragen.
- Subjektives Vorgehen und erfahrungsbasierte sowie unpräzise Beurteilungen, die nicht auf objektiven, klar definierten Kriterien beruhen, führen vielfach zu Defiziten in der Nachweisführung. Dies äußert sich beispielsweise darin, ...
  - dass basierend auf einem visuellen Vergleich von Diagrammen (Augenscheinvalidierung) von guten Übereinstimmungen gesprochen wird, ...
  - dass die Ergebnisse erst nach einer Parametertuning erreicht wurden und ...
  - dass für unterschiedliche Validitätskriterien verschiedene Maßnahmen ergriffen werden müssen, um eine augenscheinlich gute Übereinstimmung von Simulation und Messung zu erzielen.

---

<sup>79</sup> Vgl. Viehof, M.; Winner, H.: Forschungsstand der Validierung, 2017, S. 50 ff.

<sup>80</sup> Vgl. Unterkapitel 2.3 (Experimentelle Ermittlung und Beurteilung von Fahrzeugeigenschaften).

<sup>81</sup> Vgl. Abschnitt 4.4.4 (Versuchsdurchführung).

<sup>82</sup> Vgl. Bernard, J.E.; Clover, C.L.: Validation of Vehicle Dynamics Simulations, 1994, S. 159 ff.

Im Hinblick auf die Entwicklung einer optimierten Validierungsmethode sind folgende Merkmale und Ergebnisse bestehender Validierungsstudien hervorzuheben, die in Kapitel 4 wieder aufgegriffen werden:<sup>83</sup>

- Validierungsziel und Validitätsbewertung
  - Das Kernziel der Validierung ist die Bewertung der Prädiktionsfähigkeit<sup>84</sup>, also mit welcher Qualität fahrdynamische Eigenschaften eines bestimmten Fahrzeugs vorhergesagt werden können, ohne dieses einem Vergleich von Messung und Simulation zu unterziehen. Der Begriff Prädiktionsfähigkeit setzt sich zunehmend in der Literatur durch.<sup>85</sup>
  - Die höchste nachweisbare Genauigkeit, die eine Simulation aufweisen kann, liegt vor, wenn ihre Ergebnisse innerhalb des Streubereichs der Messungen liegen. Heydinger et al. merken jedoch auch an, dass Simulationen, die eine geringere Genauigkeit aufweisen, für viele Anwendungsfälle geeignet sind.<sup>86</sup> Hieraus resultiert der Bedarf einer Definition für die geforderte Simulationsgenauigkeit, die der Validitätsbewertung zugrunde gelegt wird.
  - Eine objektive Validitätsbewertung sollte entsprechend des Ansatzes von Klemmer et al. Informationen zur Übereinstimmungsgenauigkeit von Messung und Simulation, zum Gültigkeitsbereich und zur Signifikanz der Aussagen enthalten.<sup>87</sup>
- Nachweismethodik
  - Das Vertrauen in die Validierung lässt sich steigern, wenn der Vergleich von Realversuch und Simulation nicht nur auf ein singuläres Fahrzeug beschränkt wird.<sup>88</sup>
  - Simulationen sollten effizient sein. Dies erfordert einen direkten Anforderungsbezug. Allen und Rosenthal beschreiben, dass ein Modell nur so komplex sein sollte, wie es der Einsatzzweck erfordert.<sup>89</sup> Invertiert folgt hieraus die Erkenntnis, dass jeder Einsatzzweck andere Validitätsanforderungen an die Simulation stellt. Allen et al. beschreiben in diesem Zusammenhang die Erfordernis, Modelle für ihren Anwendungsbereich zu validieren. Insbesondere Nichtlinearitäten spielen eine sehr wichtige Rolle, sofern der gesamte fahrdynamische Bereich abgebildet werden soll.<sup>90</sup>

<sup>83</sup> Vgl. Viehof, M.; Winner, H.: Forschungsstand der Validierung, 2017, S. 50 ff.

<sup>84</sup> Englische Bezeichnung: predictive capability.

<sup>85</sup> Vgl. Viehof, M.; Winner, H.: Forschungsstand der Validierung, 2017, S. 33 / Cassara, S.J. et al.: Validation of a Tractor-Semitrailer Model, 2004 / Oberkampf, W.L. et al.: Verification, validation, and predictive capability, 2004, S. 351 f.

<sup>86</sup> Vgl. Heydinger, G.J. et al.: Validating Vehicle Dynamics Simulations, 1990, S. 3.

<sup>87</sup> Vgl. Klemmer, J. et al.: Validation Process for Vehicle Simulation Models, 2011, S. 743 ff.

<sup>88</sup> Vgl. Garrot, W.R. et al.: Methodology for Validating Vehicle Dynamics, 1997, S. 75.

<sup>89</sup> Vgl. Allen, R.W.; Rosenthal, T.J.: Vehicle Dynamics Simulation Models, 1994, S. 1 ff.

<sup>90</sup> Vgl. Allen, R.W. et al.: Vehicle Dynamics Validation for Real-Time Simulation, 2001, S. 1 ff.

Dies lässt die Frage aufkommen, inwiefern standardisierte Fahrmanöver für Validierungszwecke geeignet sind und ob es erforderlich ist, Validierungsversuche an die Anforderungen, die sich aus dem Anwendungszweck ergeben, anzupassen. Mit dieser Fragestellung hat sich Bach in seiner Forschungsarbeit auseinandergesetzt.<sup>91</sup>

- Heydinger et al. erklären, dass die Modellparametrierung und Modellvalidierung unabhängig voneinander erfolgen müssen. Werden diesen beiden Prozessen die gleichen Daten zugrunde gelegt, fällt die Validitätsbewertung aufgrund eines systematischen Fehlers zwangsweise positiv aus. Zudem dürfen die Parameterwerte im Zuge der Validierung nicht mehr verändert werden.<sup>92</sup> Werden diese beiden Grundsätze nicht eingehalten, kann der von Balci definierte Fehlertyp II eintreten. Er beschreibt die Fehlentscheidung, ein nicht valides Modell als valide zu bewerten. Diese Fehlentscheidung stellt ein Risiko für den Modellanwender dar.<sup>93</sup>
- Testanwendungen und deren Auswertung
  - Neben Fahrversuchen sind auch Prüfstandsversuche als Testanwendungen und Komponentenuntersuchungen in Betracht zu ziehen. Allen et al. nutzen einen Prüfstand zur Untersuchung des Reifenmodells.<sup>94</sup> Alasty und Ramezany führen vertikaldynamische Analysen auf einem Vierstempel-Gesamtfahrzeug-Prüfstand durch.<sup>95</sup> Niemann untersucht die Eignung eines solchen Prüfstands für die vertikaldynamische Modellvalidierung.<sup>96</sup> Insbesondere in der Industrie wird angestrebt, dass sich das Gesamtfahrzeugmodell aus validen Komponentenmodellen zusammensetzt. Nur so können Fachkräfte bzw. Fachabteilungen die Komponentenmodelle entwickeln und für die Gesamtfahrzeugsimulation bereitstellen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass ein Gesamtmodell, das aus validen Submodellen aufgebaut wird, nicht zwingend valide sein muss.<sup>97</sup>
  - Datenerfassung, -verarbeitung und -interpretation sollten in Bezug auf die jeweilige Testanwendung eine kritische Auseinandersetzung erfahren. Hierauf liegt der Schwerpunkt von Kutluays Publikationen.<sup>98</sup>

---

<sup>91</sup> Vgl. Bach, C.: Effizienzsteigerung von Validierungstests, 2017.

<sup>92</sup> Vgl. Heydinger, G.J. et al.: Validating Vehicle Dynamics Simulations, 1990, S. 3.

<sup>93</sup> Vgl. Balci, O.: Principles and Techniques of Simulation Validation, 1995, S. 150.

<sup>94</sup> Vgl. Allen, R.W. et al.: Validation of vehicle dynamics simulation, 2002, S. 319 ff.

<sup>95</sup> Vgl. Alasty, A.; Ramezani, A.: Parameter Identification of a Ride Model, 2002.

<sup>96</sup> Vgl. Niemann, H.: Eignungsanalyse eines Vierstempelprüfstands für die Validierung, 2017.

<sup>97</sup> Vgl. Viehof, M.; Winner, H.: Forschungsstand der Validierung, 2017, S. 46.

<sup>98</sup> Vgl. Kutluay, E.: Validation Methodology for Lateral Dynamics, 2012 / Kutluay, E.; Winner, H.: Methodology for Vehicle Dynamics Validation, 2012.

- Allen et al. sowie Garrot et al. zeigen, dass analytische Untersuchungen, Überschlagsrechnungen und Plausibilitätsprüfungen bzw. Konsistenzprüfungen zweckmäßig sind, um ein Modell zu prüfen und qualitative Fehler z.B. bei der Abfolge fahrdynamischer Vorgänge nach einem Lenkwinkelsprung zu identifizieren.<sup>99</sup>

## 2.2 Fahrdynamiksimulation

Bei Fahrdynamik- und Fahrwerksimulationen in der Fahrzeugentwicklung stehen die Kinematik und die Elastokinematik<sup>100</sup> (KnC) sowie die Kinetik im Mittelpunkt der Betrachtung. Die Kinematik beschreibt die geometrischen Bewegungsverhältnisse, die sich aus den Freiheitsgraden der einzelnen Fahrwerkskomponenten und der geometrischen Auslegung ergeben. Die Elastokinematik dient ebenfalls der Darstellung eines Bewegungsverhaltens – jedoch resultierend aus Bauteilelastizitäten unter Einwirkung von Kräften und Momenten. Sie spielt insbesondere für die Simulation von Gummi-Metall-Verbundlagern, die vielfältig im Fahrwerk eingesetzt werden, eine wichtige Rolle. Die Kinetik beschreibt als Teilgebiet der technischen Mechanik den Zusammenhang von Kräften und Bewegungen. Die Bedeutung für die Fahrdynamiksimulation resultiert aus der Übertragungstrecke vom Reifen-Fahrbahn-Kontaktpunkt bis zum Fahrzeugaufbau, die durch diese drei Bereiche der Physik beschrieben wird und ausschlaggebend für die Gesamtfahrzeugbewegung ist.<sup>101a</sup>

Unterschieden werden in der detaillierten Fahrzeugsimulation im Wesentlichen die Finite-Elemente-Simulation und die Mehrkörpersimulation. In der Finite-Elemente-Simulation werden Körper durch eine endliche Anzahl einfacher Teilkörper bzw. -flächen, die über Knoten miteinander verbunden sind, abgebildet. Sie ermöglicht die Analyse elastischer und ggf. plastischer Bauteileigenschaften anhand der Geometrie-, Material- und Lastfallinformationen. Die Finite-Elemente-Methode (FEM) findet in der Fahrwerkentwicklung Anwendung in den Bereichen Betriebsfestigkeit, Crash, Schwingungsanalyse, Akustik und elastokinematische Auslegung, jedoch aus Gründen der Komplexität und Rechenleistung nur in Spezialfällen in der Fahrdynamiksimulation auf Gesamtfahrzeugebene. Hier kommen überwiegend weniger rechenintensive Mehrkörpersimulationsmodelle zum Einsatz, die einzelne Bauteile als starre Körper mit zentrierter Masse abbilden und diese über Gelenke miteinander verknüpfen. Zudem können Federn, Dämpfer und Zwangsbedingungen in den Übertragungstrecken integriert werden.<sup>101b</sup>

---

<sup>99</sup> Vgl. Allen, R.W. et al.: Validation of Ground Vehicle Computer Simulations, 1992, S. 59 ff. / Garrot, W.R. et al.: Methodology for Validating Vehicle Dynamics, 1997, S. 71 ff.

<sup>100</sup> Englische Bezeichnung: kinematic and compliance (KnC).

<sup>101</sup> Vgl. Adamski, D.: Simulation in der Fahrwerktechnik, 2014, (a) S. 3 | (b) S. 4 ff / Schramm, D. et al.: Simulation der Dynamik von Kraftfahrzeugen, 2013, (a) S. 6 f | (b) S. 6 ff.

*„Bei den Simulationswerkzeugen für Mehrkörpersysteme ist zunächst zu unterscheiden, ob es sich um eine Multi Purpose- oder eine Special Purpose-Anwendung handelt. Die erste Gruppe ist nicht speziell für die Fahrzeugentwicklung zugeschnitten, sondern für alle Mechanismen geeignet, die sich durch diese Methode beschreiben lassen [...]. Im Vergleich dazu ist die Gruppe der Special Purpose-Anwendungen auf die Belange der Fahrzeugentwicklung fokussiert und bietet Modellkataloge und Auswertemethoden aus diesem Bereich an. [...] Beispiele für kommerzielle Special Purpose-Werkzeuge sind CarMaker der Firma IPG Automotive [...] oder DYNA4 der Firma Tesis Dynaware [...]. Sie können für die Fahrdynamiksimulation eingesetzt werden und sind echtzeitfähig. Anwendungsseitig stehen hier der Antriebsstrang und das Fahrwerk im Vordergrund [...].“<sup>102</sup>*

Darüber hinaus kommen in vielen Anwendungen und Untersuchungen Basis-Fahrzeugmodelle<sup>103</sup> – auch als Grundmodellierungen bezeichnet – zum Einsatz, die dazu dienen, die grundlegende Fahrdynamik mit Fokus auf einer der drei Fahrzeugdomänen<sup>104</sup> abzubilden. Diese Modelle benötigen nur einen Bruchteil an Parametrierungsdaten im Vergleich zu den zuvor genannten Werkzeugen. Vielfältig eingesetzte Modelle dieser Art sind das Viertelfahrzeugmodell, i.d.R. ein Ein- oder Zweimassenschwinger für die Vertikaldynamiksimulation und das Einspurmodell für die Querdynamiksimulation. Letzteres wird u.a. zur Untersuchung des Gierverhaltens, des Reaktionsverhaltens bei Lenkwinkeländerungen oder der Fahrstabilität herangezogen. Rückschlüsse auf den Einfluss von beispielsweise Feder, Dämpfer oder Radhubkinematik sind nicht möglich, da die Achsschräglaufsteifigkeit der einzige Fahrwerksparameter in diesem Modell ist.<sup>105</sup>

An dieser Stelle sei das Ausgangszitat dieser Arbeit von Albert Einstein aufgegriffen: „Mache die Dinge so einfach wie möglich – aber nicht einfacher.“ Dieses betrifft gleichermaßen den Genauigkeitsanspruch an die Simulation und die in Abschnitt 2.1.4 aufgeführte Forderung von Allen und Rosenthal, dass das Simulationsmodell nur so komplex sein sollte, wie es der Einsatzzweck erfordert. In den Simulationsabteilungen größerer Unternehmen und insbesondere bei Gebrauch kommerzieller Simulationssoftware ist dies nur unter gewissen Einschränkungen möglich, wobei jedoch für die Längs- und Querdynamik unterschiedlich komplexe Modelle und objektive Beurteilungskriterien etabliert sind. In der Fahrkomfortsimulation existieren derartige Standards und generalisierte Subsystemmodelle inklusive Parametrierungsverfahren noch nicht. Hier werden vorwiegend Mehrkörpersimulationsmodelle eingesetzt, die für manche Entwicklungsphasen überdimensioniert sind und damit präzise Eigenschaftsprädiktionen erschweren.<sup>106</sup> Angrick setzt mit seiner Forschungsarbeit<sup>107</sup> genau an diesem Punkt an und de-

---

<sup>102</sup> Adamski, D.: Simulation in der Fahrwerktechnik, 2014, S. 6 ff.

<sup>103</sup> Englische Bezeichnung: basic vehicle models.

<sup>104</sup> Die Längs-, Quer- und Vertikaldynamik werden als die drei Domänen der Fahrdynamik bezeichnet.

<sup>105</sup> Vgl. Lugner, P.; Plöchl, M.: Modelling in vehicle dynamics, 2004, S. 222 ff / Schramm, D. et al.: Simulation der Dynamik von Kraftfahrzeugen, 2013, S. 11 ff.

<sup>106</sup> Vgl. Angrick, C.: Subsystemmethodik für die Komfortauslegung, 2017, S. 13.

<sup>107</sup> Angrick, C.: Subsystemmethodik für die Komfortauslegung, 2017.

monstriert, dass sich mit einer Subsystemmethodik das Vorgehen aus der Fahrdynamiksimulation auch auf die Fahrkomfortsimulation übertragen lässt, was einen effektiveren und an den Anwendungszweck angepassten Einsatz der Simulationsmodelle ermöglicht. In der Industrie werden große Anstrengungen für die korrekte Parametrierung der Fahrzeugmodelle unternommen. Würden für unterschiedliche Fragestellungen gänzlich unterschiedliche Simulationswerkzeuge bzw. -modelle herangezogen, hätte dies zur Folge, dass die Parametrierung in unterschiedlicher Art und Weise vorgenommen werden muss, was die Gefahr variierender Datenvalidität erhöht. Dennoch ermöglichen auch kommerzielle Special Purpose-Werkzeuge wie CarMaker<sup>108</sup> die Anpassung der Modellkomplexität auf Submodellebene. So können beispielsweise für Komfortsimulationen komplexere Reifenmodelle herangezogen werden als für Handlingsimulationen oder einfache Kennlinienmodelle durch physikalische Submodelle für z.B. Dämpfer und Luftfeder ersetzt werden. Basis-Fahrzeugmodelle sind sehr gut für Plausibilitätschecks und Konsistenzprüfungen komplexerer Modelle geeignet und können somit auch in der Validierung eingesetzt werden.<sup>109</sup>

Die in Kapitel 5 vorgestellten Validierungsstudien beziehen sich auf Simulationen mit der Software CarMaker.

## 2.3 Experimentelle Ermittlung und Beurteilung von Fahrzeugeigenschaften

Wie Abschnitt 2.1.3 aufzeigt, sind die wesentlichen Auslegungskriterien einer Validierungsstudie die Testanwendungen und die metrischen Validitätskriterien. Über den gesamten Entwicklungsprozess eines Kraftfahrzeugs erstrecken sich Testverfahren zur Analyse und Beurteilung bestimmter Fahrzeugeigenschaften. Die Fahrdynamik bildet hierin einen besonderen Schwerpunkt. Für sie besteht eine Vielzahl von Testverfahren zur objektiven Beurteilung, wobei standardisierte Verfahren insbesondere in der Quer- und Längsdynamik vorzufinden sind.<sup>110</sup> In Abschnitt 4.4.2.2 wird die Eignung dieser Versuche für den Zweck der Validierung diskutiert.

Die Beurteilung vertikaldynamischer Eigenschaften ist heute noch sehr subjektiv geprägt. Dies ist darin zu begründen, dass die Vertikaldynamik einerseits den Fahrkomfort beschreibt – also ein Gefühl, das im Wesentlichen durch das Einwirken von Beschleunigungen auf die Fahrzeuginsassen beeinflusst wird. Die Forschung beschäftigt sich zwar mit der Objektivierung von Fahrkomfort, aber bis heute sind die Korrelations- und Regressionsverfahren noch nicht so weit fortgeschritten, dass auf die Subjektivbeurteilung erfahrener Entwicklungsingenieure verzichtet

---

<sup>108</sup> Software der IPG Automotive GmbH, Karlsruhe.

<sup>109</sup> Vgl. Abschnitt 2.1.4 (Überblick bestehender Fahrdynamik-Validierungsstudien).

<sup>110</sup> Vgl. Viehof, M.; Winner, H.: Forschungsstand der Validierung, 2017, S. 62 ff.

werden kann.<sup>111</sup> Bezüglich der Bewertung und der Testverfahren verfolgen die verschiedenen Automobilhersteller unterschiedliche Strategien. Andererseits beeinflusst das vertikaldynamische Verhalten eines Fahrzeugs auch die Fahrsicherheit. Dieser Einfluss wird über die Stärke der dynamischen Radlastschwankungen infolge fahrbahn- und aufbauinduzierter Schwingungen charakterisiert. Dabei gilt, dass das Längs- und Seitenkraftübertragungspotenzial eines Reifens umso größer ist, je geringer die im Fahrbetrieb auftretenden Radlastschwankungen sind. Fahrsicherheit ist somit auch ein Indikator für das Handling, das über Testverfahren der Quer- und Längsdynamik eine Beurteilung erfährt. Fahrsicherheit und -komfort sind häufig konkurrierende Auslegungsziele, die insbesondere für passive Fahrwerke eine Kompromissbildung erfordern.<sup>112</sup>

Im Hinblick auf die Modellvalidierung zeigt dieser Zusammenhang, dass ein Modell für den Anwendungszweck der Längs- und Querdynamik relevante vertikaldynamische Phänomene abbilden können muss, was die Forderung nach objektiven Testanwendungen für die Validierung vertikaldynamischer Eigenschaften hervorruft.

Viele objektive Testverfahren der Längs- und Querdynamik sind in Form von Normen standardisiert. Die Beschreibungen umfassen die Durchführung des Fahrmanövers, die Bewertungsgrößen und die erforderlichen Messgrößen.<sup>113</sup> Neben den Normungen gibt es unterschiedliche Publikationen, die sich mit Einzelfahrmanövern zur Hervorhebung einzelner Fahrzeugeigenschaften beschäftigen.<sup>114</sup> Diese Testverfahren haben sich aufgrund folgender Vorteile in der Praxis durchgesetzt:<sup>115</sup>

- Hohe Reproduzierbarkeit der Fahrzeuganregung.
- Hervorhebung und / oder Ausblenden bestimmter Fahrzeugeigenschaften.<sup>116</sup>

---

<sup>111</sup> Vgl. Heißing, B. et al.: Fahrwerkhandbuch, 2013, S. 126.

<sup>112</sup> Vgl. Heißing, B. et al.: Fahrwerkhandbuch, 2013, S. 252 / Isermann, R.: Fahrdynamik-Regelung, 2006, S. 253 / Braess, H.H.; Seiffert, U.: Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, 2013, S. 639 ff / Trzesniowski, M.: Rennwagenteknik, 2012, S. 251.

<sup>113</sup> Vgl. u.a. DIN ISO 4138: Stationäre Kreisfahrt, 1984 / DIN ISO 7975: Bremsen in der Kurve, 1987 / DIN ISO 9816: Lastwechselreaktionen, 1995 / ISO 3888-1: Double lane-change, 1999 / ISO 3888-2: Obstacle avoidance, 2002 / ISO 7401: Lateral transient response test methods, 2003 / ISO 12021-1: Sensitivity to lateral wind, 1996 / ISO 13674-1: Weave test, 2010 / ISO 13674-2: Transition test, 2016 / ISO 14512: Braking on surfaces with split coefficient of friction, 1999 / ISO 14793: Lateral transient response test methods, 2003 / ISO 17288-1: Steering-release test – Part 1, 2002 / ISO 17288-2: Steering-pulse test – Part 2, 2004 / ISO/FDIS 21994: Straight-line braking with ABS, 2007 / ISO/TS 20119: Dispersion metrics for straight-line driving, 2002.

<sup>114</sup> Vgl. u.a. Rompe, K.; Heißing, B.: Objektive Testverfahren für Fahreigenschaften, 1984 / Zomotor, A. et al.: Bewertung des Fahrverhaltens – Teil 1, 1997 / Zomotor, A. et al.: Bewertung des Fahrverhaltens – Teil 2, 1998.

<sup>115</sup> Vgl. Viehof, M.; Winner, H.: Forschungsstand der Validierung, 2017, S. 62.

<sup>116</sup> Als Beispiel seien quasistationäre Manöver (wie z.B. die quasistationäre Kreisfahrt) genannt, in denen gezielt dynamische Effekte und transiente Anregungen aus der Fahrverhaltensanalyse ausgeschlossen werden.

- Definierte Bewertungsverfahren und objektive Ausgangsgrößen.
- Bessere Vergleichbarkeit von Fahrzeugen resultierend aus den vorherigen Vorteilen.

Eine Klassifikation der wichtigsten Fahrmanöver nach Einsatzzweck und Art der Durchführung wurde von Zomotor et al. vorgenommen. Der Einsatzzweck zeigt auf, welcher fahrdynamische Zustand (Kurvenverhalten, Wechselkurvenverhalten, Übergangsverhalten, Geradeauslauf) adressiert wird.<sup>117</sup> Eine aktualisierte Klassifizierung kann dem Fahrwerkhandbuch entnommen werden.<sup>118</sup>

Bezüglich der Art der Durchführung eines Versuchs wird zwischen sogenannten Open-Loop- und Closed-Loop-Versuchen unterschieden. Während bei Open-Loop-Versuchen die zeitliche Anregung des Fahrzeugs in Form einer Steuerung vorgegeben ist, handelt es sich bei Closed-Loop-Manövern um eine Regelung, bei der beispielsweise ein Fahrer versucht, eine definierte Trajektorie einzuhalten.<sup>119</sup>

Eine für die Validierung relevante Eigenschaft von Testverfahren ist die Übertragbarkeit der Untersuchungsergebnisse auf andere Arbeitspunkte. Hier ist festzustellen, dass standardisierte Fahrmanöver nur einen oder wenige Arbeitspunkte adressieren. Dies lässt die Frage nach der Eignung und dem Optimierungspotenzial für den Zweck der Validierung aufkommen, worauf in Abschnitt 4.4.2.2 näher eingegangen wird.

## 2.4 Fazit zum derzeitigen Forschungsstand

Die Übersicht über den aktuellen Forschungsstand zeigt die Diversität der Betrachtungs- und Herangehensweisen in der Validierung auf. Obwohl seitens der Wissenschaft klare Zusammenhänge und Begrifflichkeiten definiert sind, geht diese Präzision in der Praxis verloren. Subjektive Einflüsse und unmotiviert Interpretationen führen zu Unsicherheiten und Misstrauen gegenüber den Validitätsaussagen. Der Stand der Technik und der Wissenschaft lässt sich wie folgt zusammenfassen:

---

<sup>117</sup> Entsprechende Abbildung siehe Zomotor, A. et al.: Bewertung des Fahrverhaltens – Teil 1, 1997, S. 781.

<sup>118</sup> Entsprechende Tabelle siehe Heißing, B. et al.: Fahrwerkhandbuch, 2013, S. 128.

<sup>119</sup> Vgl. u.a. Heißing, B. et al.: Fahrwerkhandbuch, 2013, S. 126 ff.

*„Aus der Übersicht geht hervor, dass sich für die Modellvalidierung bis heute keine allgemeingültige Strategie durchgesetzt hat. Die Prozessdefinitionen unterscheiden sich hinsichtlich ihrer adressierten Schwerpunkte, wie beispielsweise Praktikabilität, Prozessstruktur, Modellanwendungen und Vertrauensnachweis. Im zeitlichen Verlauf der Veröffentlichungen sind eine zunehmende Systematisierung des Prozesses und das Bestreben nach objektiven Entscheidungen festzustellen. Der Überblick über die bestehenden Validierungstechniken zeigt, dass eine sehr große Vielzahl von Techniken besteht, die prinzipiell objektive Entscheidungen über die Qualität eines Modells zulassen. [...] Anhand [publizierter Validierungsstudien] werden die aus den allgemeingültigen Veröffentlichungen abgeleiteten Erkenntnisse bestätigt. Die Modellvalidierung wird vollkommen unterschiedlich gestaltet, die Auswahl der Validitätskriterien sowie die Validierungstechniken sind größtenteils subjektiv geprägt und die Validierung bezieht sich auf einzelne Modell-Parameterdatensatz-Kombinationen. Letzterer Punkt bewirkt, dass die Validierung nur Vertrauen in das Modell in Kombination mit dem jeweiligen Parameterdatensatz erzeugt.“<sup>120</sup>*

Im Hinblick auf das Kernanwendungsgebiet dieser Forschungsarbeit zeigt die Übersicht der Fahrdynamiksimulationen die unterschiedliche Komplexität verschiedener Simulationswerkzeuge auf, die sich für den Qualitätsnachweis auch auf den Validierungsaufwand überträgt. Zur Beurteilung des Gesamtfahrzeugverhaltens kommen in der Längs- und Querdynamik weitestgehend standardisierte Einzelfahrmanöver zum Einsatz, die auch als Testanwendungen im Validierungsprozess Anwendung finden können. Jedoch spielen hier die Arbeitspunktabhängigkeiten der Fahrzeugeigenschaften eine wichtige Rolle, sodass für einen großen Gültigkeitsbereich der Validitätsaussage Eignungsanalysen und ggf. Versuchsanpassungen erforderlich sind.

---

<sup>120</sup> Viehof, M.; Winner, H.: Forschungsstand der Validierung, 2017, S. I.

---

## 3 Ist-Stand-Analyse

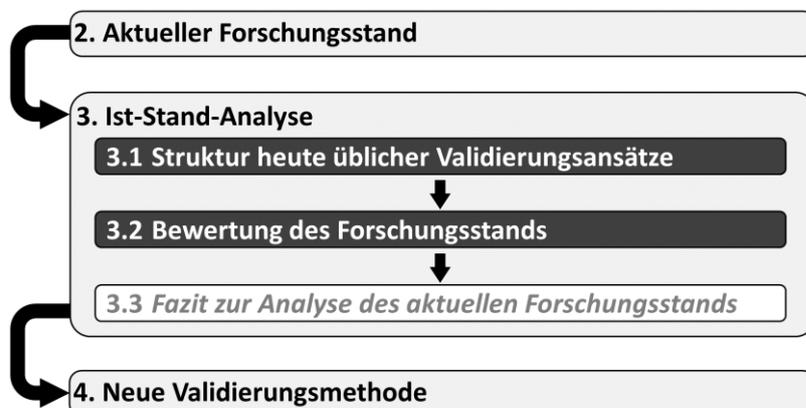


Abbildung 3-1: Einordnung und Struktur von Kapitel 3

In der nachfolgenden Analyse des derzeitigen Forschungsstands werden entsprechend Abbildung 3-1 die heutigen Validierungsansätze<sup>121</sup> hinsichtlich ihrer Prozessstruktur untersucht und im Rahmen einer Bewertung ihre Defizite, die es in einer verbesserten Validierungsmethode zu kompensieren gilt, analysiert.

### 3.1 Struktur heute üblicher Validierungsansätze

Eine Validierungsstudie folgt, ebenso wie andere praktische Versuche bzw. Untersuchungen, den drei Phasen *Vorbereitung*, *Datenerhebung* und *Auswertung*. Die nähere Betrachtung des aktuellen Forschungsstands ergibt, dass Validierungsstudien grundlegend sechs Prozessstufen aufweisen. Jede dieser Stufen wird durch mindestens einen Teilprozess charakterisiert. Die Prozessstruktur ist in der rechten Spalte in Abbildung 3-2 dargestellt und zeigt auch die methodischen Schwachstellen des heutigen Prozesses, auf die in Unterkapitel 3.2 detaillierter eingegangen wird. Nachfolgend werden die sechs Prozessstufen zusammengefasst:<sup>122</sup>

---

<sup>121</sup> Vgl. Unterkapitel 2.1 (Validierung).

<sup>122</sup> Viehof, M. et al.: Objektivierungspotenzial der operativen Validierung, 2016, S. 419 ff / Vgl. Viehof, M.; Winner, H.: Forschungsstand der Validierung, 2017, S. 12 ff, 50 ff.

#### 1. Anforderungsdefinition

Die Anforderungsdefinition wird in den meisten Fällen nicht als solche bezeichnet bzw. gekennzeichnet. Vielmehr handelt es sich heute um eine Kurzbeschreibung der Simulationsanwendung, der gewisse Simulationsanforderungen entnommen werden können. Die Art der genannten Anforderungen variiert innerhalb der Studien stark.

#### 2. Auslegung der Validierungsstudie

Aufgrund der Betrachtung nur einer singulären Kombination von Modell- und Datensatz müssen für die Studie lediglich die Vergleichsversuche und die metrischen Validitätskriterien festgelegt werden. Dies erfolgt in den meisten Fällen ohne eine explizite Begründung oder Ableitung aus den Anforderungen.

#### 3. Versuchsvorbereitung

Zur Versuchsvorbereitung gehören die vom Messsystem bestimmte Auslegung der Datenerfassung und -verarbeitung, die den Vergleich von Simulations- und Realversuchsergebnissen erst ermöglichen.

#### 4. Versuchsdurchführung

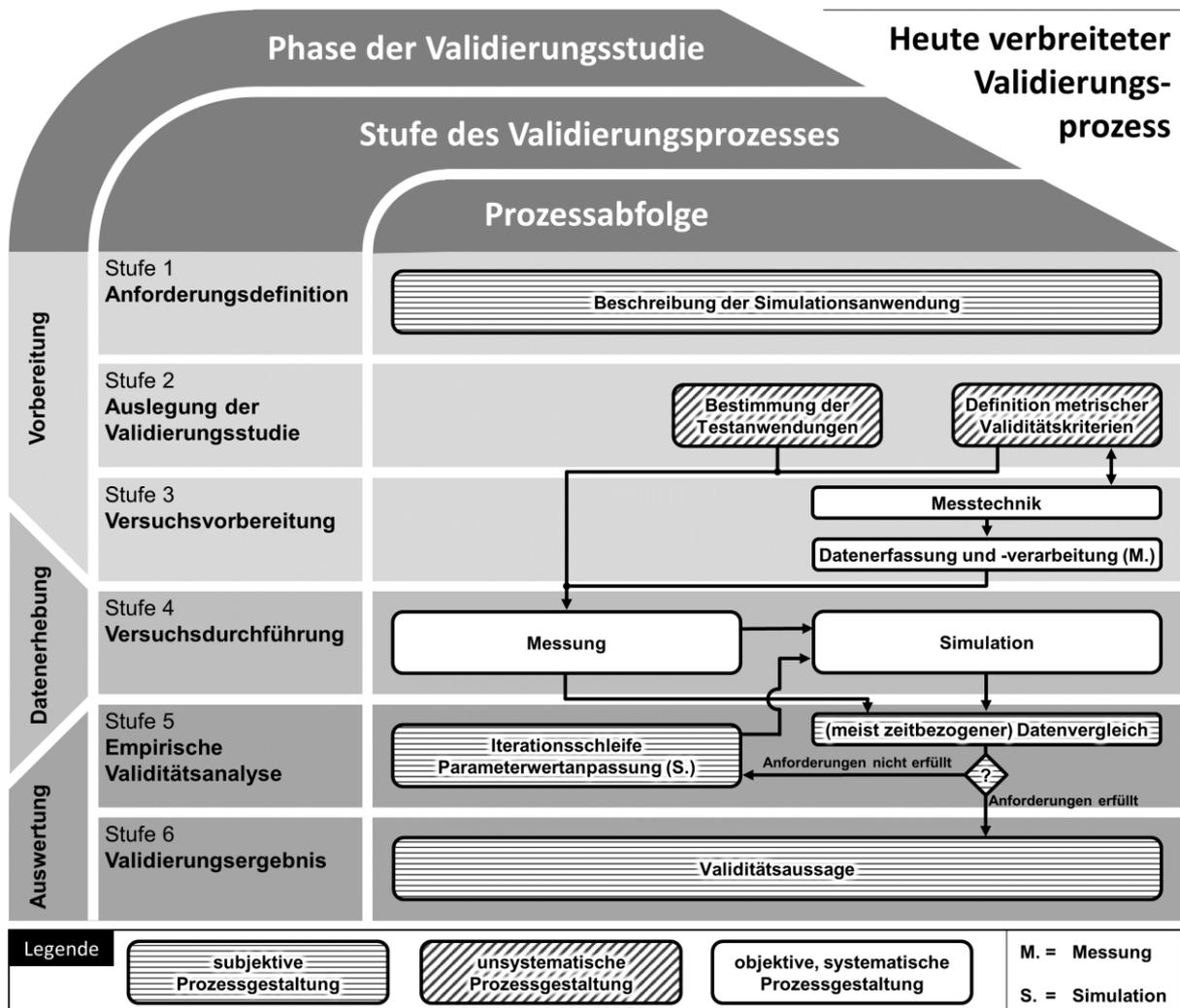
Nach der Vorbereitung erfolgt die Durchführung der Versuche. Hier werden üblicherweise zuerst die Messungen und im Anschluss die Simulationen durchgeführt. Dies ist damit zu begründen, dass messbare Eingangssignale als Steuergrößen für die Simulation verwendet werden, um lastfallbedingte Streuungen der Ausgangsgrößen ebenso auf die Simulation zu übertragen.

#### 5. Empirische Validitätsanalyse

Die empirische Validitätsanalyse erfolgt sehr häufig durch subjektive Augenscheinvalidierung. Dies bedeutet, dass ein Experte z.B. anhand überlagerter Graphen aus Messung und Simulation über die Qualität der Simulation entscheidet. Bei negativer Beurteilung werden in vielen Fällen Parameterwertanpassungen vorgenommen, damit die Simulation eine bessere Übereinstimmung mit dem gemessenen Systemverhalten zeigt. Hier sind üblicherweise methodische Schwachstellen zu identifizieren, die das Misstrauen in die Simulation fördern.

#### 6. Validierungsergebnis

Die Validitätsbewertung ist aufgrund des subjektiven Vorgehens heute nur selten von der Validitätsanalyse (Stufe 5) zu trennen. Meist lautet die Validitätsaussage *valide* oder *nicht valide*. Wie Abschnitt 2.1.3.3 zeigt, gibt es in wenigen Fällen auch Verfahren zur Ergebnisdarstellung, die über die binäre Qualitätsaussage hinausgehen.

Abbildung 3-2: Heutiger Validierungsprozess<sup>123</sup>

## 3.2 Bewertung des Forschungsstands

Um Verbesserungen im Validierungsprozess erzielen zu können, müssen zunächst die Defizite, die es zu umgehen bzw. zu kompensieren gilt, identifiziert werden. Die Analyse des aktuellen Forschungsstands in Unterkapitel 3.1 führt zu den nachfolgend beschriebenen Nachteilen des heute üblichen Validierungsvorgehens in der Fahrdynamik.

In der Regel beschränkt sich die Validierung auf die Untersuchung eines einzigen Fahrzeugs. Es handelt sich hierbei um Stichprobenversuche. Dies bedeutet, dass entsprechend Abbildung 3-3 nur ein einziger Vergleich durchgeführt wird, der sich meist auf mehrere Versuchs-

<sup>123</sup> Quelle: Modifiziert nach Viehof, M. et al.: Objektivierungspotenzial der operativen Validierung, 2016, S. 423.

wiederholungen stützt. In diesem Vergleich setzt sich die Simulation aus einer singulären Kombination von Modell und Parameterdatensatz für das betrachtete Fahrzeug<sup>124</sup> zusammen. Mit Verweis auf den in Abschnitt 2.1.1 beschriebenen Zusammenhang von Modell-, Daten- und Simulationsvalidität lässt dieses Vorgehen lediglich eine Qualitätsbewertung der spezifischen Simulation dieses einen Fahrzeugs zu. Es kann nicht nachgewiesen – sondern nur vermutet – werden, dass für ein anderes Fahrzeug in der gleichen Anwendung die gleiche Simulationsgüte erreicht wird. Dies ist der Hauptgrund, weshalb heutige Validierungsstudien kein grundlegendes Vertrauen in die Simulation erzeugen können. Das beschriebene Vorgehen liefert keine Information über die Prädiktionsfähigkeit<sup>125</sup> und muss somit streng genommen bei jeder Änderung des Fahrzeugs wiederholt werden, was die Simulation als Untersuchungswerkzeug nicht rechtfertigt und überflüssig macht, da der Realversuch trotzdem durchgeführt werden muss. Die äußerst geringe Effizienz dieser Validierungsstrategie hat zur Folge, dass in der Praxis heute noch viel nach Bauchgefühl gehandelt wird und nur stichprobenweise Absicherungen in Form von Validierungen erfolgen.<sup>126</sup>

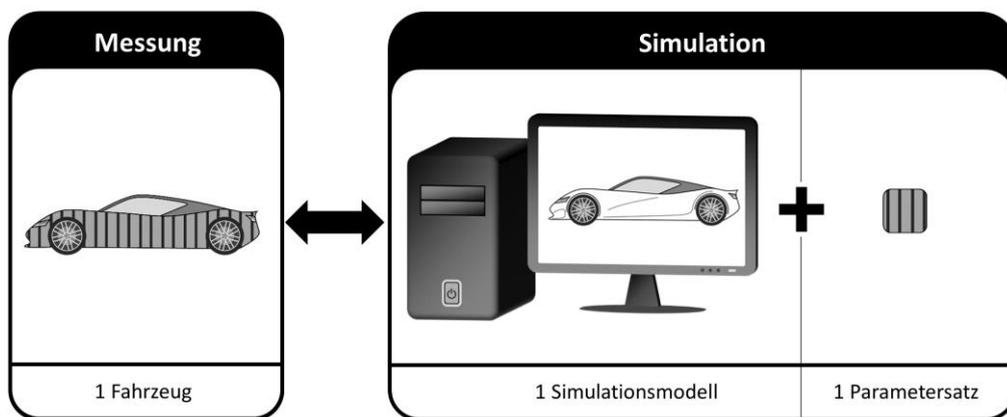


Abbildung 3-3: Prinzip der heute üblichen Validierungsstrategie<sup>127</sup>

Häufig erwecken Validierungsstudien den Eindruck, dass das Validierungsergebnis schon vor der Durchführung festgelegt wurde. Dies resultiert im Wesentlichen aus einer mangelhaften Systematik, stark subjektiv geprägten Entscheidungen und den regelmäßig praktizierten Parameterwertanpassungen zur Erhöhung der Übereinstimmungsgenauigkeit von Messung und Simulation. Abbildung 3-2 zeigt, in welchen Bereichen des Validierungsprozesses diese Mängel vorzufinden sind.

<sup>124</sup> Es handelt sich um eine spezifische Systemvariante.

<sup>125</sup> Vgl. Unterkapitel 1.1 (Motivation).

<sup>126</sup> Vgl. Viehof, M. et al.: Objektivierungspotenzial der operativen Validierung, 2016, S. 421 / Viehof, M. et al.: Validierungskonzept für die Vertikaldynamik, 2017, S. 148 / Viehof, M.; Winner, H.: Research Methodology for a New Validation Concept, 2018, S. 3.

<sup>127</sup> Quelle: Modifiziert nach Viehof, M.; Winner, H.: Research Methodology for a New Validation Concept, 2018, S. 3.

In den meisten Fällen wird nicht präzise beschrieben, wofür die Simulation eingesetzt werden soll. Genauigkeitsanforderungen werden dabei entweder ganz außer Acht gelassen oder unbegründet festgelegt. Im Anschluss an die subjektiv geprägte Anforderungsdefinition erfolgt in der Regel die Festlegung der Testanwendungen und der metrischen Validitätskriterien ohne Bezug zu den Anforderungen. Dies wirkt sich negativ auf die Glaubwürdigkeit der Validierungsstudie aus, da es für den späteren Nutzer der Simulationsergebnisse entscheidend ist, nachvollziehen zu können, wieso die Validierungsstudie für den Zweck der Simulation, der aus der Anforderungsdefinition hervorgehen sollte, aussagekräftig ist.<sup>128</sup>

Weitere Defizite betreffen die Subjektivität der Validierung. Die einfachste und gleichzeitig auch am häufigsten vorzufindende Variante des Datenvergleichs ist die zeitbezogene Betrachtung von Sensorwerten unter Vernachlässigung von Kriterien wie Aussagekraft, Robustheit, Unsicherheiten, Toleranzen, Streuungen und Anforderungsbezug. Über diese Kriterien müsste zur Vertrauensförderung gezeigt werden, dass die betrachteten Kennwerte, anhand derer das Validitätsurteil am Ende getroffen wird, für die Anforderungen repräsentativ und für die Analyse geeignet sind. Die Validitätsbewertung ist, wie in Unterkapitel 2.1 beschrieben, zumeist das Ergebnis einer subjektiven Bewertung, bei der häufig ein graphischer Vergleich von Diagrammen als Grundlage dient. Nur für den Sonderfall, dass diese Bewertung durch den Nutzer der Simulationsergebnisse selbst erfolgt, kann dieses subjektive Vorgehen zielführend sein. Andernfalls fehlen dem Experten häufig Informationen über Mess- und Simulationsgenauigkeiten, die für eine objektive Validitätsaussage herangezogen werden müssten.<sup>129</sup>

Zuletzt setzt die Validierung ein hohes Maß an Fachkenntnis voraus. In der Fahrdynamik betrifft dieses insbesondere die zur Anwendung kommende Messtechnik und die Wirkzusammenhänge im Versuch. Sämtliche metrischen Validitätskriterien – egal ob subjektiv oder objektiv miteinander verglichen – werden aus Sensorinformationen der Messung und äquivalenten Größen aus der Simulation abgeleitet. In der Fahrdynamik ist es nicht üblich, das Messverhalten realer Sensoren in der Simulation abzubilden. Stattdessen werden offenkundig identische Sensorinformationen aus der Simulation als Ausgangsgrößen definiert. Beispielsweise zeigt Wang in seiner Forschungsarbeit, dass Messfelgen ein bauart- und funktionsbedingtes charakteristisches Messverhalten aufweisen, das von der Art der Anregung und der Zustandsdynamik abhängig ist.<sup>130</sup> Dies kann im Vergleich mit Radnabenkräften und -momenten, die direkt aus der Simulation geführt werden, zu großen Abweichungen führen, die auf systematische Fehlinterpretationen und nicht auf Messfehler zurückzuführen sind. Ein weiterer systematischer Fehler liegt vor, wenn ein nominell parametrisiertes Simulationsfahrzeug mit einem messtechnisch aufgerüsteten

---

<sup>128</sup> Vgl. Unterkapitel 4.1 (Diversität der Anwendungsbereiche und Anforderungen an die Methode).

<sup>129</sup> Vgl. Viehof, M. et al.: Objektivierungspotenzial der operativen Validierung, 2016, S. 421 ff / Viehof, M. et al.: Validierungskonzept für die Vertikaldynamik, 2017, S. 148 f / Viehof, M.; Winner, H.: Research Methodology for a New Validation Concept, 2018, S. 3 / Viehof, M.; Winner, H.: Forschungsstand der Validierung, 2017, S. 25, 50 ff.

<sup>130</sup> Wang, Y.; Winner, H.: Measurement Characteristics of Wheel Force Sensor, 2015 / Wang, Y.; Winner, H.: Measurement of Tyre Contact Force, 2015.

Versuchsfahrzeug, das bedingt durch die Messtechnik signifikante Eigenschaftsänderungen erfährt, verglichen wird. Übliche Eigenschaftsänderungen in der Fahrdynamik betreffen die Masse und Schwerpunktlage sowie die Aerodynamik bei Verwendung von An- oder Aufbauten. Die Parametrierung eines dem Messfahrzeug äquivalenten Simulationsmodells sowie eine an die Messsystemeigenschaften angepasste Datenverarbeitung bzw. Sensormodellierung stellen notwendige Voraussetzungen zur objektiven Bewertung der Simulationsqualität dar.

## 3.3 Fazit zur Analyse des aktuellen Forschungsstands

Der Vergleich heutiger Validierungsstudien und prozessbezogener Publikationen führt zu einer generalisierbaren Prozessstruktur<sup>131</sup>, anhand derer die Defizite unter Einbeziehung des Stands der Forschung aufgezeigt werden. Die Analyse des heutigen Validierungsvorgehens offenbart einen direkten Zusammenhang zum fehlenden Vertrauen in Simulationsergebnisse, das im Anwendungsbereich der Fahrdynamiksimulation – aber auch in anderen Anwendungsdomänen – beklagt wird. Als Ursachen stellen sich systematische Schwachstellen in der Nachweisführung und in der Prozessgestaltung heraus.

---

<sup>131</sup> Vgl. Abbildung 3-2.

---

## 4 Neue Validierungsmethode

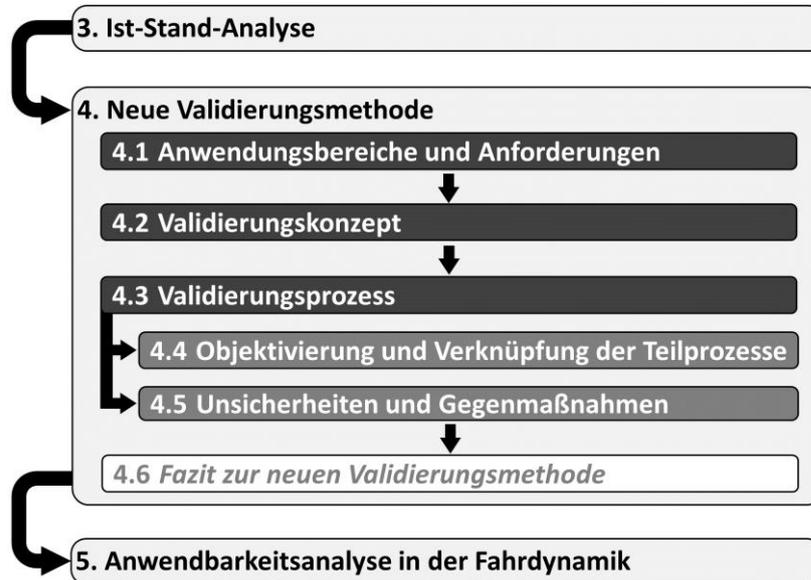


Abbildung 4-1: Einordnung und Struktur von Kapitel 4

In diesem Kapitel wird die neue Validierungsmethode vorgestellt. Entsprechend Abbildung 4-1 werden aus den Ergebnissen der Ist-Stand-Analyse der Anwendungsbereich präzisiert und die Anforderungen für das neue Validierungskonzept abgeleitet. Aus dem Konzept geht der Validierungsprozess hervor, der im Hinblick auf die Objektivierung und Teilprozessverknüpfung sowie den Umgang mit Unsicherheiten weiter konkretisiert wird.

### 4.1 Diversität der Anwendungsbereiche und Anforderungen an die Methode

Wie eingangs in Kapitel 1 erwähnt, ist die nachfolgend vorgestellte Validierungsmethode abstrakter als Vergleichsmethode zu betrachten und in vielen Bereichen anwendbar. Die auf den Forschungszielen<sup>132</sup> basierende Auslegung für den Zweck der Validierung fokussiert zwar den Vergleich von Simulations- und Messdaten, wobei die Messungen das vermeintlich wahre Systemverhalten repräsentieren. Allgemeiner formuliert, resultiert das Ergebnis aus dem Vergleich zweier Systemabbildungen bzw. -anschauungen, wobei in diesem Fall die Simulation in Relation zur Messung bewertet wird. Die Abstraktionsebene des Anwendungsbereichs lässt sich also

---

<sup>132</sup> Vgl. Unterkapitel 1.3 (Forschungsziele).

erweitern. Die nachfolgend für den Zweck der Validierung vorgestellte Methode ist eine universelle Vergleichsmethode für zwei Systemanschauungen, in der die Übereinstimmungsqualität einer Systemabbildung im Vergleich zu der anderen bewertet wird. Übergeordnet muss deshalb von einer Vergleichsmethode für eine Systemanschauung und eine referenzierte Systemanschauung (kurz: Referenz) gesprochen werden. Die Methode lässt sich folglich u.a. auch auf zwei unterschiedliche Simulationsanwendungen, Theorien, Messsysteme und deren Kombinationen anwenden, um deren Übereinstimmung objektiv zu bewerten. Einige Praxisbeispiele für den Anwendungsbereich der Methode sind in Tabelle 4-1 aufgeführt.

Tabelle 4-1: Beispielhafte Anwendungsbereiche der neuen Vergleichsmethode

Anwendungsbereich	Systemabbildung	Referenz
<b>Validierung</b>	Simulation	Messung
<b>Simulationsvergleich</b>	Software A (z.B. CarMaker)	Software B (z.B. ADAMS)
<b>Übertragbarkeitsanalyse</b>	Messung (z.B. mit Reifen der Dimension 195/65 R15)	Messung (z.B. mit äquivalenten Reifen der Dimension 215/45 R17)
<b>Gültigkeitsanalyse</b>	Theorie (z.B. Physik der Signalausbreitung)	Messung (z.B. Entfernungsmessung mit Ultraschallsensor)

Im Hinblick auf die Zielanwendung, die im Fokus der Entwicklung steht – die Validierung von Simulationen – wird die Systemabbildung nachfolgend zur Erläuterung der Methode durch die Simulation und die Referenz durch den Realversuch bzw. die Messung repräsentiert. Die Begriffe sind also synonym zu verstehen und können für die Übertragung auf andere Vergleiche gemäß Tabelle 4-1 ersetzt werden. Auf diese Universalität der Methode wird im Rahmen der Bewertung in Abschnitt 6.2.1 erneut eingegangen.

Der Zielanwendungsbereich der nachfolgend vorgestellten Validierungsmethode ist durch die in Unterkapitel 1.3 definierten Rahmenbedingungen spezifiziert. Zusammengefasst gilt:

- Die Methode adressiert Anwendungsdomänen, in denen bestimmte Simulationsanwendungen zyklisch für unterschiedliche Systemvarianten wiederholt werden, wie es beispielsweise in der Produktentwicklung und speziell in der Fahrzeugentwicklung der Fall ist. In anderen Anwendungsbereichen, in denen keine statistische Qualitätsaussage gefordert ist, z.B. bei der Einzelsimulation einer spezifischen Systemvariante, bleibt der Validierungsprozess auch anwendbar. Der Vorteil der erhöhten Effektivität durch statistische Validitätsaussagen und die Bewertung absoluter und relativer Kennwertprädiktionen kann hier jedoch nicht erzielt werden.<sup>133</sup>

<sup>133</sup> Vgl. Unterkapitel 6.1 (Erfüllung der Konzeptanforderungen).

- Die Modelle bzw. die Softwareumgebungen sind für die Simulationsanwendungen konstant und von der Systemvariante unabhängig. Die Systemvarianten werden durch unterschiedliche Modellparametrierungen abgebildet.
- Es werden ausschließlich objektive Systemeigenschaften untersucht. Die Ausgangsgrößen der Simulationsanwendungen sind definiert.
- An die Bestimmung der Systemeigenschaften werden Genauigkeitsanforderungen gestellt.
- Die Modellparametrierung erfolgt nach einem definierten Prozess und erfährt eine Qualitätskontrolle, sodass die relative Datenvalidität guter Kontrollierbarkeit unterliegt.
- Unterschiedliche Systemvarianten können Messungen in der Praxis unterzogen werden, um Referenz- bzw. Vergleichsdaten für die Simulation zu erheben.

Aus den in Unterkapitel 3.2 aufgeführten Defiziten und den in Abschnitt 2.1.4 zusammengefassten Validierungsstudien ergeben sich Anforderungen (Anf.) für eine optimierte Validierungsmethode, anhand derer die Methode in Unterkapitel 6.1 bewertet wird.<sup>134</sup>

**Anf. 1** Die *Effektivität* – d.h. der Erkenntnisgewinn sowie der Nutzen – der Validierungsstudie lässt sich steigern, indem ...

- a) ... sich Validitätsaussagen nicht nur auf eine spezifische Systemvariante beziehen, sondern einen *erweiterten Gültigkeitsbereich* aufweisen.
- b) ... die *prädiktiven Fähigkeiten* der Simulation im Fokus der Bewertung stehen. Dies bedeutet, dass auch eine Qualitätsbewertung für die Simulation von Systemvarianten erfolgen muss, für die keine Messdaten zum direkten Vergleich bereitstehen. Insbesondere in der Fahrzeugentwicklung können nicht alle Fahrzeugvarianten Messungen unterzogen werden und in frühen Entwicklungsphasen stehen ohnehin keine Realfahrzeuge zur Verfügung. Dies impliziert, dass Validierungsstudien deutlich seltener als die simulationsbasierten Systemuntersuchungen durchgeführt werden müssen.<sup>135</sup>
- c) ... die Simulationsqualität für ihre *beiden Einsatzzwecke* – (1) die Vorhersage absoluter Kennwerte für eine bestimmte Systemvariante und (2) den relativen Vergleich unterschiedlicher Systemvarianten, d.h. die Vorhersage relativer Eigenschaftsunterschiede (A-B-Vergleiche) – bewertet wird.
- d) ... *Daten-, Modell- und Simulationsvalidität* getrennt voneinander betrachtet werden. Für den beschriebenen Hauptanwendungsbereich (konstantes Modell, fest definierter Parametrierungsprozess) bringt eine Aussage über die Simulationsvalidität den größten Praxisnutzen.

---

<sup>134</sup> Vgl. Viehof, M. et al.: Objektivierungspotenzial der operativen Validierung, 2016, S. 417 ff / Viehof, M. et al.: Validierungskonzept für die Vertikaldynamik, 2017, S. 148 ff / Viehof, M.; Winner, H.: Research Methodology for a New Validation Concept, 2018, S. 1 ff / Viehof, M.; Winner, H.: Forschungsstand der Validierung, 2017, S. 25, 73 ff.

<sup>135</sup> Vgl. Anf. 2 (Effizienz).

- Anf. 2** Die **Effizienz** der Validierungsstudie lässt sich steigern, weil infolge der statistischen Absicherung nicht jede Systemvariante anhand von spezifischen Vergleichsdaten dieser Variante validiert werden muss. Validierungsstudien müssen nur einmalig pro Anwendung und Gültigkeitsbereich – und damit nicht wie bisher einmalig pro Kombination aus Systemvariante (hier: Fahrzeug) und Testanwendung – durchgeführt werden.
- Anf. 3** Die **Stärkung des Vertrauens** in die Simulation und die **Praxisrelevanz** der Validierungsstudie erfordern vom Validierungsprozess die Erfüllung des Qualitätsmerkmals<sup>136</sup> ...
- a) ... *Anforderungsbezug*. Sowohl die Auslegung der Validierungsstudie als auch die Validitätsbewertung sind an spezifischen Anforderungen des Anwendungszwecks auszurichten und anzupassen.
  - b) ... *Praktikabilität*. Der Validierungsprozess muss an bestimmte Rahmenbedingungen, wie z.B. den zulässigen Aufwand der Validierungsstudie sowie die zur Verfügung stehenden Systemvarianten und Messgeräte zur Vergleichsdatenerhebung, anpassbar sein. Auch bei etwaigen Kompromissbildungen muss die Validierungsmethode anwendbar bleiben.
  - c) ... *Nachvollziehbarkeit*. Dieses Merkmal adressiert die Gestaltung des Validierungsprozesses und die logische Verknüpfung der Teilprozesse. Von ihm hängt die Akzeptanz der Methode ab.
  - d) ... durchgängige *Objektivität*. Sämtliche Schritte, die die Auslegung, die Durchführung und die Auswertung der Validierungsstudie betreffen, sind durch die Anwendung definierter Techniken vorgegeben, sodass größtmögliche Anwenderunabhängigkeit erzielt wird.
- Anf. 4** Die Validierungsmethode muss die **Wahrscheinlichkeit von Falschaussagen minimieren**, indem...
- a) ... potenzielle *systematische Fehler* im Vergleich von Messung und Simulation identifiziert und ihre Einflussnahme auf die Validitätsbewertung minimiert werden. Beispielhaft ist hier die Eigenschaftsänderung des Systems durch Ausstattung mit Messtechnik zu nennen.
  - b) ... eine Analyse zur Vermeidung von *Falsch-Positiv-Aussagen* durchgeführt wird. Die in Abschnitt 2.1.4 als Risiko des Modellanwenders bezeichnete Fehlentscheidung, eine nicht valide Simulation als valide zu bewerten, muss möglichst ausgeschlossen werden.
- Anf. 5** Die **Ergebnisdarstellung** der Validierungsstudie muss zur Erzielung von Akzeptanz und eines erhöhten Praxisnutzens ...
- a) ... alle *relevanten Informationen* über die Validierungsstudie übersichtlich zusammenfassen.
  - b) ... dynamisch an *unterschiedliche Genauigkeitsanforderungen* anpassbar sein.

---

<sup>136</sup> Vgl. Viehof, M. et al.: Objektivierungspotenzial der operativen Validierung, 2016, S. 424.

- c) ... als *Entscheidungsgrundlage* für den häufig auftretenden Abwägungsprozess zwischen Simulation und Messung dienen können. Dieser bezieht sich auf die Frage, ob die Simulationsgüte ausreichend hoch ist, um die Messung ersetzen zu können.
- d) ... für den *Vergleich unterschiedlicher Validierungsstudien*, wie z.B. unterschiedliche Modelle oder Simulationsumgebungen, geeignet sein, indem deren Einfluss auf die Simulationsvalidität einer bestimmten Anwendung aufgezeigt wird.
- e) ... klar *verständlich und aussagekräftig* sein, um für unterschiedliche Interessengruppen, wie z.B. Simulations- und Versuchsingenieure sowie fachfremde Entscheidungsträger, handhabbar und nutzbringend zu sein.

## 4.2 Validierungskonzept

Die Anforderungsdefinition in Unterkapitel 4.1 bedingt, dass das neue Validierungskonzept von dem üblichen singulären Vergleich<sup>137</sup> von Messung und Simulation Abstand nimmt. Zur Erfüllung von Anf. 1 (Effektivität) und Anf. 2 (Effizienz) muss ein statistischer Nachweis durch Untersuchung der Simulation in unterschiedlichen Arbeitspunkten erfolgen. Dieses Prinzip ist in Abbildung 4-2 dargestellt.

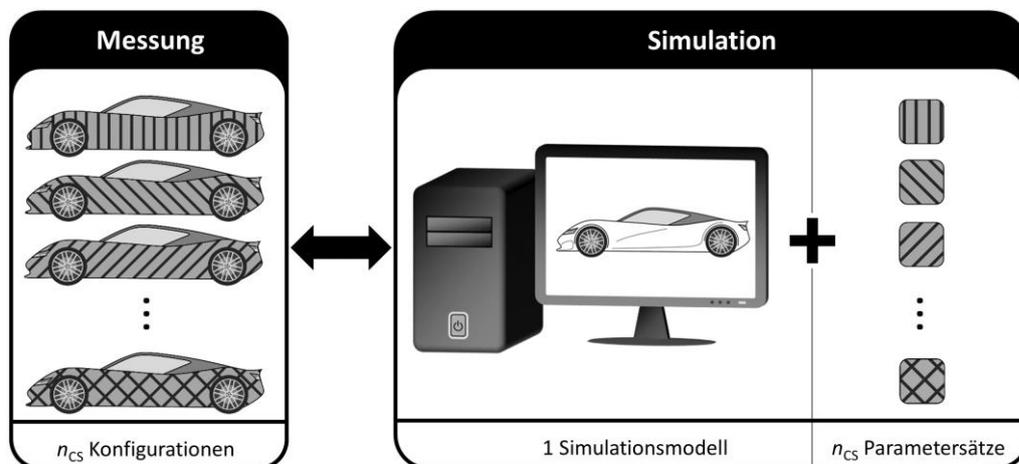


Abbildung 4-2: Prinzip der statistischen Validierung<sup>138</sup>

Im Rahmen einer Validierungsstudie werden mehrere ( $n_{CS} > 1$ ) unterschiedliche Systemkonfigurationen mit ebenso vielen Simulationen verglichen, wobei das Simulationsmodell nicht verändert wird, sondern lediglich die Parametrierung des Modells an die unterschiedlichen Fahrzeuge angepasst wird.

<sup>137</sup> Vgl. Unterkapitel 3.2 (Bewertung des Forschungsstands).

<sup>138</sup> Quelle: Modifiziert nach Viehof, M.; Winner, H.: Research Methodology for a New Validation Concept, 2018, S. 4.

Von Konfigurationen wird gesprochen, weil es sich im Anwendungsbereich der Fahrdynamik nicht zwingend um unterschiedliche Fahrzeuge handeln muss. Für die statistische Untersuchung kann es legitim sein, sofern es die Anforderungen an die Studie zulassen, die Eigenschaften eines Fahrzeugs zu verändern und damit nur an definierten Stellen der Parametersätze Änderungen vorzunehmen.<sup>139</sup>

Das Konzept hält aus den Gründen, die in den Abschnitten 2.1.3.1 und 2.1.4 erläutert sind, am Vergleich von Mess- und Simulationsdaten fest. Messdaten unterliegen jedoch Fehlern und Unsicherheiten.<sup>140</sup> Die Identifikation von Mess- und Simulationsungenauigkeiten stellt Anforderungen an die Versuchsplanung.<sup>141</sup>

Die Analyse konzentriert sich auf die Übereinstimmungsgenauigkeit von Simulation und Messung für eine möglichst große Konfigurationsanzahl  $n_{CS}$ . Daraus lässt sich die Qualität der Simulationsergebnisse für die betrachtete Anwendung statistisch – d.h. losgelöst von einem spezifischen Fahrzeug und damit in einem definierten Parameterraum allgemeingültig – bewerten.<sup>142, 143</sup>

Liegt der Parametersatz einer Systemvariante, die nicht im Rahmen der Validierungsstudie als Konfigurationsstichprobe einem Vergleich unterzogen wurde, innerhalb des validierten Parametrierungsbereichs, liefert das Validierungsverfahren durch Interpolation dennoch eine objektiv abgesicherte – aber keine verifizierte – Auskunft über deren Simulationsvalidität. Bei Kenntnis des Systemverhaltens außerhalb des betrachteten Parametrierungsbereichs – z.B. bei Untersuchung eines linearen Systems – können die Validierungsergebnisse auch extrapolativ auf den Parameterbereich übertragen werden.<sup>144</sup>

Erst die gleichzeitige Betrachtung unterschiedlicher Konfigurationen ermöglicht, neben der Qualitätsbewertung absoluter Kennwertvorhersagen, auch die Bewertung, wie gut die Simulation für die Vorhersage relativer Eigenschaftsunterschiede zwischen verschiedenen Systemvarianten geeignet ist, was für den relativen Vergleich unterschiedlicher Systemvarianten relevant

---

<sup>139</sup> Vgl. Abschnitt 4.4.1 (Anforderungsdefinition) und Abschnitt 4.4.2 (Auslegung der Validierungsstudie).

<sup>140</sup> Vgl. Abschnitt 4.4.5 (Empirische Validitätsanalyse) und Unterkapitel 4.5 (Unsicherheiten und Gegenmaßnahmen).

<sup>141</sup> Vgl. Abschnitt 4.4.3 (Versuchsvorbereitung) und Unterkapitel 4.5 (Unsicherheiten und Gegenmaßnahmen).

<sup>142</sup> Die statistische Auslegung und Versuchsplanung der Validierungsstudie sind Themen der Abschnitte 4.4.2 (Auslegung der Validierungsstudie) und 4.4.3 (Versuchsvorbereitung).

<sup>143</sup> Dies betrifft Anf. 1a (Effektivität durch erweiterten Gültigkeitsbereich). Vgl. Unterkapitel 4.1 (Diversität der Anwendungsbereiche und Anforderungen an die Methode).

<sup>144</sup> Dies betrifft Anf. 1b (Effektivität durch Prädiktionsfähigkeit). Vgl. Unterkapitel 4.1 (Diversität der Anwendungsbereiche und Anforderungen an die Methode).

ist.<sup>145</sup> Auf diese Weise wird der maximale Informationsgehalt der erhobenen Versuchsdaten für die Validitätsbewertung genutzt.<sup>146</sup>

Unter der Voraussetzung, dass die unterschiedlichen Konfigurationen mit gleicher Genauigkeit – d.h. mit konstanter Datenvalidität – in der Simulationsumgebung parametrisiert werden, kann anhand der Simulationsvalidität auch Rückschluss auf die Modellvalidität gezogen werden.<sup>147</sup> Aus dem Vergleich von Mess- und Simulationsergebnissen über die  $n_{CS}$  Konfigurationen kann bei Auftreten von Abweichungen die Ursache<sup>148</sup> – Daten- oder Modellinvalidität – erkannt werden.<sup>149</sup>

Objektivität bedingt, dass die Messungen und Simulationen anhand diskreter Kennwerte miteinander verglichen werden. Wenn, ähnlich wie bei der subjektiven Augenscheinvalidierung, ganze Kurvenverläufe miteinander verglichen werden sollen, ist es erforderlich, diese in Form weniger, diskreter Werte gegenüberzustellen, was eine Datenkomprimierung erfordert. Neben der Betrachtung von Korrelationsmaßen gibt es hierfür weitere Verfahren, die in Abschnitt 4.4.2 vorgestellt werden.

Die Validierung beruht entsprechend der Grundlagen in Abschnitt 2.1.2 auf empirischen Beobachtungen. Das Prinzip der Induktion bedingt, dass aus den stichprobenbasierten Beobachtungen eine allgemeingültige Aussage über die Simulationsqualität getroffen wird. Diese Validitätsaussage kann in der Praxis nicht verifiziert werden, da dies eine Durchführung der Validierungsstudie mit allen möglichen Konfigurationen voraussetzen würde. Aus diesem Grund kann das neue Validierungskonzept nur über die Anzahl der Konfigurationen und über eine gezielte Auswahl der voraussichtlich besten Konfigurationsstichproben die Effektivität des Vertrauensnachweises maximieren. Als beste Stichproben sind Konfigurationen zu verstehen, für die eine Falsifikation – d.h. ein Nachweis, dass die Simulation die geforderte Genauigkeit in diesem Arbeitspunkt nicht erfüllt – am wahrscheinlichsten bzw. von stärkster negativer Auswirkung auf den Nutzen der Simulation ist.<sup>150</sup> Werden im Rahmen des statistischen Validierungsprozesses derartige Falsifikationen nachgewiesen, sind diese als besonders wertvolle Information zu betrachten, da durch sie klar verifiziert wird, in welchem Parametrierungsbereich das Simulationsmodell nicht valide ist. Eine solche Einschränkung des Gültigkeitsbereichs ist mit dem bisherigen Validierungsvorgehen nicht möglich und deshalb als weiterer Vorteil des neuen Konzepts zu bewerten.

---

<sup>145</sup> Vgl. Abschnitt 4.4.5.3 (Simulationsvalidierung).

<sup>146</sup> Dies betrifft Anf. 1c (Effektivität durch Bewertung beider Einsatzzwecke der Simulation). Vgl. Unterkapitel 4.1 (Diversität der Anwendungsbereiche und Anforderungen an die Methode).

<sup>147</sup> Vgl. Abschnitt 2.1.1 (Terminologie der Modellierung und Simulation) und Abbildung 2-2.

<sup>148</sup> Vgl. Abschnitt 4.4.5 (Empirische Validitätsanalyse).

<sup>149</sup> Dies betrifft Anf. 1d (Effektivität durch Trennung von Daten-, Modell- und Simulationsvalidität). Vgl. Unterkapitel 4.1 (Diversität der Anwendungsbereiche und Anforderungen an die Methode).

<sup>150</sup> Vgl. Abschnitt 4.4.2.3 (Konfigurationsstichproben).

Da das Ergebnis der Validierungsstudie nicht auf einer Verifikation beruht, sondern aus Falsifikationsuntersuchungen induktiv erhoben wird, darf aus streng wissenschaftlicher Sicht nie von einer validen Simulation gesprochen werden. Stattdessen lautet die korrekte Formulierung, dass aufgrund keiner aufgetretenen Falsifikation dem Modell keine Invalidität nachgewiesen werden konnte. Diese Formulierung ist jedoch für die Praxis, in der es üblich ist, Simulationen als valide zu bezeichnen, nicht tauglich.<sup>151</sup>

Deshalb wird ein neuer Validitätsbegriff eingeführt, der die Grundsätze der Wissenschaftsphilosophie nicht verletzt und gleichzeitig für die praktische Anwendung geeignet ist:

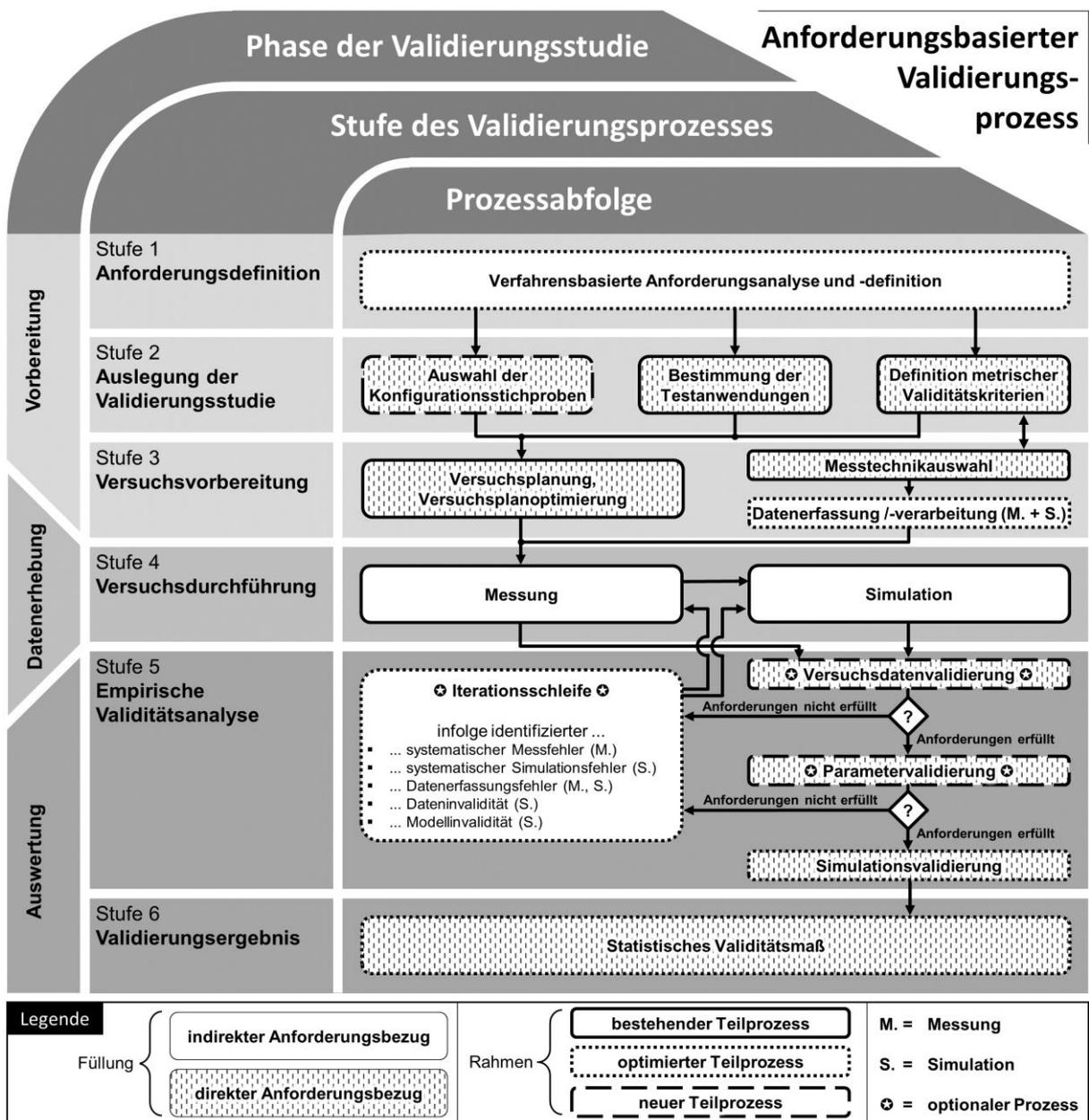
**Stichprobenvalidität** bzw. eine **stichprobenvalide** Simulation liegt vor, wenn die Validität im Rahmen der empirischen Stichprobenversuche nicht falsifiziert werden konnte. Sie drückt aus, dass sich die Simulation bzw. das Modell nach Popper bewährt hat.<sup>152</sup> Der Begriff impliziert, dass die Validitätsaussage aus der empirischen Beobachtung mehrerer Konfigurationsstichproben resultiert. Stichprobenvalidität kann im Gegensatz zu allgemeingültiger Validität verifiziert und damit objektiv nachgewiesen werden.

---

<sup>151</sup> Vgl. Abschnitt 2.1.2 (Wissenschaftsphilosophische Betrachtung).

<sup>152</sup> Vgl. Popper, K.: Logik der Forschung, 1994, S. 198 ff.

## 4.3 Validierungsprozess

Abbildung 4-3: Neuer anforderungsbasierter Prozess für die statistische Validierung<sup>153</sup>

<sup>153</sup> Quelle: Modifiziert nach Viehof, M. et al.: Objektivierungspotenzial der operativen Validierung, 2016, S. 424 / Viehof, M. et al.: Validierungskonzept für die Vertikaldynamik, 2017, S. 150.

In Abbildung 4-3 ist der neue Prozess für die statistische Validierung dargestellt. Dieser resultiert aus der Anpassung des heutigen Validierungsprozesses<sup>154</sup> unter Berücksichtigung der neuen Konzeptanforderungen<sup>155</sup> und Konzeptdefinition<sup>156</sup>.

Entsprechend der Legende in Abbildung 4-3 kennzeichnet die Umrahmung eines Teilprozesses die Veränderungen gegenüber der heutigen Prozessstruktur in Abbildung 3-2. Hierbei ist zu unterscheiden, ob ein Teilprozess im Wesentlichen unverändert übernommen wurde, neu eingeführt wurde oder optimiert, d.h. methodisch grundlegend überarbeitet, wurde. Teilprozesse, die für eine objektive und nachvollziehbare Durchführung Informationen aus dem ersten Teilprozess, der Anforderungsdefinition, erfordern, sind ebenfalls hervorgehoben.

Die Gestaltung der einzelnen Teilprozesse resultiert jeweils aus einem systemtechnischen Problemlösungszyklus, analog zu den Ausführungen in Unterkapitel 1.4. Hierin werden die nachfolgenden Forschungsfragen systematisch beantwortet:

- Was ist der Zweck des Teilprozesses?
- Welches sind die Eingangs- und Ausgangsinformationen?
- Welche Lösungen zur objektiven Transformation der Prozesseingänge in die Prozessausgänge bietet der Stand der Forschung?
- Welche dieser Lösungen ist für den Zweck der Validierung die beste und welche Kriterien sind für diese Bewertung heranzuziehen? Müssen Adaptionen für den Einsatz in der Validierung vorgenommen werden?
- Lässt sich der Teilprozess anwenderneutral in Form einer automatisierten bzw. fest definierten Durchführung gestalten?

Tabelle 4-2 zeigt eine Übersicht aller Teilprozesse inklusive einer Kurzbeschreibung des jeweiligen Zwecks, einer Zuordnung der Objektivierungstechniken und der Zuweisung eines Abschnitts dieser Arbeit, in dem die objektive Prozessdurchführung – d.h. die Antworten auf die oben aufgeführten Forschungsfragen – beschrieben ist.

---

<sup>154</sup> Vgl. Abbildung 3-2 und Unterkapitel 3.1 (Struktur heute üblicher Validierungsansätze).

<sup>155</sup> Vgl. Unterkapitel 4.1 (Diversität der Anwendungsbereiche und Anforderungen an die Methode).

<sup>156</sup> Vgl. Unterkapitel 4.2 (Validierungskonzept).

Tabelle 4-2: Zusammenfassung des neuen Validierungsprozesses<sup>157</sup>

Prozessstufe	Teilprozess	Kurzbeschreibung	Objektivierung	Verweis (Abschnitt)
1 Anforderungsdefinition	Verfahrensbasierte Anforderungsanalyse und -definition	Aus der Simulationsanwendung werden die Anforderungen für den Validierungsprozess abgeleitet. Hierbei werden globale Hauptanforderungen, Subsystem- und Zusatzanforderungen sowie Anforderungen an die statistische Absicherung unterschieden.	Definitionsverfahren, Systemanalyse	4.4.1
	Definition metrischer Validitätskriterien (MVC)	Die Größen, die für die Validitätsbeurteilung herangezogen werden, leiten sich unmittelbar aus der Anforderungsdefinition ab. Anhand einer Systemanalyse wird überprüft, ob diese robust erfassbar und in der Testanwendung aussagekräftig sind. Kurvenverläufe werden komprimiert.	Anforderungsbezug, Techniken zur MVC-Festlegung	4.4.2.1
2 Auslegung der Validierungsstudie	Bestimmung der Testanwendungen	Häufig sind die Versuche durch die Anforderungen bereits festgelegt. Andernfalls müssen relevante Arbeitspunkte des Systems identifiziert werden. Die metrischen Validitätskriterien müssen auf diese Arbeitspunkte eine hohe Sensitivität aufweisen und robust erfassbar sein.	Anforderungsbezug, Sensitivitätsanalyse	4.4.2.2
	Auswahl der Konfigurationsstichproben	Ziele dieses Prozesses sind die Identifikation von Konfigurationsstichproben, für die eine Falsifikation der gewünschten Simulationsqualität am wahrscheinlichsten ist, und damit das Erreichen einer hohen Effektivität. Aufschluss hierüber geben Parametersensitivitäten.	Anforderungsbezug, Sensitivitätsanalyse	4.4.2.3
3 Versuchsvorbereitung	Versuchsplanung, Versuchsoptimierung	Die Anforderungen an die statistische Absicherung bestimmen die Versuchsplanung. Bei der Versuchsoptimierung werden einerseits eine effiziente Umsetzung in der Praxis und andererseits eine Reduktion des Versuchsumfangs bei möglichst geringem Erkenntnisverlust angestrebt.	Anforderungsbezug, DoE-Verfahren, Statistik	4.4.3.1
	Messtechnikauswahl	Die erforderliche Messtechnik resultiert aus der Definition der metrischen Validitätskriterien. In der Praxis müssen Kompromisse eingegangen werden, wenn nicht alle gewünschten Messgrößen mit der zur Verfügung stehenden Messtechnik erfassbar sind oder der Aufwand zu groß ist.	Anforderungsbezug	4.4.3.2
4 Versuchsdurchführung	Datenerfassung / -verarbeitung	Dieser Teilprozess erfordert Messsystem- und Simulationsverständnis, um systematische Fehler zu unterbinden. Die Datenerhebung muss zwischen Messung und Simulation so angelegentlich werden, dass den Vergleichsdaten möglichst keine zusätzlichen Ungenauigkeiten aufgeprägt werden.	Datenkonditionierung	4.4.3.3
	Messung Simulation	Entsprechend der vorhergehenden Versuchsplanung werden die Messungen mit den definierten Konfigurationsstichproben durchgeführt. Dabei werden die lastfallbeschreibenden Informationen (z.B. Eingaben des Fahrers im Fahrversuch) gemessen und für die Simulation bereitgestellt. Um Schwankungen der Versuchsausgangsgrößen, die aus variierenden Fahrzeuganregungen resultieren, gleichermaßen auf die Simulation zu übertragen, werden die Testanwendungen als Open-Loop-Versuche auf Basis der gemessenen Lastfallinformationen simuliert.	Bezug zu Versuchsplanung Bezug zu Versuchsplanung	4.4.4
5 Empirische Validitätsanalyse	optional: Versuchsdatenvalidierung (+ Iteration)	Anhand der Übereinstimmungsgenauigkeit der Sensorsignale wird geprüft, ob die Lastfälle abweichen, ob Datenerfassungsfehler vorliegen und ob die Parametrierung starke Abweichungen zwischen Messung und Simulation hervorruft. Diese Fehler können iterativ korrigiert werden.	Anforderungsbezug, Sensorsignal- bzw. Lastfallanalyse	4.4.5.1
	optional: Parametervalidierung (+ Iteration)	Dieser Prozess analysiert, wie sich die Konfigurationen auf die Hauptausgangsgrößen der Testanwendungen auswirken. Auf diese Weise können die Stichprobenauswahl und die physikalisch richtige Abbildung sensibler Parameter im Modell geprüft und ggf. iterativ verbessert werden.	Anforderungsbezug, Sensitivitätsanalyse (OFAT)	4.4.5.2
6 Validierungsergebnis	Simulationsvalidierung	In diesem Prozess wird die Übereinstimmungsgenauigkeit der metrischen Validitätskriterien zwischen Messung und Simulation unter Berücksichtigung von Genauigkeitsanforderungen und identifizierten Unsicherheiten für alle Konfigurationsstichproben bewertet.	Anforderungsbezug, Validitätskriterienvergleich, Labelvergabe	4.4.5.3
	Statistisches Validitätsmaß	Die Ergebnisse der Simulationsvalidierung werden über eine Metrik in Validitätsmaße umgerechnet, die Auskunft darüber geben, wie gut die Simulation – statistisch betrachtet – für die Vorhersage der absoluten Kennwerte und relativer Kennwertänderungen geeignet ist.	Anforderungsbezug, statistikbasierte Metrik für Validität	4.4.6

<sup>157</sup> Vgl. Viehof, M. et al.: Objektivierungspotenzial der operativen Validierung, 2016, S. 424 ff / Viehof, M. et al.: Validierungskonzept für die Vertikaldynamik, 2017, S. 150 ff.

## 4.4 Objektivierung und Verknüpfung der Teilprozesse

Die folgenden Abschnitte sind an der Prozessstruktur entsprechend Abbildung 4-3 und an Tabelle 4-2 ausgerichtet. Sie geben Aufschluss über die Prozesssystematik und die Objektivierung der einzelnen Teilprozesse. Das Ziel ist die Bereitstellung eines Validierungsvorgehens, das sich in weiten Bereichen automatisieren lässt und zu einer anwenderunabhängigen Validitätsaussage führt. Konkrete Beispiele für die Durchführung der einzelnen Prozesse in Fahrdynamikstudien folgen in Kapitel 5.

### 4.4.1 Anforderungsdefinition

Der erste Teilprozess einer Validierungsstudie beschäftigt sich mit der Definition sämtlicher Anforderungen, die innerhalb der Studie berücksichtigt werden müssen. Insbesondere die detaillierte Angabe des Simulationszwecks, d.h. welche Informationen bzw. Kennwerte aus der Simulation erhoben werden, und die Definition der Genauigkeit, die von den Simulationsergebnissen gefordert wird, stellen eine Grundvoraussetzung für eine objektive und nachvollziehbare Prozessgestaltung dar.<sup>158</sup> Eine Übersicht über die Anforderungsdefinition zeigt Abbildung 4-4.

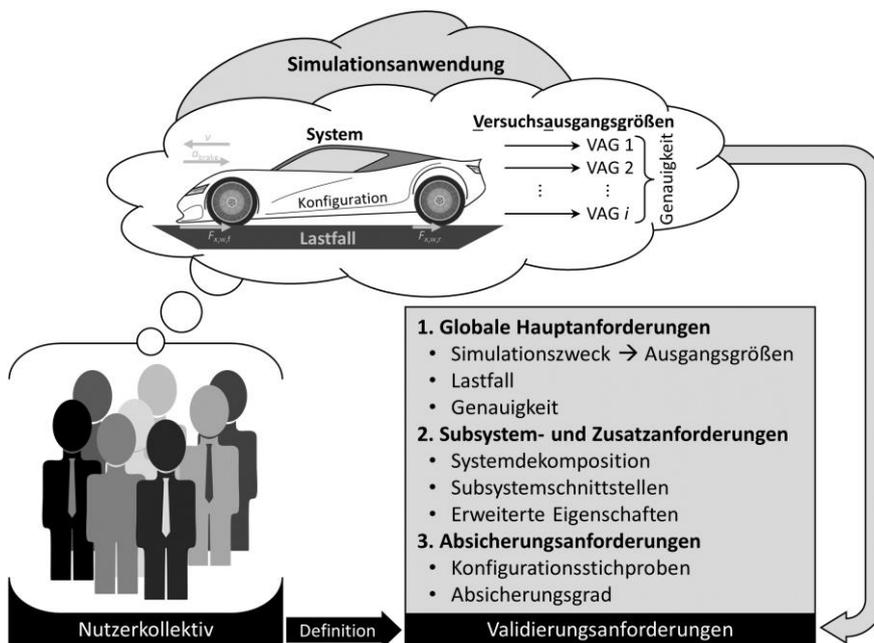


Abbildung 4-4: Übersicht der verfahrensbasierten Definition von Validierungsanforderungen

Zur Objektivierung und zur Vereinheitlichung der Prozessgestaltung wird ein Definitionsverfahren, das auf dem Fragenkatalog in Anhang A.1.1 basiert, eingeführt. Dieser Fragenkatalog

<sup>158</sup> Vgl. Unterkapitel 3.2 (Bewertung des Forschungsstands).

folgt aus einer Analyse der publizierten Validierungsstudien<sup>159</sup> und einer Anwenderbefragung im industriellen Umfeld. Im Fokus der Untersuchung standen die fehlenden Informationen, die zu Misstrauen gegenüber der Simulation bzw. der Validierungsergebnisse führen. Als wichtigste Erkenntnis stellt sich heraus, dass für den Nutzer der Simulationsergebnisse eindeutig kommuniziert werden muss, für welchen Einsatzzweck das Modell validiert wird und welche Qualitätsanforderungen es erfüllen muss, um als stichprobenvalide bewertet zu werden. Diese Informationen werden im Definitionsverfahren als globale Hauptanforderungen bezeichnet. Auf ihrer Basis kann der Nutzer selbst entscheiden, ob die Validitätsaussage auf seinen spezifischen Anwendungsbereich übertragbar und damit für ihn gültig ist.

Um größtmöglichen Nutzen einer Validierungsstudie zu erzielen, sollte das gesamte Nutzerkollektiv entsprechend Abbildung 4-4 in die Anforderungsdefinition eingebunden werden. Auf diese Weise wird gewährleistet, dass die verschiedenen Anforderungen der unterschiedlichen Interessengruppen durch eine einzige Studie erfüllt werden können. Als Beispiel sei hier die Vertikaldynamiksimulation von Fahrzeugen genannt. Applikationsingenieure für Fahrwerkregelsysteme schauen auf andere objektive Kennwerte und Frequenzbereiche als z.B. die Experten für Schwingungskomfort. Ein Entscheidungsträger wiederum interessiert sich ggf. nur für die Genauigkeit von Komfortkennwerten, die sich nach einer Berechnungsvorschrift aus bestimmten Sensorsignalen berechnen lassen, um aus dem Vergleich unterschiedlicher Varianten festzulegen, welche Dämpferkonfiguration in die Serienproduktion geht. Werden diese unterschiedlichen Anforderungen des Nutzerkollektivs in der Validierungsstudie berücksichtigt, kann sichergestellt werden, dass diese für alle Interessengruppen gleichermaßen relevante Ergebnisse bereitstellt, was sich positiv auf die Effizienz der Nachweismethode auswirkt.

Das Definitionsverfahren deckt drei Bereiche ab, die gemäß Abbildung 4-4 als (1) globale Hauptanforderungen, (2) Subsystem- und Zusatzanforderungen sowie (3) Absicherungsanforderungen bezeichnet werden. Diese Anforderungsbereiche werden nachfolgend näher spezifiziert.<sup>160</sup>

##### 1. Globale Hauptanforderungen

Sie definieren den Einsatzzweck der Simulation und folgen aus der Weiterverwendung der Simulationsergebnisse. Festzulegen sind die Ausgangsgrößen, etwaige Lastfallbedingungen – z.B. wenn ein spezifischer Fahrversuch gefordert ist oder die Testanwendung einen bestimmten Frequenzbereich abdecken muss – und die Genauigkeit, die die Ausgangsgrößen aufweisen sollen.

Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die höchste Genauigkeitsanforderung die Übereinstimmung mit der messbaren Genauigkeit des realen Systems ist. Die Forderung einer höheren Genauigkeit wäre für das geforderte Vertrauensniveau nicht nachweisbar und ist deshalb in der Validierung nicht zulässig.<sup>161</sup>

---

<sup>159</sup> Vgl. Viehof, M.; Winner, H.: Forschungsstand der Validierung, 2017, S. 12 ff.

<sup>160</sup> Vgl. Viehof, M. et al.: Validierungskonzept für die Vertikaldynamik, 2017, S. 154 ff.

<sup>161</sup> Vgl. Abschnitt 4.4.5 (Empirische Validitätsanalyse).

### 2. *Subsystem- und Zusatzanforderungen*

Sie sind relevant, wenn sich das Modell aus einzelnen Submodellen zusammensetzt und die Qualität der Submodelle in Bezug auf das Gesamtsystemverhalten ebenfalls untersucht werden soll. In der Fahrdynamiksimulation werden Anforderungen dieser Art meist definiert, da das Fahrverhalten maßgeblich durch die Variation einzelner Fahrwerkskomponenten verändert wird. Vor dem Hintergrund, den Einfluss unterschiedlicher Fahrwerksabstimmungen auf das Fahrverhalten bzw. die Aufbaubewegung simulieren zu können, muss die physikalisch richtige Abbildung der Submodelle in der Wirkkette untersucht und nachgewiesen werden.

Die für eine Simulationsanwendung relevanten Submodelle bzw. Übertragungstrecken lassen sich durch eine fachspezifische<sup>162</sup> Systemdekomposition identifizieren. Die Subsystemschnittstellen müssen definiert werden, da sie Anforderungen an die Messtechnik im Realversuch stellen.

Zuletzt können hier weitere Validierungsanforderungen niedrigerer Priorität definiert werden.

### 3. *Absicherungsanforderungen*

Sie sind in der statistischen Validierung von besonderer Bedeutung für die Versuchsplanung. Sie bestimmen maßgeblich über den Aufwand der Validierungsstudie.

Einerseits werden Anforderungen an die Konfigurationsstichproben formuliert. Diese betreffen im Wesentlichen den Parametrierungs- und damit den Gültigkeitsbereich der Ergebnisse. Für manche Simulationsanwendungen werden hier bereits Variationsparameter vorgegeben.

Andererseits wird der Grad der statistischen Absicherung spezifiziert. Dies bezieht sich auf die Granularität der Parametervariation, d.h. die Anzahl der zu untersuchenden Konfigurationsstichproben, und die Signifikanz der Ergebnisse, die Einfluss auf die Anzahl der Versuchswiederholungen nimmt.

## 4.4.2 Auslegung der Validierungsstudie

In der zweiten Stufe einer Validierungsstudie sind die drei Auslegungsmerkmale festzulegen:

1. Metrische Validitätskriterien → Was wird bewertet?
2. Testanwendung → Wie wird bewertet?
3. Konfigurationsstichproben → Was ist der Gültigkeitsbereich der Bewertung?

Dabei ist es nicht möglich, eine feste Reihenfolge vorzugeben, in der diese drei Auslegungsmerkmale festgelegt werden. Die Begründung liefert das Beziehungsdreieck in Abbildung 4-5, das die Abhängigkeit verdeutlicht. Die Auslegung der Studie gilt dann als erfolgreich, wenn für

---

<sup>162</sup> „Fachspezifisch“ bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Systemdekomposition von der jeweiligen spezifischen Anwendung abhängig ist und Fach- bzw. Systemkenntnisse voraussetzt.

jedes Merkmal die individuellen Anforderungen erfüllt werden<sup>163</sup> und die verknüpfenden Fragen aus Abbildung 4-5 positiv beantwortet werden können.

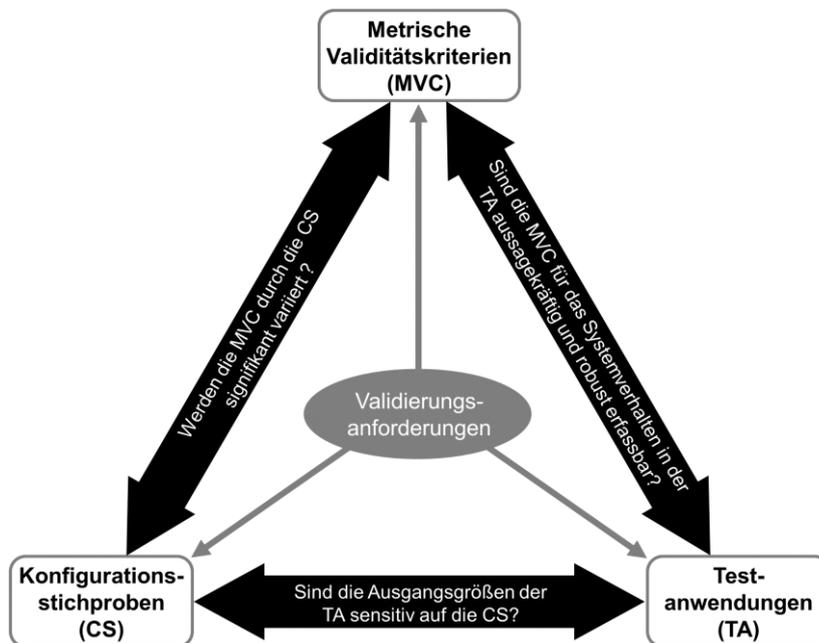


Abbildung 4-5: Beziehungsdreieck der Auslegungsmerkmale

Tabelle 4-2 kann entnommen werden, dass für die objektive Auslegung der Validierungsstudie Vorabuntersuchungen in der Simulationsumgebung durchgeführt werden. Besonders hervorzuheben sind die Sensitivitätsanalysen, die in Abschnitt 4.4.2.3 näher erläutert werden. Aufmerksame Betrachter werden dieses Vorgehen unter Umständen methodisch anzweifeln, da sich die Frage stellt, ob eine Validierungsstudie für ein Simulationsmodell sinnvoll mit Simulationsergebnissen, die dieses Modell liefert und deren Validität folglich nicht bekannt ist, ausgelegt werden kann. Eine nähere Auseinandersetzung hiermit führt zu dem Ergebnis, dass eben die Auslegung mit der Simulationsumgebung, die im Validierungsprozess bewertet wird, eine hohe Effektivität bewirkt. Denn die Voruntersuchungen haben zum Ziel, genau die Arbeitspunkte – sowohl bezüglich der Parametrierung als auch bezogen auf die Testanwendungen – auszuwählen, in denen die Simulation besonders hohe Sensitivitäten zeigt. Die Übereinstimmung mit der Messung stellt hier die größte Herausforderung für die Simulation dar, sodass die Stichproben mit der effektivsten Aussagekraft für Stichprobenvalidität ausgewählt werden. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Simulation deutlich geringere Streuungen aufweist als eine äquivalente Auslegung durch Voruntersuchungen mit praktischen Messungen, die jedoch meist aus Aufwandsgründen ohnehin nicht realisierbar sind. Eine Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse (FMEA) zeigt, dass bezüglich des realen Systems nicht repräsentative Simulationsergebnisse in der Vorbereitungsphase lediglich zu einer geringeren Effizienz, d.h. zu einem erhöhten Ver-

<sup>163</sup> Vgl. Abschnitte 4.4.2.1 (Metrische Validitätskriterien), 4.4.2.2 (Testanwendungen) und 4.4.2.3 (Konfigurationsstichproben).

suchsaufwand, und zu geringerer Effektivität, d.h. weniger signifikanten Konfigurationsstichproben, führen können.<sup>164</sup> Die Gültigkeit des objektiven Vergleichs von Simulations- und Messergebnissen und damit die Beurteilung der Stichprobenvalidität werden durch möglicherweise invalide Vorabsimulationen in der Vorbereitungsphase nicht beeinflusst. Hinzu kommt, dass für ein objektives Vorgehen keine Alternative zu einer simulationsbasierten Auslegung besteht und sich insbesondere kommerzielle Special Purpose-Werkzeuge<sup>165</sup> in bereits durchgeführten Fahrdynamik-Validierungsstudien<sup>166</sup> durch qualitativ belastbare Ergebnisse, die die Effektivität der Studien gegenüber einer Subjektivauslegung wesentlich steigern, bewährt haben. Aus diesen Gründen wird der Einsatz von Simulationen in der Vorbereitungsphase in jedem Fall empfohlen und als wichtiger Bestandteil in die neue Validierungsmethode aufgenommen.

#### 4.4.2.1 Metrische Validitätskriterien

Die metrischen Validitätskriterien<sup>167</sup> (MVC) werden maßgeblich in der vorhergehenden Anforderungsdefinition<sup>168</sup> festgelegt. Höchste Priorität haben die Ausgangsgrößen der Simulationsanwendung, die als globale Hauptanforderungen definiert sind. Aber auch die Kenngrößen der Subsystemschnittstellen bzw. der Übertragungsfunktionen auf Submodellebene, die als System- und Zusatzanforderungen definiert wurden, werden in die Liste der MVC übernommen.

Wie in Unterkapitel 4.2 beschrieben, erfordert die objektive Validitätsbewertung den Vergleich diskreter Kennwerte. In vielen Fällen werden Anforderungen jedoch allgemeingültiger formuliert, sodass Techniken zur Bestimmung von Vergleichskennwerten herangezogen werden müssen. Ein Beispiel hierfür ist die globale Hauptanforderung einer Fahrdynamik-Validierungsstudie, dass aus der Simulation der stationäre Lenkwinkelbedarf bestimmt werden soll. Folglich muss der Zusammenhang von Lenkwinkel und Querschleunigung validiert werden, was sich in unendlich vielen Arbeitspunkten realisieren und somit nicht durch einen einzigen Kennwert ausdrücken lässt. In der Regel wird eine Lenkwinkel-Querschleunigung-Kennlinie in einem quasistationären Kreisfahrtmanöver aufgezeichnet. Es stellt sich die Frage, wie diese Kurvenverläufe aus Simulation und Messung sinnvoll und objektiv anhand von Kennwerten miteinander verglichen werden können. Hierfür kommen unterschiedliche Verfahren in Frage. Drei dieser Techniken, die sich in der Validierungspraxis bewährt haben,<sup>169</sup> werden nachfolgend erläutert:

---

<sup>164</sup> Vgl. Viehof, M. et al.: Validierungskonzept für die Vertikaldynamik, 2017, S. 160.

<sup>165</sup> Vgl. Unterkapitel 2.2 (Fahrdynamiksimulation).

<sup>166</sup> Vgl. Kapitel 5 (Anwendbarkeitsanalyse in der Fahrdynamik).

<sup>167</sup> Englische Bezeichnung: metric validity criterion (MVC).

<sup>168</sup> Vgl. Abschnitt 4.4.1 (Anforderungsdefinition).

<sup>169</sup> Vgl. Kapitel 5 (Anwendbarkeitsanalyse in der Fahrdynamik) / Viehof, M.; Winner, H.: Forschungsstand der Validierung, 2017, S. 50 ff.

## 1. Bestimmung des Korrelationskoeffizienten

Mithilfe des empirischen Korrelationskoeffizienten lässt sich die Ähnlichkeit zweier Vektoren ausdrücken. Der „[...] empirische Korrelationskoeffizient  $r$  einer zweidimensionalen Stichprobe [...] vom Umfang  $n$  ist ein geeignetes Maß für die Stärke oder den Grad der linearen Abhängigkeit [...].“<sup>170</sup> Der Korrelationskoeffizient  $r$  für die zwei Signalvektoren  $X$  (z.B. Lenkwinkel aus der Simulation) und  $Y$  (z.B. Lenkwinkel aus der Messung) der Länge  $n$  mit identischem Bezugsvektor (z.B. Querbeschleunigung) berechnet sich aus den Varianzen  $s_x$  und  $s_y$  sowie der empirischen Kovarianz  $s_{xy}$  nach folgender Berechnungsvorschrift:<sup>171a</sup>

$$s_x^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (4.1)$$

$$s_y^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (4.2)$$

$$s_{xy} = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y}) \quad (4.3)$$

$$r = \frac{s_{xy}}{s_x \cdot s_y} \quad (4.4)$$

Der Korrelationskoeffizient  $r$  gibt an, wie gut sich die Signalabhängigkeit in einem Streudiagramm<sup>172</sup> durch eine Gerade annähern lässt. Er kann nur Werte zwischen -1 und +1 annehmen, wobei der Betrag ein Maß für die Übereinstimmungsgenauigkeit ist und das Vorzeichen anzeigt, ob die Regressionsgerade eine positive oder negative Steigung aufweist. Je näher der Betrag von  $r$  an 1 liegt, desto höher ist die Übereinstimmung der beiden Signalvektoren.<sup>171b</sup>

Neben dem empirischen Korrelationskoeffizienten bestehen weitere Verfahren zur Bestimmung von Korrelationsmaßen. Im technischen Bericht ISO/TR 16250:2013 werden beispielsweise unterschiedliche Metriken vorgestellt und verglichen, die u.a. die Übereinstimmungsgenauigkeit der Phase, der Amplitude und der Kurvenform der beiden miteinander verglichenen Signale unterscheiden.<sup>173</sup>

<sup>170</sup> Papula, L.: Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler, 2016, S. 626.

<sup>171</sup> Vgl. Papula, L.: Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler, 2016, (a) S. 620 f. | (b) S. 622 ff.

<sup>172</sup> Im Streudiagramm wird je ein Signalvektor auf der Abszisse und der Ordinate aufgetragen.

<sup>173</sup> Vgl. ISO/TR 16250: Objective rating metrics for dynamic systems, 2013 / ISO/TS 18571: Objective rating metric for non-ambiguous signals, 2014.

### 2. Umrechnung in charakteristische Kennwerte

Die Umrechnung ermittelter Zusammenhänge in charakteristische Kennwerte ist anwendungsabhängig. Die Beurteilung der Relevanz solcher metrischer Validitätskriterien erfordert Fachwissen. Nachfolgend werden einige Beispiele aufgeführt:

- Bei Schwingungsanalysen ist es üblich, den Effektivwert oder die mittlere Signalleistung zu berechnen.<sup>174</sup>
- Bei zeitbezogenen Signalen können Zeitintervalle zwischen zwei Ereignissen verglichen werden. So wird beispielsweise beim Fahrmanöver Lenkwinkelsprung die Dauer zwischen der Durchführung des Lenkwinkelsprungs und dem Erreichen des Maximums der folgenden Gierreaktion als Kennwert extrahiert.<sup>175</sup>
- In der Querdynamik ist es üblich, den linearen vom nichtlinearen Bereich der Fahrzeugreaktion zu unterscheiden. Im Querschleunigungsbereich von 0 m/s<sup>2</sup> bis ca. 4 m/s<sup>2</sup> können Zusammenhänge aufgrund der Linearität durch einen Gradienten ausgedrückt werden. So spiegelt beispielsweise der mittlere Eigenlenkgradient als einzelner Kennwert die Information der Lenkwinkelbedarfskurve in dem genannten Beschleunigungsbereich wider.<sup>176</sup>

### 3. Komprimierung der quasi-kontinuierlichen<sup>177</sup> Kurvenverläufe

Bei den beiden vorherigen Techniken geht die Information verloren, in welchen Bereichen der Vergleichskurven gute bzw. schlechte Übereinstimmung vorherrscht. Um diese Information nicht gänzlich zu verlieren und um Erkenntnisse aus der Validierung zu gewinnen, in welchen Bereichen die Simulationsqualität besonders gut bzw. schlecht ist, werden die quasi-kontinuierlichen Kurvenverläufe auf wenige Kennwerte komprimiert bzw. diskretisiert.

Bei diesem Vorgehen sollte vermieden werden, einzelne Wertepaare aus den Mess- und Simulationsdaten herauszuziehen, da dieses Vorgehen ein sehr großes Fehlerpotenzial, z.B. bei Signalrauschen, mit sich bringt. Stattdessen sollte über geeignete Gewichtung-

---

<sup>174</sup> Vgl. Kuttner, T.: Praxiswissen Schwingungsmesstechnik, 2015, S. 264 ff.

<sup>175</sup> Vgl. ISO 7401: Lateral transient response test methods, 2003, S. 10.

<sup>176</sup> Vgl. Viehof, M.: Querdynamisches Potenzial von Torque Vectoring, 2014, S. 18 ff.

<sup>177</sup> An dieser Stelle wird von quasi-kontinuierlichen Kurvenverläufen gesprochen, weil es sich bei den Diagrammen, die aus den Mess- und Simulationsdaten gewonnen werden, streng genommen nicht um kontinuierliche Kurvenverläufe handelt. Die Daten liegen als zeitdiskrete Werte vor. Unter der Annahme, dass die Ausgangsgrößen der Simulation mit 1.000 Hz aufgezeichnet werden und die quasistationäre Kreisfahrt eine Dauer von 30 Sekunden aufweist, besteht die Lenkwinkelbedarfskurve aus 30.000 diskreten Wertepaaren (Lenkwinkel | Querschleunigung). Vor dem Hintergrund, dass mit der nachfolgend beschriebenen Technik diese Datenmenge auf eine Größenordnung von zehn Wertepaaren reduziert werden soll, wird nachfolgend von einer Komprimierung quasi-kontinuierlicher Kurvenverläufe bzw. einer Kennwertdiskretisierung gesprochen. Die Komprimierung hat das Ziel, den Informationsgehalt auf wenige diskrete Kennwerte zu reduzieren, was mit einer Reduktion der Auflösung der betrachteten Kennlinien gleichzusetzen ist.

bzw. Fensterfunktionen der gesamte Signalinhalt zur Ermittlung der diskreten Kurvenverlaufskennwerte herangezogen werden, da dies die Robustheit der Kennwerterfassung erhöht. Ein Beispiel hierfür ist in Anhang A.1.2 zu finden.

Claus zeigt anhand der objektiven Komfortbewertung, wie eine solche Gewichtung im Frequenzbereich erfolgt. Auf die Effektivwerte der Aufbaubeschleunigung im Oktavband<sup>178</sup> wendet er eine auf die logarithmische Frequenzachse skalierte Von-Hann-Fensterfunktion an, mit der er das kontinuierliche Effektivwert-Signal multipliziert. Die Gewichtungsfunktionen für die ersten vier Oktaven sind in Abbildung 4-6 dargestellt.<sup>179</sup>

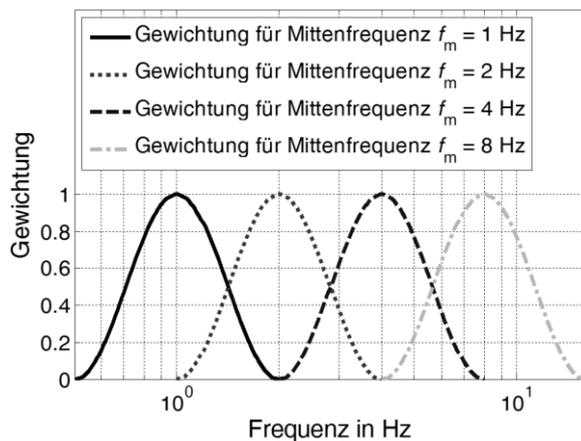


Abbildung 4-6: Überlappende Gewichtung für frequenzbezogene Kennwerte im Oktavband<sup>180</sup>

Das Von-Hann-Fenster entspricht einer auf eine halbe Periode bezogenen  $\sin^2$ -Funktion, die sich für die Gewichtung sämtlicher Bezugsgrößen anwenden lässt. Abbildung 4-7 zeigt die Übertragung dieser Komprimierungstechnik auf querbeschleunigungsbezogene Größen, wie beispielsweise die bereits erwähnte Lenkwinkelbedarfskurve. Der Kurvenverlauf wird auf neun metrische Validitätskriterien<sup>181</sup> für den Validierungsprozess reduziert. Der besondere Vorteil dieser sinusartigen Gewichtung ist, dass die Summe aller Gewichtungsfunktionen entsprechend Diagramm (a) in Abbildung 4-7 gleich eins ist und sich somit der gesamte Signalinhalt gleichermaßen auf die diskreten Kennwerte auswirkt.

<sup>178</sup> Die frequenzbezogene Effektivwertkurve wird auf die Oktavmittenfrequenzen  $f_m = [1; 2; 4; 8; 16; 32]$  Hz diskretisiert.

<sup>179</sup> Vgl. Claus, S.: Kompensation von Verzugszeiten im semiaktiven Fahrwerk, 2017, S. 31 ff.

<sup>180</sup> Quelle: Claus, S.: Kompensation von Verzugszeiten im semiaktiven Fahrwerk, 2017, S. 32.

<sup>181</sup> Die Kennwerte beziehen sich auf die ganzzahligen Querbeschleunigungen von  $1 \text{ m/s}^2$  bis  $9 \text{ m/s}^2$ . Diese werden nachfolgend auch als Bezugsquerbeschleunigungen  $a_{y,m}$  bezeichnet. Der Index „m“ steht für Mitte (englische Bezeichnung: mean). Die Bezugsquerbeschleunigung beschreibt die Intervallmitte der Gewichtungsfunktion.

Die in Abbildung 4-7 gezeigten querbeschleunigungsbezogenen Gewichtungsfunktionen  $w_{a_{y,m}}$  für ein zeitdiskretes Messsignal mit konstanter Abtastrate werden nach folgender Vorschrift für die Kennwertermittlung bei der Bezugsquerbeschleunigung  $a_{y,m}$  berechnet:

$$w_{a_{y,m}}(I_i) = \begin{cases} 0 & I_i < I_{\min} \\ \sin^2 \left( \frac{\pi \cdot (I_i - I_{\min})}{I_{\max} - I_{\min}} \right) & \text{für } I_{\min} \leq I_i \leq I_{\max} \\ 0 & I_i > I_{\max} \end{cases} \quad (4.5)$$

mit

$$I_{\min} = I \left( a_{y,m} - \frac{\Delta a_{y,w}}{2} \right) = I \left( a_{y,m} - 1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) \quad (4.6)$$

$$I_{\max} = I \left( a_{y,m} + \frac{\Delta a_{y,w}}{2} \right) = I \left( a_{y,m} + 1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) \quad (4.7)$$

$I$  beschreibt den Index jedes Wertes innerhalb des Signalvektors und  $i$  ist die Laufvariable der Signallänge. Die Variable  $\Delta a_{y,w}$  steht für die Gesamtbreite des Gewichtungsfensters und beträgt im vorliegenden Beispiel  $2 \text{ m/s}^2$ . Die Berechnungsvorschrift für den gewichteten Lenkwinkel  $\delta$  an der Gewichtungsintervallmitte  $a_{y,m}$  lautet:

$$\delta_{a_{y,m}} = \frac{\sum (\delta(a_y) \cdot w_{a_{y,m}})}{\sum w_{a_{y,m}}} \quad (4.8)$$

Der Vorteil der Robustheit in der Kennwertermittlung mittels Gewichtungsfunktionen wird in Anhang A.1.2 anhand eines Beispiels verdeutlicht.

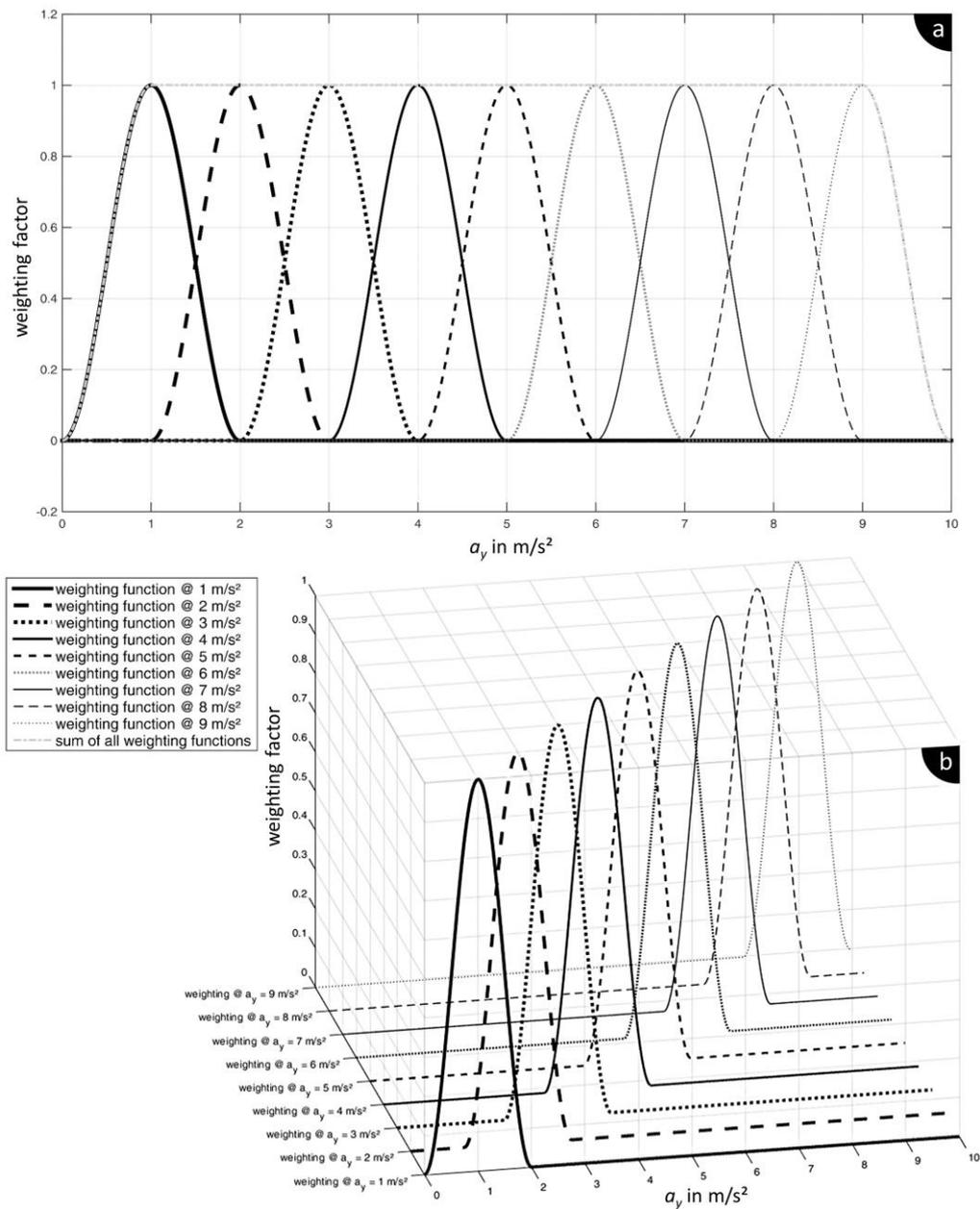


Abbildung 4-7: Gewichtungsfunktionen für querbeschleunigungsbezogene Größen

In der Validierungspraxis besteht eine feste Abhängigkeit zwischen den Validitätskriterien und der verfügbaren Messtechnik. Hier sind ggf. Kompromissbildungen erforderlich.<sup>182</sup>

<sup>182</sup> Vgl. Abschnitt 4.4.3.2 (Messtechnik).

#### 4.4.2.2 Testanwendungen

Bei der Festlegung der Testanwendungen sind zwei Anforderungstypen aus der ersten Prozessstufe<sup>183</sup> zu unterscheiden:<sup>184</sup>

1. *Versuchsanforderungen*

Hierbei handelt es sich um Anforderungen, die eine Qualitätsbewertung der Simulation für einen spezifischen Versuch adressieren. Beispielhaft lautet eine solche Anforderung: Die Ausgangsgröße der Simulation ist die Gierreaktion des Fahrzeugs bei einer  $\mu$ -Split-Bremmung. Bei diesem Anforderungstyp ist die Testanwendung des Fahrzeugs schon explizit vorgegeben.

2. *Eigenschaftsanforderungen*

Bei Anforderungen dieses Typs wird von der Simulation die Prädiktion bestimmter Systemeigenschaften ohne Vorgabe eines bestimmten Versuchs gefordert. Eine beispielhafte Anforderungsdefinition hierfür ist: Das Ergebnis der Simulation ist das Übertragungsverhalten vertikaler Anregungen vom Radaufstandspunkt zum Fahrzeugaufbau für Anregungsfrequenzen bis 30 Hz. Die Testanwendung ist nicht näher spezifiziert.

In der Fahrdynamikforschung haben sich standardisierte Fahrmanöver etabliert, die auch für die Validierung von Fahrdynamiksimulationen herangezogen werden.<sup>185</sup> Dennoch sollten die Testanwendungen für den Zweck der Validierung genau überprüft und überdacht werden. Viehof et al. und Niemann zeigen am Beispiel von Fahrzeuganregungen auf einem Vierstempel-Gesamtfahrzeugprüfstand, dass diese Testanwendung gegenüber etablierten Verfahren für die Vertikaldynamikanalyse (z.B. Fahrten über definierte Teststrecken) Vorteile aufweist, wengleich sie – je nach Anforderung – die typischen Fahrversuche nicht gänzlich ersetzen kann.<sup>186</sup>

Insbesondere in größeren Unternehmen ist es für Anforderungen vom Typ 2 sinnvoll, eine Versuchsklassifizierung zu erstellen, anhand derer die durchführbaren Versuche verglichen und objektiv für die Erfüllung von Validierungsanforderungen bewertet werden können. Diese Klassifikationsübersicht sollte folgende Informationen enthalten:

- Testbezeichnung
- Ausführungsspezifikation
- Art des Versuchs: open-loop oder closed-loop
- Objektive Ausgangsinformationen bzw. metrische Validitätskriterien

---

<sup>183</sup> Vgl. Abschnitt 4.4.1 (Anforderungsdefinition).

<sup>184</sup> Vgl. Viehof, M. et al.: Validierungskonzept für die Vertikaldynamik, 2017, S. 154 ff.

<sup>185</sup> Vgl. Unterkapitel 2.3 (Experimentelle Ermittlung und Beurteilung von Fahrzeugeigenschaften) / Viehof, M.; Winner, H.: Forschungsstand der Validierung, 2017, S. 50 ff.

<sup>186</sup> Vgl. Viehof, M. et al.: Objektivierungspotenzial der operativen Validierung, 2016, S. 430 ff / Viehof, M. et al.: Validierungskonzept für die Vertikaldynamik, 2017, S. 151 ff / Niemann, H.: Eignungsanalyse eines Vierstempelprüfstands für die Validierung, 2017.

Mit den Erkenntnissen aus dem Forschungsstand der Validierung in Unterkapitel 2.1 und 2.3 ergibt sich die Notwendigkeit, die Qualifikation der Testanwendung im Hinblick auf die Anforderungen zu bewerten. Hierbei sind Fragen zu beantworten, die nachfolgend näher erläutert werden:

- *Stimmen die Versuchsausgangsgrößen mit den geforderten metrischen Validitätskriterien überein und sind sie aussagekräftig?*

Die Bewertung der Aussagekraft von Versuchsausgangsgrößen ist mit der Anforderungsdefinition verknüpft und erfordert fachliches Systemverständnis. In Fahrversuchen gilt, dass sich Systemunterschiede in Closed-Loop-Manövern anhand der Fahrereingaben und in Open-Loop-Manövern anhand fahrdynamischer Kennwerte, die die Fahrzeugreaktion beschreiben, identifizieren lassen.<sup>187</sup> Wird beispielsweise der ISO-Wedelttest<sup>188</sup> sowohl in der Messung als auch in der Simulation als Closed-Loop-Manöver durchgeführt,<sup>189</sup> darf die Gierrate zu bestimmten Zeit- bzw. Wegpunkten nicht als metrisches Validitätskriterium herangezogen werden. Aufgrund der Randbedingungen (gleiche Fahrzeuggeschwindigkeit und gleiche Trajektorie) wird sich auch bei signifikanten Systemunterschieden keine signifikante Abweichung in dieser Ausgangsgröße identifizieren lassen, sodass dieses Validitätskriterium für diesen Anwendungszweck nicht geeignet ist. Der Lenkwinkelbedarf wäre in diesem Beispiel das bessere, aussagekräftigere Validitätskriterium.

- *Spiegelt die Testanwendung den relevanten Anwendungsbereich des Simulationsmodells wider?*

Die gewählte Testanwendung muss neben der Identifikation der metrischen Validitätskriterien auch den geforderten Lastfall abbilden können. Entsprechend den Ausführungen zum aktuellen Forschungsstand in den Abschnitten 2.1.3.1 und 2.1.4, sollten für den Zweck der Validierung Closed-Loop-Manöver in der Simulation als Open-Loop-Manöver durchgeführt werden, indem die Anregungsgrößen im Realversuch gemessen werden. Die Vorteile dieses Vorgehens werden in Abschnitt 4.4.4 erörtert.

- *Sind die Versuchsausgangsgrößen sensitiv auf kontrollierbare und möglichst unabhängig von nicht kontrollierbaren Faktoren?*

Ausgangsgrößen, die auf kontrollierbare Faktoren sensitiv reagieren, sind zwingend erforderlich, um Abweichungen des Systemverhaltens zwischen Messung und Simulation in der Validierung aufzeigen zu können. Wenn eine Ausgangsgröße durch die Fahrzeugkonfiguration, die Versuchsparameter oder steuerbare Umgebungsbedingungen nicht beeinflusst wird, ist sie als metrisches Validitätskriterium nicht geeignet, da keine Falsifikationen nachgewiesen werden können. Sensitivitätsanalysen zeigen auf, wie stark definierte Variationsparameter die Ausgangsgrößen beeinflussen, sodass eine frühzeitige

---

<sup>187</sup> Vgl. Unterkapitel 2.3 (Experimentelle Ermittlung und Beurteilung von Fahrzeugeigenschaften).

<sup>188</sup> Vgl. ISO 3888-1: Double lane-change, 1999.

<sup>189</sup> Dies erfordert in der Simulation ein Fahrermodell.

simulationsbasierte Absicherung möglich ist.<sup>190</sup> Sind die Validitätskriterien, die Testanwendungen und die Konfigurationsstichproben definiert, kann durch eine abschließende Sensitivitätsanalyse, bei der nicht kontrollierbare Versuchsparameter variiert werden, erfasst werden, welche Streuungen der metrischen Validitätskriterien durch Störeinflüsse zu erwarten sind. Wünschenswert sind hier möglichst geringe Sensitivitäten. Die Untersuchung kann mit dem im nachfolgenden Abschnitt 4.4.2.3 beschriebenen Verfahren erfolgen.

- *Lassen sich die metrischen Validitätskriterien in der Testanwendung robust erfassen?*  
Die robuste bzw. zuverlässige Erfassung der metrischen Validitätskriterien ist wichtig, damit diese zum Vergleich unterschiedlicher Systemvarianten mit ausreichender Trennschärfe – d.h. mit möglichst geringer Streuung – herangezogen werden können. Diese Eigenschaft lässt sich ebenfalls in simulationsbasierten Voruntersuchungen feststellen. Gaß zeigt in seiner Forschungsarbeit zum Manöver Sinuslenken mit steigender Lenkfrequenz ein Beispiel für eine nicht robuste Parameteridentifikation. Eine Ausgangsgröße des Manövers ist die Giereigenfrequenz. Für die von ihm betrachtete Kombination aus Fahrzeug und Versuchsdurchführung ist das Maximum der Übertragungsfunktion zwischen Lenkradwinkleingabe und Gierrate kaum ausgeprägt, sodass die Bestimmung der Extremwertlage mit sehr großen Unsicherheiten verbunden ist. Dieses Ergebnis stellt einen Nachweis dar, dass das Fahrzeug für die Erfassung der Giereigenfrequenz in falschen Arbeitspunkten getestet wird. Der Validierungsversuch müsste somit für die Erfassung dieses metrischen Validitätskriteriums eine Anpassung erfahren.<sup>191</sup>

Die Effektivität und die Effizienz der Validierungsstudie können weiter gesteigert werden, indem die Testanwendungen an die spezifischen Anforderungen der Validierungsstudie angepasst werden und nicht einfach auf Standardversuche zurückgegriffen wird. Hierbei spielt insbesondere die Übertragbarkeit der Validierungsergebnisse auf möglichst viele Arbeitspunkte eine wichtige Rolle. In standardisierten Fahrmanövern wird das Fahrzeugverhalten nur in einem oder in sehr wenigen Arbeitspunkten untersucht. Die versuchsseitigen Parameter und damit die Arbeitspunkte des Fahrzeugs werden nicht oder kaum variiert. Trotzdem wird in der Praxis häufig induktiv eine Allgemeingültigkeit vermutet, obwohl diese nicht stichprobenweise verifiziert wird. Bach zeigt in seiner Forschungsarbeit, dass durch die gezielte Auswahl von Arbeitspunkten, in denen das Fahrverhalten nicht durch Inter- oder Extrapolierung vorhersehbar ist, die Testanwendungen für die Validierung optimiert werden können. Hierdurch lässt sich der Erkenntnisgewinn über den stichprobenvaliden Einsatzbereich von Simulationen maximieren. Zudem können durch Anwendung von Kombinatorik Effizienzsteigerungen in der praktischen Versuchsdurchführung erzielt werden.<sup>192</sup>

---

<sup>190</sup> Vgl. Abschnitt 4.4.2.3 (Konfigurationsstichproben).

<sup>191</sup> Vgl. Gaß, L.: Fahrereinfluss im Manöver Sinuslenken, 2017.

<sup>192</sup> Vgl. Bach, C.: Effizienzsteigerung von Validierungstests, 2017.

### 4.4.2.3 Konfigurationsstichproben

In der Konzeptdefinition in Unterkapitel 4.2 ist beschrieben, dass aus Gründen der Effizienz und der Effektivität die Konfigurationsstichproben gezielt so auszulegen sind, dass eine hohe Sensitivität der Versuchsausgangsgrößen vorliegt. Dadurch, dass das System in besonders sensiblen Arbeitspunkten<sup>193</sup> untersucht wird, steigt die Wahrscheinlichkeit von Falsifikationen, d.h., dass der Simulation nachgewiesen wird, dass sie unter Berücksichtigung der zulässigen Toleranzen, die Genauigkeitsansprüche nicht erfüllt. Umgekehrt erzeugt eine stichprobenvalide Simulation, die in besonders herausfordernden Arbeitspunkten getestet wurde, stärkeres Vertrauen bei den Nutzern.

Die Stichprobenauswahl kann durch Sensitivitätsanalysen (SA) objektiviert werden. Die wichtigsten Eigenschaften und Merkmale der Sensitivitätsanalyse für den Zweck der Validierung fassen Viehof et al. wie folgt zusammen:<sup>194</sup>

*„Die Sensitivitätsanalyse basiert auf einer systematischen Änderung der Eingangsvariablen und Modellparameter über den für die Anwendung relevanten Wertebereich. Dabei werden die Auswirkungen der Varianz der Eingangsvariablen auf die Varianz der Ausgangsgrößen untersucht und damit die Einflussstärke der variierten Eingangsgrößen identifiziert. [...] Es wird zwischen drei Bereichen der Sensitivitätsanalyse unterschieden:*

- 1. Das Faktor-Screening dient zur qualitativen Unterscheidung von signifikanten und nicht signifikanten Eingangsgrößen (Faktoren). Screening-Methoden zeichnen sich im Vergleich zu quantitativen Verfahren durch den geringeren Aufwand aus.*
- 2. Die lokale Sensitivitätsanalyse untersucht das Modellverhalten in einem bestimmten Arbeitspunkt, z.B. einem lokalen Optimum. Hierbei werden nur kleine Variationen der Faktoren vorgenommen, um z.B. Stabilitätsuntersuchungen durchzuführen.*
- 3. Bei der globalen Sensitivitätsanalyse werden die Faktoren über ihren gesamten Wertebereich variiert und damit der gesamte Faktorraum hinsichtlich der Beeinflussung der Ausgangsgrößen analysiert. Diese Art der Sensitivitätsanalyse liefert umfassendes Modellverständnis und ist deshalb besonders für Validitätsuntersuchungen geeignet.*

*[...] Bei den Sensitivitätsanalyseverfahren werden Techniken für lineare und für nichtlineare Modelle unterschieden, wobei letztere auch auf lineare Modelle angewendet werden können. Zu den bekanntesten globalen Techniken für nichtlineare Modelle gehören die auf der Monte-Carlo-Simulation basierende Sensitivitätsanalyse nach Sobol sowie der Fourier Amplitude Sensitivity Test (FAST) und dessen Erweiterung, der extended Fourier Amplitude Sensitivity Test (eFAST), der im Gegensatz zum FAST auch die Bestimmung der Interaktionskoeffizienten erlaubt.“<sup>195</sup>*

Nach Siebertz et al. und Saltelli et al. stellt der eFAST eines der derzeit robustesten und effizientesten Sensitivitätsanalyseverfahren dar, das global und modellunabhängig zur Ermittlung

---

<sup>193</sup> Die Betriebspunkte beschreiben die Parametrierungen des Modells.

<sup>194</sup> Vgl. Viehof, M. et al.: Objektivierungspotenzial der operativen Validierung, 2016, S. 426 ff / Viehof, M. et al.: Validierungskonzept für die Vertikaldynamik, 2017, S. 159 ff / Balci, O.: Guidelines for Simulation Studies, 1990, S. 31 / Siebertz, K. et al.: Statistische Versuchsplanung, 2010, S. 247 f.

<sup>195</sup> Viehof, M. et al.: Objektivierungspotenzial der operativen Validierung, 2016, S. 426 f.

quantitativer Effekte<sup>196</sup> herangezogen werden kann.<sup>197</sup> Somit eignet sich der eFAST auch besonders für die Anwendung im Validierungsprozess. Seine Effizienz liegt darin begründet, dass auf die Ergebnisse systematisch ausgelegter Stichprobenversuche eine Frequenzanalyse angewendet wird. Um in dieser Arbeit eine Verwechslung mit den Validierungsversuchen auszuschließen, wird nachfolgend vor den Merkmalen der Sensitivitätsanalyse die Abkürzung „SA-“ angeführt. Bei den SA-Stichproben handelt es sich um Parametersätze innerhalb derer die SA-Variationsparameter mit einer bestimmten Frequenz über der Anzahl der SA-Versuche variiert werden. Das Funktionsprinzip, die Begrifflichkeiten und die bei der Anwendung zu berücksichtigenden Kriterien werden in Anhang A.1.3 anhand eines Beispiels detailliert erläutert.<sup>198</sup>

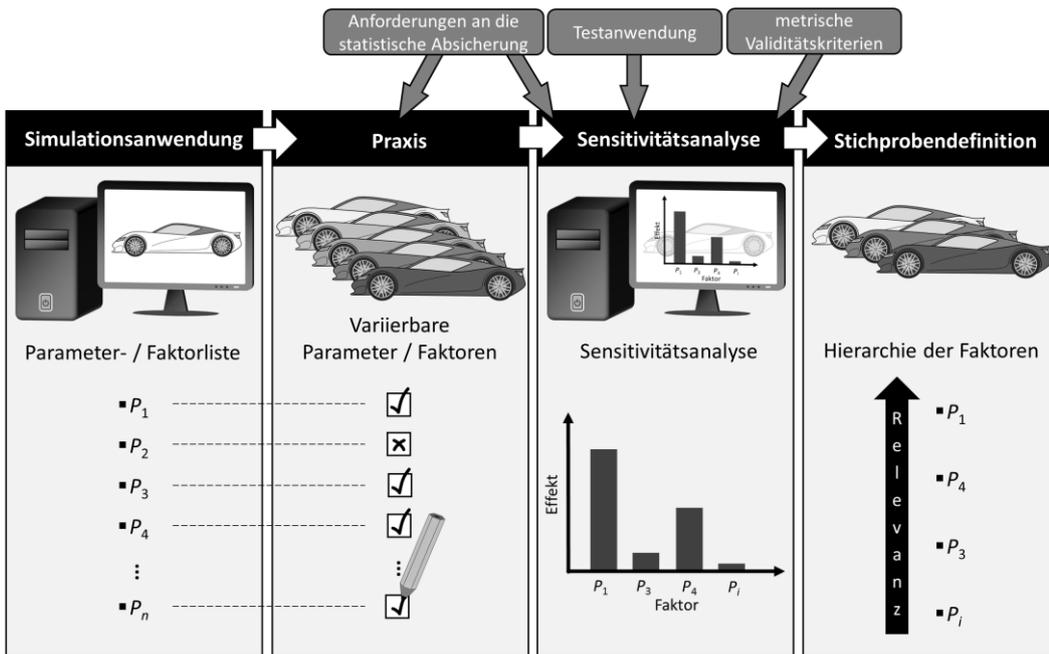


Abbildung 4-8: Prinzip der Konfigurationsstichprobendefinition

Abbildung 4-8 verdeutlicht das Prinzip der Stichprobendefinition im neuen Validierungsprozess. Die definierbaren Konfigurationen sind hochgradig von der praktischen Umsetzbarkeit abhängig.<sup>199</sup>

Im ersten Schritt wird aus dem zu validierenden Simulationsmodell eine Parameterliste abgeleitet, die vollständig durch den Parametrierungsprozess abgedeckt sein muss.

<sup>196</sup> Als Effekt bezeichnet man die Wirkung eines Faktors. Er quantifiziert die Veränderung eines Qualitätsmerkmals bei der Veränderung mindestens eines Faktors. (Vgl. Siebertz, K. et al.: Statistische Versuchsplanung, 2010, S. 12).

<sup>197</sup> Vgl. Siebertz, K. et al.: Statistische Versuchsplanung, 2010, S. 260 / Saltelli, A. et al.: A Method for Global Sensitivity Analysis, 1999, S. 39.

<sup>198</sup> Vgl. Viehof, M. et al.: Objektivierungspotenzial der operativen Validierung, 2016, S. 426 ff. / Niemann, H.: Eignungsanalyse eines Vierstempelprüfstands für die Validierung, 2017, S. 16 ff.

<sup>199</sup> Dies betrifft Anf. 3a (Anforderungsbezug) und Anf. 3b (Praktikabilität). Vgl. Unterkapitel 4.1 (Diversität der Anwendungsbereiche und Anforderungen an die Methode).

Nachfolgend wird untersucht, welche dieser Fahrzeugeigenschaften in der Praxis unter Berücksichtigung der in Stufe 1 des Validierungsprozesses<sup>200</sup> geforderten Variationsbandbreite verändert werden kann. In diesem Aspekt zeigt sich, dass das neue Validierungsverfahren im Hinblick auf seine Praxisrelevanz kompromissbereit ist.

Die metrischen Validitätskriterien werden anschließend in der festgelegten Testanwendung einer Sensitivitätsanalyse in Bezug auf die möglichen Variationsparameter unterzogen. Die Variationsbereiche dieser Faktoren entsprechen dabei den praktisch realisierbaren und den Anforderungen entsprechenden Verstellbereichen. Für diesen Parameterraum wird das Validierungsergebnis am Ende gültig sein. In der Validierung ist es auch zulässig, vollständige Parameterdatensätze durch Betrachtung unterschiedlicher Systemvarianten, z.B. Fahrzeuge, als Faktoren zu verändern. In diesem Fall können in der Sensitivitätsanalyse die vollständigen Parameterdatensätze der für die praktischen Versuche verfügbaren Systemvarianten anstatt einzelner Parameter variiert werden. Zudem ist es möglich, versuchsseitige Parameter in die Stichprobenauswahl aufzunehmen, wie z.B. die Fahrzeuggeschwindigkeit beim Lenkwinkelsprung oder die Anregungsfrequenz beim Sinuslenken.

Als wichtiges Ergebnis liegt zunächst eine Faktorhierarchie vor. Um das eingangs erklärte Ziel der Konfigurationsstichprobendefinition zu erfüllen, sollten die Faktoren mit der höchsten Sensitivität auf die metrischen Validitätskriterien am stärksten priorisiert werden. Es wird empfohlen als Technik den eFAST heranzuziehen, sodass auch die quantitativen Effekte ermittelt werden können. Der eFAST ist effizient in der Durchführung, lässt sich in einer Softwareumgebung automatisieren<sup>201</sup> und liefert neben den Haupteffekten auch Erkenntnisse darüber, welche Faktoren in besonders starker Interaktion stehen. Diese sollten neben den Parametern mit großem Haupt- bzw. Totaleffekt mit in die Auswahl relevanter Konfigurationsstichproben übernommen werden, um die interne Stichprobenvalidität<sup>202</sup> des Modells ebenfalls nachweisen zu können.

Die Effekte selbst geben nur in Kombination mit der quantitativen Varianz des metrischen Validitätskriteriums eine Auskunft darüber, ob die ausgewählten Faktoren signifikante, d.h. eindeutig messbare, Eigenschaftsänderungen hervorrufen. Dies ist die Kernvoraussetzung für eine belastbare Validitätsaussage.

Die Festlegung der Konfigurationsstichproben erfolgt letztlich unter Berücksichtigung der folgenden Kriterien:

1. Relevanz der veränderbaren Faktoren im Realversuch → Was sollte gemäß der Sensitivitätsanalyse variiert werden und in welchem Wertebereich?

---

<sup>200</sup> Vgl. Abschnitt 4.4.1 (Anforderungsdefinition).

<sup>201</sup> Vgl. Anhang A.3.1 (Struktur der Sensitivitätsanalyse-Umgebung).

<sup>202</sup> Es können die interne und die externe Validität der Simulation unterschieden werden. Externe Validität beschreibt die Prädiktionsqualität von Versuchsausgangsgrößen und interne Validität bezieht sich auf den Nachweis, dass Parameter innerhalb des Modells eine physikalisch korrekte Wirkungsweise aufweisen. (Vgl. Viehof, M. et al.: Objektivierungspotenzial der operativen Validierung, 2016, S. 426).

2. Geforderter Grad der statistischen Absicherung → Auf wie viele Faktorstufen<sup>203</sup> soll der Wertebereich aufgelöst werden? Wie viele unterschiedliche Konfigurationsstichproben sind zu untersuchen? Hierbei ist zu berücksichtigen, dass mindestens drei Faktorstufen erforderlich sind, um nichtlineare Zusammenhänge identifizieren zu können.
3. Praktikabilitätsgrenze → Wie viele Faktoren können aufgenommen werden bzw. bis zu welcher Ebene der Faktorhierarchie<sup>204</sup> können die Parameter variiert werden, ohne dass der Versuchsaufwand zu groß wird?

### 4.4.3 Versuchsvorbereitung

Nachdem die Auslegungskriterien in der ersten und zweiten Stufe des Validierungsprozesses definiert wurden, werden sie zur Vorbereitung der Validierungsversuche herangezogen. Die Vorbereitung umfasst die Erstellung des Versuchsplans sowie die Festlegung der Messtechnik für die Realversuche und die Vorbereitung der Datenerhebung in Messung und Simulation.

#### 4.4.3.1 Versuchsplanung und Versuchsplanoptimierung

Für den Zweck der Validierung müssen Vergleichsdaten aus den beiden Versuchsumgebungen erhoben werden.<sup>205</sup> Im Hinblick auf die Praktikabilität der neuen Validierungsmethode ist der Aufwand für die Realversuche maßgeblich, während in der Simulation der Versuchsumfang aufgrund der Ressourceneffizienz von vergleichsweise untergeordneter Bedeutung ist.

Der Versuchsraum spannt sich aus den definierten Testanwendungen<sup>206</sup> und Konfigurationsstichproben<sup>207</sup> auf. Als weiterer Multiplikator für den Versuchsaufwand kommt der geforderte Absicherungsgrad<sup>208</sup>, d.h. die Anzahl der Versuchswiederholungen, hinzu.

---

<sup>203</sup> Die unterschiedlichen Faktoreinstellungen werden als Stufen bezeichnet. Ein Faktor, der mit vier unterschiedlichen Werten in die Konfigurationsstichproben aufgenommen wird, besitzt somit vier Stufen. Die Änderung des Faktorwerts von einer Stufe zur anderen wird auch Stufenabstand genannt. (Vgl. Siebertz, K. et al.: Statistische Versuchsplanung, 2010, S. 6 / Kleppmann, W.: Versuchsplanung, 2016, S. 14).

<sup>204</sup> Vgl. Abbildung 4-8.

<sup>205</sup> Vgl. Unterkapitel 4.2 (Validierungskonzept).

<sup>206</sup> Vgl. Abschnitt 4.4.2.2 (Testanwendungen).

<sup>207</sup> Vgl. Abschnitt 4.4.2.3 (Konfigurationsstichproben).

<sup>208</sup> Vgl. Abschnitt 4.4.1 (Anforderungsdefinition).

Sofern es praktisch umsetzbar ist, kann stets der Vollfaktorplan<sup>209</sup> durchgeführt werden. Bei  $n_{TA}$  Testanwendungen<sup>210</sup>,  $n_{CS}$  Konfigurationsstichproben<sup>211</sup> und  $n_{TE}$  Versuchsdurchläufen<sup>212</sup> berechnet sich die gesamte Versuchsanzahl<sup>213</sup>  $n_{TR}$  zu:

$$n_{TR,fullfactorial} = n_{TA} \cdot n_{CS,fullfactorial} \cdot n_{TE} \quad (4.9)$$

Hinzu kommt, dass die Anzahl der möglichen Konfigurationsstichproben  $n_{CS,fullfactorial}$  aus einer Potenzfunktion mit der Anzahl der Faktorstufen<sup>214</sup>  $n_{FL}$  als Basis und der Anzahl von Faktoren<sup>215</sup>  $n_F$  als Exponenten resultiert.<sup>216</sup> Unter der Voraussetzung, dass alle Faktoren gleich viele Faktorstufen besitzen, gilt:

$$n_{CS,fullfactorial} = n_{FL}^{n_F} \quad (4.10)$$

Bei lediglich einer Testanwendung, fünf Faktoren mit jeweils drei Stufen und zwei Versuchswiederholungen ( $n_{TE} = 3$ ) wären demnach jeweils  $n_{TR,fullfactorial} = 729$  Messungen und Simulationen durchzuführen, was in den meisten Anwendungsfällen einen zu hohen Versuchsaufwand darstellen dürfte.

Hieraus wird ersichtlich, dass sich die Aufgabe des Teilprozesses *Versuchsplanung und Versuchsplanoptimierung* in zwei Fragestellungen aufteilt, für deren Beantwortung in den nachfolgenden Abschnitten Lösungen vorgestellt werden:

1. Welche der als relevant identifizierten Konfigurationsstichproben müssen tatsächlich untersucht werden und welche können vernachlässigt werden, da sie keinen oder nur einen geringen Erkenntnisgewinn für die statistische Bewertung versprechen?  
→ Dies betrifft die Anzahl der Konfigurationsstichproben  $n_{CS}$ .
2. Wie oft müssen die Versuche wiederholt werden, um zuverlässig stochastische Fehler identifizieren und statistische Sicherheiten quantifizieren zu können?  
→ Dies betrifft die Anzahl der Versuchsdurchläufe  $n_{TE}$ .

---

<sup>209</sup> Bei einem Vollfaktorplan bzw. einem vollfaktoriellen Versuchsplan werden alle möglichen Faktorkombinationen untersucht. Somit wird der maximale Versuchsaufwand unternommen. (Vgl. Siebertz, K. et al.: Statistische Versuchsplanung, 2010, S. 6).

<sup>210</sup> Englische Bezeichnung: test application (TA).

<sup>211</sup> Englische Bezeichnung: configuration samples (CS).

<sup>212</sup> Englische Bezeichnung: test executions (TE).

<sup>213</sup> Englische Bezeichnung: test runs (TR).

<sup>214</sup> Englische Bezeichnung: factor levels (FL).

<sup>215</sup> Englische Bezeichnung: factor (F).

<sup>216</sup> Vgl. Kleppmann, W.: Versuchsplanung, 2016, S. 129.

### 4.4.3.1.1 Optimierung der Konfigurationsstichproben

Die statistische Versuchsplanung (Design of Experiments, DoE) beschäftigt sich mit der effizienten Auslegung von Versuchsreihen.<sup>217a</sup> Ihre Grundlagen und Techniken sollten deshalb auch für die Aufwandsreduktion von Validierungsversuchen herangezogen werden. Das Ziel ist die Entwicklung eines teilfaktoriellen Versuchsplans mit geringem Informationsverlust gegenüber dem Vollfaktorplan – also das Bestreben,  $n_{CS}$  so weit wie möglich zu reduzieren. Insbesondere für die Anwendung der Validierungsmethode in der Fahrdynamik ist die Minimierung der Konfigurationsstichprobenanzahl von besonderer Bedeutung, da jede Konfigurationsänderung mit zeit- und kostenintensiven Umbauten bzw. Umrüstungen – entweder der Messtechnik oder der Fahrzeuge selbst – verbunden ist.

Der Informationsgewinn aus den Validierungsversuchen mit unterschiedlichen Konfigurationsstichproben ist vergleichbar mit dem einer Sensitivitätsanalyse.<sup>218</sup> Denn im Rahmen der Validierung wird überprüft, ob die Effekte der variierten Faktoren in absoluter und relativer Betrachtung zwischen Realversuch und Messung übereinstimmen. Aus diesem Grund sollte der Vollfaktorplan derart reduziert werden, dass die Wirkung der Faktoren weiterhin aus den Versuchsdaten abgeleitet werden kann. Die Lehre der statistischen Versuchsplanung liefert vielfältige Ansätze, die vom System, der Anzahl der betrachteten Faktoren und Stufen sowie der Ergebnisverwertung abhängig sind. Diese können der Fachliteratur<sup>219</sup> entnommen werden. Für die Validierung ist es wichtig, dass der Versuchsplan zumindest in Teilen orthogonal ist. Orthogonalität ist eine Konstruktionseigenschaft, die der Versuchsplan zur Trennung von Effekten einzelner Faktoren aufweisen muss und liegt vor, wenn die Einstellungsmuster der Faktoren voneinander unabhängig sind. Das Einstellungsmuster beschreibt die Abfolge der Stufen eines Faktors in einer Versuchsreihe.<sup>217b</sup>

Abbildung 4-9 verdeutlicht dies anhand von drei beispielhaften, teilfaktoriellen Versuchsplänen. Diese resultieren aus einem Vollfaktorplan mit  $n_F = 3$  Faktoren und  $n_{FL} = 3$  Stufen, die über die Symbole -, 0 und + gekennzeichnet sind.

- Versuchsplan (a) besteht nur aus den drei Elementen einer Diagonalen im Faktorraum und erfüllt damit nicht das Orthogonalitätskriterium, was durch die drei identischen Einstellungsmuster in der Tabelle ebenfalls ersichtlich wird. Bei gleichzeitiger Variation aller Faktoren können die Haupt- und Interaktionseffekte nicht extrahiert werden.
- Versuchsplan (b) ist vollständig orthogonal. Jeder Faktor besitzt sein individuelles Einstellungsmuster. Dieses ist in seiner Wirkung vergleichbar mit einer individuellen Frequenzzuweisung für jeden Faktor in der Sensitivitätsanalysetechnik eFAST.<sup>220</sup>

---

<sup>217</sup> Vgl. Siebertz, K. et al.: Statistische Versuchsplanung, 2010, (a) S. 1 | (b) S. 7.

<sup>218</sup> Vgl. Abschnitt 4.4.2.3 (Konfigurationsstichproben).

<sup>219</sup> Siehe u.a. Siebertz, K. et al.: Statistische Versuchsplanung, 2010 / Kleppmann, W.: Versuchsplanung, 2016.

<sup>220</sup> Vgl. Abschnitt 4.4.2.3 (Konfigurationsstichproben).

- Versuchsplan (c) ist eine Kombination aus dem Zentralstern, aus dem die Haupteffekte und eindimensionale Interaktionen (zwischen zwei Parametern) rund um das Zentrum identifiziert werden können, und einer Diagonalen zur Analyse von mehrdimensionalen Interaktionen (zwischen allen drei Parametern). Der Zentrumspunkt ist hier essentiell für die Identifikation eines möglicherweise nichtlinearen Systemverhaltens.<sup>221</sup>

In der Validierungspraxis bestehen weitere Einschränkungen, die bei der Versuchsplanoptimierung zu berücksichtigen sind. Sofern Faktorvariationen zwischen den einzelnen Versuchsreihen mit aufwändigen Umrüstungen – z.B. einem Austausch von Fahrwerkskomponenten oder der Übertragung des Messsystems in ein anderes Fahrzeug – verbunden sind, liegt die höchste Priorität darin, die Konfigurationsstichproben so auszuwählen, dass diese Umrüstungen möglichst selten auftreten und eine Rückrüstung auf eine bereits untersuchte Konfigurationsstichprobe vermieden wird. Insbesondere wenn die Versuche für mehrere Testanwendungen, die unterschiedliche Fahrzeugkonfigurationen erfordern, parallel erfolgen, rückt der Aspekt des Aufwands und der Kosten immer mehr in den Fokus. Adaptionen und Vereinfachungen des Versuchsplans, wie sie in Abbildung 4-9 von Variante (b) nach (c) vorgenommen werden, helfen, die Praktikabilität der Methode zu erhöhen. Mit beiden Versuchsplänen wird der Aufwand gegenüber dem Vollfaktorplan um 66,7 % reduziert.<sup>222</sup> Zudem beinhalten beide Pläne relevante Arbeitspunkte für die Validierung zur Prüfung, inwiefern die Simulation einzelne Parametereinflüsse (Haupteffekte) sowie eindimensionale und komplexere mehrdimensionale Wechselwirkungen (Interaktionseffekte) über den gesamten Parameterraum verteilt abbilden kann.<sup>223</sup>

---

<sup>221</sup> Vgl. Kleppmann, W.: Versuchsplanung, 2016, S. 277.

<sup>222</sup> Dies betrifft Anf. 2 (Effizienz). Vgl. Unterkapitel 4.1 (Diversität der Anwendungsbereiche und Anforderungen an die Methode).

<sup>223</sup> Dies betrifft Anf. 1 (Effektivität). Vgl. Unterkapitel 4.1 (Diversität der Anwendungsbereiche und Anforderungen an die Methode).

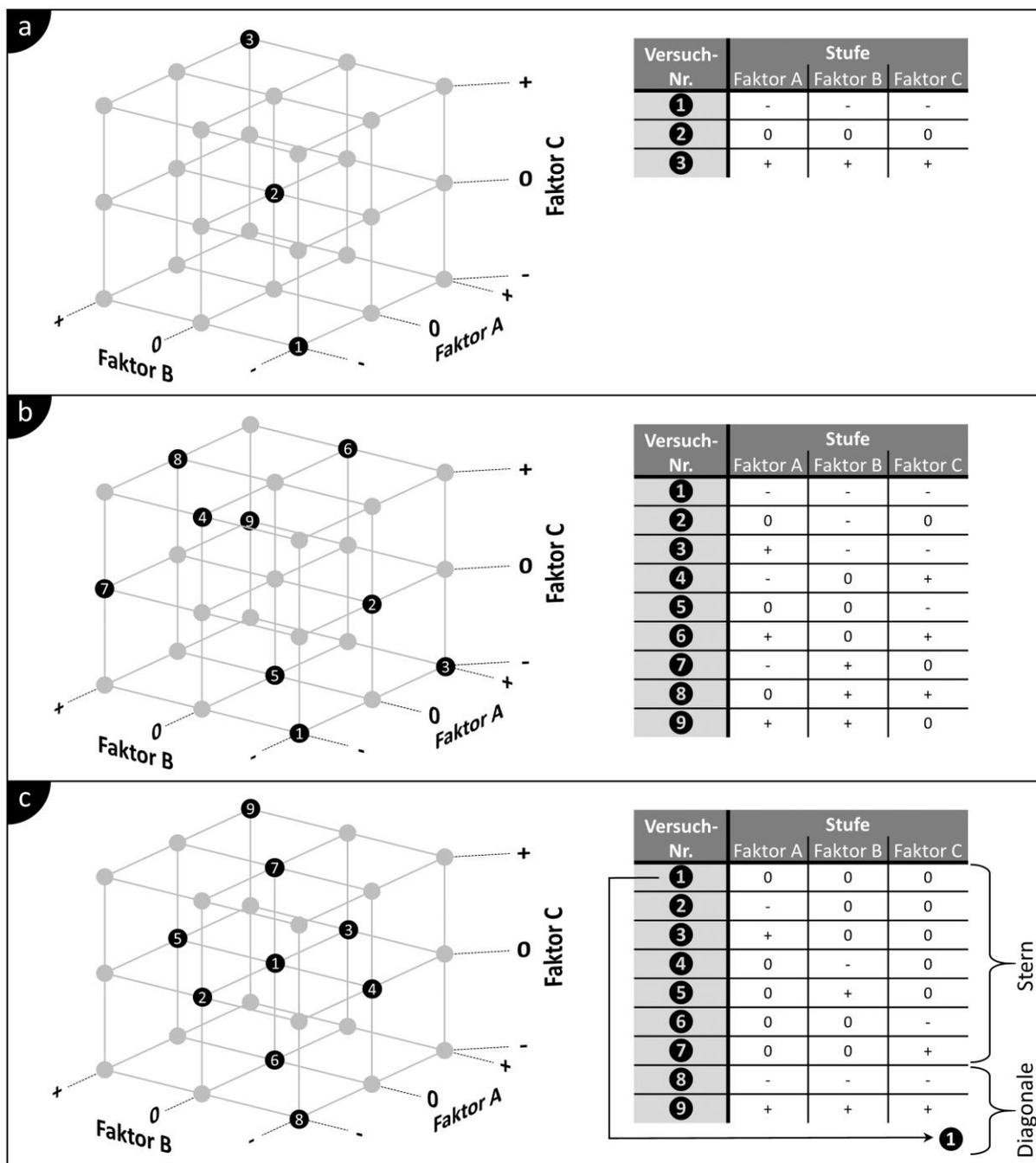


Abbildung 4-9: Teilfaktorische Versuchspläne im Vergleich

Die neue Validierungsmethode ist hinsichtlich der Auswahl der Konfigurationsstichproben und der Gestaltung des Versuchsplans äußerst robust, da die Informationen nicht gebraucht werden, um beispielsweise ein Regressionsmodell des Systems zu erstellen, sondern um möglichst aussagekräftige Arbeitspunkte zum Vergleich von Messung und Simulation zu finden. Deshalb lautet die Empfehlung, die beschriebenen Regeln der Versuchsplankonstruktion bestmöglich einzuhalten, was z.B. durch die Nutzung spezieller Versuchsplanungssoftware überprüft werden kann. Abweichungen und hybride Versuchspläne – d.h. Anpassungen an die Rahmenbedingungen der praktischen Durchführung – sind nicht ausgeschlossen.

## 4.4.3.1.2 Festlegung der Anzahl von Versuchsdurchführungen

Die Frage nach der erforderlichen Anzahl von Versuchswiederholungen beantwortet die Statistik unter Berücksichtigung der Genauigkeitsanforderungen<sup>224</sup> an die Simulation.

Die Dichtefunktion  $f(x)$  der stetigen Verteilung von physikalisch-technischen Messgrößen wird als Gaußsche Normalverteilung angenommen und durch folgende Funktion beschrieben:<sup>225a</sup>

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad \text{mit } -\infty < x < \infty \quad (4.11)$$

Abbildung 4-10 fasst die wichtigsten Eigenschaften dieser Funktion zusammen.

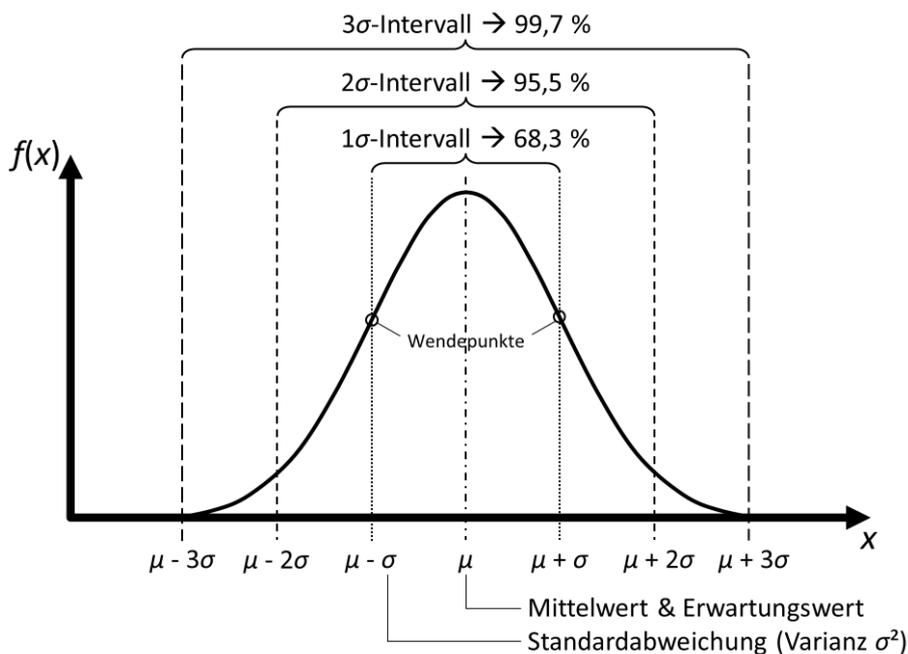


Abbildung 4-10: Gaußsche Normalverteilung<sup>226</sup>

Die Verteilungsfunktion wird einzig durch den arithmetischen Mittelwert  $\mu$  und die Standardabweichung  $\sigma$  der Messreihe<sup>227</sup> beschrieben, wobei für einen Umfang von  $n \rightarrow \infty$  Einzelwerten  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , die auch als Stichproben bezeichnet werden, gilt:<sup>225b</sup>

$$\mu = \bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.12)$$

<sup>224</sup> Vgl. Abschnitt 4.4.1 (Anforderungsdefinition).

<sup>225</sup> Vgl. Papula, L.: Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler, 2016, (a) S. 371 | (b) S. 486 ff..

<sup>226</sup> Vgl. Papula, L.: Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler, 2016, S. 371 ff / Kersting, G.; Wakolbinger, A.: Elementare Stochastik, 2008, S. 41.

<sup>227</sup> „Die Standardabweichung  $s$  der Messreihe ist ein Maß für die Streuung der Einzelwerte  $x_i$  um den arithmetischen Mittelwert  $\bar{x}$ .“ (Papula, L.: Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler, 2016, S. 674).

$$\sigma = \sqrt{s^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.13)$$

Auch Qualitäts- und Fertigungskontrollen beruhen im Regelfall auf dieser Normalverteilung.<sup>228a</sup> Aus diesem Grund wird sie auch zur objektiven Ermittlung und Quantifizierung von Unsicherheiten im neuen Validierungsprozess herangezogen. Mit ihr lassen sich die notwendigen Vertrauens- bzw. Konfidenzintervalle bestimmen, anhand derer die Übereinstimmungsqualität von Messung und Simulation objektiv bewertet wird.<sup>229</sup> Abbildung 4-10 zeigt drei technisch relevante Vertrauensintervalle, die Sigma-Intervalle. Durch sie kann der Streubereich normalverteilter Parameter mit einer statistischen Sicherheit angegeben werden. So liegt der Erwartungswert mit einer Wahrscheinlichkeit von  $p = 95,5\%$  im Intervall  $\mu \pm 2\sigma$ . Mit welcher statistischen Sicherheit gearbeitet wird, ist in der Anforderungsdefinition festzulegen.<sup>230</sup> Die Werte der Schranken bei einer geforderten Wahrscheinlichkeit  $p$  werden als Quantile<sup>228b</sup> der Standardnormalverteilung, die die Werte  $\mu = 0$  und  $\sigma = 1$  aufweist, in Tabellen angegeben. Die Transformation einer normalverteilten Variable  $X$  in die standardnormalverteilte Variable  $U$  erfolgt mittels linearer Transformation.<sup>228c</sup>

$$U = \frac{X - \mu}{\sigma} \quad (4.14)$$

Zu unterscheiden sind die Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha$ , die auch als Signifikanzniveau bezeichnet wird, und das Vertrauensniveau  $\gamma$ . Das Signifikanzniveau ist die Entscheidungsgrenze im Hypothesen- bzw. Signifikanztest, worauf in Abschnitt 4.4.5 näher eingegangen wird.<sup>231</sup> Es besteht folgender Zusammenhang.<sup>228d</sup>

$$\gamma = 1 - \alpha \quad (4.15)$$

Es stellt sich die Frage, wie viele Wiederholungen der einzelnen Validierungsversuche erforderlich sind, um das geforderte Vertrauensintervall mit der notwendigen Genauigkeit zu identifizieren, wobei die Praktikabilitätsanforderung<sup>232</sup> bedingt, dass die Anzahl der Versuchswiederholungen möglichst gering gehalten wird. Hierzu ist ein Verfahren erforderlich, das erklärt, wie

<sup>228</sup> Vgl. Papula, L.: Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler, 2016, (a) S. 371 | (b) S. 388 f | (c) S. 374 | (d) S. 522.

<sup>229</sup> Vgl. Abschnitt 4.4.5 (Empirische Validitätsanalyse).

<sup>230</sup> Vgl. Abschnitt 4.4.1 (Anforderungsdefinition).

<sup>231</sup> Vgl. Rasch, B. et al.: Quantitative Methoden, 2014, S. 42.

<sup>232</sup> Dies betrifft Anf. 3b (Praktikabilität). Vgl. Unterkapitel 4.1 (Diversität der Anwendungsbereiche und Anforderungen an die Methode).

bei einer geringen Anzahl von Versuchswiederholungen, also einer kleiner Anzahl von Versuchsdurchläufen<sup>233</sup>  $n_{TE}$ , die Normalverteilung mit einer statistischen Sicherheit bestimmt werden kann.

Die sogenannte  $t$ -Verteilung, die auch als Student-Verteilung<sup>234</sup> bezeichnet wird, ermöglicht auch für Versuche mit geringer Durchführungshäufigkeit eine Schätzung des Mittelwertes inklusive Angabe eines Vertrauensintervalls für normalverteilte Größen. Diese Technik ist für die Versuchsplanung im neuen Validierungskonzept von besonderer Wichtigkeit.

Der unbekannte wahre Wert  $\bar{x}$  wird gemäß Formel 4.12 als arithmetisches Mittel aus den  $n_{TE}$  Werten geschätzt. Für  $n_{TE} \rightarrow \infty$  konvergiert die Varianz  $s^2$  entsprechend Formel 4.13 gegen  $\sigma^2$ . Je kleiner die Stichprobenzahl  $n$  gewählt wird, desto größer sind die möglichen Abweichungen zwischen  $\bar{x}$  und  $\mu$  sowie zwischen  $s^2$  und  $\sigma^2$ . Bei einer unbekanntem Standardabweichung  $\sigma$  der normalverteilten Grundgesamtheit wird deshalb zur Berechnung der Vertrauensgrenze für den Mittelwert einer Stichprobe ein von  $n_{TE}$  und von dem Vertrauensniveau  $\gamma$  abhängiger  $t$ -Faktor herangezogen. Damit berechnet sich das Versuchsergebnis gemäß folgender Formel:<sup>235a</sup>

$$x = \bar{x} \pm t(n_{TE}, \gamma) \cdot \frac{s}{\sqrt{n_{TE}}} = \bar{x} \pm t(n_{TE}, \gamma) \cdot s_{s_{\bar{x}}} \quad (4.16)$$

mit der Standardabweichung des Mittelwerts  $s_{s_{\bar{x}}}$ .<sup>235b</sup>

$$s_{s_{\bar{x}}} = \frac{s}{\sqrt{n_{TE}}} = \sqrt{\frac{1}{n_{TE} \cdot (n_{TE} - 1)} \cdot \sum_{i=1}^{n_{TE}} (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.17)$$

Der  $t$ -Faktor für  $n = n_{TE}$  Versuchsdurchführungen kann aus Tabellen entnommen werden, wobei sich diese je nach Vertrauensniveau  $\gamma$  unterscheiden. Diese Vertrauensniveaus sind in Anlehnung an die drei Sigma-Intervalle gewöhnlich als  $\gamma = 68,3 \%$ ,  $\gamma = 95 \%$  und  $\gamma = 99 \%$  definiert. Ein Auszug der Tabellen ist in Anhang A.1.4 zu finden. Auch für andere statistische Sicherheiten kann der  $t$ -Faktor bestimmt werden.<sup>235a</sup>

<sup>233</sup> Die Anzahl der Versuchsdurchläufe  $n_{TE}$  entspricht der Anzahl der einzelnen Mess- bzw. Simulationswerte aus denen der Erwartungswert und das Vertrauensintervall bestimmt werden. In der Statistik wird diese Anzahl auch als Umfang  $n$  der Stichprobe bezeichnet. Dieser Begriff führt in dieser Arbeit jedoch zu Missverständnissen, da es sich ausdrücklich nicht um die Anzahl der Konfigurationsstichproben  $n_{CS}$  handelt, sondern um die Anzahl der Mess- bzw. Simulationswerte für eine feste Konfigurationsstichprobe, die aus  $n_{TE}$ -facher Versuchsdurchführung resultiert. (Vgl. Papula, L.: Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler, 2016, S. 252).

<sup>234</sup> Die  $t$ -Verteilung geht auf den englischen Statistiker William Gosset (1876-1937) zurück, der unter dem Pseudonym Student publizierte. (Vgl. Kersting, G.; Wakolbinger, A.: Elementare Stochastik, 2008, S. 142).

<sup>235</sup> Vgl. Papula, L.: Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler, 2016, (a) S. 670 ff | (b) S. 674.

Für eine geforderte statistische Sicherheit  $\gamma = 68,3\%$  und  $n_{TE} \geq 100$  beträgt  $t = 1$ . Dies zeigt, dass sich die  $t$ -Verteilung bei einer großen Anzahl von Messwerten der Genauigkeit der Gaußschen Normalverteilung annähert. Der Vertrauensbereich stimmt dann mit der Standardabweichung des Mittelwerts  $s_{\bar{x}}$  überein.<sup>236a</sup>

Damit ist eine statistische Technik ausgewählt, die auch bei wenigen Versuchswiederholungen eine Bestimmung der Vertrauensintervalle zulässt. Da mit zunehmender Versuchsanzahl bei gleicher statistischer Sicherheit der Streubereich genauer bestimmt werden kann, werden für den Zweck der Validierung folgende Regeln festgelegt:

- Die Testanwendung muss für jede Konfiguration, d.h. für jede Kombination aus Konfigurationsstichprobe des Systems (z.B. Fahrzeugkonfiguration) und Testanwendung (z.B. bestimmte Variante eines Fahrversuchs) mindestens dreimal durchgeführt werden, da der  $t$ -Faktor bei nur zwei Stichproben zu sehr großen Vertrauensintervallen führt.
- Nach Möglichkeit sollten mit den für die Validierung wichtigsten Konfigurationsstichproben, die durch Variation der sensitivsten Parameter erzeugt werden<sup>237</sup>, zumindest einmalig  $n_{TE} = 10$  bis 15 Versuchsdurchführungen je Testanwendung erfolgen. Auf diese Weise lässt sich prüfen, ob die Simulation in den herausforderndsten Arbeitspunkten die Genauigkeit der Messung bei einem möglichst engen Vertrauensintervall trifft. Diese Versuchsanzahl hat sich als bester Kompromiss aus Effizienz und Effektivität herausgestellt, da bei  $n_{TE} < 10$  der  $t$ -Faktor um mindestens 2 % bei Reduktion um jede weitere Versuchsdurchführung ansteigt (das Toleranzband vergrößert sich überproportional) und er sich bei  $n_{TE} > 15$  nur noch um ca. 0,5 % reduziert (der Genauigkeitsgewinn ist dann relativ gering).<sup>236b</sup>

#### 4.4.3.2 Messtechnikauswahl

Wie bereits in Abschnitt 4.4.2.1 in Bezug auf die Auswahl der metrischen Validitätskriterien erwähnt wurde, unterliegt die Messtechnikauswahl häufig einer Kompromissbildung aus drei Einflussfaktoren gemäß Abbildung 4-11:

1. Metrische Validitätskriterien: Welche Größen sollen messtechnisch erfasst werden?
2. Versuchsplan: Unter welchen Bedingungen sollen die Messungen durchgeführt werden?
3. Verfügbarkeit der Messtechnik: Welche Größen können mit der verfügbaren Messtechnik erfasst werden?

---

<sup>236</sup> Vgl. Papula, L.: Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler, 2016, (a) S. 672 f | (b) S. 672.

<sup>237</sup> Vgl. Abschnitt 4.4.2.3 (Konfigurationsstichproben).

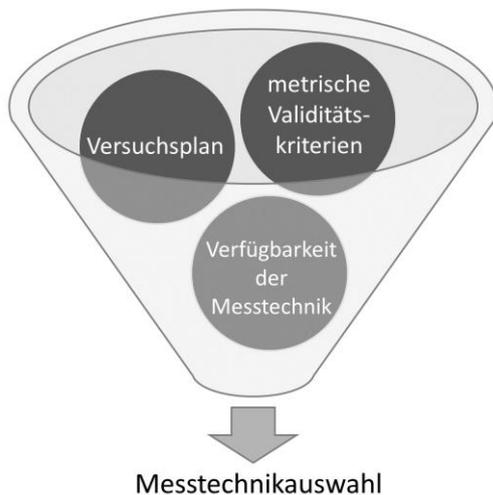


Abbildung 4-11: Einflussfaktoren der Messtechnikauswahl

Aus diesem Auswahlprozess resultiert eine an die Anforderungen und Rahmenbedingungen des Anwendungsgebiets bestmöglich angepasste Messsystemkonfiguration für die Validierungsstudie.

Drei wesentliche Eigenschaften des spezifischen Messsystems müssen im Folgenden zum Abschluss systematischer Fehler im Validierungsvorgehen analysiert werden:

1. *Eigenschaftsänderungen des Systems*

Ein systematischer Fehler in der Validierung ist der Vergleich eines mit Messtechnik aufgerüsteten Systems mit einem nominell bedateten Simulationsmodell. Messtechnik bringt meist Eigenschaftsänderungen des Systems mit sich, die nicht zu vernachlässigen sind. In Fahrversuchen mit einem System zur Datenaufzeichnung inklusive Stromversorgung sowie Anzeige- und Bedieneinheit, Messfelgen, Radpositionssensoren und unterschiedlichen Sensoren im Fahrwerk und am Aufbau kann einfach eine Änderung der Fahrzeugmasse um mehr als 120 kg erreicht werden. Hiermit sind weitreichende sekundäre Veränderungen verbunden. So ändern sich beispielsweise die Schwerpunktlage, die Massenträgheiten, die Standhöhe und damit die Arbeitspunkte aller Fahrwerkskomponenten. Die Identifikation von Eigenschaftsänderungen durch die Messtechnik ist möglichst genau durchzuführen, um die Parametrierung eines äquivalenten Simulationsmodells zu gewährleisten.

2. *Messprinzipien*

Analog zur Eigenschaftsänderung des Systems müssen auch spezielle Sensoreigenschaften in der Simulation abgebildet werden oder in Form einer entsprechenden Konditionierung der Ausgangsdaten berücksichtigt werden. Ein typisches Beispiel ist das Funktionsprinzip von Messfelgen, das zu einem vom Arbeitspunkt und der Anregungsdynamik abhängigen Messverhalten führt. Wang hat dies erforscht und entsprechende

Kompensationsmaßnahmen in seinen Forschungsarbeiten vorgestellt.<sup>238</sup> Auch Fehlinterpretationen müssen durch ein entsprechendes Systemverständnis vermieden werden. So sind die Sensoren einer Messfelge in der Radnabe und nicht am Reifen-Fahrbahn-Kontaktpunkt positioniert. Zwar sind Radlasten in Fahrdynamiksimulationen häufig als Standard-Ausgangsgrößen vordefiniert, es ist in den meisten Anwendungsfällen jedoch mit signifikanten systematischen Fehlern verbunden, wenn diese mit den Vertikalkraftsignalen von Messfelgen verglichen werden. Ähnlich verhält es sich mit Radpositionssensoren. Bei diesen ist kritisch zu hinterfragen, ob sie als Bezugssystem den Aufbau oder die Fahrbahn heranziehen.

### 3. Datenverarbeitung

Auch abweichende Datenverarbeitungsschritte in Messung und Simulation können zu Differenzen in den Vergleichsdaten führen, die nicht in einem unterschiedlichen Systemverhalten begründet sind. Insbesondere Signalfilterungen und Änderungen von Abtastraten sollten sensibel behandelt werden.

Die Prinzipien der Messdatenerfassung und die Datenverarbeitungsschritte sind Bestandteile des nachfolgenden Teilprozesses *Datenerfassung und -verarbeitung*, der in Abschnitt 4.4.3.3 beschrieben ist.

Die Messung der lastfallbestimmenden Signale – z.B. die Fahrereingaben im Fahrversuch – ist obligatorisch, um die Simulation gemäß der Ausführungen in Tabelle 4-2 und in Abschnitt 4.4.4 als Open-Loop-Versuch ausführen zu können.

#### 4.4.3.3 Datenerfassung und -verarbeitung

Es stellt sich die Frage, mit welcher Strategie die Wahrscheinlichkeit einer Verfälschung der Daten auf dem Weg von der Signalerfassung am Sensor bis hin zum Vergleich der metrischen Validitätskriterien minimiert werden kann. Als Ziele dieses Teilprozesses ergeben sich die äquivalente Datenerhebung in beiden Untersuchungsumgebungen und die Minimierung der Validitätsbeeinflussung durch die Datenverarbeitungsschritte. Die möglichen Fehlerquellen in der Signalerfassung und Datenverarbeitung werden in Abschnitt 4.5.3 thematisiert. Die entwickelte Lösung für den Praxiseinsatz ist in Abbildung 4-12 zusammengefasst und wird nachfolgend erläutert.<sup>239</sup>

---

<sup>238</sup> Vgl. Unterkapitel 3.2 (Bewertung des Forschungsstands) / Wang, Y.: Charakterisierung der Raddynamikmesstechnik, 2018 / Wang, Y.; Winner, H.: Measurement Characteristics of Wheel Force Sensor, 2015 / Wang, Y.; Winner, H.: Measurement of Tyre Contact Force, 2015.

<sup>239</sup> Vgl. Viehof, M. et al.: Validierungskonzept für die Vertikaldynamik, 2017, S. 163.

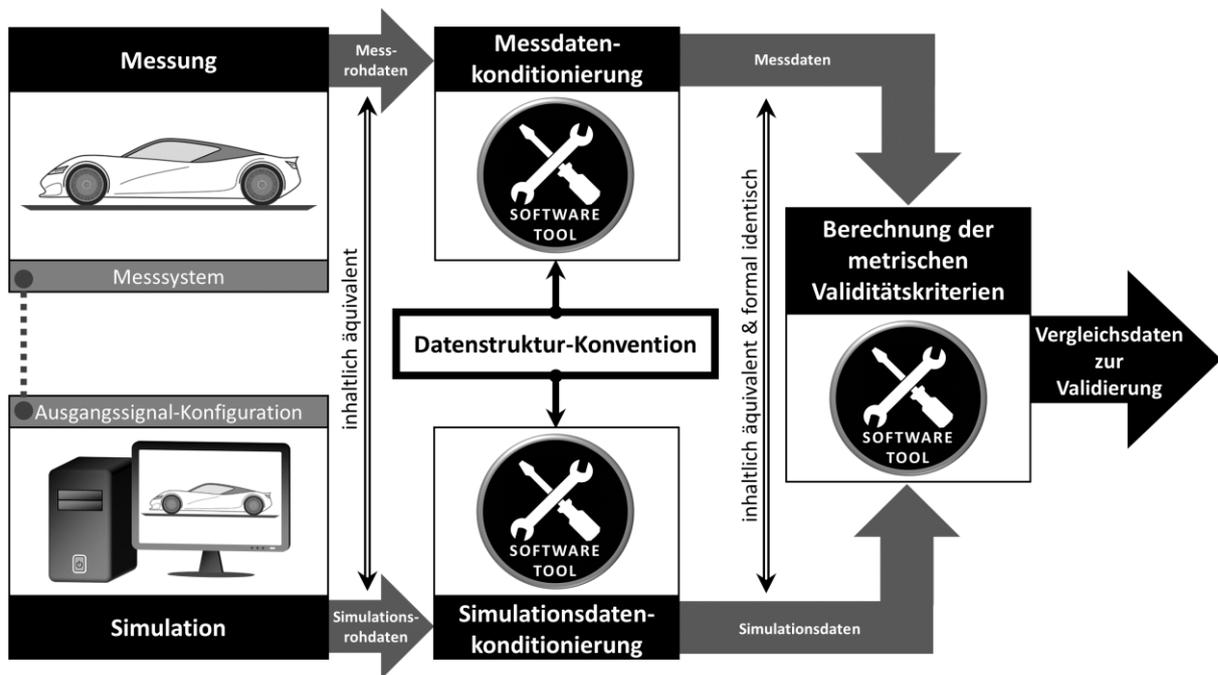


Abbildung 4-12: Datenerfassung und -verarbeitung

Für die Validierung der Simulation sind Vergleichsdaten erforderlich. Nur äquivalente Daten aus den beiden Untersuchungsumgebungen können hierfür herangezogen werden. In der Praxis sind dies Sensorsignale und Validitätskriterien, die aus diesen Signalen berechnet werden. Zusätzliche Informationen aus der Simulation wären zwar ohne nennenswerten Aufwand zu erheben, können aber lediglich für Plausibilisierungen und Konsistenzprüfungen herangezogen werden. Die logische Schlussfolgerung ist, dass die Simulation äquivalente Sensordaten zum realen Messsystem ausgeben muss. Aus diesem Grund wird die Messtechnik unter Berücksichtigung ihrer Eigenschaften, die in Abschnitt 4.4.3.2 erläutert sind, in die Simulationsumgebung übertragen und eine äquivalente Ausgangssignal-Konfiguration erstellt.

Diese inhaltlich äquivalenten Sensorrohdaten sind für den Validierungsprozess nicht geeignet, da sie in der Regel formale Unterschiede aufweisen. Übliche Abweichungen zwischen den Sensorsignalen aus Messung und Simulation betreffen folgende Eigenschaften:

- Signalnamen
- Vorzeichen
- Einheiten
- Art der Messung (relativ oder absolut)
- Abtastrate
- Signallänge
- Filterung
- Zeitliche Verschiebung von Signalen unterschiedlicher Messsysteme z.B. durch unterschiedliche Laufzeiten, Totzeiten oder Signalverarbeitungsschritte

Aufgrund dieser Unterschiede sollten metrische Validitätskriterien nicht durch individuelle Rechenoperationen für Mess- und Simulationsrohdaten bestimmt werden, sondern die Datenstruktur sollte bezüglich der aufgelisteten Eigenschaften angeglichen werden. Hierzu ist es erforderlich, im Voraus eine Datenstruktur-Konvention festzulegen, anhand derer sich die Konditionierungssoftware ausrichtet. Verlangt die äquivalente Abbildung des Funktionsprinzips eines Messsystems die nachträgliche Bearbeitung von Simulationsrohdaten, um Vergleichbarkeit der Sensorsignale aus Messung und Simulation herzustellen und um ein komplexes Sensormodell zu umgehen, können diese Datenverarbeitungsschritte in der Simulationsdatenkonditionierung integriert werden. Gibt beispielsweise die Simulation die Radaufstandskraft aus, die mit der über eine Messfelge ermittelten Radnabenkraft verglichen werden soll, ist eine Signalwertkorrektur für die Gewichts- und für die Trägheitskraft des Rades vorzunehmen. Hierfür sind ggf. zusätzliche Ausgangsgrößen aus der Simulation erforderlich, wie z.B. die Vertikalbeschleunigung des Rades.<sup>240</sup>

Im Anschluss an die Datenkonditionierung liegen für jeden Versuch inhaltlich äquivalente und formal identische Sensorsignale aus der Messung und aus der Simulation vor. Der Vorteil dieser Datenangleichung ist, dass die nachfolgenden Bearbeitungsschritte – insbesondere die Berechnung der metrischen Validitätskriterien – für die Mess- und Simulationssignale identisch sind. Hierdurch ist ausgeschlossen, dass – z.B. durch unterschiedliche Filterungen infolge abweichender Abtastraten – systematische Datenverarbeitungsfehler die Validitätsaussage beeinflussen. Wenn in diesen weiteren Datenverarbeitungsschritten Fehler vorliegen sollten, wirken sich diese auf die Simulations- und die Messdaten gleichermaßen aus, sodass die Übereinstimmungsqualität hiervon nicht betroffen ist. Dieses Vorgehen stärkt somit die Robustheit der Validitätsbewertung.<sup>241</sup>

#### 4.4.4 Versuchsdurchführung

Bereits in Bezug auf die Auswahl der Testanwendungen in Abschnitt 4.4.2.2 wurde beschrieben, dass die Realversuche zeitlich vor den Simulationen durchzuführen sind, um auf Basis der gemessenen Lastfallsignale<sup>242</sup> die Simulation als Open-Loop-Versuch ausführen zu können, auch wenn es sich in der Praxis um einen Closed-Loop-Versuch handelt.

Diese Strategie bringt Vorteile mit sich:

- Der Vergleich von Messung und Simulation erfolgt auf Basis der Systemreaktionen (z.B. Fahrverhalten) und nicht anhand der Anregungsgrößen (z.B. Fahrereingaben).
- In der Fahrdynamiksimulation ist kein Fahrermodell erforderlich.

---

<sup>240</sup> Vgl. Abschnitt 4.4.3.2 (Messtechnik).

<sup>241</sup> Vgl. Viehof, M. et al.: Validierungskonzept für die Vertikaldynamik, 2017, S. 163.

<sup>242</sup> Lastfallsignale beschreiben die Anregung des Systems im Validierungsversuch. In der Fahrdynamik sind dies die Fahrereingaben im Fahrversuch oder die Kraft- bzw. Wegeinleitungen auf einem Prüfstand.

- Anregungsbedingte Streuungen der Ausgangsgrößen im Realversuch werden auch als solche in die Simulation übertragen.

Dieses Vorgehen ist somit ein weiterer wichtiger Schritt zur Reduktion des Einflusses systematischer Fehler auf das Validierungsergebnis.

In manchen Fällen beschränken sich die Realversuche nicht ausschließlich auf die Ausführung des Versuchsplans. Gründe für Zusatzmessungen sind:

- Identifikation von Modellparametern<sup>243</sup>
- Identifikation bzw. Abschätzung nicht kontrollierbarer Einflussgrößen<sup>244</sup>
- Sensorkalibrierung<sup>245</sup>
- Zeitvarianzanalyse<sup>246</sup>
- Systemkonditionierung<sup>246</sup>

Diese Zusatzmessungen haben gemein, dass sie die Genauigkeit der Vergleichsdatenerhebung erhöhen, indem Informationen über schwer handhabbare Unsicherheiten gewonnen werden und somit systematische Fehlereinflüsse infolge erhöhter Kontrollierbarkeit reduziert werden. Auf den Nutzen der aufgeführten Zusatzmessungen wird in Unterkapitel 4.5 näher eingegangen.

#### 4.4.5 Empirische Validitätsanalyse

Die empirische Validitätsanalyse steht in Bezug zum Signifikanztest. Als Datenbasis aus der Versuchsdurchführung liegen zwei unabhängige Stichproben für das betrachtete metrische Validitätskriterium (MVC) aus dem Realversuch und der Simulation vor. Für diese Stichproben lassen sich jeweils der Mittelwert und die Varianz gemäß der Ausführungen in Abschnitt 4.4.3.1 bestimmen bzw. schätzen. Die Rahmenbedingungen aus der Praxis – nämlich vergleichsweise kleine Stichprobengrößen, nicht erfassbare und schwer quantifizierbare Unsicherheiten, unbekannte Verteilungen von Fehlereinflüssen und die Festlegung ungewichteter Toleranzintervalle in der Anforderungsdefinition – erfordern eine Vereinbarkeit und die Verknüpfung mit der statistischen Datenerhebung inkl. ihrer Schätzgrößen für den Erwartungswert und der Streuung. Für die Validitätsbeurteilung ist in Analogie zum Signifikanztest die Frage zu beantworten, ob eine empirische Mittelwertsdifferenz zwischen den metrischen Validitätskriterien der Messung

---

<sup>243</sup> Vgl. Abschnitt 4.5.1 (Konfigurationsstichproben und Modellparametrierung).

<sup>244</sup> Vgl. Abschnitt 4.5.2 (Nicht kontrollierbare Einflussgrößen).

<sup>245</sup> Vgl. Abschnitt 4.5.3 (Signalerfassung und -verarbeitung).

<sup>246</sup> Vgl. Abschnitt 4.5.4 (Versuchsdurchführung in der Praxis).

und der Simulation unter Berücksichtigung des Vertrauensniveaus signifikant ist oder ob sie auf einem Zufall beruht.<sup>247</sup>

Die Beantwortung dieser Frage erfolgt bei normalverteilten Stichprobenwerten mit dem  $t$ -Test<sup>248</sup>, der als Entscheidungsgrundlage das in Abschnitt 4.4.3.1 eingeführte Signifikanzniveau  $\alpha$  heranzieht. Dieses wird in vielen praktischen Anwendungsgebieten auf 5 % festgelegt.<sup>249</sup> Auch in dieser Arbeit wird der beschriebene – wenngleich auch subjektiv definierte – Standard beibehalten, womit gleichzeitig das Vertrauensniveau  $\gamma$  der Validierungsergebnisse bei 95 % (vergleichbar mit dem  $2\sigma$ -Intervall) liegt.<sup>250</sup> Abweichende Signifikanzniveaus sind zulässig, jedoch sollten die Aussagekraft und der Nutzen von Validierungsstudien mit  $\alpha > 5$  % kritisch hinterfragt werden, da  $\alpha$  das Risiko von Falschaussagen darstellt. Ein Niveau von  $\alpha = 31,7$  % in Übereinstimmung mit dem  $1\sigma$ -Intervall hat hingegen keine praktische Relevanz.<sup>250</sup>

Die Ausführungen zur Normalverteilung und zum  $t$ -Faktor bezüglich der Versuchsplanung in Abschnitt 4.4.3.1 stehen in direktem Bezug zum  $t$ -Test. Eine Übersicht zur Funktionsweise und zum Ablauf dieses Signifikanztests befindet sich in Anhang A.1.5. Darin wird aufgezeigt, dass am Ende des  $t$ -Tests eine einfache Entscheidungslogik für die Gültigkeitsbewertung der beiden Hypothesen  $H_0$  und  $H_1$  Anwendung findet. Dabei ist es unerheblich, um wie viel der berechnete Wert  $t_{df}$  kleiner ist als der Signifikanz-Grenzwert  $t_{crit}$ , damit die Nullhypothese durch die Stichprobe bekräftigt wird. Dieses Prinzip wird für die Validitätsbewertung übernommen. Die Stichprobenvalidität wird anhand von Vertrauens- und Gültigkeitsbereichen bewertet, die in Form von Wertebereichen in einer Intervall- bzw. Balkendarstellung miteinander verglichen werden. Diese Intervalle repräsentieren ein Quantil mit einer definierten Signifikanz bzw. Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha$ . Die Definition der Bewertungslogik in Abschnitt 4.4.5.3 zeigt, dass sich auch ein Übergangs- bzw. Unsicherheitsbereich zwischen Stichprobenvalidität und -invalidität objektiv erheben lässt, wenn die Bewertung anhand signifikanter Vertrauensintervalle erfolgt. Dies bedeutet, dass in Ergänzung zum vorgestellten Signifikanztest eine Zwischenstufe in der Bewertung zwischen signifikanter Stichprobenvalidität und signifikanter Invalidität der Stichprobe eingeführt wird. Diese Stufe kennzeichnet eine Unsicherheit in der Validitätsbewertung und resultiert aus den Signifikanzbereichen.

Abbildung 4-13 veranschaulicht das Prinzip der Erfassung von Vertrauensintervallen aus empirischen Daten, wie sie ab Abschnitt 4.4.5.2 in dieser Arbeit Anwendung findet. Dabei ist der

---

<sup>247</sup> Zufall bedeutet in diesem Zusammenhang, dass ein Stichprobenfehler vorliegt. Das heißt, dass aus einer sehr großen Anzahl möglicher Stichproben für die durchzuführende Untersuchung Stichproben ausgewählt wurden, die nicht gleichverteilt um den wahren Mittelwert  $\mu$  liegen. (Vgl. Rasch, B. et al.: Quantitative Methoden, 2014, S. 35 f).

<sup>248</sup> Ebenso wie der in Abschnitt 4.4.3.1 vorgestellte  $t$ -Faktor geht auch der  $t$ -Test auf den englischen Statistiker William Gosset zurück.

<sup>249</sup> Vgl. Rasch, B. et al.: Quantitative Methoden, 2014, S. 44 / Papula, L.: Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler, 2016, S. 546.

<sup>250</sup> Vgl. Abschnitt 4.4.3.1 (Versuchsplanung und Versuchsplanoptimierung).

Vertrauensbereich in Diagramm (c) nicht derart zu interpretieren, dass in diesem Intervall alle Werte gleich wahrscheinlich sind. Die Wahrscheinlichkeit wird durch die  $t$ -Verteilung, wie sie in Diagramm (b) dargestellt ist, geschätzt. Für die Bewertung der Stichprobenvalidität wird jedoch in Analogie zum  $t$ -Test keine Unterscheidung zwischen besserer oder schlechterer Anforderungserfüllung vorgenommen, sondern es wird lediglich nach Boolescher Logik geprüft, ob für das geforderte Signifikanzniveau die Bewertungskriterien für Stichprobenvalidität erfüllt sind oder nicht. Die Möglichkeit, basierend auf der Wahrscheinlichkeitsverteilung auch ein kontinuierliches Validitätsmaß einzuführen, wird in Abschnitt 6.2.1 diskutiert. Die Validitätsbewertung richtet sich am Signifikanztest aus, sodass die Informationsfilterung von Diagramm (b) zu (c) gerechtfertigt ist und den Bewertungsprozess vereinfacht. Diese Informationsreduktion ist nicht nur legitim, sondern auch erforderlich, weil Genauigkeitsdefinitionen sowie Schätzungen unbekannter Unsicherheiten, deren Verteilungen nicht bekannt sind, in der Praxis ebenfalls Intervallangaben mit harten Grenzen entsprechen, innerhalb derer keine variierende Gewichtung erfolgt.<sup>251</sup>

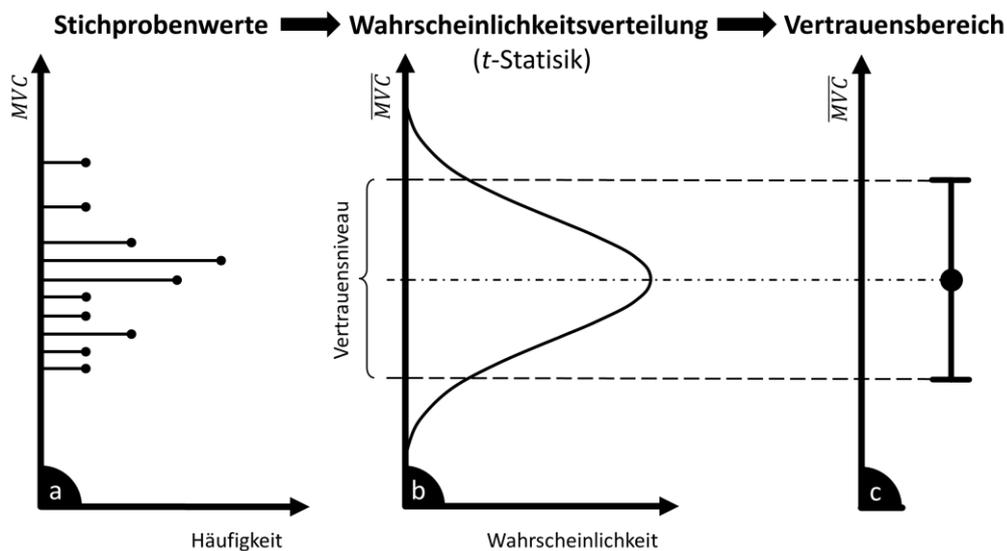


Abbildung 4-13: Erhebung eines Vertrauensintervalls aus den Stichprobenwerten

Der Einfluss der Stichprobengröße, d.h. die Anzahl  $n_{TE}$  der Versuchsdurchführungen, und die Unbekanntheit von Unsicherheiten, die sich aus den Stichprobenwerten bestenfalls grob abschätzen lassen, sind als grundlegende weiche Faktoren der Validierungspraxis, jedoch nicht als methodische Schwachstelle des neuen Validierungskonzepts, zu bewerten. Durch die konservative Abschätzung der Vertrauensintervalle mit Hilfe der  $t$ -Statistik und die Möglichkeit, harte, an das Anwendungsgebiet angepasste Toleranzgrenzen bzw. -intervalle definieren zu können, passt sich die Validierungsmethode an die Rahmenbedingungen an.

In den nachfolgenden Unterkapiteln werden jeweils (1) der Zweck der Validierungsstufe, (2) die zur Anwendung kommende Validierungstechnik und (3) das objektive Bewertungsverfahren zusammengefasst.

<sup>251</sup> Vgl. Abschnitt 4.4.1 (Anforderungsdefinition) und 5 (Anwendbarkeitsanalyse in der Fahrdynamik).

Die ersten beiden Stufen der Validierung, die Versuchsdaten- und die Parametervalidierung, dienen dazu, Abweichungen zu identifizieren, um eine frühzeitige Iteration zur Korrektur von Fehlern durchführen zu können. Wenn lediglich eine Untersuchung der Simulationsvalidität gefordert ist, können diese beiden Stufen übersprungen werden. Ihre Durchführung wird insbesondere dann empfohlen, wenn schon im Voraus Zweifel an der Modell- und Datenvalidität bestehen und wenn im Rahmen der Validierung Fehler effizient identifiziert und systematisch korrigiert werden sollen (siehe Iterationsschleifen in Abbildung 4-3).

### 4.4.5.1 Versuchsdatenvalidierung

#### 4.4.5.1.1 Motivation und Ziel

Die Versuchsdatenvalidierung stellt als erste der drei Validierungsstufen sicher, dass die Daten aus der Messung und der Simulation formal übereinstimmen. Sie hat zum Ziel, dass zum einen systematische Fehler identifiziert und frühzeitig über eine Iterationsschleife korrigiert werden können. Zum anderen steigt bei Erfüllung der Anforderungen dieser Validierungsstufe die Wahrscheinlichkeit, dass auch in den nachfolgenden Validierungsstufen die gewünschte Simulationsqualität nachgewiesen wird. Für die Versuchsdatenvalidierung sind zunächst die potenziellen formalen und systematischen Fehler zu identifizieren. Eine Analyse des Informationsflusses in der Datenerhebung, wie er in Abbildung 4-14 dargestellt ist, offenbart die drei relevanten Fehlertypen:

1. Eine *fehlerhafte Lastfallübertragung* liegt vor, wenn das Simulationsmodell eine andere Beanspruchung erfährt als das reale System in der Messung.
2. Eine *fehlerhafte Parametrierung bzw. Parameteridentifikation* bewirkt, dass das Simulationsmodell andere Eigenschaften aufweist als das reale System.
3. Eine *fehlerhafte Datenerhebung* führt sowohl in der Messung als auch in der Simulation zu Differenzen zwischen den Vergleichsdaten, die sich auf die Validitätsbewertung auswirken. Der Datenerhebung liegt eine Vielzahl potenzieller Fehlerquellen zugrunde. So können die realen Sensoren beispielsweise einen Offset, einen Verstärkungsfehler, eine Signaldrift oder eine falsche Einbauposition aufweisen. Aber auch Fehler in der Interpretation und Korrektur von Sensorsignalen führen zu Abweichungen. In der Simulation stellt die äquivalente Abbildung des realen Messsystems häufig eine Herausforderung dar.<sup>252</sup> Insbesondere einfache Fehler, wie falsche Einbaupositionen oder Vorzeichen- und Einheitenfehler, sollten in dieser frühen Phase der Validierung ausgeschlossen werden können.

---

<sup>252</sup> Vgl. Abschnitte 4.4.3.2 (Messtechnikauswahl) und 4.4.3.3 (Datenerfassung und -verarbeitung).

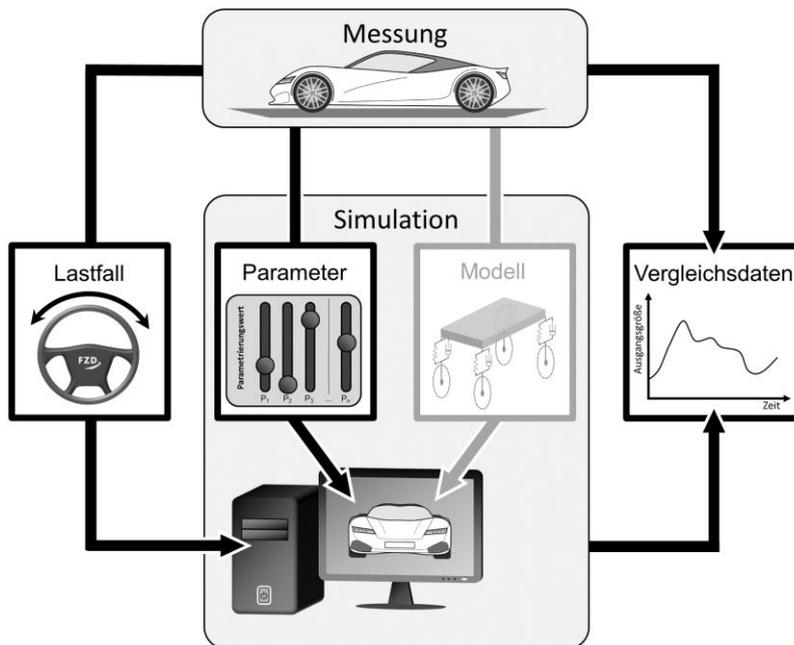


Abbildung 4-14: Ursachen formaler Datenfehler in der Vergleichsdatenerhebung

Der Einfluss der Modellvalidität auf die Qualität der Vergleichsdaten ist in Abbildung 4-14 ausgedeutet, da sie in der ersten Validierungsstufe noch keine direkte Betrachtung findet und nicht als formaler Fehler der Datenerhebung angesehen wird.

#### 4.4.5.1.2 Objektivierungstechnik

Für die Objektivierung dieses Teilprozesses der Validierung ist ein Verfahren erforderlich, das die drei aufgeführten Fehlertypen identifizieren kann. Da sich die Fehlertypen in den Versuchsausgangsdaten überlagern, ist es nicht ausreichend, ein Urteil ausschließlich anhand der Spannweite<sup>253</sup> bzw. der absoluten Extrema der Sensordaten zu fällen. Insbesondere die Aufdeckung von Lastfallübertragungs- und Parametrierungsfehlern erfordern eine Analyse der gesamten Signalinhalte. Als prädestiniert für diesen Anwendungszweck stellt sich der Vergleich kumulativer Verteilungsfunktionen<sup>254</sup> (CDF) aller Sensorsignale heraus. Diese geben Aufschluss über den Zeitanteil der Sensorwerte über der Versuchsdauer – ohne den Nachteil einer subjektiv festgelegten Quantifizierung, wie sie bei der Verwendung von Histogrammen durch die Klasseneinteilung<sup>255</sup> vorliegen würde.

Wie die CDF aus einem zeitdiskreten Signal generiert wird, wird in Anhang A.1.6 anhand eines Beispiels visualisiert und beschrieben.

<sup>253</sup> Die Spannweite beschreibt den Abstand zwischen dem Minimum und dem Maximum der Signalwerte. (Vgl. Papula, L.: Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler, 2016, S. 475).

<sup>254</sup> Englische Bezeichnung: cumulative distribution function (CDF).

<sup>255</sup> Vgl. Papula, L.: Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler, 2016, S. 480.

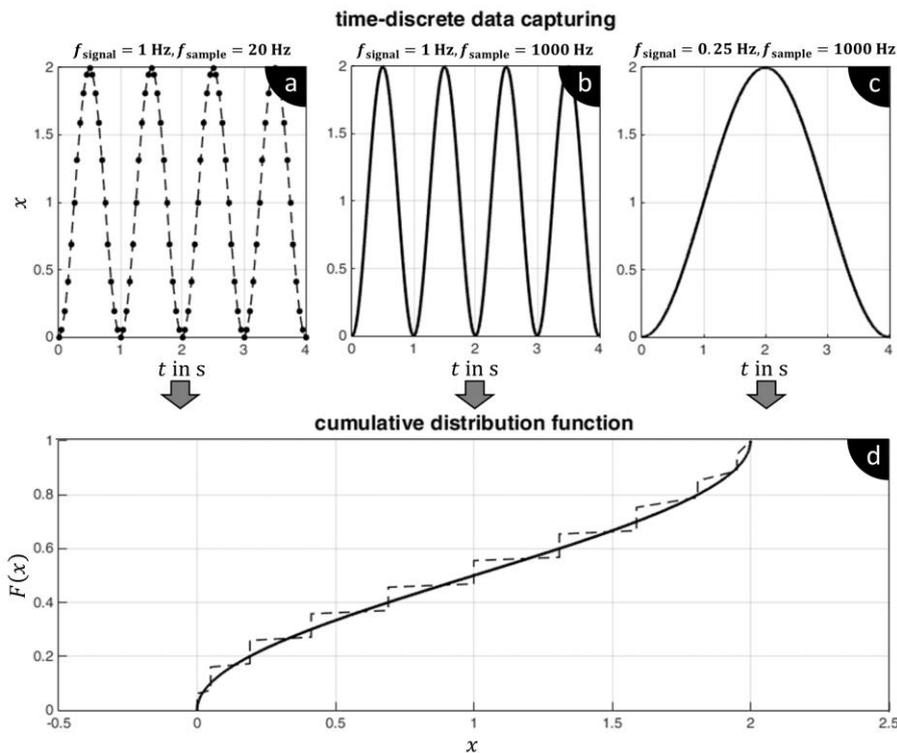


Abbildung 4-15: Eigenschaften der kumulativen Verteilungsfunktion

Abbildung 4-15 zeigt anhand der CDFs (d) dreier unterschiedlicher Sinussignale (a, b, c) zwei wesentliche Eigenschaften:

1. Das erste Signal (a) ist eine 1 Hz-Sinusschwingung mit einer Abtastfrequenz von 20 Hz.<sup>256</sup> Hieraus resultiert eine stufenförmige CDF (d). Das zweite Signal (b) unterscheidet sich nur durch seine höhere Abtastrate von 1000 Hz. Dies bewirkt eine höhere Auflösung der CDF (d), ändert aber nicht die Topographie des Graphen. Somit ist die CDF von der Abtastfrequenz abhängig. Um eine objektive Vergleichbarkeit von Mess- und Simulationsdaten durch CDFs zu schaffen, muss im Rahmen der Datenkonditionierung eine Angleichung der Abtastraten erfolgen, falls sich diese bei der Datenerfassung unterscheiden.
2. Das dritte Signal (c) unterscheidet sich vom zweiten (b) lediglich durch eine geringere Signalfrequenz von 0,25 Hz. Dieser signifikante Signalunterschied kann mithilfe der CDF (d) nicht identifiziert werden, da sie keinen absoluten Zeitbezug hat und hier gleichzeitig die Phasendifferenz vom Signalbeginn bis zum Signalende jeweils ein ganzzahliges Vielfaches von  $\pi$  ist. Unter dieser Bedingung ist die CDF von der Signalfrequenz unabhängig und somit zur Identifikation frequenzabhängiger Unterschiede nicht geeignet. In der praktischen Validierung erscheint ein solcher Fehler relativ unwahrscheinlich, wenn die Eingangssignale der Simulation im praktischen Versuch gemessen werden. Um Abweichungen dieser Art im Rahmen der Versuchsdatenvalidierung den-

<sup>256</sup> Die Punkte in Diagramm (a) entsprechen den Mess- bzw. Abtastwerten.

noch identifizieren zu können, wird vorgeschlagen, die Untersuchung der CDFs um einen Vergleich von Leistungsdichtespektren<sup>257</sup> (PSD) zu ergänzen. In diesen hat die zeitliche Signaländerung einen signifikanten Einfluss, da mit steigender Änderungsfrequenz des Signals auch die Signalleistung zunimmt.<sup>258</sup> Die nachfolgend beschriebene Objektivbewertung kann für das Leistungsdichtespektrum analog zur CDF erfolgen.

Untersuchungen, die in Anhang A.1.7 dokumentiert sind, zeigen, dass sich der CDF-Vergleich zur zuverlässigen Identifikation der drei relevanten Fehlertypen bewährt. Der Prozess der Versuchsdatenvalidierung sieht vor, dass für jeden Sensorausgangswert die CDF – und optional ergänzend die PSD – der Messung mit derjenigen der Simulation verglichen wird.

##### 4.4.5.1.3 Objektive Bewertung

Als zulässige Abweichung für die Sensorsignale können wahlweise bekannte (Bauteil-)Toleranzen (z.B. für den Kraftsensor am Dämpfer die Bauteiltoleranz aus der Serienproduktion) oder ein Signifikanzintervall, das sich unter Anwendung der  $t$ -Statistik<sup>259</sup> auf die Sensorsignale bei mehrfacher Versuchsdurchführung berechnet, herangezogen werden. Auf diese Weise kann eine automatisierte und damit eine anwenderunabhängige Durchführung der Versuchsdatenvalidierung realisiert werden.

Abbildung 4-16 zeigt ein Beispiel, in dem als Genauigkeitsanforderung das Vertrauensniveau  $\gamma = 95\%$  vorgegeben wird. Der Lastfall entspricht hier einem frequenzexponentiellen Gleitsinus mit variabler Amplitude. Sowohl das Messsignal (a, b) als auch das Simulationsergebnis (c, d) unterliegen einer Streuung. Der Versuch wurde jeweils 15-mal durchgeführt (b, d). Unter Anwendung der  $t$ -Statistik wird das geforderte 95%-Vertrauensintervall für beide Untersuchumgebungen berechnet, wobei das Intervall der Simulation aufgrund geringerer Varianz kleiner als das der Messung ausfällt. Der Vergleich der CDFs für die beiden gemittelten Signale aus Messung und Simulation in Diagramm (e) zeigt, dass die Simulation tendenziell etwas höhere Werte liefert. Als Entscheidungsgrundlage, ob damit dennoch die Genauigkeitsanforderung erfüllt ist, müssen die in Diagramm (f) dargestellten CDF-Flächen, die sich aus der jeweils oberen und unteren Grenze der Konfidenzintervalle ergeben, berechnet werden. Im abgebildeten Beispiel kann nicht falsifiziert werden, dass das Signal aus der Simulation die Genauigkeitsanforderung erfüllt, da das 95%-Vertrauensintervall der Simulation vollständig innerhalb dem der Messung liegt. Somit gilt die Versuchsdatenvalidierung als bestanden. Wenn die CDF-Fläche der Simulation außerhalb der Toleranzfläche der Messung liegt, sollte der Iterationsprozess gestartet werden, da ein Falsifikationsnachweis vorliegt, der verifiziert, dass die Anforderungen an die Versuchsdatenübereinstimmung nicht erfüllt sind.

---

<sup>257</sup> Englische Bezeichnung: power spectral density (PSD).

<sup>258</sup> „Das Leistungsdichtespektrum  $PSD(f)$  ist das Produkt aus Messzeit  $T$  und dem zweifachen Betragsquadrat des durch die FFT ermittelten Amplitudenspektrums  $v(f)$ . Das Betragsquadrat entspricht dem Produkt aus  $v(f)$  und dem konjugiert komplexen Amplitudenspektrum  $v^*(f)$ .“ (Claus, S.: Potenzialbewertung zukünftiger Fahrwerkregelungen, 2011, S. 34).

<sup>259</sup> Vgl. Abschnitt 4.4.3.1 (Versuchsplanung und Versuchsplanoptimierung).

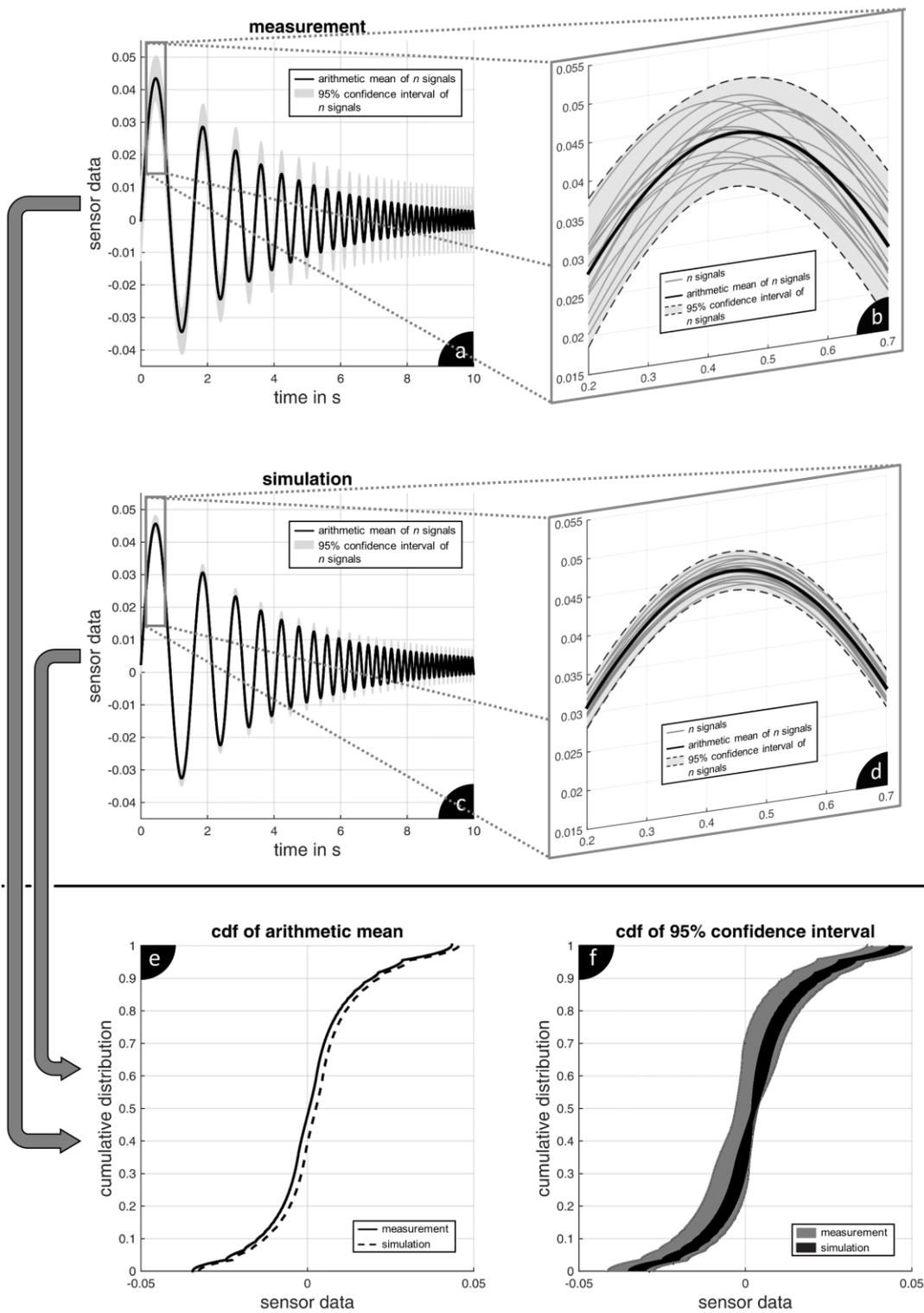


Abbildung 4-16: Versuchsdatenvalidierung – Beispiel für Anforderungserfüllung

Wird keine varianzbezogene Übereinstimmung in Bezug auf die Messdaten gefordert, sondern eine Signaltoleranz definiert, ist die Auswertung analog vorzunehmen. In diesem Fall muss je-

doch überprüft werden, dass die vorgegebene Toleranz nicht kleiner als das Streuband der Messung ist, da eine höhere Genauigkeit aufgrund der Datenungenauigkeit aus der Messung nicht nachweisbar ist.<sup>260</sup>

Treten Fälle von Invalidität auf, sollten die Ursachen systematisch erschlossen werden. Redundante Sensorinformationen (z.B. Schwimmwinkelmessung über ein Stereo-GPS-System und über einen Correvit-Sensor) oder Mehrfachmessungen an einem symmetrischen System (z.B. Radaufhängungssensorik an der linken und rechten Seite eines Fahrzeugs) unterstützen die Identifikation des Fehlertyps bei falsifizierter Versuchsdatenvalidität. Bereits anhand der Art und Weise, wie die Fälle von Invalidität beim Vergleich der CDF auftreten, kann ein Rückschluss auf den Fehlertyp erfolgen, wobei die folgenden Aussagen nicht pauschalisierbar sind:

- Sind einzelne Sensorsignale nicht valide, ist zu vermuten, dass es sich um einen Datenerfassungsfehler dieses Signals oder eine fehlerhafte Parametrierung eines für dieses Signal relevanten Submodells handelt. Häufig kann über Symmetrien, Konsistenzprüfungen oder Plausibilisierungen ein weiterer Ausschluss erfolgen.
- Sind mehrere Sensorsignale einer Übertragungsstrecke nicht valide, ist eine fehlerhafte Lastfallübertragung von der Messung in die Simulation anzunehmen.

In jedem Fall ist bei nachweislicher Invalidität eines oder mehrerer Sensorsignale zu empfehlen, eine Iterationsschleife gemäß Abbildung 4-3 zur Fehlerkorrektur und Verbesserung der Vergleichsdatenqualität durchzuführen, bevor der nächste Validierungsschritt begonnen wird.

#### 4.4.5.2 Parametervalidierung

##### 4.4.5.2.1 Motivation und Ziel

Die Parametervalidierung ist physikalisch motiviert. Durch sie wird nachgewiesen, dass sich die unterschiedlichen Modellparametrierungen für die ausgewählten Konfigurationsstichproben in gleicher Weise auf die Zielgrößen eines Versuchs auswirken wie im Realversuch. Dadurch wird sichergestellt, dass die in der Auslegungsphase der Validierungsstudie als relevant bewerteten Parametereinflüsse vom Simulationsmodell physikalisch richtig umgesetzt werden. Das Prinzip der Parametervalidierung ist somit die Bestimmung lokaler Sensitivitäten im Parameterraum. Gleichzeitig kann auch die absolute Varianz des Validitätskriteriums mit dem Erwartungswert aus der Vorbereitungsphase verglichen werden.

##### 4.4.5.2.2 Objektivierungstechnik

Das Verfahren lässt sich sowohl bei Variation einzelner Systemparameter gemäß Abbildung 4-17 als auch bei vollständigen Parameterdatensatzvariationen, wie in Abbildung 4-18 demonstriert, anwenden. Beide Abbildungen beziehen sich auf die beispielhafte Simulation eines fußpunkterregten Ein-Massen-Schwingers im eingeschwungenen Zustand mit drei unterschiedlichen Parametrierungen (siehe Tabelle innerhalb der Abbildungen). Dieses Modell ist

---

<sup>260</sup> Vgl. Abschnitt 4.4.5.3 (Simulationsvalidierung).

das einfachste Fahrzeuersatzmodell der Vertikaldynamik und lässt sich mit den drei Parametern Aufbaumasse  $m_{\text{body}}$ , Federsteifigkeit  $c_{\text{spring}}$  und Dämpferkonstante  $d_{\text{damper}}$  parametrieren. Der Reifen und die reifengefederte Masse werden im Gegensatz zum Zwei-Massen-Schwinger vernachlässigt. Das Simulationsmodell wird sinusförmig mit einer Frequenz von 1 Hz angeregt, wobei die Anregungsamplitude  $\hat{z}_{\text{wheel}}$  als vierter Variationsparameter in die Untersuchung aufgenommen wird.

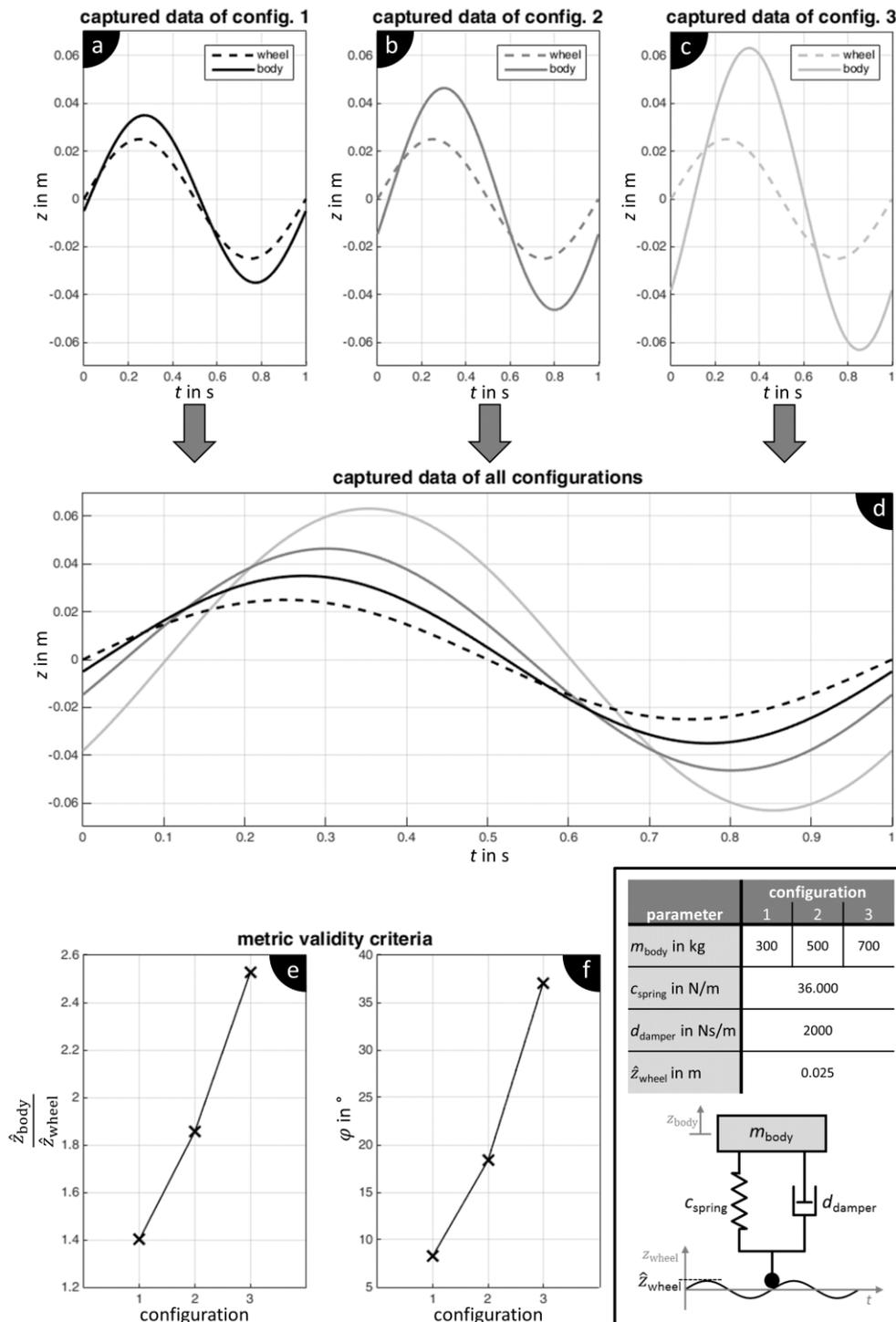


Abbildung 4-17: Parametervalidierung – Beispiel für einzelne Parametervariation

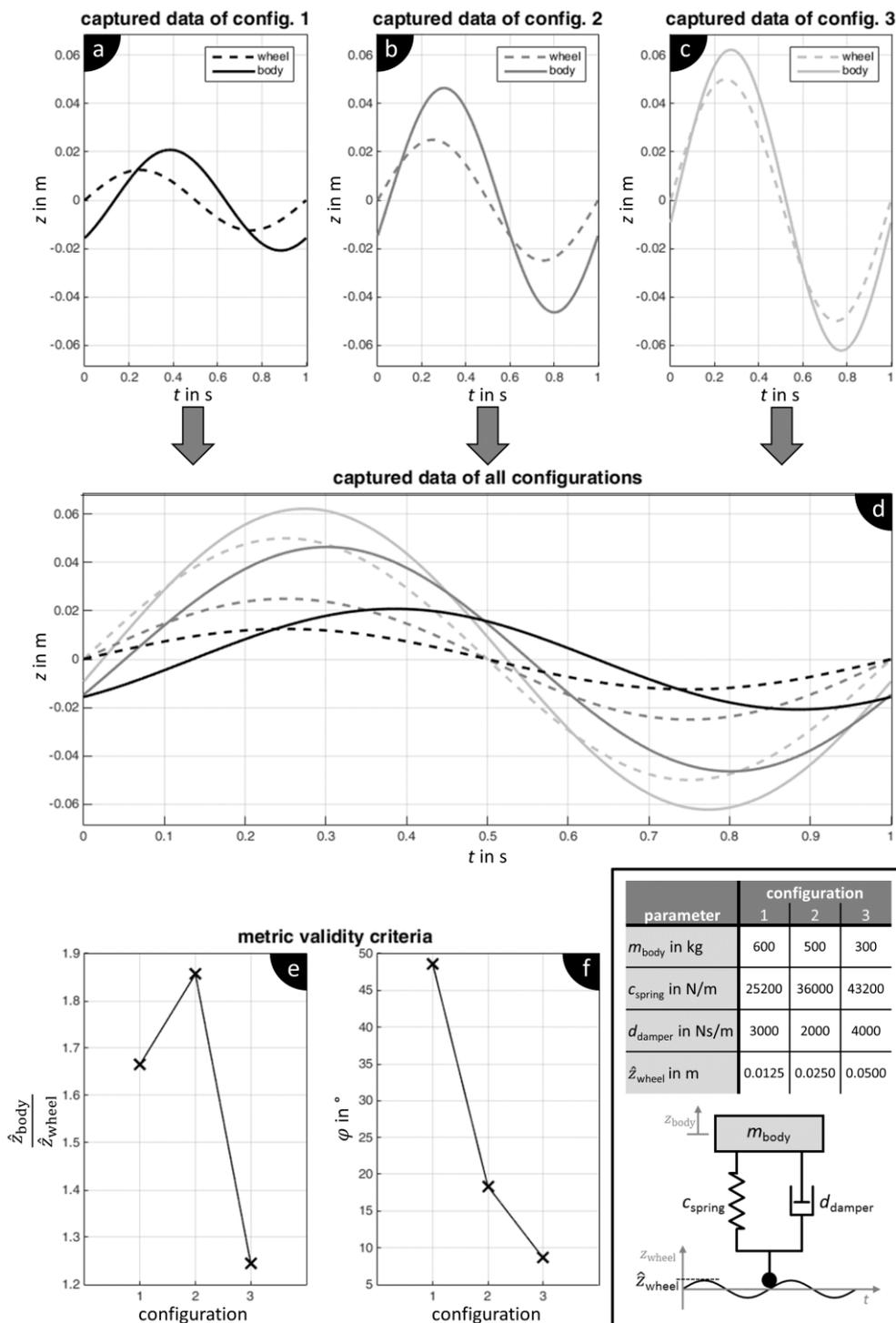


Abbildung 4-18: Parametervalidierung – Beispiel für vollständige Parameterdatensatzvariation

Die hier betrachteten Versuchsausgangsgrößen sind das Amplitudenverhältnis der vertikalen Aufbau- und Radbewegung, das ein Maß für die Systemdämpfung ist, sowie der sich einstellende konstante Phasenwinkel zwischen Aufbau- und Radbewegung. Die Diagramme (a), (b) und (c) zeigen die Datenerfassung jeder einzelnen Konfiguration. In Diagramm (d) sind die Graphen zur einfacheren Nachverfolgung des unterschiedlichen Systemverhaltens zusammengefasst. Die beiden Diagramme (e) und (f) zeigen für jede Konfiguration die Sensitivität der beiden Ausgangsgrößen bezogen auf die drei Konfigurationen.

4.4.5.2.3 Objektive Bewertung

Die Bewertung, ob Invalidität vorliegt oder nicht, erfolgt bei der Parametervalidierung nach dem gleichen Prinzip wie bei der Versuchsdatenvalidierung.<sup>261</sup> Das heißt, aus einem geforderten Vertrauensniveau  $\gamma$  oder aus einer festen Toleranzvorgabe werden in Verbindung mit den durchgeführten Versuchswiederholungen die Erwartungswerte und Vertrauensintervalle für den realen und den virtuellen Versuch bestimmt. Liegt der Streubereich der Simulation vollständig im Toleranzbereich bzw. Streubereich der Messung, gilt die Parametervalidierung als bestanden, da keine Invalidität für die betrachteten Stichproben nachweisbar ist.

Abbildung 4-19 zeigt als Beispiel, wie sich unterschiedliche Dämpferkonfigurationen auf die Amplitude der Übertragungsfunktion, die sich auf die vertikale Beschleunigung der Prüfstandstempel und des Fahrzeugaufbaus über der Vorderachse bezieht, auswirken. Für die Simulation werden in diesem Diagramm der Erwartungswert und das Vertrauensintervall, das aus 15 Simulationsdurchläufen resultiert, angezeigt. Dem Erwartungswert der Messung sind zwei Fehlerbalken hinzugefügt. Der kleine Toleranzbereich spiegelt das Kurzzeitverhalten von 15 direkt hintereinander durchgeführten Messungen wider. Die großen Fehlerbalken resultieren aus einer Testreihe zum Langzeitverhalten, in der unter nominell gleichen Bedingungen der Versuch an unterschiedlichen Zeitpunkten und nach erneutem Versuchsaufbau durchgeführt wurde. Die Effekte, d.h. die relativen Einflüsse der Dämpfervariation, erfüllen hier den Genauigkeitsanspruch. Auch bezüglich der absoluten Kennwerte erweist sich die Simulation als stichprobengültig, wenn die Genauigkeit des Langzeitverhaltens als Referenz herangezogen wird.<sup>262</sup>

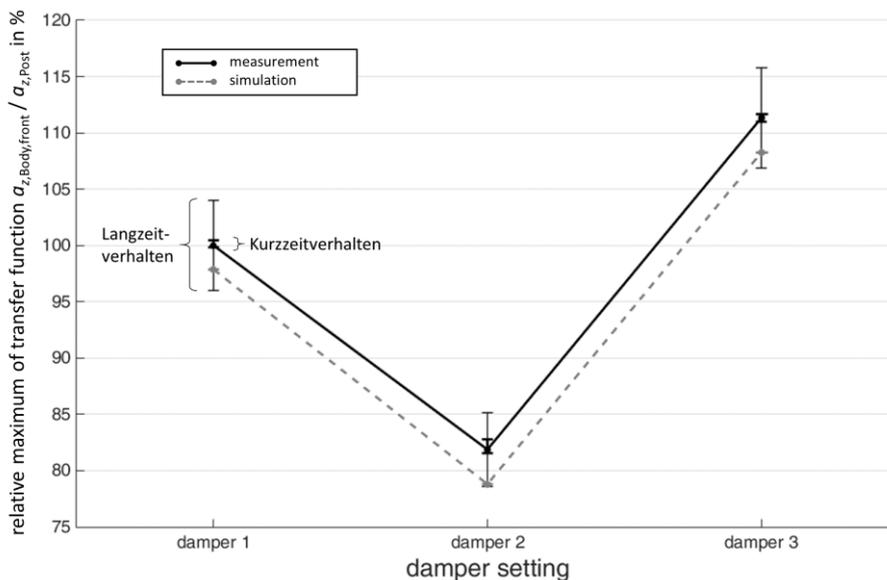


Abbildung 4-19: Einfluss der Dämpfer-Konfigurationsstichproben auf die Systemdämpfung<sup>263</sup>

<sup>261</sup> Vgl. Abschnitt 4.4.5.1 (Versuchsdatenvalidierung).

<sup>262</sup> Vgl. Viehof, M. et al.: Validierungskonzept für die Vertikaldynamik, 2017, S. 165 f.

<sup>263</sup> Quelle: Modifiziert nach Viehof, M. et al.: Validierungskonzept für die Vertikaldynamik, 2017, S. 166.

### 4.4.5.3 Simulationsvalidierung

#### 4.4.5.3.1 Motivation und Ziel

Die Simulationsvalidierung hat zum Ziel, die Stichprobenvalidität aller metrischen Validitätskriterien für alle untersuchten Konfigurationsstichproben zu verifizieren bzw. zu falsifizieren. Die Zusammenfassung zu einem übergeordneten statistischen Validitätsmaß erfolgt anschließend im letzten Teilprozess zur Bewertung der Simulationsvalidität.<sup>264</sup>

#### 4.4.5.3.2 Objektivierungstechnik

Für jedes metrische Validitätskriterium wird die Übereinstimmungsgenauigkeit von Messung und Simulation identifiziert, wobei entsprechend Abbildung 4-20 die beiden Einsatzzwecke der Simulation – die absolute Kennwertvorhersage und die Vorhersage relativer Kennwertänderungen – getrennt voneinander betrachtet werden müssen.<sup>265, 266</sup>

Die Eingangsinformationen für diesen Vergleichsprozess sind ...

1. die  $n_{CS}$  metrischen Validitätskriterien aus den  $n_{TR}$  Versuchsdurchführungen (jeweils für den realen und den virtuellen Versuch) gemäß der Auslegung der Validierungsstudie und der Versuchsplanung, ...
2. das geforderte Vertrauensniveau  $\gamma$  zur Anwendung der  $t$ -Statistik, ...
3. die geforderte Simulationsgenauigkeit, die über die Toleranzangabe der Referenzdaten – die metrischen Validitätskriterien aus dem Realversuch – entscheidet, und ...
4. (optional) die quantifizierten, zusätzlichen Unsicherheiten der MVC, die nicht aus der statistischen Verteilung identifiziert werden können.

Nachfolgend werden das Vertrauensintervall der Simulation und das Toleranzintervall der Messung unterschieden:

- Das Vertrauensintervall repräsentiert den Streubereich des Mittelwertes in Abhängigkeit der nachweisbaren Genauigkeit, d.h. unter Anwendung der  $t$ -Statistik auf die  $n_{TE}$  Einzelwerte.<sup>267</sup>
- Das Toleranzintervall ist die Referenz für die Validitätsbewertung der Simulation. Es stellt die zulässige Toleranz für Stichprobenvalidität der Simulation dar.

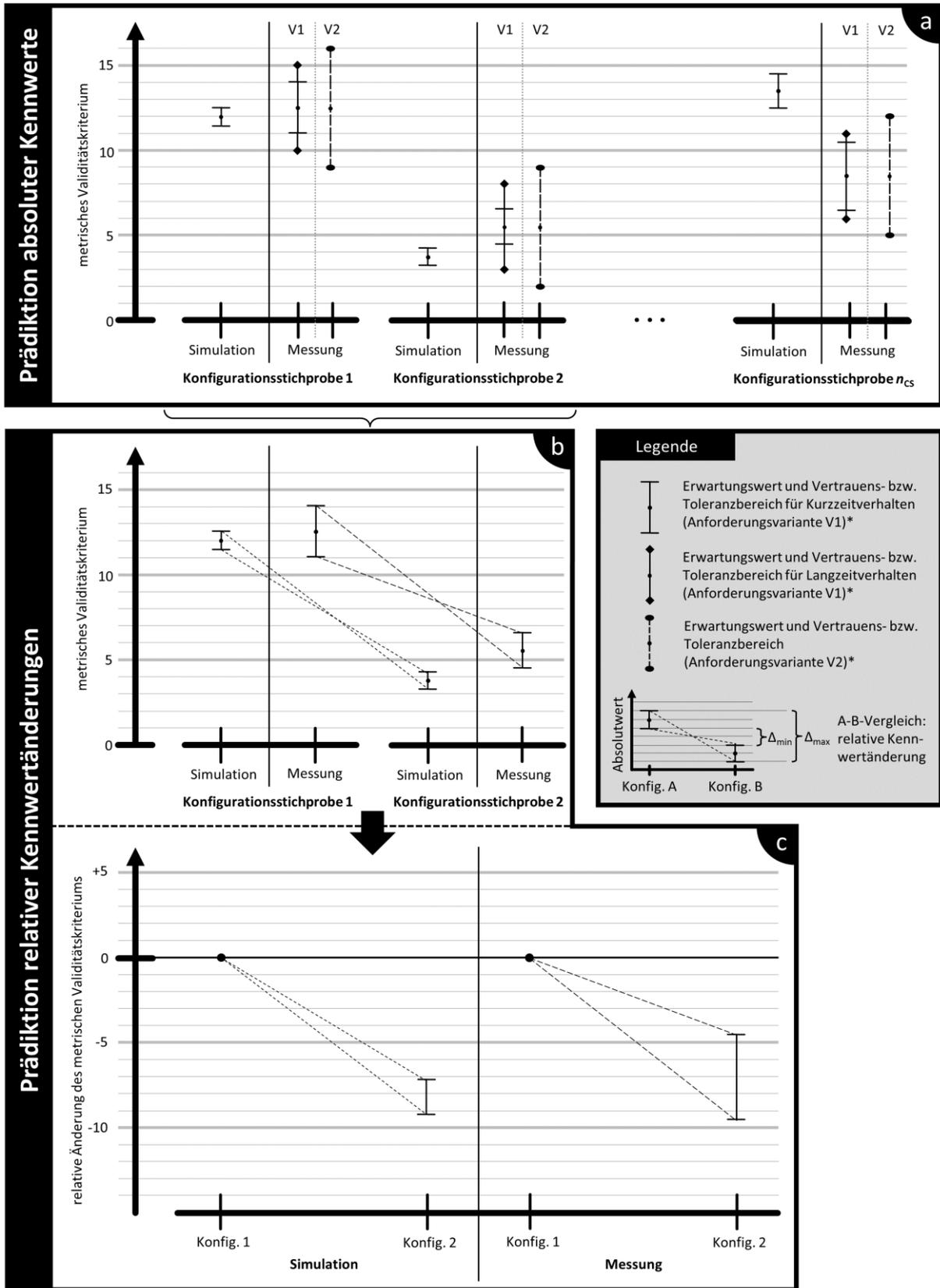
---

<sup>264</sup> Vgl. Abschnitt 4.4.6.1 (Statistisches Validitätsmaß).

<sup>265</sup> Dies betrifft Anf. 1c (Effektivität durch Bewertung aller Einsatzzwecke der Simulation). Vgl. Unterkapitel 4.1 (Diversität der Anwendungsbereiche und Anforderungen an die Methode).

<sup>266</sup> Vgl. Unterkapitel 4.2 (Validierungskonzept).

<sup>267</sup> Vgl. Abschnitt 4.4.3.1 (Versuchsplanung und Versuchsplanoptimierung).



\* Anforderungsvarianten:

V1: Höchstes Genauigkeitsniveau: Simulation soll für eine definierte statistische Sicherheit  $\gamma$  die Genauigkeit der Messung aufweisen.

V2: Reduziertes Genauigkeitsniveau: Simulation darf eine definierte Toleranz (größer V1) gegenüber dem Erwartungswert der Messung aufweisen.

Abbildung 4-20: Prinzip der Simulationsvalidierung

Bei der Toleranzangabe für den Erwartungswert der Messung sind zwei Varianten der Anforderungsdefinition zu unterscheiden:

1. Forderung des höchsten Genauigkeitsniveaus (V1):  
Von der Simulation wird gefordert, dass sie die gleiche Genauigkeit wie die Messung aufweist. In diesem Fall lautet die notwendige Bedingung für Stichprobenvalidität, dass bei gleichem Vertrauensniveau  $\gamma$  das Konfidenzintervall der Simulation innerhalb dem der Messung liegt. Bei dieser Variante entspricht das Toleranzintervall dem Vertrauensintervall der Messdaten gemäß Gleichung 4.16.
2. Forderung eines reduzierten Genauigkeitsniveaus (V2):  
Es ist zulässig, von der Simulation eine geringere Genauigkeit als die der Messung zu fordern. In diesem Fall ist das Vertrauensintervall für die Validitätsbewertung nicht mehr maßgebend und als Toleranzintervall für den Erwartungswert des Realversuchs wird die geforderte Simulationsgenauigkeit herangezogen. Hierbei kann es sich beispielsweise um zulässige absolute (z.B.  $\pm 0,5$  Hz) oder relative (z.B.  $\pm 15$  %) Abweichungen vom Erwartungswert der Messung handeln.

Abbildung 4-20 verdeutlicht das Prinzip der Simulationsvalidierung. Der Erwartungswert der Simulation inkl. Vertrauensbereich und der Erwartungswert aus dem Realversuch inkl. Toleranzbereich für die Validitätsbewertung werden für jede der  $n_{CS}$  Konfigurationsstichproben gegenübergestellt. Die Ableitung von Vertrauensintervallen aus empirisch erhobenen Stichprobenwerten erfolgt gemäß der Erläuterungen zu Beginn von Abschnitt 4.4.5. Die Beschreibung der Analogie zum Signifikanztest erfolgt im nächsten Abschnitt.

Diagramm (a) zeigt die Analyse der Prädiktionsfähigkeit für absolute Kennwerte. Für die Messgröße sind die beiden oben beschriebenen Varianten der Genauigkeitsanforderung dargestellt. Bei Anforderungsdefinition V1 entspricht das Toleranzintervall dem Vertrauensintervall der Messung. Das heißt, es zeigt deren nachweisbare Genauigkeit an. Unterschieden werden hierbei wiederum die Vertrauensintervalle für das Kurzzeit- und das Langzeitverhalten des Systems.<sup>268</sup> Bei der Anforderungsdefinition V2 entspricht der Fehlerbalken der geforderten – im Vergleich zum Vertrauensintervall reduzierten – Genauigkeit.

Diagramm (b) zeigt einen Auszug aus Diagramm (a), um anhand der ersten beiden Konfigurationsstichproben die Bewertung relativer Kennwertvorhersagen zu demonstrieren. Der Vertrauensbereich der Simulation und der Messung ergibt sich gemäß Diagramm (c) aus der maximalen und der minimalen Differenz der metrischen Validitätskriterien für zwei Konfigurationen.

Hiermit liegt nun eine objektive Gegenüberstellung des Erwartungswerts aus der Simulation und des tolerierten Wertebereichs vor, die als Grundlage für die Validitätsbewertung herangezogen werden kann. Der logische nächste Schritt ist die Beantwortung der Frage, in welcher Form die Übereinstimmungsqualität objektiv bewertet wird.

---

<sup>268</sup> Vgl. Abschnitte 4.4.5.2 (Parametervalidierung) und 4.5.4 (Versuchsdurchführung in der Praxis).

### 4.4.5.3.3 Objektive Bewertung

Für die objektive Bewertung der Übereinstimmungsgenauigkeit wird eine Fallunterscheidung für die Stichprobenvalidität vorgenommen, anhand derer vier Labels eingeführt werden, die sämtliche Fälle abdecken und deren Vergabe rein objektiven Kriterien unterliegt. Die Beschreibung der Validitätslabels unter Zuordnung aller relevanten Fälle für die Übereinstimmung von Simulation und Messung ist in Abbildung 4-21 vorzufinden. Sie basiert auf der Annahme, dass der Vertrauensbereich der Simulation kleiner ist als der Toleranzbereich der Referenzgrößen, die aus der praktischen Messung stammen. Die Labels lassen sich analog auch auf umgekehrte Verhältnisse übertragen. Da dies – insbesondere für das Anwendungsgebiet der Fahrdynamiksimulation – wenig Praxisrelevanz hat, wird im Folgenden hierauf nicht näher eingegangen.

Abbildung 4-21 unterscheidet die beiden Anwendungszwecke der Simulation – die Prädiktion absoluter Kennwerte und die Vorhersage relativer Kennwertunterschiede zwischen zwei Systemvarianten. Während im ersten Anwendungszweck nur quantitative Aussagen bewertet werden können, kommt bei Relativbetrachtungen auch die Aussage über die Ordinalität hinzu, d.h., ob das metrische Validitätskriterium beim Übergang von der einen Systemvariante zur anderen ansteigen oder abfallen wird. Hierbei handelt es sich um eine rein qualitative Information. Neben den drei Labels für quantitative Beziehungen wird deshalb ein viertes Label für die Stichprobenvalidität qualitativer Aussagen über relative Kennwertänderungen eingeführt.

Der Tabelle in Abbildung 4-21 können die Bedingungen gemäß Mengenalgebra<sup>269</sup> entnommen werden, die für die automatisierte Zuweisung der Labels in der Programmierung umgesetzt werden müssen. Wichtige Begriffe der Mengenalgebra, die hierbei zur Anwendung kommen, sind die Teilmenge<sup>270</sup> und der Durchschnitt<sup>271</sup>. Für das dritte und vierte Label ist eine Fallunterscheidung der Vorzeichen notwendig.

Die Labels entsprechen farbigen Kreisen in Anlehnung an ein Ampelsystem, was intuitiv visualisiert, dass grün für die beste Bewertung steht und mit gelb, rot und schwarz die Qualität und der Nutzen der Simulation zunehmend reduziert werden. Die Zahlen innerhalb der Kreise sind Indikatoren für die Qualitätshierarchie der Labels und ermöglichen zudem eine Anwendung in Graustufen-Darstellungen.

---

<sup>269</sup> Vgl. Lehmann, I.; Schulz, W.: Mengen – Relationen – Funktionen, 2016.

<sup>270</sup> Die Menge  $S$  wird als Teilmenge der Menge  $M$  bezeichnet, wenn alle Elemente von  $S$  auch Elemente von  $M$  sind. Dies bedeutet hier, dass der Vertrauensbereich  $S$  vollständig im Toleranzintervall  $M$  liegt. (Vgl. Lehmann, I.; Schulz, W.: Mengen – Relationen – Funktionen, 2016, S. 20).

<sup>271</sup> Der Durchschnitt der beiden Mengen  $S$  und  $M$  entspricht der Menge der Elemente von  $S$  und  $M$ , die beide gemeinsam haben. Dies bedeutet hier, dass sich die Intervalle  $S$  und  $M$  überschneiden, wenn  $S$  keine Teilmenge von  $M$  ist, aber der Durchschnitt von  $S$  und  $M$  keine leere Menge ist. (Vgl. Lehmann, I.; Schulz, W.: Mengen – Relationen – Funktionen, 2016, S. 26).

Validitätslabel	Prädiktionsqualität für absolute Kennwerte	Prädiktionsqualität für relative Kennwertunterschiede					Beziehung von S und M
		Fallunterscheidungen: Vorzeichen der metrischen Validitätskriterien					
		S: eindeutig M: eindeutig → Vorzeichen gleich	S: eindeutig M: eindeutig → Vorzeichen ungleich	S: eindeutig M: uneindeutig	S: uneindeutig M: eindeutig	S: uneindeutig M: uneindeutig	
1 (grün)							S ist Teilmenge von M.
2 (gelb)							S ist keine Teilmenge von M und der Durchschnitt ist keine leere Menge.
3 (rot)							Der Durchschnitt von S und M ist eine leere Menge.
4 (schwarz)							

Beschreibung				
Label	Bedingungen für Label-Zuweisung (Mengenalgebra)		Stichprobenvalidität ...	
	Prädiktion absolute Kennwerte	Prädiktion relativer Kennwertunterschiede	... für quantitative Prädiktion	... für ordinale Prädiktion
1	$S \subseteq M$	$S \subseteq M$	verifiziert	verifiziert
2	$[S \not\subseteq M] \wedge [S \cap M \neq \emptyset]$	$[S \not\subseteq M] \wedge [S \cap M \neq \emptyset]$	unsicher	
3	$[S \cap M = \emptyset]$	$[S \cap M = \emptyset] \wedge [S_{\text{sgn}} \cdot M_{\text{sgn}} \geq 0]$	falsifiziert	falsifiziert
4		$[S \cap M = \emptyset] \wedge [S_{\text{sgn}} \cdot M_{\text{sgn}} < 0]$		

Legende	
S = Menge der Werte des metrischen Validitätskriteriums, die aus der Simulation hervorgeht	M = Menge der Werte des metrischen Validitätskriteriums, die aus der Messung als Referenz für die Simulation hervorgeht
→ S ist somit der Vertrauensbereich und M der Toleranzbereich für die Bewertung der Stichprobenvalidität	
Vorzeichenkennwerte der Mengen: $S_{\text{sgn}} = \frac{\max(\text{sgn}(s_i)) + \min(\text{sgn}(s_i))}{2}$ $M_{\text{sgn}} = \frac{\max(\text{sgn}(m_i)) + \min(\text{sgn}(m_i))}{2}$	

Abbildung 4-21: Bewertungslabels für Simulationsvalidität

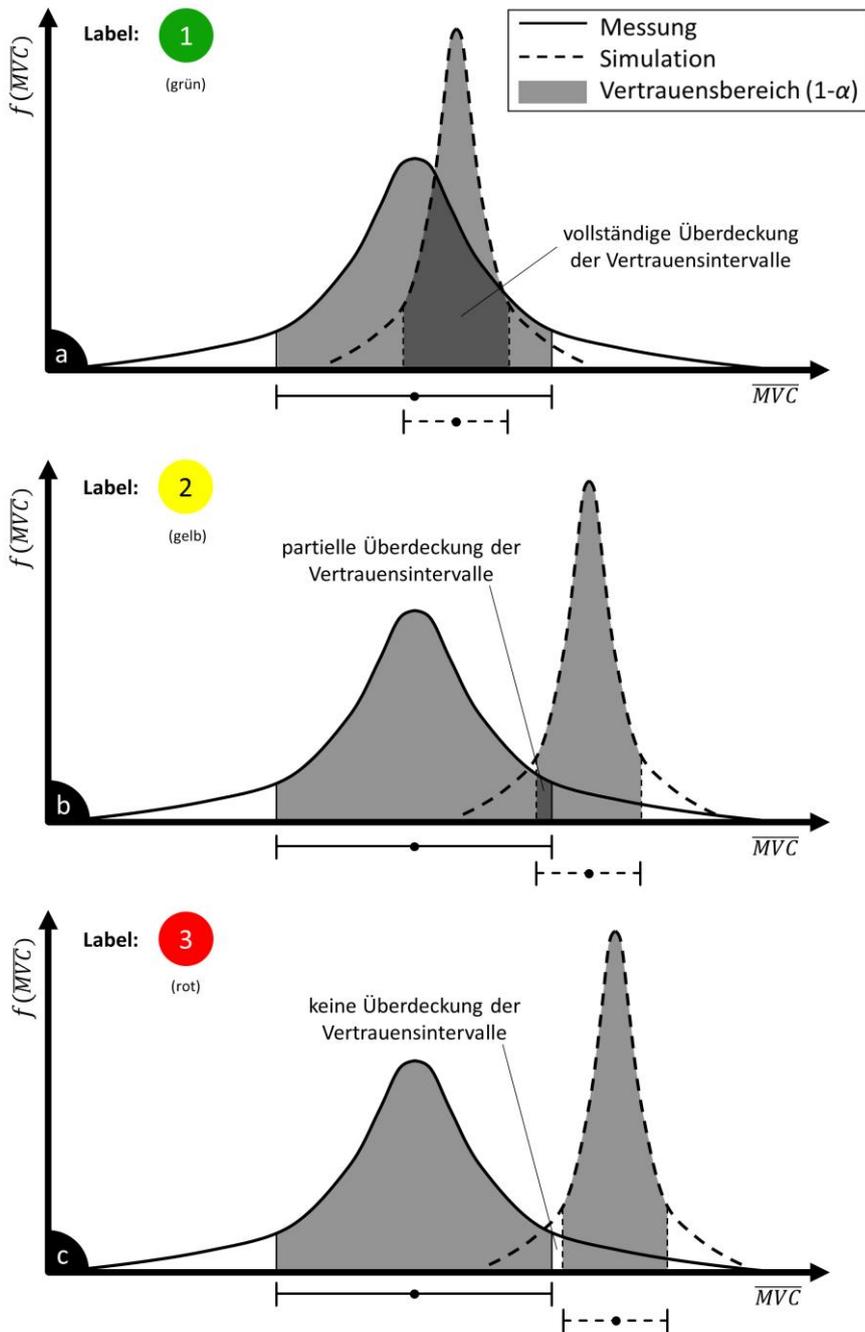


Abbildung 4-22: Veranschaulichung der Labelvergabe anhand der Verteilungsfunktionen der MVC

In Abbildung 4-22 erfolgt die Verknüpfung zwischen den Ausführungen zur Erhebung von Vertrauensintervallen (Balken) aus Abschnitt 4.4.5 und der Vergabe der drei Validitätslabels für absolute Kennwertprädiktionen in Abbildung 4-21. Unter Berücksichtigung des Signifikanzniveaus bzw. der Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha$  wird auf Basis der Lage der Vertrauensintervalle (Balken unterhalb der Diagramme) die Stichprobenvalidität bewertet.

Im Gegensatz zum Signifikanztest, anhand dessen binär zwischen Stichprobenvalidität und -invalidität entschieden werden kann, wird für den Übergangsbereich dieser beiden Zustände das gelbe Label 2 eingeführt.

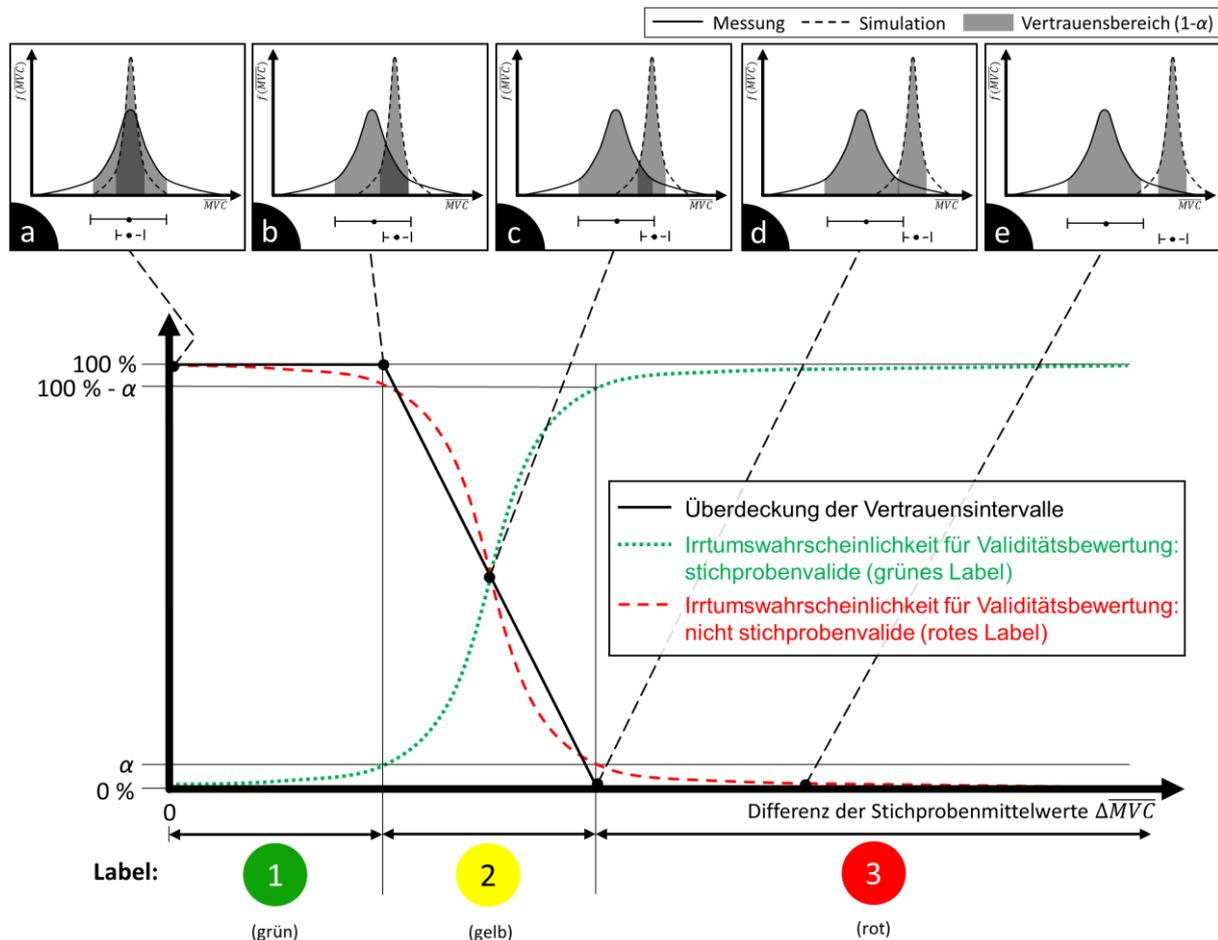


Abbildung 4-23: Begründung der Labelvergabe anhand der Irrtumswahrscheinlichkeit

Abbildung 4-23 stellt die statistischen Kriterien für die Labelvergabe dar. Das grüne Label 1 (für verifizierte Stichprobenvalidität) und das rote Label 3 (für falsifizierte Stichprobenvalidität) werden vergeben, wenn ihre jeweilige Irrtumswahrscheinlichkeit nicht größer als die Vorgabe für  $\alpha$  ist. In dem Übergangsbereich, in dem die Stichprobenvalidität nicht mit dem geforderten Vertrauensniveau  $\gamma$  verifiziert oder falsifiziert werden kann, kommt das gelbe Label 2 zum Einsatz, das seinerseits diese Unsicherheit kennzeichnet. In Ergänzung zum  $t$ -Test, dessen Urteil bei einem bestimmten kritischen Wert zwischen Stichprobenvalidität und -invalidität umschaltet<sup>272</sup>, wird dem Anwender hier eine zusätzliche Qualitätsstufe aufgezeigt. In der Praxis bedeutet dies, dass das harte Kriterium für Stichprobenvalidität für einen signifikanten Anteil der Stichproben nicht erfüllt ist – aber für einen gewissen Stichprobenanteil schon. Deshalb drückt das Label die Nähe zum Validitätsbereich aus und kennzeichnet die Arbeitspunkte der

<sup>272</sup> Vgl. Abschnitt 4.4.5 (Empirische Validitätsanalyse).

Simulation, in denen Fehlerkorrekturen und Modellverbesserungen vermeintlich am einfachsten zu einer Erweiterung des Validitätsbereichs führen können.

Des Weiteren geht aus Abbildung 4-23 hervor, dass, ebenso wie beim Signifikanztest, ein Restrisiko für Falschaussagen bestehen bleibt. Liegt das Signifikanzniveau bei  $\alpha = 5\%$ , ist anzunehmen, dass bis zu 5 % aller Labelzuweisungen einem Irrtum unterliegen.

Bei den Darstellungen in Abbildung 4-22 und Abbildung 4-23 gilt es zu berücksichtigen, dass das Referenzintervall für die Simulation (Balken der Messung unterhalb der Diagramme) aus einer statistischen Verteilung der MVC aus der Messung bestimmt wird. Eine feste Toleranzanforderung, wie sie als Variante 2 im vorherigen Abschnitt beschrieben wird, ist wie eine Rechteckverteilungsfunktion zu interpretieren, für die in analoger Weise der Intervallbalken festgelegt wird. In beiden Fällen stellt dieser das Vertrauensintervall für das definierte Signifikanzniveau dar. Da auf Basis der relativen Lage der Intervallbalken die Labelzuweisung erfolgt, ist die Verteilungsfunktion für die Labelvergabe aus den im Abschnitt 4.4.5 genannten Gründen nur von indirekter Bedeutung. Hierin zeigt sich die Adaption des Verfahrens an die unterschiedlichen Anforderungen aus der Praxis.

Am Ende der Simulationsvalidierung liegt für jede Kombination aus Konfigurationsstichprobe und Testanwendung eines der ersten drei Validitätslabels für die absolute Kennwertvorhersage vor und für alle möglichen Kombinationen der Konfigurationsstichproben wurde eines der vier Labels für die relative Prädiktionsfähigkeit vergeben. Auf diese Weise wird die Vielzahl der Messdaten unter Berücksichtigung aller Genauigkeitsanforderungen durch vier unterschiedliche Qualitätslabels charakterisiert, womit jedoch noch keine Reduktion der Anzahl von Bewertungen für die einzelnen Konfigurationsstichproben und deren Kombinationen erfolgt. Es stellt sich die Frage, wie diese Informationsmenge systematisch und möglichst automatisiert zu einem objektiven und aussagekräftigen Validierungsgesamtergebnis weiter zusammengefasst werden kann. Hierauf wird im folgenden Abschnitt 4.4.6 eingegangen.

#### **4.4.6 Validierungsergebnis**

In diesem Abschnitt wird erläutert, wie die einzelnen Validitätslabels, die im vorherigen Teilprozess Simulationsvalidierung zugeordnet wurden, strukturiert und anschließend zusammengefasst werden. Als Ergebnis der Validierungsstudie liegt ein Validitätsbewertungsbericht vor, der eine statistische Aussage über die Stichprobenvalidität sowie Qualitätsinformationen zur Validierungsstudie selbst beinhaltet.

#### 4.4.6.1 Statistisches Validitätsmaß

Der erste Schritt der Strukturierung und Zusammenfassung ist das Eintragen der Validitätslabels aus Abschnitt 4.4.5.3 in die neu eingeführte Validitätsbewertungskarte<sup>273</sup> (VAM), die für jedes metrische Validitätskriterium erstellt wird. Dieser Vorgang lässt sich ebenso wie die Labelzuweisung vollständig automatisieren und damit anwenderunabhängig und effizient gestalten.

Abbildung 4-24 zeigt die VAM, die  $n_{CS}$  Zeilen und ebenso viele Spalten aufweist, in denen die einzelnen Konfigurationsstichproben gegenübergestellt werden. Auf der Diagonalen werden die Labels für die Prädiktionsqualität absoluter Validitätskriterien eingetragen. In der hellgrau hinterlegten Dreieckfläche stehen sich jeweils zwei unterschiedliche Konfigurationsstichproben gegenüber, sodass dort die Labels für die Stichprobenvalidität relativer Kennwertänderungen eingetragen werden. Dass sich je Zeile die Anzahl der Spalten bzw. der horizontalen Felder um ein Feld reduziert, liegt daran, dass die Relativbewertung einer Stichprobenkombination (z.B. Stichprobe 3 und 4) in einer quadratischen VAM in zwei Feldern auftritt (z.B. in Feld 3|4 und in Feld 4|3)<sup>274</sup>. Da es für die Bewertung der Stichprobenvalidität jedoch unbedeutend ist, ob die relative Änderung des Validitätskriteriums von Stichprobe A zu B oder von Stichprobe B zu A bewertet wird, darf diese Information nur in einem Feld der VAM auftauchen, was letztlich die Dreieckform begründet.

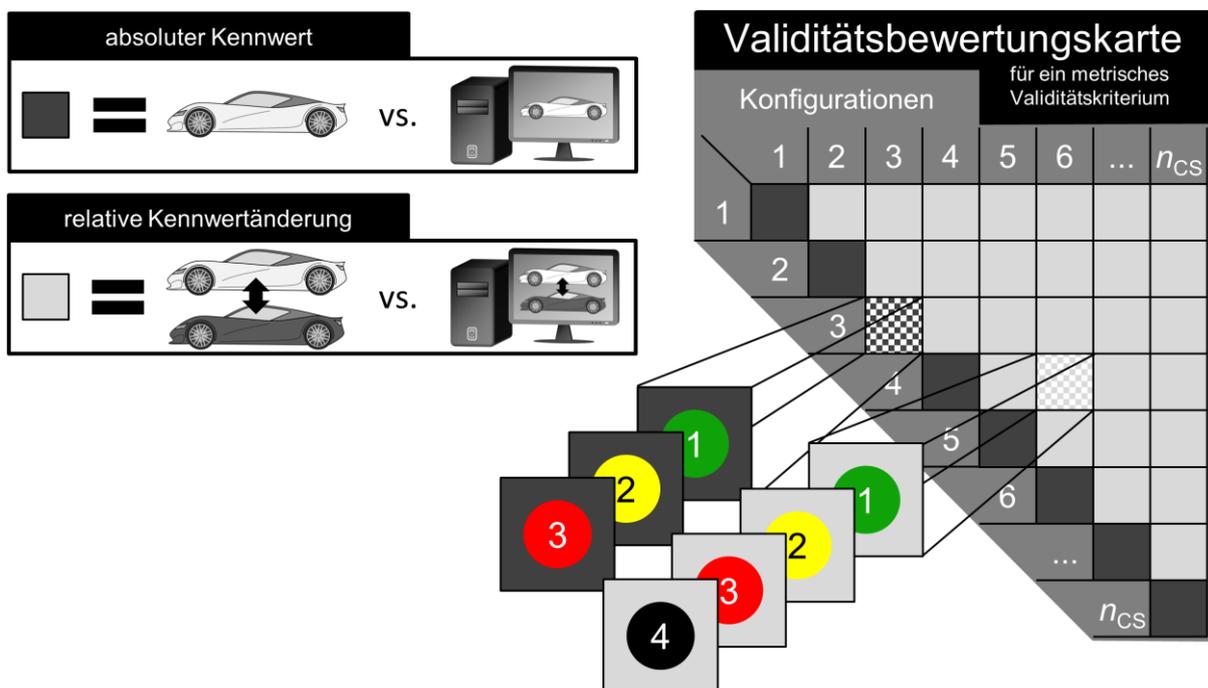


Abbildung 4-24: Validitätsbewertungskarte (VAM) eines metrischen Validitätskriteriums

Die VAM enthält die maximale Anzahl von Absolut- und Relativinformationen über die metrischen Validitätskriterien, die den Simulations- und Messdaten entnommen werden kann. Bei

<sup>273</sup> Englische Bezeichnung: validity assessment map (VAM).

<sup>274</sup> Feld 3|4 bezeichnet das Feld in Zeile 3 und Spalte 4. Feld 4|3 bezeichnet das Feld in Zeile 4 und Spalte 3.

$n_{CS}$  Konfigurationsstichproben berechnen sich die Anzahl  $n_{VAM,abs}$  der Bewertungen für die absolute Kennwertvorhersage und die Anzahl  $n_{VAM,rel}$  der Bewertungen für die Prädiktionsqualität relativer Kennwertänderungen nach folgenden Formeln:

$$n_{VAM,abs} = n_{CS} \quad (4.18)$$

$$n_{VAM,rel} = \frac{n_{CS}^2 - n_{CS}}{2} \quad (4.19)$$

Die Vorteile der VAM sind:

- Die VAM enthält alle Daten, die für die statistische Validitätsbewertung in Bezug auf das jeweilige metrische Validitätskriterium erforderlich sind.<sup>275</sup>
- Alle Simulations- und Messergebnisse der Validierungsstudie werden vollständig und gleichermaßen in der VAM abgebildet. Es findet keine Datenselektion statt.<sup>276</sup>
- Die VAM kann für jede Art, Größe und Dimensionalität des Versuchsplans erstellt werden. Sie kann beliebig um Stichproben erweitert und reduziert werden.<sup>276</sup>
- Die VAM enthält objektive Validitätsbewertungen, die anhand fester Kriterien erhoben werden.<sup>277</sup> Der gesamte Erstellungsprozess lässt sich automatisieren und bietet keinen Spielraum für subjektive Anpassungen.<sup>276</sup>
- Die Inhalte der VAM sind bei Kenntnis der vier Validitätslabels einfach zu verstehen und zu kommunizieren.<sup>278</sup>
- Die VAM unterstützt die Identifikation der Ursache von Invalidität und die Benennung eines Gültigkeitsbereichs.<sup>275</sup>

Tritt nicht ausschließlich das grüne Label 1 in der VAM auf, können sehr einfach die Bereiche bzw. Beziehungen entnommen werden, in denen die Qualitätsansprüche nicht erfüllt sind. Auf diese Weise ist es möglich, gezielt nach den Ursachen zu suchen oder den Parameterbereich, für den Stichprobenvalidität besteht, einzugrenzen. Ein Praxisbeispiel hierfür folgt in Abschnitt 5.3.6.

Jede VAM enthält eine Übersicht, an wie vielen grünen, gelben, roten und schwarzen Labels jede Konfigurationsstichprobe beteiligt ist. Diese Übersicht wird automatisiert durch Auswertung der Labels innerhalb der VAM erstellt. Bei einer prozentualen Ungleichverteilung für die  $n_{CS}$  Konfigurationsstichproben liegt ein Indikator vor, welche der Konfigurationen, statistisch betrachtet, mit der geringsten Qualität simuliert werden.

---

<sup>275</sup> Dies betrifft Anf. 1 (Effektivität). Vgl. Unterkapitel 4.1 (Diversität der Anwendungsbereiche und Anforderungen an die Methode).

<sup>276</sup> Dies betrifft Anf. 3 (Stärkung des Vertrauens und Praktikabilität). Vgl. Unterkapitel 4.1 (Diversität der Anwendungsbereiche und Anforderungen an die Methode).

<sup>277</sup> Vgl. Abschnitt 4.4.5.3 (Simulationsvalidierung).

<sup>278</sup> Dies betrifft Anf. 5 (aussagekräftige Ergebnisdarstellung). Vgl. Unterkapitel 4.1 (Diversität der Anwendungsbereiche und Anforderungen an die Methode).

Abbildung 4-25 zeigt hierfür ein Beispiel (unten links), in dem auf einen Blick ersichtlich ist, dass Konfigurationsstichprobe 4 im Vergleich zu den anderen eine stark unterdurchschnittliche Simulationsqualität aufweist. Auf Basis dieser Erkenntnis kann gezielt nachgeforscht werden, ob das Modell für diesen Arbeitspunkt tatsächlich eine statistisch geringere Validität aufweist, sodass ggf. der Gültigkeitsbereich eingeschränkt werden muss, oder ob zuvor nicht identifizierte systematische Fehler diese Abweichung verursachen.

Da die VAMs aufgrund der Informationsmenge selbst nicht den Anspruch an eine praxistaugliche Darstellung des Gesamtergebnisses einer Validierungsstudie erfüllen, muss im nächsten Schritt eine weitere Zusammenfassung der Validitätsbewertungen erfolgen.

Die Lösung ist eine statistische Aussage über die Häufigkeit, mit der die einzelnen Labels für jedes metrische Validitätskriterium in den durchgeführten Stichprobenversuchen vergeben wurden. Abbildung 4-25 verdeutlicht das Vorgehen anhand einer Beispiel-VAM, die auf Versuchen mit lediglich  $n_{CS} = 8$  Konfigurationsstichproben beruht, um das Prinzip anschaulich darstellen zu können. Diese Stichprobenzahl ist für die Praxis als gering einzustufen und bedingt eine relativ grobe Auflösung der Kennwerte. Mit steigender Stichprobenanzahl nimmt auch die Auflösung der Kennwerte zu. Aufgrund dieser Abhängigkeit zwischen Kennwertauflösung und Stichprobenumfang ist es wichtig, dass der Validitätsbewertungsbericht, der in Abschnitt 4.4.6.2 vorgestellt wird, eine Information über die Stichprobenanzahl und die Auflösung des Validitätsmaßes enthält.

Abbildung 4-25 zeigt neben der VAM (oben links) ein Diagramm (unten rechts), das in Übereinstimmung mit Abbildung 4-21 nochmals direkt verdeutlicht, wie die Bewertungslabels der absoluten Prädiktionen auf der Diagonalen zustande kommen.<sup>279</sup> Oben rechts wird die Bestimmung des neuen statistischen Maßes für Stichprobenvalidität aufgezeigt. Für jedes metrische Validitätskriterium werden die zwei Validitätsmaße  $V_{abs}$  und  $V_{rel}$  berechnet. Diese stellen jeweils die relative Häufigkeit der drei bzw. vier Labels dar, die für die Stichproben vergeben wurden. Dass die relative und nicht die absolute Häufigkeit angegeben wird, ist in der geforderten Vergleichbarkeit von Validierungsergebnissen bzw. unterschiedlichen Validierungsstudien begründet.<sup>280</sup>

---

<sup>279</sup> Vgl. hierzu auch Abbildung 4-20.

<sup>280</sup> Dies betrifft Anf. 5d (Vergleich unterschiedlicher Validierungsstudien). Vgl. Unterkapitel 4.1 (Diversität der Anwendungsbereiche und Anforderungen an die Methode).

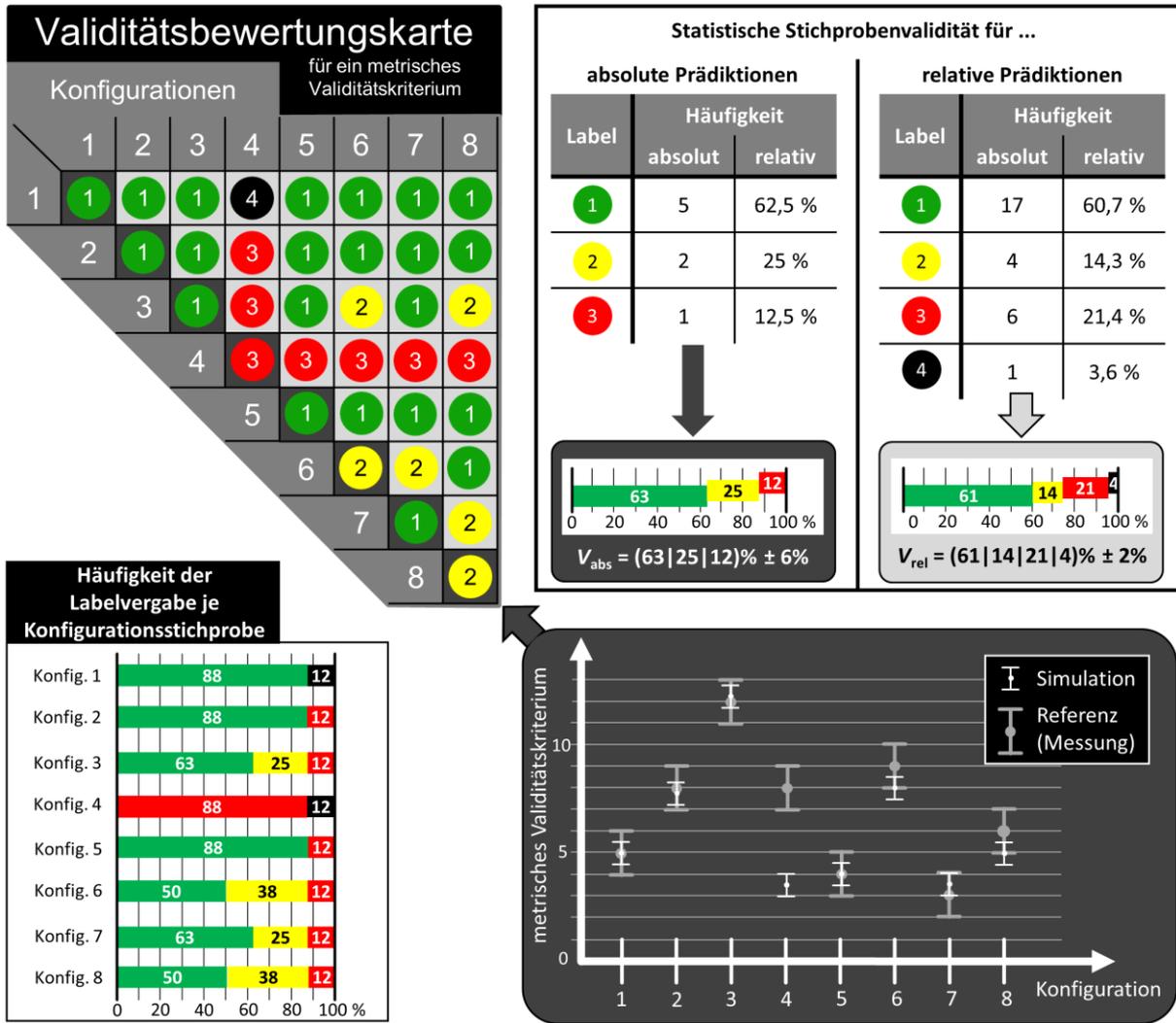


Abbildung 4-25: Bestimmung des statistischen Maßes für Stichprobenvalidität aus der VAM

Für  $V_{abs}$  sind nur die Diagonalelemente relevant, während sich  $V_{rel}$  aus allen anderen Labels (in hellgrau hinterlegten Feldern) berechnet. Aufgrund dieser größeren Datengrundlage ist die Auflösung von  $V_{rel}$  stets höher als die von  $V_{abs}$ . Die beiden Validitätskennwerte werden gemäß folgender Vorschriften berechnet und angegeben:

$$V_{abs} = \left( \frac{n_{VAM,abs,Label1}}{n_{VAM,abs}} \mid \frac{n_{VAM,abs,Label2}}{n_{VAM,abs}} \mid \frac{n_{VAM,abs,Label3}}{n_{VAM,abs}} \right) \pm R_{V,abs} \quad (4.20)$$

$$V_{rel} = \left( \frac{n_{VAM,rel,Label1}}{n_{VAM,rel}} \mid \frac{n_{VAM,rel,Label2}}{n_{VAM,rel}} \mid \frac{n_{VAM,rel,Label3}}{n_{VAM,rel}} \mid \frac{n_{VAM,rel,Label4}}{n_{VAM,rel}} \right) \pm R_{V,rel} \quad (4.21)$$

Hierbei ist  $n_{VAM,abs,Labeli}$  mit  $i = [1, 2, 3]$  die Anzahl des jeweiligen Labels (grün, gelb oder rot) auf der Diagonalen für die Absolutbewertung und  $n_{VAM,rel,Labeli}$  mit  $i = [1, 2, 3, 4]$  ist entsprechend die jeweilige Labelanzahl (grün, gelb, rot oder schwarz) in der Dreieckfläche für die Relativbewertung. Die Kennwertauflösung  $R_v$  folgt aus der Stichprobengröße  $n_{CS}$ :

$$R_{V,abs} = \frac{1}{2 \cdot n_{VAM,abs}} = \frac{1}{2 \cdot n_{CS}} \quad (4.22)$$

$$R_{V,rel} = \frac{1}{2 \cdot n_{VAM,rel}} = \frac{1}{n_{CS}^2 - n_{CS}} \quad (4.23)$$

#### 4.4.6.2 Darstellung und Ausgabe der Validierungsergebnisse

Die Ergebnisse der Validierungsstudie werden in einem Validitätsbewertungsbericht<sup>281</sup> (VAR) zusammengefasst. Kernelement dieses Berichts sind die beiden statistischen Indikatoren für Stichprobenvalidität  $V_{abs}$  und  $V_{rel}$ , die für jedes metrische Validitätskriterium der Validierungsstudie angegeben werden.

Anwendungsanalysen in der Industrie haben ergeben, dass zur Steigerung der Effektivität und der Praktikabilität weitere Informationen und Funktionen im VAR aufgenommen werden müssen. Der VAR muss deshalb folgende Angaben enthalten, die Antworten auf die zugeordneten Fragen liefern:

1. Organisatorische Angaben
  - Welche Person hat die Validierungsstudie zu verantworten und ist Ansprechpartner?
  - Wo sind die Daten der Validierungsstudie abgelegt?
  - Wann bzw. zu welchem Zeitpunkt wurde die Validierungsstudie durchgeführt?
  - Gibt es besondere Anmerkungen zu der Validierungsstudie?
2. Untersuchungsumgebung
  - Worauf bezieht sich die Validierungsstudie? Welche zwei Systemabbildungen werden miteinander verglichen (z.B. Simulation und referenzierte Messung)?
  - Wie sind die beiden Systemabbildungen definiert (z.B. die Spezifikation der Simulationsumgebung → Software, Modellversionen, Parameterdatensätze, ...)?
  - Wie wurde die Validierungsstudie ausgelegt?
    - Welche *Testanwendungen* wurden ausgewählt?
    - Welche *Konfigurationsstichproben* wurden untersucht? In welchen Stufen wurden die Faktoren verändert?
    - In welchem *Umfang* wurde validiert (Anzahl der Konfigurationsstichproben  $n_{CS}$ , Anzahl absoluter Bewertungen  $n_{VAM,abs}$  und Anzahl relativer Bewertungen je metrischem Validitätskriterium  $n_{VAM,rel}$ )?
    - Welche sind die *metrischen Validitätskriterien*?

---

<sup>281</sup> Englische Bezeichnung: validity assessment report (VAR).

3. Statistische Validitätsbewertung für jedes metrische Validitätskriterium (MVC)

- Welche statistische Stichprobenvalidität  $V_{\text{abs}}$  und  $V_{\text{rel}}$  erreichen die einzelnen MVC?
- Welche Aussagekraft bzw. Signifikanz hat die Validitätsbewertung für das jeweilige MVC?

Zur Beantwortung dieser Frage wird der Signifikanzindikator  $S_V$  eingeführt, dessen Wert Auskunft darüber gibt, wie aussagekräftig die Validierungsstudie ist bzw. ob diese überhaupt für die Qualitätsaussage über das jeweilige metrische Validitätskriterium geeignet ist.

Der Signifikanzindikator  $S_V$  ist das Verhältnis aus dem Variationsbereich des MVC-Erwartungswertes der Referenz (hier: Messung) über die unterschiedlichen Stichproben und dem Toleranzbereich:

$$S_V = \frac{\bar{M}_{\text{max}} - \bar{M}_{\text{min}}}{\Delta M_{\text{tol}}} \quad (4.24)$$

Im Beispiel-Diagramm in Abbildung 4-25 (unten rechts) variiert der Erwartungswert (Messung) zwischen  $\bar{M}_{\text{max}} = 12$  und  $\bar{M}_{\text{min}} = 3$ . Der Toleranzbereich ist definiert als  $\Delta M_{\text{tol}} = 2$  (Größe des Intervallbalkens der Referenz bzw. Messung). Damit ergibt sich hier ein Signifikanzindikator von  $S_V = 4,5$ .

Ziel der zweiten Prozessstufe des Validierungsprozesses ist die Maximierung von  $S_V$ .<sup>282</sup> Für die Validitätsbewertung muss die Bedingung  $S_V > 1$  erfüllt sein. In der Praxis haben sich erste Studien mit  $S_V \geq 3$  als aussagekräftig erwiesen, wenngleich sich diese zunächst subjektiv festgelegte Grenze in Zukunft bewähren muss und die Abhängigkeit des Anwendungsgebiets hierauf zu untersuchen ist. Im Validitätsbewertungsbericht wird für  $S_V \leq 1$  ein rotes, für  $1 < S_V < 3$  ein gelbes und für  $S_V \geq 3$  ein grünes Ampelsymbol angezeigt.<sup>283</sup>

Der Signifikanzindikator muss für jedes MVC angegeben werden.

- Welche quantitativen Bedingungen müssen für Stichprobenvalidität erfüllt sein, d.h., wie groß ist der Vertrauensbereich der Messung und welche Genauigkeit wird gefordert bzw. welche Toleranz wird als zulässig definiert?

Auch wenn sich der neue Qualitätsnachweis in zukünftigen Studien erst noch bewähren muss, zeigen erste Praxisanwendungen der neuen Validierungsmethode, dass die statistischen Validitätsmaße  $V_{\text{abs}}$  und  $V_{\text{rel}}$  zielführend sind und Akzeptanz erfahren. Anwender oder Nutzer der Simulationsergebnisse fordern jedoch zusätzlich eine Information darüber, welche quantitativen Bedingungen die Simulation erfüllen muss, um als stichprobenvalid bewertet zu werden. Die zusätzliche Angabe der Größe des Vertrauensintervalls der Messung und des Toleranzintervalls erfüllen diese Ansprüche.

---

<sup>282</sup> Vgl. Abschnitt 4.4.2 (Auslegung der Validierungsstudie).

<sup>283</sup> Vgl. Abbildung 4-26.

4. Zusatzfunktion: Individuelle Anpassung der Genauigkeitsanforderung (Toleranzbereich) jedes MVC

- Wie ändert sich der statistische Validitätsstatus bezogen auf die zugrundeliegenden Versuchsdaten, wenn durch einen Anwender eine andere individuelle Genauigkeitsanforderung vorgegeben wird?

Zur Beantwortung dieser Frage beinhaltet der VAR ein Eingabefenster, in dem die Genauigkeitsanforderung übersteuert werden kann. Wie in den Abschnitten 4.4.1 und 4.4.5.3 beschrieben, ist die höchste Genauigkeitsanforderung für die Simulation die Übereinstimmung mit dem Vertrauensbereich der Messung. Dies bedeutet, dass der Vertrauens- bzw. Signifikanzbereich, der aus den Messdaten resultiert<sup>284</sup>, eine Teilmenge des geforderten Toleranzintervalls sein muss. Es ist jedoch zulässig und für viele Anwendungen sinnvoll, geringere Genauigkeitsansprüche zu formulieren. Dies bedeutet, dass der Toleranzbereich für die Simulation vergrößert wird und somit die Vergabe grüner Labels 1 leichter wird. Bei der Labelzuweisung müssen nur die Toleranzintervalle entsprechend der Genauigkeitsanforderung angepasst werden. Die Simulationsstreuung und die Erwartungswerte aus der Messung bleiben bestehen. Aus diesem Grund ist eine direkte, automatisierte Anpassung von  $V_{\text{abs}}$  und  $V_{\text{rel}}$  innerhalb des VAR möglich, sodass jeder Anwender für seine individuellen Genauigkeitsanforderungen den Validitätsstatus der Simulation einsehen kann. Diese Funktion fördert die Effektivität und die Praxisrelevanz des Bewertungsverfahrens in hohem Maße.

- Ist die Genauigkeitsanforderung zulässig?

Es muss stets geprüft werden, ob die im vorherigen Listenpunkt beschriebene Regel der Genauigkeitsanforderung eingehalten wird. Sofern ein Anwender eine höhere Genauigkeit als den Vertrauensbereich der Referenzdaten fordert, muss automatisiert eine Warnung im VAR erscheinen.

5. Optional: Konfigurationskontrolle

Stechen bestimmte Konfigurationen mit überdurchschnittlich geringer Stichprobenvalidität aus der Menge der Konfigurationsstichproben heraus?

Ein Diagramm mit der Häufigkeitsverteilung der Labelvergabe je Konfigurationsstichprobe wird, wie in Abschnitt 4.4.6.1 beschrieben, für jede Validitätsbewertungskarte (VAM) ausgegeben. Der VAR beinhaltet ein äquivalentes Diagramm, das sich auf alle VAMs bzw. die Labels aller MVC bezieht und damit eine höhere Auflösung aufweist. Es dient als Kontrollmedium, um möglicherweise systematisch bedingte Fehler innerhalb der Validierungsstudie einfach erkennen zu können. Ein Praxisbeispiel hierfür wird in Abschnitt 5.3.6 vorgestellt.

Abbildung 4-26 zeigt schematisch den Aufbau eines Validitätsbewertungsberichts. Ergebnisdarstellungen ausgeführter Validierungsstudien folgen in Kapitel 5.

---

<sup>284</sup> Vgl. Abschnitt 4.4.5 (Empirische Validitätsanalyse).

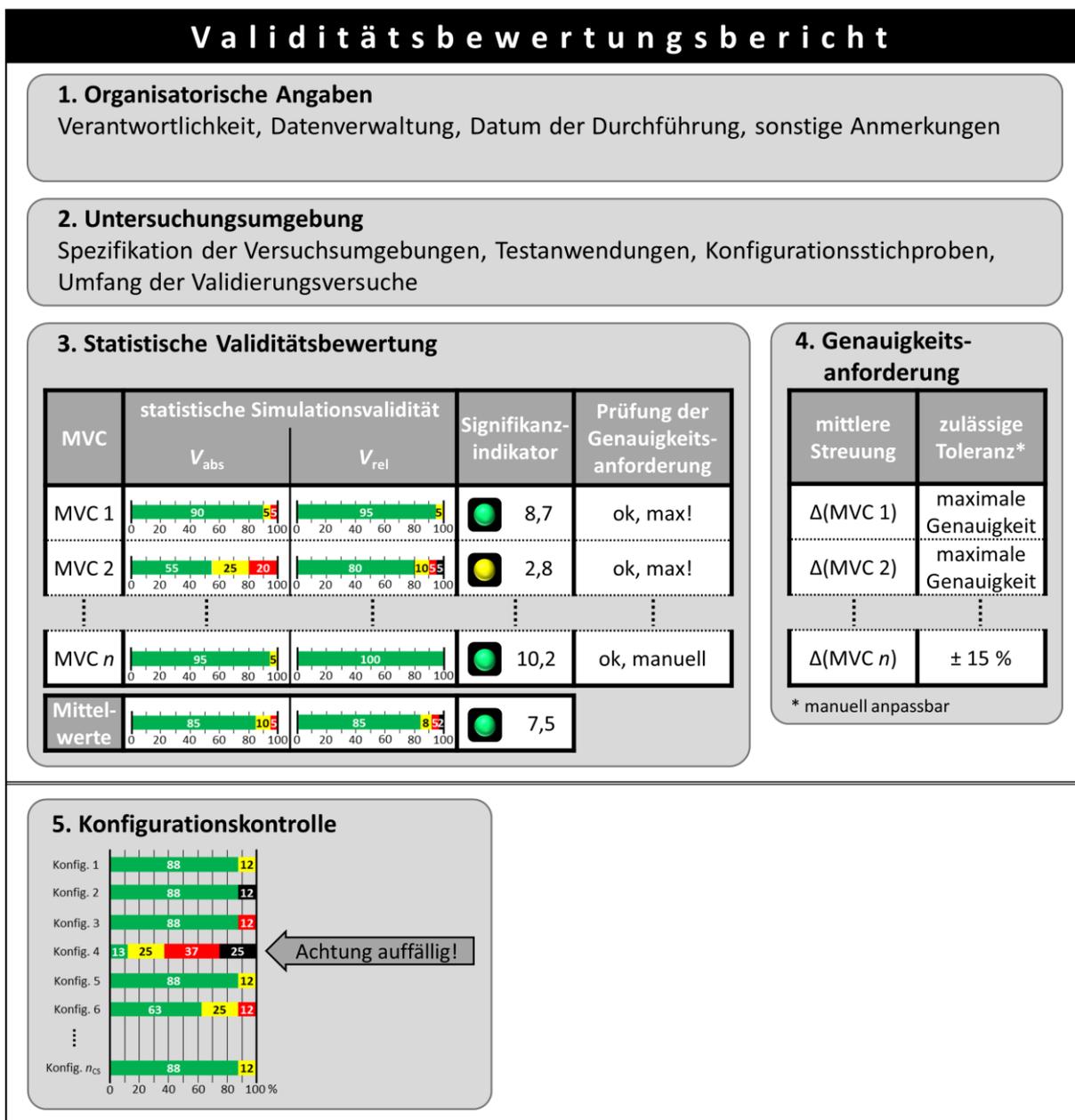


Abbildung 4-26: Schematischer Aufbau und Inhalte des Validitätsbewertungsberichts (VAR)

## 4.5 Unsicherheiten und Gegenmaßnahmen

Im Rahmen der Beschreibung der einzelnen Teilprozesse und der Objektivierungstechniken in Unterkapitel 4.4 wurden bereits unterschiedliche Quellen und Einflüsse von Unsicherheiten, denen der Validierungsprozess ausgesetzt ist, erwähnt. Die Komplexität der Modellvalidierung erfordert ein Bewusstsein für diese systematischen Fehlerquellen. Nachfolgend werden die wichtigsten Einflüsse zusammengefasst und Strategien vorgestellt, wie diesen Unsicherheiten innerhalb der neuen Validierungsmethode begegnet werden kann. Eine wichtige Rolle hierbei spielen die in Abschnitt 4.4.4 erwähnten Zusatzversuche.

Alle Strategien dienen dazu, systematische Fehler weitestgehend zu verhindern. Da es im Gegensatz zu stochastischen Fehlern nicht möglich ist, diese Fehler durch mehrfache Versuchswiederholungen zu identifizieren und zu quantifizieren, ist die Einflussminimierung im Hinblick auf die Validitätsbewertung besonders wichtig. Systematische Fehler können einen Offset des Erwartungswertes bewirken, während stochastische Fehler den Streubereich um diesen vorgeben. Beide Fehlerarten nehmen Einfluss auf die Validitätsbewertung.<sup>285</sup>

### 4.5.1 Konfigurationsstichproben und Modellparametrierung

Die Übereinstimmungsgenauigkeit absoluter Kennwerte zwischen Simulation und Messung wird maßgeblich von der Datenvalidität beeinflusst. Entsprechend Abbildung 2-2 und den zugehörigen Ausführungen in Abschnitt 2.1.1 ist die Genauigkeit der Modellparametrierung im Vergleich zum realen System wichtig, um Rückschlüsse auf die Modellvalidität ziehen zu können. Hierzu gehört auch die Berücksichtigung der Systembeeinflussung durch das Messsystem.<sup>286</sup>

Jeder Bestandteil eines realen Systems und jeder Parameter eines Modells ist mit Unsicherheiten versehen. Insbesondere wenn in frühen Entwicklungsphasen die realen Systemkomponenten nicht zur Verfügung stehen, müssen nominelle Werte herangezogen werden, für die im Optimalfall erfahrungsbasierte Kenntnisse über die Eigenschaftsschwankung bzw. Streubereiche der Werte vorliegen. Mittels Sensitivitätsanalysen<sup>287</sup> kann herausgefunden werden, auf welche Modellparameter die Ausgangsgrößen der Validierungsversuche besonders sensitiv reagieren, um den Fokus im Parametrierungsprozess genau auf diese Modellparameter zu legen.<sup>288</sup>

Für das neue Validierungskonzept ist es wichtig, dass die Datenvalidität für die einzelnen Konfigurationsstichproben nicht signifikant schwankt. Dies kann im Regelfall durch die Forderung standardisierter Parametrierungsprozesse, wie sie in der Industrie meist vorliegen, gewährleistet werden, sodass die gleichen Parameterwerte unterschiedlicher Systemvarianten auf Basis der gleichen Datenquellen erhoben werden.<sup>289</sup>

In manchen Fällen können Modellparameter nicht oder nur schwer durch Komponentenmessungen bzw. -datenblätter oder statische Systemvermessungen erfasst werden. Zusatzversuche können dann bei der Parameteridentifikation Abhilfe leisten. Diese Zusatzversuche können in der Praxis oder in einer alternativen Simulationsumgebung durchgeführt werden. Ein Beispiel hierfür ist die Messung des Reibwerts zwischen Reifen- und Fahrbahn bzw. die Kraft-Schlupf-

---

<sup>285</sup> Vgl. Abschnitt 4.4.5.3 (Simulationsvalidierung).

<sup>286</sup> Vgl. Abschnitte 4.4.3.2 (Messtechnikauswahl) und 4.4.3.3 (Datenerfassung und -verarbeitung).

<sup>287</sup> Vgl. Abschnitt 4.4.2.3 (Konfigurationsstichproben).

<sup>288</sup> Vgl. Klassen, C.: Einfluss der Modellparametrierung, 2018.

<sup>289</sup> Vgl. Unterkapitel 4.1 (Diversität der Anwendungsbereiche und Anforderungen an die Methode).

Abhängigkeit. Hierbei handelt es sich um einen sehr einflussreichen und nur schwer kontrollierbaren Parameter in längs- und querdynamischen Anwendungen. Wenn unmittelbar vor und nach der Versuchsreihe dieser Parameter bzw. diese Abhängigkeit mit einer geeigneten Messeinrichtung – z.B. einem Reifenmessanhänger<sup>290</sup> – auf der entsprechenden Versuchsstrecke erfasst wird, kann die Datenvalidität in Bezug auf den sonst nur grob schätzbaren Reibwert erhöht werden. Zu beachten gilt es, dass Versuchsdaten für die Parameteridentifikation und die Validierung streng voneinander getrennt werden müssen.<sup>291</sup>

### 4.5.2 Nicht kontrollierbare Einflussgrößen

In vielen Anwendungsbereichen treten nicht kontrollierbare Einflussgrößen auf, deren quantitative Erfassung häufig nur mit erheblichem Aufwand möglich ist.

Hier sei das Beispiel des Reibwerts aus Abschnitt 4.5.1 erneut aufgegriffen. Die dort beschriebene Reibwertmessung erfordert ein entsprechendes Messsystem und zusätzliche Reifen für die Messungen mit dem mobilen Prüfstand. Der Zusatzaufwand – sowohl zeitlich als auch finanziell – für derartige Versuche kann erheblich sein.

Eine Alternative zur genauen Parameteridentifikation stellen Versuche zur Abschätzung bzw. zum Relativvergleich dar, in denen die ohnehin für die Validierung genutzte Messtechnik entsprechende Informationen bereitstellt. Die Herausforderung liegt darin, einen Zusatzversuch durchzuführen, in dem nicht kontrollierbare Einflussgrößen einen signifikanten und rückführbaren Einfluss auf messbare Größen haben. Somit kann über die Messung die Änderung der nicht kontrollierbaren Einflussfaktoren bestimmt werden, sodass die Unsicherheit über diese Einflussgröße (deutlich) reduziert wird.

Um den vorherrschenden Reibwert abzuschätzen oder um relative Reibwertänderungen zu identifizieren, können z.B. vor einer Versuchsreihe auf der Versuchsfahrbahn Vollbremsungen mit aktivem Antiblockiersystem (ABS) durchgeführt werden. Insbesondere für Versuchsreihen die sich über einen größeren Zeitraum erstrecken, die mit unterschiedlichen Reifen durchgeführt werden oder die auf unterschiedliche Versuchsgelände aufgeteilt werden müssen, ist diese Form der Parameterschätzung eine Möglichkeit, um relative Veränderungen der Einflussgröße Reibwert zu identifizieren, sodass eine relative Anpassung dieses Parameters in der Simulation vorgenommen werden kann. Als objektives Bewertungskriterium kann die mittlere stationäre Verzögerung herangezogen werden, die ein in Fahrzeuginnenrichtung ausgerichteter Beschleunigungssensor erfasst. Für den Fall, dass das Fahrzeug mit Messfelgen und einem Sensor, der auf die fahrbahnbezogene Geschwindigkeit der Radnabe schließen lässt (z.B. ein Correvit-Sensor an der Radnabe oder am Aufbau), ausgestattet ist, können sogar die Reibwert-Schlupf-Kurven ( $\mu$ - $S$ -Kurven) geschätzt werden. Abbildung 4-27 zeigt hierfür ein beispielhaftes Messer-

---

<sup>290</sup> Vgl. Seipel, G.: Entstehung und Intensität von Reifenspuren, 2013, S. 50 ff.

<sup>291</sup> Vgl. Abschnitt 2.1.4 (Überblick bestehender Fahrdynamik-Validierungsstudien).

gebnis. Das Versuchsfahrzeug und die Messtechnik, womit die Kennlinie ermittelt wurde, werden in Unterkapitel 5.1 und 5.2 vorgestellt. Die dargestellte  $\mu$ - $S$ -Kurve für das rechte Vorderrad in Diagramm (a) resultiert aus einer Vollbremsung aus 100 km/h auf der Start-Lande-Bahn des August-Euler-Flugplatzes in Griesheim. Im Gegensatz zu dem mobilen Reifenprüfstand ist bei dieser Messmethode die absolute Geschwindigkeit des Rades während der Messung nicht konstant. Darüber hinaus stellt sich beim Übergang von der stationären Geradeausfahrt in die konstante Verzögerung eine Radlaständerung ein, die sich jedoch nur auf einen kleinen Schlupfbereich auswirkt. Wie Diagramm (b) zeigt, liegt im Bereich von  $7\% \leq S \leq 100\%$  eine annähernd konstante mittlere Radlast vor, sodass dort zum mobilen Reifenprüfstand vergleichbare Aussagen über die  $\mu$ - $S$ -Kurve möglich sind. Verfügt das Messfahrzeug über Radträgerbeschleunigungssensoren oder Radpositionssensorik, können die Längsschwingungen des Radträgers relativ zum Aufbau bei der Berechnung der  $\mu$ - $S$ -Kurve berücksichtigt werden, um die Qualität der Schätzung zu erhöhen. In bereits durchgeführten Validierungsstudien hat sich das beschriebene Verfahren zur Detektion von Reibwertänderungen zwischen den einzelnen Versuchsreihen bewährt. Der Aufwand für diese Art von Zusatzmessungen fällt bezogen auf die eigentlichen Validierungsversuche in der Regel kaum ins Gewicht.

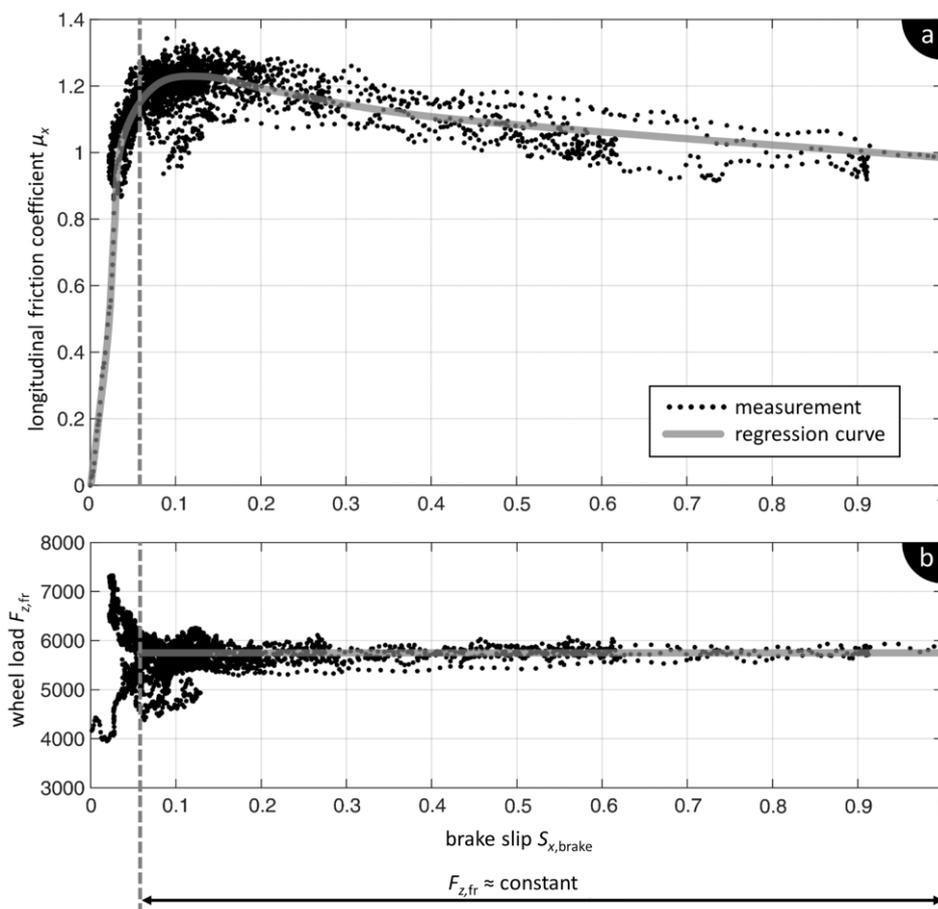


Abbildung 4-27:  $\mu$ - $S$ -Kurve ermittelt aus einer Vollbremsung mit Messfelgen und Correvit-Sensor

Die beste Strategie für die Validierung ist jedoch eine gezielte Auslegung der Validierungsversuche und der metrischen Validitätskriterien, sodass eine Unabhängigkeit von nicht kontrollierbaren, einflussreichen Größen geschaffen wird. Dies gelingt in der Regel durch die Betrachtung

bezogener Kennwerte. Beispielhaft sei das Manöver der Vollbremsung aufgegriffen. Wird als metrisches Validitätskriterium nicht die Verzögerung des Fahrzeugs, sondern die Reibwertausnutzung, herangezogen, spielen Reibwertschwankungen während der Versuche eine untergeordnete Rolle, da das metrische Validitätskriterium auf dieses nicht sensitiv reagiert. Ebenso verhält es sich, wenn das Nickverhalten in Abhängigkeit der Verzögerung und nicht in Bezug auf den Bremsdruck oder Bremspedalweg betrachtet wird, um die Unsicherheit bezüglich der Reibungseffekte zwischen Bremsbelag und Bremsscheibe in der Analyse auszuschließen. Dieser Aspekt, bevorzugt robuste und gut kontrollierbare Zusammenhänge zu analysieren, sollte gemäß der Ausführungen zur Definition metrischer Validitätskriterien stets zusätzlich berücksichtigt werden, sofern es die geforderten Versuchsausgangsgrößen erlauben.<sup>292</sup>

### 4.5.3 Signalerfassung und -verarbeitung

Die Herausforderungen und Fehlerquellen in der Prozessgestaltung der Signalverarbeitung von der Erfassung bis zur Bereitstellung für den Validierungsprozess werden in Abschnitt 4.4.3.3 erläutert. Eine Strategie zur formalen Angleichung der Simulations- und Messdaten wird dort eingeführt, um in weiteren Datenverarbeitungsschritten die Übereinstimmungsqualität nicht durch systematische Fehler zu beeinflussen.

Neben dieser Strategie können Zusatzmessungen<sup>293</sup> zur Vermeidung weiterer Fehler, die das Ausgangssignal der Sensoren im Realversuch betreffen, beitragen. Fehlerhafte Kalibrierungsparameter lassen sich über Redundanzen und Konsistenz- bzw. Plausibilitätsprüfungen erkennen. Die Sensorausrichtung wird über gezielte Lastfälle erkannt. Beispielsweise kann die Ausrichtung eines Correvit-Sensors relativ zur Fahrzeuglängsachse durch eine einfache Geradeausfahrt überprüft werden. Die Drift eines Sensorsignals lässt sich über Langzeitmessungen erkennen. Alle drei Fehler können nachträglich in der Datenverarbeitung korrigiert werden und erfordern keine erneute Versuchsdurchführung, falls diese erst später identifiziert werden. Auch die in Abschnitt 4.4.5.1 vorgestellte Versuchsdatenvalidierung ist ein probates Mittel zur Identifikation dieser Fehler. Sie liefert jedoch nicht die Informationen, die für die Korrektur in der Datenkonditionierung erforderlich sind.

Die Messprinzipien der einzelnen Sensoren erfordern häufig weitere Rechenoperationen wie Integration, Differenzierung, Interpolation oder Transformation, um das geforderte metrische Validitätskriterium zu bestimmen. Verrauschte Signale werden zudem Tiefpassfilterungen unterzogen. Über Messprinzipien und Operationen der Signalverarbeitung gibt die Fachliteratur<sup>294</sup> detailliert Auskunft.

---

<sup>292</sup> Vgl. Abschnitte 4.4.2.1 (Metrische Validitätskriterien) und 4.4.2.2 (Testanwendungen).

<sup>293</sup> Vgl. Abschnitt 4.4.4 (Versuchsdurchführung).

<sup>294</sup> Siehe u.a. Hoffmann, R.; Wolff, M.: Intelligente Signalverarbeitung, 2014 / Schüßler, H.W.: Digitale Signalverarbeitung, 2008/ Kuttern, T.: Praxiswissen Schwingungsmesstechnik, 2015.

#### 4.5.4 Versuchsdurchführung in der Praxis

Bei der Versuchsdurchführung in der Praxis stehen die Repräsentativität und die Reproduzierbarkeit im Vordergrund.

In bestimmten fahrdynamischen Anwendungen sollten diesbezüglich Zusatzversuche<sup>295</sup> durchgeführt werden, um ein möglicherweise zeitvariantes Systemverhalten zu identifizieren und um das System für die Messungen in einen möglichst konstanten Betriebszustand zu bringen.

Zeitvarianz kann durch mehrfache direkte Wiederholung des Validierungsversuchs identifiziert werden. Streuen die Ausgangswerte des Versuchs nicht um einen Mittelwert, sondern weisen sie eine eindeutige Änderungstendenz auf, ist dies ein Indikator für Zeitvarianz. Bei zeitvariantem Systemverhalten muss geprüft werden, ob sich nach gewisser Zeit eine Sättigung einstellt, sodass durch ein entsprechendes Konditionierungs- bzw. Einfahrprogramm vor jeder Versuchsreihe dieser Sättigungsbereich erreicht wird, um die Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit der einzelnen Versuchsreihen zu gewährleisten. Beispiele hierfür sind:

- Fahrversuche mit neuen Reifen setzen die einmalige Durchführung eines speziellen Einfahrprogramms voraus, in dem die Reifen definierte längs- und querdynamische Belastungen erfahren. Hierdurch wird sichergestellt, dass im Anschluss bei den Validierungsversuchen unter konstanten Umgebungsbedingungen keine großen Eigenschaftsstreuungen auftreten.
- Vertikaldynamische Versuche bringen das Fahrzeug in einen Schwingungszustand, bei dem die Dämpfer Bewegungsenergie in thermische Energie umwandeln. Validierungsversuche auf einem Vierstempelprüfstand haben gezeigt, dass bei einer konstanten sinusförmigen Anregung anfänglich eine Zeitvarianz vorliegt, die nach wenigen Minuten des Einschwingens – nämlich dann, wenn die Dämpfer eine Sättigungstemperatur erreicht haben – verloren geht. Aus diesem Grund wird das Fahrzeug in der in Unterkapitel 5.3 beschriebenen Validierungsstudie vor den Validierungsmessungen stets einem Einschwingvorgang ausgesetzt.

Bei der Identifikation von Versuchsstreuungen sind zwei Arten zu unterscheiden:

1. Kurzzeitverhalten

Hierbei steht die Varianz der Ausgangsgrößen bei direkten Versuchswiederholungen im Fokus. Die nicht kontrollierbaren Einflussfaktoren sind als annähernd konstant zu betrachten.

---

<sup>295</sup> Vgl. Abschnitt 4.4.4 (Versuchsdurchführung).

### 2. Langzeitverhalten

Es stellt sich die Frage, wie groß die Varianz der Ausgangsgrößen ausfällt, wenn der Versuch unter nominell gleichen Bedingungen, aber in größeren Zeitabständen und bei erneutem Versuchsaufbau durchgeführt wird. Hierbei sind die nicht kontrollierbaren Faktoren nicht mehr konstant, sondern streuen innerhalb ihres eigenen Varianzbereichs. Technische Systeme weisen deshalb breitere Vertrauensintervalle für das Langzeitverhalten als für das Kurzzeitverhalten auf.

Die Identifikation des Langzeitverhaltens kann mit erheblich mehr Zeit-, Kosten- und Arbeitsaufwand verbunden sein als die Analyse des Kurzzeitverhaltens. Jedoch stellt es für viele Validierungszwecke die wertvollere, nämlich praxisrelevantere, Information dar. So ist für einen Automobilhersteller die Eigenschaftsstreuung der Serienfahrzeuge relevant, die durch permanent wechselnde Lastfälle und die Betriebsdauer über das Langzeitverhalten repräsentiert wird. Deshalb spielen Dauerversuche eine wichtige Rolle in der Fahrzeugentwicklung. In der Fahrdynamik spiegeln die Messdaten jedoch meist nur das Kurzzeitverhalten wider.

## 4.6 Fazit zur neuen Validierungsmethode

Aus den Defiziten des heutigen Validierungsvorgehens können unter Einbeziehung des Stands der Wissenschaft Anforderungen an eine neue, universell anwendbare Methode zum objektiven Vergleich zweier Systemabbildungen abgeleitet werden. Der Fokus dieser Forschungsarbeit liegt auf dem Einsatzgebiet der Simulationsvalidierung, sodass als Systemabbildungen die Simulation und die referenzierten Messungen herangezogen werden.

Die Anforderungen an die Methode betreffen die Effektivität, die Effizienz, die Qualitätsmerkmale zur Steigerung des Vertrauens und der Praxisrelevanz, Maßnahmen zur Vermeidung von Falschaussagen und Fehlinterpretationen sowie die Ergebnisdarstellung der Validierungsstudie.

Auf Basis dieser Anforderungen erfolgen Prozessoptimierungen sowie die Auswahl und Einbindung von Techniken zur Objektivierung des Validierungsvorgehens. Hierzu gehören u.a. ein Verfahren zur Anforderungsdefinition, die Sensitivitätsanalyse, die Versuchsplanoptimierung, der Versuchsdatenvergleich mittels kumulativer Verteilungsfunktionen sowie die Einführung von Validitätslabels und einer Metrik zur Berechnung eines statistischen Maßes für Stichprobenvalidität. Das Ergebnis wird in Form eines Validitätsbewertungsberichts ausgegeben.

Die Kontrollierbarkeit von Einflüssen, die die Vergleichsdaten aus Simulation und Messung verfälschen, ist eine der größten Herausforderungen in der Validierung. Vielen dieser Einflüsse kann durch Maßnahmen, die die Modellparametrierung, die Schätzung von Einflussgrößen, die Signalverarbeitung und die praktische Versuchsdurchführung betreffen, begegnet werden, um die Kontrollierbarkeit der Datenvalidität zu erhöhen.

---

## 5 Anwendbarkeitsanalyse in der Fahrdynamik

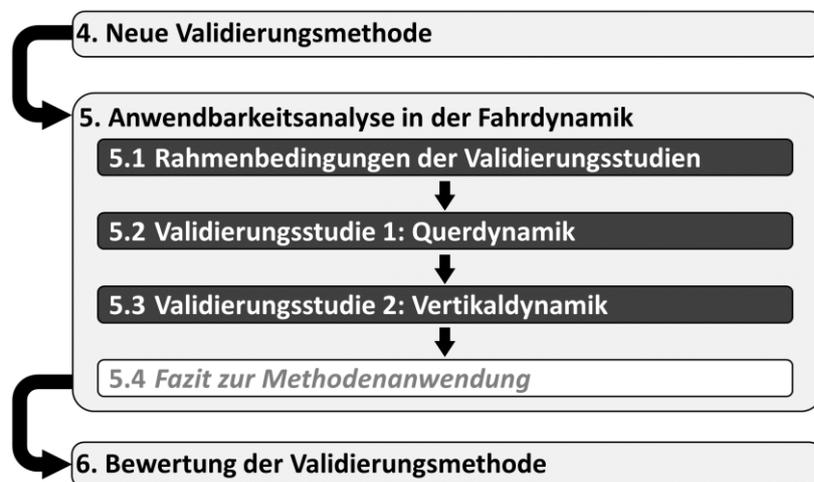


Abbildung 5-1: Einordnung und Struktur von Kapitel 5

Gemäß Abbildung 5-1 beschäftigt sich dieses Kapitel mit der Implementation der neuen, allgemeinen Validierungs- bzw. Vergleichsmethode aus Kapitel 4 in dem konkreten Anwendungsbe-  
reich der Fahrdynamiksimulation in der Automobilindustrie, um die Anwendbarkeit in beispiel-  
haften Validierungsstudien zu analysieren. Im Fokus der Analyse stehen die anwendungsspezi-  
fischen Fragestellungen, Probleme und Herausforderungen, die sich bei der Durchführung der  
beiden Studien ergeben und möglicherweise die Allgemeingültigkeit der Methode einschrän-  
ken.

Die Bewertung der Validierungsmethode im Hinblick auf die Anforderungserfüllung<sup>296</sup>, die An-  
wendbarkeit in spezifischen Anwendungsdomänen und die gegenüber dem Ist-Stand<sup>297</sup> errei-  
chten Verbesserungen erfolgt in Kapitel 6.

### 5.1 Rahmenbedingungen der Validierungsstudien

In den durchgeführten Fahrdynamik-Validierungsstudien kommt der entwickelte Validierungs-  
prozess aus Kapitel 4 zum Einsatz. Die Kombination der Methodenentwicklung und ihre An-

---

<sup>296</sup> Vgl. Unterkapitel 4.1 (Diversität der Anwendungsbereiche und Anforderungen an die Methode).

<sup>297</sup> Vgl. Kapitel 3 (Ist-Stand-Analyse).

wendbarkeitsanalyse in dieser Forschungsarbeit erfordert ein angepasstes Forschungsvorgehen<sup>298</sup> und die Einhaltung einiger Rahmenbedingungen, die eine hohe Effektivität der Nachweisführung sicherstellen und nachfolgend zusammengefasst werden:

- Die Validierungsstudien werden in einem Kernanwendungsgebiet, der Fahrdynamiksimulation, durchgeführt. Sie werden am Entwicklungsprozess der Automobilindustrie ausgerichtet.
  - Die Simulationsanwendungen adressieren Fahrzeugeigenschaften, die eine zentrale Rolle bei der fahrdynamischen Auslegung neuer Fahrzeuge spielen. Im Fokus stehen Anwendungen, die bereits heute simulationsbasiert untersucht werden, aber deren Nutzen im Entwicklungsprozess durch einen verbesserten Qualitätsnachweis erheblich gesteigert werden kann.
  - Für die Validierungsstudien werden die heute zur Verfügung stehenden Ressourcen und Prozesse genutzt. Hierzu gehören im Wesentlichen: Fahrzeuge und Komponenten, Messtechnik, Prüfstände, Teststrecken, Versuchskataloge, Werkstätten und Parametrierungsdaten für die Fahrzeuge und Komponenten. Auf diese Weise kann der Nutzen der neuen Validierungsmethode durch Vergleiche mit dem Ist-Stand evaluiert werden.
- Die neue Validierungsmethode ist während ihrer Entwicklung noch nicht in dem bestehenden Fahrzeugentwicklungsprozess eingebettet. Dies bringt Einschränkungen mit sich:
  - Eine langfristige Vorausplanung der Studien und deren Integration in etablierte Prozesse sind während der Erforschung der Validierungsmethode nicht möglich. Dies fordert Kompromissbereitschaft und kann zu zeitlichen Verzögerungen sowie erhöhten Kosten führen, die bei einer späteren Etablierung des Validierungsprozesses durch höhere Effizienz vermieden werden können.
  - Die ersten Validierungsstudien nach dem neuen Konzept müssen zunächst durch ein Forschungsteam in kurzer Zeit durchgeführt werden und erfordern Flexibilität hinsichtlich der derzeitigen Rahmenbedingungen, wie Verfügbarkeit von Systemvarianten, Messtechnik und Personalkapazitäten. Auch in diesem Punkt steckt Potenzial zur Effizienzsteigerung bei Etablierung des Prozesses.

Die beschriebenen Rahmenbedingungen führen zu folgender Strategie für die Validierungsstudien, die im Rahmen dieser Forschungsarbeit durchgeführt werden:<sup>299</sup>

- Die Konfigurationsstichproben basieren auf einem Basisfahrzeug. Die notwendigen Eigenschaftsänderungen für die verschiedenen Konfigurationsstichproben erfolgen durch den Austausch ausgewählter Komponenten, durch Verstellen variabler Komponenten

---

<sup>298</sup> Vgl. Unterkapitel 1.4 (Forschungsmethodik und Struktur der Arbeit) / Viehof, M.; Winner, H.: Research Methodology for a New Validation Concept, 2018.

<sup>299</sup> Vgl. Viehof, M.; Winner, H.: Research Methodology for a New Validation Concept, 2018, S. 5 f / Viehof, M. et al.: Validierungskonzept für die Vertikaldynamik, 2017, S. 157 ff.

und durch Variation der Aufbau- sowie der reifengefederten Masse. Die Vorteile, die sich aus dieser Strategie der Stichprobenkonfiguration ergeben, betreffen die Kontrollierbarkeit der relativen Datenvalidität und die Effizienz:

- Die Parametrierung des Gesamtfahrzeugmodells muss nur einmalig durchgeführt werden. Alle anderen Parameterdatensätze für die weiteren Stichprobenkonfigurationen ergeben sich durch Anpassung dieses Datensatzes auf Komponentenebene.
- Alle Eigenschaftsvariationen zwischen den Stichproben können z.B. durch Komponentenvermessungen genau quantitativ erfasst und damit bestmöglich kontrolliert werden. Die Gefahr, dass die Datenvalidität zwischen den Konfigurationsstichproben variiert, ist bei diesem Vorgehen weitestgehend reduziert. Arbeitspunktabhängige Unterschiede der Simulationsvalidität, die aus der Zuweisung verschiedener Labels hervorgeht, sind verstärkt auf die Modellvalidität zurückzuführen.
- Die Eigenschaftsänderungen des Basisfahrzeugs durch das Messsystem übertragen sich analog auf alle anderen Konfigurationsstichproben, da das Messsystem konstant gehalten wird. Bei unterschiedlichen Fahrzeugen wäre insbesondere der Einfluss der Zusatzmasse der Messtechnik für jedes Fahrzeug individuell zu identifizieren.
- Das Datenerfassungssystem und die meisten Sensoren verbleiben im Fahrzeug. Beim Wechsel zwischen den einzelnen Konfigurationsstichproben müssen ggf. einzelne Sensoren neu appliziert und kalibriert werden.
- Bezüglich der Versuche wird im ersten Ansatz auf Standards in der Fahrzeugerprobung zurückgegriffen. Das heißt, dass als Validierungsversuche etablierte Fahrdynamikexperimente und Prüfstandsversuche zur Anwendung kommen. Die Methode wird in dieser Arbeit für vertikal- und querdynamische Simulationsanforderungen getestet. Die Vorteile sind:
  - Die Vergleichbarkeit mit bisherigen Simulationen dieser Versuche sowie die Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf frühere Simulationsergebnisse sind gewährleistet.
  - Mögliche Schwachstellen der etablierten Verfahren können aufgedeckt werden. Weiterführende Forschungsarbeiten<sup>300</sup> können die Optimierung von Validierungsversuchen basierend auf diesen Erkenntnissen untersuchen.
  - Die Prüfstände und Testgelände sind bereits auf die Versuche ausgerichtet. Die Durchführbarkeit der Versuche erfordert keine weitere Voruntersuchung.

Diese Strategie weist eine hohe Effizienz auf. Dies erhöht die Attraktivität der neuen Validierungsmethode und maximiert die Wahrscheinlichkeit einer Aufnahme in den Produktentwicklungsprozess der Fahrzeugindustrie. Optimierungen und Erweiterungen können schrittweise im Praxiseinsatz erfolgen.

Dem Vorteil der Kontrollierbarkeit bei der gewählten Strategie, Variationen am Versuchsfahrzeug vorzunehmen und keine unterschiedlichen Fahrzeuge heranzuziehen, steht der Nachteil

---

<sup>300</sup> Vgl. Bach, C.: Effizienzsteigerung von Validierungstests, 2017 / Gaß, L.: Fahrereinfluss im Manöver Sinuslenken, 2017 / Schad, J.: Untersuchungsumgebung für standardisierter Fahrmanöver, 2016.

eingeschränkter Parametervariationen für die Konfigurationsstichproben gegenüber. Hieraus resultieren Forderungen für spätere Validierungsstudien:

*„Als Nachteile dieses Vorgehens sind zu nennen, dass die Durchführung bei der Forderung großer Parametervariationsbereiche nicht möglich ist und dass auf diese Weise einige Eigenschaften nicht variiert werden können, die bei einem Wechsel des Fahrzeugs verändert werden (z.B. der Radstand). Deshalb wird vorgeschlagen, für eine umfassendere Absicherung der Validierungsergebnisse [in späteren Validierungsstudien] beide Variationsmethoden miteinander zu verknüpfen.“<sup>301</sup>*

### 5.1.1 Versuchsfahrzeug und Fahrzeugkonfigurationen



Abbildung 5-2: Versuchsfahrzeug Opel Astra K

Als Versuchsfahrzeug kommt der in Abbildung 5-2 dargestellte Opel Astra der Baureihe K zum Einsatz. Hierbei handelt es sich um ein Fahrzeug der Kompaktklasse. Das Fahrzeug ist mit einem 3-Zylinder-Benzin-Turbomotor mit 1 Liter Hubraum ausgestattet, der 77 kW (105 PS) leistet. Das Versuchsfahrzeug besitzt eine McPherson-Vorderachse mit Stabilisator und eine Verbundlenker-Hinterachse ohne zusätzlichen Stabilisator. Die Bereifung der Dimension 225/45 R 17 ist für beide Achsen identisch. Die Fahrwerkselemente sind passiv. Das Leergewicht (inkl. aller Betriebsflüssigkeiten) beträgt ca. 1260 kg bei einer Achslastverteilung von 58:42.

Da die Validierungsstudien ausschließlich für die Modellreihe aussagekräftig sein soll, werden die einzelnen Stichproben für die statistische Validitätsbewertung ausgehend von dem Basisfahrzeug in Serienkonfiguration, aber inklusive des erforderlichen Messsystems, das in Abschnitt 5.1.2 beschrieben ist, konfiguriert. Die Änderungen am Basisfahrzeug betreffen u.a. die Zuladung, die reifengefederte Masse, den Stabilisator, die Verbundlenkerhinterachse, die

---

<sup>301</sup> Viehof, M. et al.: Validierungskonzept für die Vertikaldynamik, 2017, S. 160.

Dämpfer und den Reifenfülldruck. Die Stichprobenauswahl wird im Rahmen der Validierungsstudien beschrieben.<sup>302</sup>

Die nähere Auseinandersetzung mit den Variationsparametern bzw. Faktoren führt zu der Erkenntnis, dass im System Fahrzeug keine fahrdynamikrelevanten Variationsparameter vorzufinden sind, die isoliert betrachtet werden können. Mit jeglichen Komponentenvariationen werden zusätzliche Systemeigenschaften zwangsweise verändert. Das in der Fahrdynamikvalidierung wichtigste Beispiel hierfür ist die Variation der Zuladungsmasse. Diese bringt weitreichende Änderungen mit sich, die z.B. die Schwerpunktlage, die Standhöhe, die Arbeitspunkte von Feder, Dämpfer und Fahrwerkslagern sowie die Radstellung betreffen.<sup>303</sup> Die Variation solcher interaktiver Parameter stellt für die Simulationsumgebung eine große Herausforderung dar, da sie neben dem quantitativen Einfluss der eigentlichen Parametervariation auch die systeminternen Parameterinteraktionen abbilden können muss. Diese Eigenschaft wird in Abschnitt 4.4.2.3 als interne Validität bezeichnet und im Rahmen der Parametervalidierung<sup>304</sup> untersucht. Für den Vertrauensnachweis durch den Validierungsprozess ist diese Eigenschaft somit als vorteilhaft zu bewerten.

### 5.1.2 Messtechnik im Versuchsfahrzeug

Abbildung 5-3 zeigt eine Übersicht der Sensoren und des Messsystems, die in den Validierungsstudien zum Einsatz kommen. Die abgebildete Zusammenstellung resultiert aus der effizienzbedingt parallelen Durchführung unterschiedlicher Validierungsstudien der Quer- und Vertikaldynamik. Dies bedeutet, dass eine Fahrzeugkonfiguration, die für mehrere Studien relevant ist, nacheinander den Testanwendungen dieser Studien unterzogen wird, um den Umrüstungsaufwand zu minimieren. Aus diesem Grund ist das Versuchsfahrzeug beispielsweise mit einem Correvit-Sensor ausgestattet, der für die Querdynamikstudie<sup>305</sup> erforderlich ist, der für die Vertikaldynamikstudie<sup>306</sup> auf dem Vier-Stempel-Prüfstand hingegen nicht benötigt wird.

---

<sup>302</sup> Vgl. Unterkapitel 5.2 (Validierungsstudie der Querdynamik) und 5.3 (Validierungsstudie der Vertikaldynamik).

<sup>303</sup> Vgl. Viehof, M. et al.: Validierungskonzept für die Vertikaldynamik, 2017, S. 161.

<sup>304</sup> Vgl. Abschnitt 4.4.5.2 (Parametervalidierung).

<sup>305</sup> Vgl. Unterkapitel 5.2 (Validierungsstudie der Querdynamik).

<sup>306</sup> Vgl. Unterkapitel 5.3 (Validierungsstudie der Vertikaldynamik).

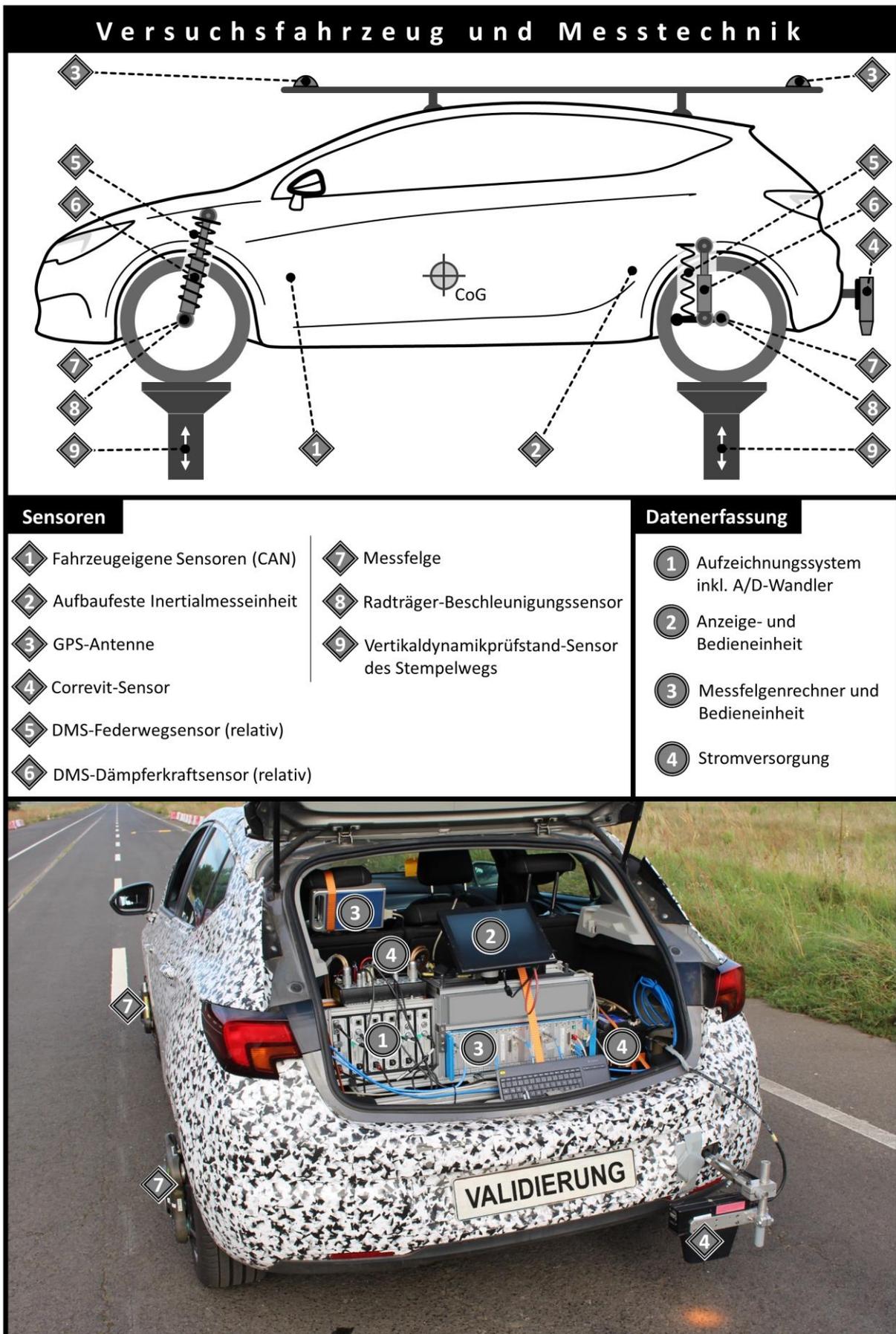


Abbildung 5-3: Messtechnik im Versuchsfahrzeug

Der Verzicht auf Radvektorsensorik ist in den gegebenen Rahmenbedingungen begründet. Die praktischen Versuche liefern somit keine Information über die Radstellung, die aus der Superposition kinematischer und elastokinematischer Effekte resultiert. Diesem Informationsverlust wird durch einen Zusatzversuch entgegengewirkt, in dem das fertig parametrisierte Simulationsmodell auf einen virtuellen KnC-Prüfstand gestellt und den gleichen Lastfällen unterzogen wird wie das Versuchsfahrzeug auf einem realen KnC-Prüfstand. Da in den nachfolgend vorgestellten Studien keine Variationen der Fahrwerkselastizität und -kinematik vorgenommen werden, kann über diesen Vergleich der Verzicht auf Radvektorsensorik kompensiert werden. Abbildung 5-4 zeigt beispielhaft für die Radaufhängung vorne links und vorne rechts den Vergleich der Radlast-Radhub-Abhängigkeit, die die Gesamtfahrwerkssteifigkeit im quasistationären Fall charakterisiert. Diese Kennlinien gehen aus der Prüfstandsmessung mit eingespanntem Fahrzeugaufbau hervor. Die Simulation liegt im relevanten Betriebsbereich innerhalb der Hysteresekurve des realen Fahrzeugs.

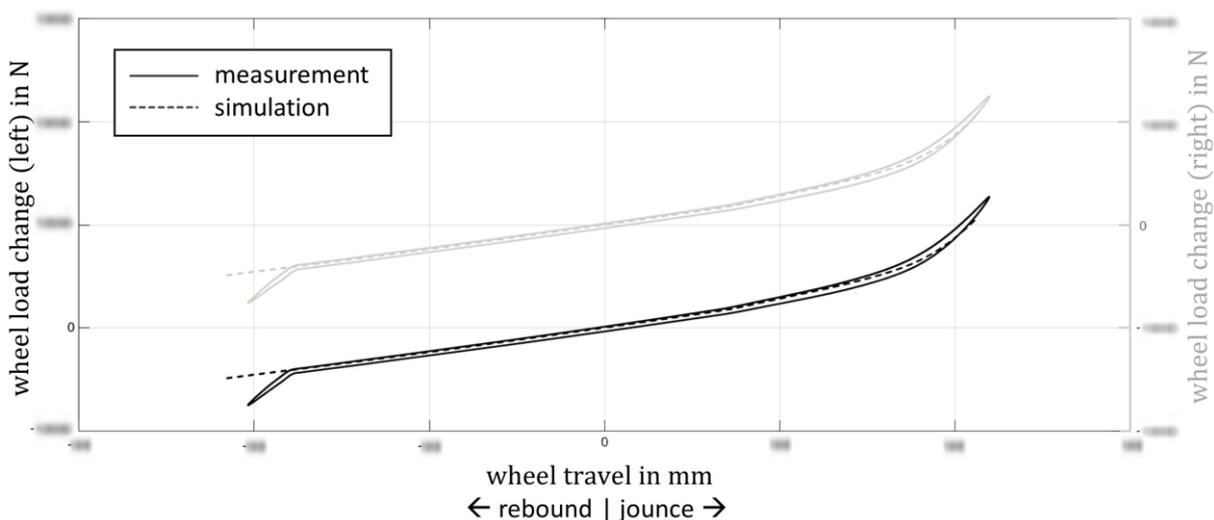


Abbildung 5-4: Vergleich der Fahrwerkssteifigkeit zwischen Prüfstandssimulation und -messung

Die größte Herausforderung bei der messtechnischen Aufrüstung eines Versuchsfahrzeugs liegt darin, die Fahrzeugeigenschaften gegenüber dem Fahrzeug ohne Messtechnik, dessen Eigenschaften eigentlich erfasst werden sollen, möglichst nicht zu verändern. Deshalb ist bei der Aufrüstung des Fahrzeugs größter Wert darauf zu legen, dass mit Ausnahme massebezogener Eigenschaftsänderungen, die nicht zu vermeiden sind, keine signifikanten Änderungen am Fahrzeug vorgenommen werden. Beispiele hierfür sind die Ausstattung der Messräder mit den gleichen Reifen und die Vermeidung abweichender Einpresstiefen.

Die für die Studien ausgewählte Messtechnik erhöht die Fahrzeugmasse um 102 kg bzw. 8 % und führt aufgrund der Positionierung des Datenaufzeichnungssystems im Kofferraum zu einer Reduktion der statischen Achslastdifferenz.<sup>307</sup> Die reifengefederte Masse steigt infolge der Messfelgen um 3 kg bzw. 15 % je Fahrzeugecke an. Diese Veränderungen sind zwar als signifikant zu bewerten, liegen aber dennoch innerhalb des kundenrelevanten Betriebsbereichs des

<sup>307</sup> Die Achslastverteilung des Fahrzeugs beträgt mit Messsystem 54:46 und ohne Messtechnik 58:42.

Fahrzeugs und sind damit nicht unrealistisch hoch, was ein wichtiges Argument für die Relevanz der Validierungsergebnisse ist. 75 % aller Fahrwerksmodifikationen, die von Kunden im Rahmen von Tuning-Maßnahmen durchgeführt werden, betreffen die Rad-Reifen-Kombination.<sup>308</sup> Dabei liegt die Spannweite der Gewichtsunterschiede zwischen den zulässigen Rädern eines Pkw bei ca. 30 %, also ca. doppelt so hoch, wie der Systemeingriff durch das Anbringen der Messfelgen.<sup>309</sup>

Anhang A.2.1 zeigt die Sensorverknüpfung und die einzelnen Pfade der Datenerfassung. Es kommt ein einziges Aufzeichnungssystem zum Einsatz, das die digitalisierten Analogsignale, sowie die Signale der anderen Messsysteme (Inertialmesseinheit, Correvit-Sensor und Fahrzeug-CAN-Bus<sup>310</sup>) gleichermaßen speichert. Die Systeme weisen unterschiedliche Abstraten, Laufzeiten und Datenkonventionen auf, sodass dem in Abschnitt 4.4.3.3 beschriebenen Prozess zur Datenverarbeitung besondere Bedeutung zukommt. Das Messsystem ist in vergleichbarer Form in der Simulationsumgebung implementiert.<sup>311</sup>

Eine Liste der gemessenen Signale inklusive Zuweisung der Sensoren bzw. Messsysteme ist Anhang A.2.2 zu entnehmen.

### 5.1.3 Auswahl repräsentativer Simulationsanwendungen

Die Auswahl repräsentativer Simulationsanwendungen für die Erprobung des neuen Validierungsprozesses richtet sich an den in Unterkapitel 5.1 erläuterten Rahmenbedingungen für das Forschungsprojekt aus:

- Standardisierte Fahrdynamikexperimente
- Längs-, quer- und vertikaldynamische Anwendungen
- Validierung im Hinblick auf relevante Fahrzeugeigenschaften

Die Auswahl der Fahrmanöver bzw. Prüfstandsversuche resultiert aus einer simulationsbasierten Kategorisierung der Testverfahren entsprechend den Ausführungen in Abschnitt 4.4.2.2, die eine objektive Auswahl geeigneter Validierungstests für spezifische Anforderungen ermöglicht. Es besteht eine feste Analogie zwischen Systemanalysen in der Regelungstechnik und in der Fahrdynamik. Eine nähere Betrachtung führt zu der Klassifikation in der Industrie verbreiteter und standardisierter Testverfahren. Die in Tabelle 5-1 kategorisierten Experimente zeigen eine Übersicht der Testanwendungen die zur Erprobung der Validierungsmethode geeignet sind. Die

---

<sup>308</sup> Vgl. Regh, F.: Sicherheitsrelevante Auswirkungen durch Fahrwerkmodifikationen, 2012, S. 20.

<sup>309</sup> Vgl. Übler, J.: Das bringen größere Felgen und Breitreifen, 2009.

<sup>310</sup> CAN steht für Controller Area Network. Der CAN-Bus ist ein Elektronik-Bussystem, das die Datenübertragung zwischen den Steuergeräten eines Autos ermöglicht. Über den CAN-Bus können Signale fahrzeugeigener Sensoren abgegriffen werden, die zur Auswertung der Validierungsversuche benötigt werden. (Vgl. Haken, K.L.: Grundlagen der Kraftfahrzeugtechnik, 2013, S. 133 ff).

<sup>311</sup> Vgl. Abschnitt 5.1.4.

zwei nachfolgend vorgestellten Studien basieren auf den beiden dunkelgrau hinterlegten Experimenten.

Tabelle 5-1: Kategorisierung verbreiteter Fahrdynamikexperimente nach Anregungssignaltyp<sup>312</sup>

		Fahrdynamikdomäne			
		Längsdynamik	Querdynamik	Vertikaldynamik	
				fahrend	stehend
Anregungssignal	Sprung	Vollbremsung	Lenkwinkel-sprung	–	↑ Anregungsprofile auf einem Vierstempelprüfstand
	Impuls	–	–	Schwellenüberfahrt	
	Rampe	schwellende Bremsung	Lenkwinkelrampe	–	
	Harmonische Schwingung	–	Sinuslenken	Wellenfahrbahn	↓

### 5.1.4 Simulationsumgebung

Die Validierungsstudien beziehen sich auf Simulationen mit der Software CarMaker der IPG Automotive GmbH. Wie in Unterkapitel 2.2 beschrieben handelt es sich dabei um eine Special Purpose-Software. CarMaker unterscheidet sich von einigen klassischen Mehrkörpersimulationen durch seine Echtzeitfähigkeit und Recheneffizienz. Diese ist darin begründet, dass in CarMaker sogenannte systemdynamische Modelle zum Einsatz kommen. „Dabei werden Lösungen der MKS-Differentialgleichungen als Kennlinien approximiert. Dies führt zu einem leichten Verlust an Rechengenauigkeit, beschleunigt aber die Rechenzeit auf Echtzeit oder auch noch schneller.“<sup>313</sup>

Das primäre Ziel der nachfolgend vorgestellten Validierungsstudien ist die Erhebung einer Information über die Simulationsvalidität für ein sehr recheneffizientes Simulationsmodell in Kombination mit einer nominellen Parametrierung. Aus diesem Grund kommen ein Standard-CarMaker-Fahrzeugmodell, das sich durch die Parametrierung des CarMaker-Fahrzeugdatensatzes ohne zusätzliche Kopplung externer Modelle auszeichnet, und ein vergleichsweise einfaches Reifenmodell zum Einsatz. Für die CarMaker-Simulation müssen folgende Bestandteile definiert werden:

<sup>312</sup> Vgl. Bach, C.: Effizienzsteigerung von Validierungstests, 2017, S. 28.

<sup>313</sup> Breuer, S.; Rohrbach-Kerl, A.: Fahrzeugdynamik, 2015, S. 275.

### 1. Fahrzeug

Das Gesamtfahrzeugmodell wird nach verschiedenen Kategorien<sup>314</sup> parametrieren. Innerhalb dieser Kategorien können unterschiedliche Submodelle ausgewählt werden. So stehen für die Feder- und Dämpfersimulation ein charakteristischer Wert (Steifigkeit bzw. Dämpfungskonstante) und Kennlinienmodelle, die auch Nichtlinearitäten abbilden können, zur Wahl. Des Weiteren bietet CarMaker die Möglichkeit, externe Modelle, z.B. über eine MATLAB/Simulink<sup>315</sup>-Schnittstelle, einzubinden, die auch die Integration von Regelsystemen ermöglichen. Zu der Modellparametrierung gehört auch die Definition der Fahrzeugsensoren, die für die Konfiguration der Simulationsausgangsgrößen entscheidend ist.

Die Parametrierung des Modells für das Versuchsfahrzeug erfolgt nach einem fest definierten unternehmensinternen Prozess. Die Komponentenparameter liefern Fachabteilungen, Zulieferer und Komponentenprüfstände. Die Kinematik und Elastokinematik werden mittels eines KnC-Prüfstands parametrieren, auf dem das Versuchsfahrzeug einer Vermessung unterzogen wird. Die Messtechnikkomponenten werden vor dem Einbau in das Versuchsfahrzeug einzeln vermessen und die Einbaupositionen präzise erfasst. Die Standhöhen-, Radlast- und damit die Schwerpunktlagenänderung infolge der Messtechnik werden nach deren Einbau durch eine statische Messung identifiziert und mit einer äquivalenten Simulation verglichen.

Für zukünftige Simulationen kann aus diesem Vergleichsprozess eine Abschätzung erfolgen, wie gut die Simulation bei nomineller (datenblattbasierter) Parametrierung das statische Systemverhalten widerspiegelt. In diesem Forschungsprojekt liegt z.B. für 18 unterschiedliche Fahrzeugkonfigurationen die Abweichung zwischen nomineller Parametrierung und Messung der Fahrzeugmasse bei durchschnittlich 0,5 % und der Schwerpunktlage bei 0,02 m. Damit sind die Genauigkeitsanforderungen an die Stillstandssimulation erfüllt.

Regelsysteme spielen in den durchgeführten Studien keine Rolle. In den Realversuchen erfolgen keine Regeleingriffe durch die Assistenzsysteme. Der Fokus liegt hier somit auf der Simulationsqualität der reinen Fahrmechanik.

### 2. Reifen

Es gibt eine Vielzahl von Reifenmodellen, die sich hinsichtlich ihres Einsatzgebietes, der Berechnungsdauer und des Parametrierungsaufwands wesentlich unterscheiden. In der Fahrdynamiksimulation kommen überwiegend echtzeitfähige Reifenmodelle, wie z.B. MF-Tyre- und MF-Swift- sowie HSRI-Modelle zum Einsatz. In der Komfort und Lastkollektivsimulation werden üblicherweise rechenintensivere und detailliertere FTire-, RMOD-K- und CDTire-Modelle verwendet.<sup>316</sup>

---

<sup>314</sup> Die Kategorien sind: Aufbau und Massen, Motor, Radaufhängung, Lenkung, Reifen, Bremsen, Antriebsstrang, Aerodynamik und Sensoren.

<sup>315</sup> Software von MathWorks, Natick (Massachusetts, USA).

<sup>316</sup> Vgl. Adamski, D.: Simulation in der Fahrwerktechnik, 2014, S. 177 ff.

Sowohl in der Quer- als auch in der Vertikaldynamikstudie dieser Arbeit kommt ein vergleichsweise einfaches MF-Tyre-6.1-Modell zum Einsatz. Dieses Modell baut auf dem bekanntesten phänomenologischen Reifenmodell mit dem Namen *Magic Formula* auf und wurde unter Leitung von Prof. Pacejka in einer Kooperation der TU Delft mit Volvo entwickelt.<sup>317a</sup> Heute wird MF-Tire vom Forschungsinstitut TNO in Delft vermarktet und ist primär für längs- und querdynamische Simulationen und für Anregungen bis 8 Hz ausgelegt.<sup>317b</sup>

Vertikaldynamisch entspricht das Modell einer Parallelschaltung aus Feder und Dämpfer mit konstanter Charakteristik.

Für die Validierungsstudien liegt eine nominelle MF-Tire-Parametrierung für den Versuchsreifen vor.

### 3. *Fahrbahn*

Die Fahrbahn entspricht in der Validierung – sofern die Versuche in der Simulation als Open-Loop-Manöver durchgeführt werden<sup>318</sup> – einer Freifläche, deren Reibwert an die Identifikationsversuche bzw. Schätzungen gemäß Abschnitt 4.5.2 angepasst wird. Etwaige Reibwertänderungen, Steigungen und seitliche Neigungen können ebenso in der Fahrbahnparametrierung berücksichtigt werden.

### 4. *Manöver*

Das Manöver beschreibt die Fahrzeugbewegung. Hierbei sind zwei Fälle zu unterscheiden. Im Closed-Loop-Manöver werden Zielwerte für die Fahrzeugbewegung (z.B. Trajektorie und Geschwindigkeit) vorgegeben. Im Open-Loop-Versuch, der für die Validierung bevorzugt wird,<sup>319</sup> werden die Anregungsprofile vorgegeben. So werden in der Querdynamikstudie die gemessenen Fahrereingaben und in der Vertikaldynamikstudie die gemessenen Stempelwege des Vierstempelprüfstands als Funktion der Zeit in die Simulation geführt.

### 5. *Konfiguration der Simulation-Ausgangsgrößen*

Die Konfiguration der Ausgangsgrößen ist an die Messtechnikkonfiguration des Versuchsfahrzeugs angepasst. In ihr werden die Ausgangssignale und deren Abtastfrequenzen festgelegt.

Die wichtigsten Modelleigenschaften zusammengefasst lauten:<sup>320</sup>

- Der Fahrzeugaufbau ist starr.
- Motor und Aufbau sind fest miteinander verbunden. Motorlager werden nicht simuliert.
- Die Aufbaufedern besitzen eine wegunabhängig konstante Steifigkeit.
- Die Aufbaudämpfer werden mit je einer Geschwindigkeit-Kraft-Kennlinie, ohne Hysterese, ohne hub- und frequenzabhängige Eigenschaftsänderung simuliert.

---

<sup>317</sup> Vgl. Adamski, D.: Simulation in der Fahrwerktechnik, 2014, (a) S. 187 | (b) S. 188.

<sup>318</sup> Vgl. Abschnitt 4.4.4 (Versuchsdurchführung).

<sup>319</sup> Vgl. Abschnitt 4.4.2.2 (Testanwendungen).

<sup>320</sup> Vgl. Viehof, M. et al.: Validierungskonzept für die Vertikaldynamik, 2017, S. 153.

- Die Anschlagpuffer (Jounce Bumper) der Dämpfer haben eine konstante Steifigkeit.
- Die Kinematik und Elastokinematik werden kennfeldbasiert simuliert.
- Das Magic-Formula-6.1-Reifenmodell weist vertikal eine konstante Steifigkeit und Dämpfung auf.

## 5.2 Validierungsstudie der Querdynamik

### 5.2.1 Stufe 1: Anforderungsdefinition

Ziel dieser Validierungsstudie ist die Erfassung der Stichprobenvalidität stationärer bis langsam-transienter querdynamischer Fahrzeugeigenschaften. Die Ausgangsgrößen der Simulationsanwendung und deren Genauigkeitsanforderungen, die auf Erfahrungswerten aus Simulation und Fahrversuch sowie der gewünschten Trennschärfe basieren, sind in Tabelle 5-2 zusammengefasst.

Tabelle 5-2: Globale Hauptanforderungen der Querdynamik-Validierungsstudie<sup>321</sup>

Ausgangsgröße	Genauigkeitsanforderung (Maximalwert ist anzuwenden)
Lenkradwinkelbedarf	$\pm 15 \%$ bzw. $\pm 4^\circ$
Eigenlenkgradient	$\pm 15 \%$ bzw. $\pm 2^\circ/(\text{m/s}^2)$
Schwimmwinkelbedarf	$\pm 15 \%$ bzw. $\pm 2^\circ$
Radlastverlagerung je Achse	$\pm 15 \%$ bzw. $\pm 100 \text{ N}$
Wankverhalten	$\pm 15 \%$ bzw. $\pm 0,25^\circ$

Im Gegensatz zur Vertikaldynamikstudie in Abschnitt 5.3.1 liegt der Fokus dieser Studie lediglich auf der Simulationsvalidität des nominell parametrisierten Modells. Deshalb werden hier keine Subsystem- und Zusatzanforderungen formuliert.

Die Studie soll eine Gültigkeit für die Fahrzeugbaureihe, d.h. unterschiedliche Derivate des Opel Astra K, haben. Die Parametervariationen innerhalb der Konfigurationsstichproben müssen sich deshalb in dem relevanten Wertebereich dieser Baureihe aufhalten, um die Ergebnisse interpolativ übertragen zu können.

<sup>321</sup> In dieser Studie werden sowohl absolute als auch prozentuale Genauigkeitsanforderungen formuliert. Dies ist immer dann sinnvoll, wenn eine Ausgangsgröße Werte nahe Null aufweisen kann. Dann führen schon kleinste absolute Abweichungen zu einer hohen prozentualen Differenz. Deshalb gilt jeweils die größere der beiden Toleranzangaben, um dieses Problem zu umgehen.

Nach Industriestandard wird ein Vertrauensniveau von  $\gamma = 95 \%$  gefordert – also eine zulässige Irrtumswahrscheinlichkeit von  $\alpha = 5 \%$ .<sup>322</sup>

## 5.2.2 Stufe 2: Auslegung der Validierungsstudie

Als Bezugsgröße für die Ausgangsgrößen wird die Querbeschleunigung herangezogen. Für Kennwerte des Kreisfahrtmanövers ist diese Bezugsgröße etabliert.<sup>323</sup> Dies bewirkt eine robuste Erfassung der Validitätskriterien, da nur eine indirekte Abhängigkeit von der Zeit, der Geschwindigkeit  $v$  und dem Bahnradius  $R$  besteht. Die Unabhängigkeit vom Bahnradius unterstützt gleichzeitig auch die Robustheit gegenüber Reibwertschwankungen. Darüber hinaus erhöht sich die Aussagekraft, da die Eigenschaft für unterschiedliche Arbeitspunkte – Kombinationen von Fahrzeuggeschwindigkeit und Bahnradius bzw. Gierrate – gültig sind.<sup>324</sup>

$$a_y = \frac{v^2}{R} = v \cdot (\dot{\beta} + \dot{\psi}) \quad (5.1)$$

Gemäß Abschnitt 4.4.2.1 muss eine Komprimierung von Kurvenverläufen zur Kennwertdefinition vorgenommen werden. Der Reifen bleibt im Querbeschleunigungsbereich  $0 \text{ m/s}^2 \leq |a_y| \leq \text{ca. } 4 \text{ m/s}^2$  annähernd linear im Verhalten.<sup>325</sup> Dies bedeutet, dass viele Kennlinien bzw. Fahrzeugeigenschaften in diesem Bereich in Form eines einzigen Gradienten beschrieben werden können. Im Querbeschleunigungsbereich  $|a_y| > 4 \text{ m/s}^2$  werden die Kurvenverläufe mittels der in Abschnitt 4.4.2.1 beschriebenen Gewichtungsfunktion komprimiert. Die hinsichtlich Robustheit und Aussagekraft abgesicherten metrischen Validitätskriterien (MVC) sind in Tabelle 5-3 inklusive der zulässigen absoluten Toleranzen, die sich aus den Genauigkeitsanforderungen ergeben, zusammengefasst. Die relative Toleranzgrenze ist auf 15 % festgelegt.

Die ersten drei MVC zum Lenkradwinkelbedarf ergänzen bewusst die drei Kriterien des Eigenlenkgradienten. Der Lenkradwinkelbedarf in Abhängigkeit der Querbeschleunigung ist eine wichtige Ausgangsinformation der Simulation. Es handelt sich hierbei um eine absolute Winkelgröße, während der Eigenlenkgradient lediglich die querbeschleunigungsbezogene Lenkwinkeländerung beschreibt.<sup>326</sup> Deshalb ist es möglich, dass ein absoluter Lenkradwinkeloffset vorliegt und der prädierte Lenkwinkelbedarf nicht valide ist, während der Eigenlenkgradient – also die relative Änderung – stichprobenvaleide ist. Aufgrund des linearen Verhaltens ist ein Arbeitspunkt im Bereich  $0 \text{ m/s}^2 \leq |a_y| \leq \text{ca. } 4 \text{ m/s}^2$  ausreichend.

<sup>322</sup> Vgl. Unterkapitel 4.4 (Objektivierung und Verknüpfung der Teilprozesse).

<sup>323</sup> Vgl. DIN ISO 4138: Straßenfahrzeuge – Stationäre Kreisfahrt, 1984.

<sup>324</sup> Vgl. Breuer, S.; Rohrbach-Kerl, A.: Fahrzeugdynamik, 2015, S. 151.

<sup>325</sup> Vgl. Pfeffer, P.; Harrer, M.: Lenkungshandbuch, 2013, S. 25.

<sup>326</sup> Vgl. Abschnitt 5.2.3 (Stufe 3: Versuchsvorbereitung).

Diese Betrachtung ist insbesondere auch dann vorzunehmen, wenn der Eigenlenkgradient auf Basis von Lenkwinkelsensorik am Rad und der Lenkradwinkelbedarf anhand des Lenkradwinkelsensors bestimmt werden. In diesem Fall kann eine fehlerhaft simulierte Lenkübersetzung, die nur Einfluss auf die absoluten Lenkradwinkel hat, trotz stichprobenvalider Prädiktion des Eigenlenkgradienten aufgezeigt werden.

Tabelle 5-3: Metrische Validitätskriterien der Querdynamik-Validierungsstudie

Nr.	metrisches Validitätskriterium (MVC)		Bezugsquerbeschleunigung	zulässige abs. Toleranz
1	absoluter Lenkradwinkel im linearen Bereich	$\delta_{H,a_y=2}$	$ a_y  = 2 \frac{m}{s^2}$	$\pm 4^\circ$
2	absoluter Lenkradwinkel im nichtlinearen Bereich	$\delta_{H,a_y=6}$	$ a_y  = 6 \frac{m}{s^2}$	$\pm 4^\circ$
3		$\delta_{H,a_y=8}$	$ a_y  = 8 \frac{m}{s^2}$	$\pm 4^\circ$
4	mittlerer Eigenlenkgradient im linearen Bereich	$K_{US,linear}$	$1 \frac{m}{s^2} \leq  a_y  \leq 4 \frac{m}{s^2}$	$\pm 2 \frac{^\circ}{m/s^2}$
5	Eigenlenkgradient im nichtlinearen Bereich	$K_{US,a_y=6}$	$ a_y  = 6 \frac{m}{s^2}$	$\pm 2 \frac{^\circ}{m/s^2}$
6		$K_{US,a_y=8}$	$ a_y  = 8 \frac{m}{s^2}$	$\pm 2 \frac{^\circ}{m/s^2}$
7	mittlerer Schwimmwinkel-Querbeschleunigung-Gradient im linearen Bereich	$\left[ \frac{d\beta}{da_y} \right]_{linear}$	$1 \frac{m}{s^2} \leq  a_y  \leq 4 \frac{m}{s^2}$	$\pm 2 \frac{^\circ}{m/s^2}$
8	Schwimmwinkel im nichtlinearen Bereich	$\beta_{a_y=6}$	$ a_y  = 6 \frac{m}{s^2}$	$\pm 2^\circ$
9		$\beta_{a_y=8}$	$ a_y  = 8 \frac{m}{s^2}$	$\pm 2^\circ$
10	mittlerer Radlastdifferenz-Querbeschleunigung-Gradient im linearen Bereich	$\left[ \frac{d(\Delta F_{z,front})}{da_y} \right]_{linear}$	$1 \frac{m}{s^2} \leq  a_y  \leq 4 \frac{m}{s^2}$	$\pm 100 \frac{N}{m/s^2}$
11		$\left[ \frac{d(\Delta F_{z,rear})}{da_y} \right]_{linear}$	$1 \frac{m}{s^2} \leq  a_y  \leq 4 \frac{m}{s^2}$	$\pm 100 \frac{N}{m/s^2}$
12	mittlerer Wankwinkel-Querbeschleunigung-Gradient im linearen Bereich	$\left[ \frac{d(\Delta\varphi)}{da_y} \right]_{linear}$	$1 \frac{m}{s^2} \leq  a_y  \leq 4 \frac{m}{s^2}$	$\pm 0,25 \frac{^\circ}{m/s^2}$
13	Wankwinkel im nichtlinearen Bereich	$\varphi_{a_y=6}$	$ a_y  = 6 \frac{m}{s^2}$	$\pm 0,25^\circ$
14		$\varphi_{a_y=8}$	$ a_y  = 8 \frac{m}{s^2}$	$\pm 0,25^\circ$

Die Anforderungen bedingen ein stationäres oder quasistationäres Querdynamikmanöver. Das klassifizierte Versuchsportfolio führt zu der Auswahl der quasistationären Kreisfahrt, für die

unterschiedliche Durchführungsvarianten bestehen.<sup>327</sup> Für die Studie wird die Variante mit konstanter Geschwindigkeit und variablem Bahnradius gewählt. Diese Durchführung als Lenkwinkelrampe mit konstanter Fahrzeuggeschwindigkeit bietet den Vorteil, dass im Gegensatz zu der Variante mit variabler Geschwindigkeit und konstantem Bahnradius die Beanspruchung der Reifen geringer ist, sodass diese über eine größere Anzahl von Versuchen konstante Eigenschaften aufweisen und ein kleineres Versuchsgelände für die Durchführung ausreicht. Nachteil dieses Verfahrens ist, dass aufgrund der konstanten bzw. nur diskret veränderten Geschwindigkeit die charakteristische Geschwindigkeit nicht bestimmt werden kann, die in dieser Studie jedoch auch nicht als Ausgangsgröße der Simulation gefordert ist. Hierfür wäre die quasistationäre Kreisfahrt mit konstantem Radius und variabler Geschwindigkeit durchzuführen.

Die Fahrzeuggeschwindigkeit und die Richtung der Lenkwinkeländerung sind die einzigen veränderlichen Parameter des Manövers – vorausgesetzt, dass die Lenkradwinkelgeschwindigkeit so gering ist, dass von einem quasistationären Zustand ausgegangen werden kann. Voruntersuchungen haben ergeben, dass die ausgewählten MVC äußerst robust auf Schwankungen der Lenkradwinkelgeschwindigkeit reagieren.<sup>328</sup>

Die Konfigurationsstichprobenauswahl unterliegt den beschriebenen Rahmenbedingungen in Unterkapitel 5.1. Die Eignungsprüfung von Variationsparametern erfolgt gemäß Abschnitt 4.4.2.3 mittels einer automatisierten Sensitivitätsanalyse (SA). Die hierzu eingesetzte Co-Simulationsumgebung koppelt die Software MATLAB zur Berechnung des SA-Versuchsplans, der MVC und der Sensitivitäten mit der Simulationssoftware CarMaker, die die Versuchsdaten für die Berechnung der MVC bereitstellt. Die Struktur ist in Anhang A.3.1 zusammengefasst.

Drei repräsentative Auszüge der eFAST-Ergebnisse finden sich in Abbildung 5-5.

---

<sup>327</sup> Vgl. DIN ISO 4138: Straßenfahrzeuge – Stationäre Kreisfahrt, 1984.

<sup>328</sup> Vgl. Bach, C.: Effizienzsteigerung von Validierungstests, 2017, S. 64.

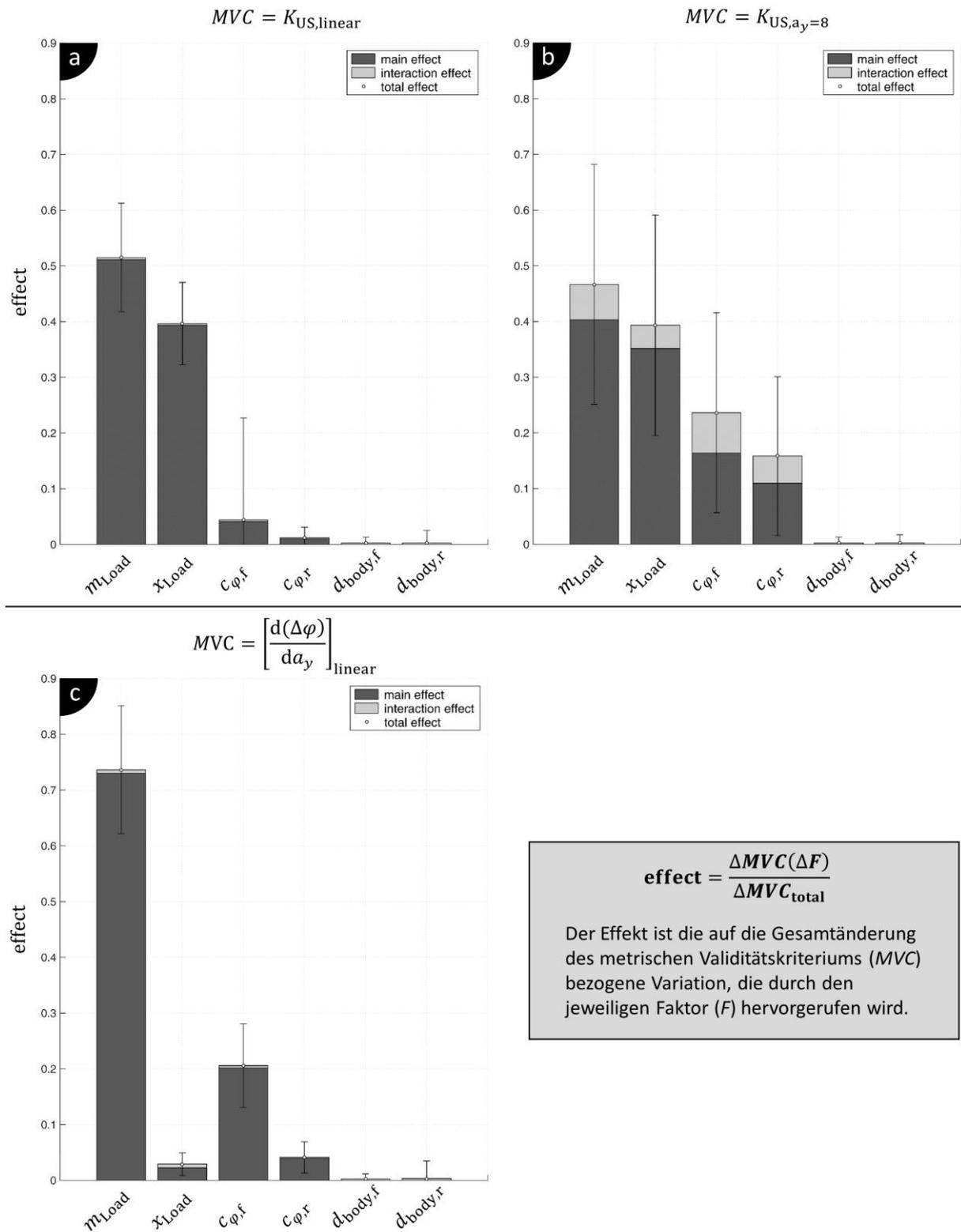


Abbildung 5-5: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zur Definition der Konfigurationsstichproben

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse sind wie folgt zu interpretieren:

- Die Zuladung  $m_{\text{Load}}$ , die Positionierung der Zuladung  $x_{\text{Load}}$  in Fahrzeuglängsrichtung sowie die Wankfedersteifigkeiten  $c_{\varphi,f}$  und  $c_{\varphi,r}$  beider Achsen beeinflussen die MVC signifikant.
- Basierend auf einem einfachen Kennlinienmodell liegen in dem quasistationären Manöver erwartungsgemäß keine Sensitivitäten bezüglich der Dämpferkennlinien  $d_{\text{body},f}$  und  $d_{\text{body},r}$  vor.
- Die Parameterhierarchie variiert in Abhängigkeit des MVC. Die Zuladungsmasse hat stets den größten Einfluss.
- Die Unsicherheit der Sensitivitätsindex-Prädiktion steigt bei Analysen im nichtlinearen Bereich. Zudem treten Interaktionen auf.<sup>329</sup>
- Die Variationsbereiche der MVC sind trotz Auswahl der einflussreichsten variierbaren Parameter und trotz Abdeckung des geforderten Parametrierungsbereichs relativ klein. Dies stellt hohe Anforderungen an die Messgenauigkeit und lässt in Verbindung mit den zulässigen Toleranzen relativ kleine Signifikanzindikatoren für die Validierungsergebnisse erwarten.

Die Sensitivitätsanalyse führt zu dem Ergebnis, dass die Zuladungsvariation und die durch unterschiedliche Positionierung der Zuladung hervorgerufene Variation der Schwerpunktage die einflussreichsten Faktoren sind. Unter den gegebenen Rahmenbedingungen werden auch die Stabilisatorsteifigkeit und die Torsionssteifigkeit der Verbundlenker-Hinterachse variiert, die als wichtige Stellschrauben für die querdynamische Fahrzeugabstimmung zu betrachten sind. Versuchsseitig zweistufige Variationen betreffen das Testgelände sowie die Richtung der Lenkwinkelrampe und die Fahrzeuggeschwindigkeit.

Mittels zweier Dämpferkonfigurationen soll nachgewiesen werden, dass diese auch im Praxisversuch des quasistationären Manövers keinen signifikanten Einfluss auf die Validitätskriterien zeigen. Unterschiede wären auf nicht modellierte Zusatzeffekte, wie z.B. die Gaskräfte der Dämpfer, oder systematische Fehlereinflüsse bei den Fahrzeugumbauten zurückzuführen.

### 5.2.3 Stufe 3: Versuchsvorbereitung

Zum Testen der Methode wird ein teilfaktorieller Versuchsplan in Anlehnung an Variante 3 aus Abbildung 4-9 mit 16 Konfigurationsstichproben für sechs Variationsparameter entwickelt. Reproduzierbarkeitsinformationen folgen aus einmalig 15-facher Versuchswiederholung nach jedem Fahrzeugumbau (Dämpfer, Stabilisator und Verbundlenkerhinterachse) und Versuchsgeländewechsel. Für alle anderen Konfigurationen werden die Versuche dreimal durchgeführt, sodass sich eine Anzahl von je 108 Messungen und Simulationen ergibt.

<sup>329</sup> Vgl. Diagramm (a) und (b) in Abbildung 5-5.

Die Vorbereitung der Datenerfassung und -verarbeitung erfolgt analog zu den Ausführungen in Abschnitt 4.4.3.3 für das in Abschnitt 5.1.2 vorgestellte Messsystem.

Bei der Berechnung der Validitätskriterien, die sich auf eine spezifische Querbewegung im nichtlinearen Bereich beziehen, kommen die Gewichtungsfunktionen aus Abbildung 4-7 zum Einsatz. Bei der Bestimmung des Eigenlenkgradienten ist entsprechend Abbildung 5-6 zu beachten, dass die Geschwindigkeit im Realversuch nicht konstant ist und damit entgegen der Theorie<sup>330</sup> keine Bezugsgerade, sondern eine Bezugskennlinie, vorliegt. In Diagramm (a) ist der absolute Lenkwinkel und in Diagramm (b) der zusätzlich zum Ackermann-Lenkswinkel aufzubringende Lenkeinschlag aufgezeigt. Die Nulllinie ist hier übereinstimmend mit der Referenzkurve aus Diagramm (a).

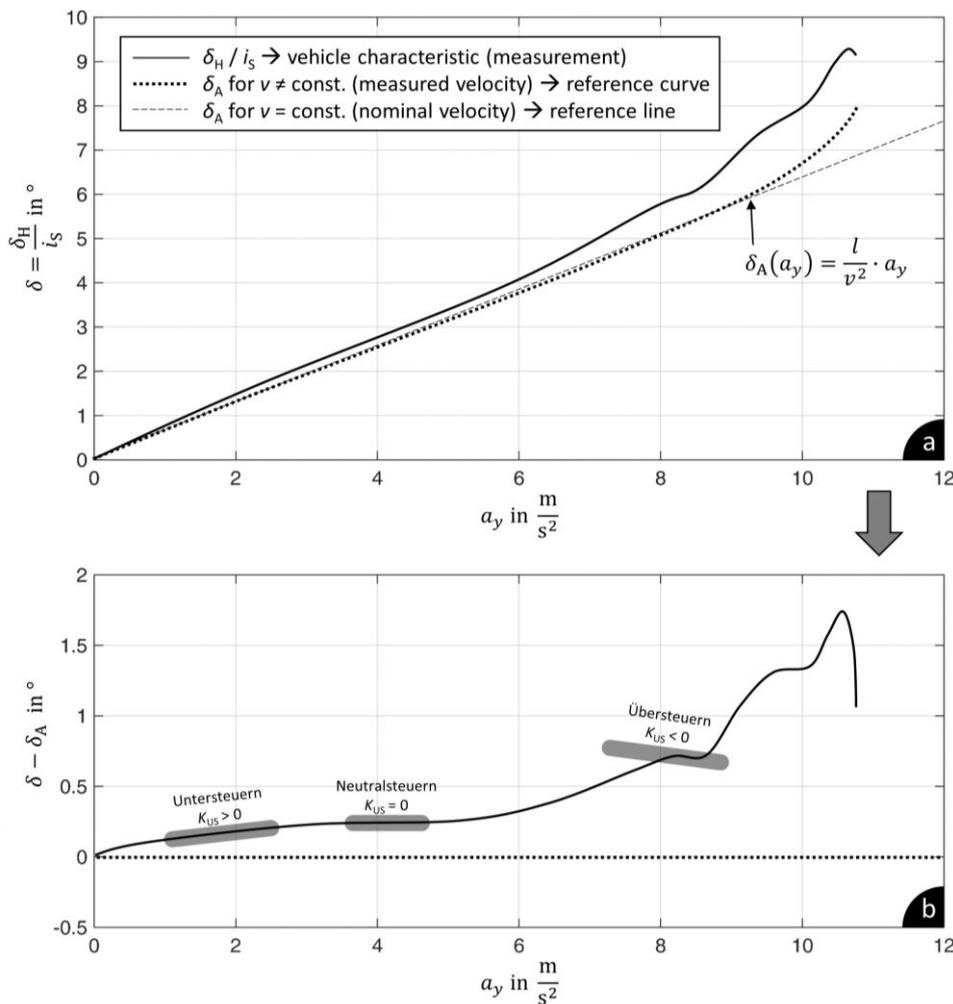


Abbildung 5-6: Bestimmung des Eigenlenkgradienten bei veränderlicher Fahrzeuggeschwindigkeit

Der Eigenlenkgradient berechnet sich auf Basis der Steigungsdifferenz der gemessenen Fahrzeugcharakteristik und der Bezugskennlinie. „Der Eigenlenkgradient bestimmt nach Gleichung

<sup>330</sup> Vgl. Zomotor, A.: Fahrverhalten, 1991, S. 109.

[...] [5.2] die Größe des zum Ackermannwinkel zu addierenden zusätzlichen Lenkeinschlags.<sup>331</sup>

$$K_{US} = \frac{d\delta}{da_y} - \frac{d\delta_A}{da_y} = \frac{\frac{d\delta}{i_s}}{da_y} - \frac{d\delta_A}{da_y} \quad (5.2)$$

Bei positivem Eigenlenkgradienten untersteuert das Fahrzeug, bei negativem Vorzeichen liegt Übersteuern vor. Zu unterscheiden ist das Eigenlenkverhalten des nahezu frei rollenden Fahrzeugs und das dynamische Eigenlenkverhalten unter Einwirkung von Antriebskräften, d.h. bei kombiniertem Längs- und Querschlepp an den Antriebsrädern, was den Schräglaufwinkelbedarf der Antriebsachse erhöht.<sup>332</sup> Diesen Unterschied gilt es, in der Auslegung und Interpretation von Validierungsversuchen der Querdynamik zu berücksichtigen.

#### 5.2.4 Stufe 4: Versuchsdurchführung

Die effiziente Versuchsplanung, die auf eine Minimierung der Anzahl von Fahrzeugumbauten ausgelegt ist, führt zu einer Durchführbarkeit der praktischen Versuchsphase innerhalb von fünf Tagen. Diese Angabe ist natürlich von vielen weiteren Faktoren, wie z.B. der Werkstatt- und Testgeländeverfügbarkeit, abhängig und kann je nach Anwendungsbereich und Personalverfügbarkeit stark streuen.

Als lastfalldefinierende Steuerungssignale für das Simulationsfahrzeug werden der Lenkwinkel und die Fahrzeuggeschwindigkeit aufgezeichnet. Da in der Studie keine Anforderung an eine Validierung des Motormodells besteht, wird dem Simulationsfahrzeug, losgelöst von der Gaspedalstellung, die gleiche Geschwindigkeit aufgeprägt wie dem Versuchsfahrzeug im Realversuch. Wichtig ist, dass die Antriebsmomente auf die richtigen Räder – hier die Vorderäder – einwirken, damit kombinierte Schlupfsituationen, die Einfluss auf das querdynamische Fahrverhalten nehmen, korrekt abgebildet werden. Das gewählte Messsystem<sup>333</sup> liefert die Radnabenmomente als Kontrollgröße hierfür.

Reibwertschwankungen werden vor jeder Versuchsreihe über Identifikationsversuche, wie sie in Abschnitt 4.5.2 beschrieben sind, identifiziert und ebenfalls in der Simulation der einzelnen Versuchsdurchläufe berücksichtigt. Die Auswertung zeigt, dass hierdurch die Kennwertreproduzierbarkeit zwischen den verschiedenen Versuchsgeländen und Tagen – wenn auch nur leicht – ansteigt. Die hier lediglich geringe Änderung ist durch zwei Aspekte zu begründen. Einerseits herrschten während der Versuchsreihe nahezu konstante Witterungsbedingungen und andererseits sind die metrischen Validitätskriterien gegenüber Reibwertschwankungen robust gewählt. Die identifizierten Reibwertunterschiede liegen im einstelligen Prozentbereich.

<sup>331</sup> Zomotor, A.: Fahrverhalten, 1991, S. 109.

<sup>332</sup> Vgl. Viehof, M.: Querdynamisches Potenzial von Torque Vectoring, 2014, S. 23.

<sup>333</sup> Vgl. Abschnitt 5.1.2 (Messtechnik im Versuchsfahrzeug).

### 5.2.5 Stufe 5: Empirische Validitätsanalyse

Im Gegensatz zur Validitätsanalyse in der Vertikaldynamikstudie, die nachfolgend in Abschnitt 5.3.5 beschrieben ist, entfallen in der Querdynamikstudie die optionalen Validierungsstufen. Wie aus der Anforderungsdefinition hervorgeht, gilt es, lediglich die Stichprobenvalidität des nominell parametrisierten Simulationsmodells zu bewerten.

Der Teilprozess sieht entsprechend Abschnitt 4.4.5.3 die Erstellung der Validitätsbewertungskarten für die 14 metrischen Validitätskriterien (MVC) unter Berücksichtigung des geforderten Vertrauensniveaus von  $\gamma = 95\%$  und der zulässigen Toleranzen bzw. geforderten Genauigkeiten der MVC vor. Aus den jeweils 108 Messungen und Simulationen gehen je 14 MVC für die 16 Konfigurationsstichproben hervor. Die daraus berechneten Erwartungswerte und zugehörigen Vertrauensintervalle dienen unter Berücksichtigung der zulässigen Toleranzen für die anschließende Gegenüberstellung.

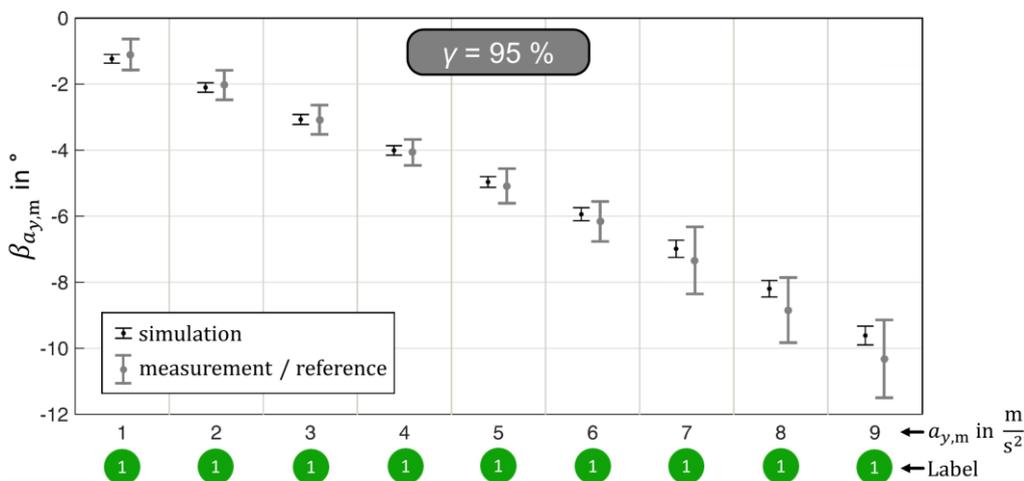


Abbildung 5-7: Validitätslabels der Schwimmwinkel-Prädiktion für eine Konfigurationsstichprobe<sup>334</sup>

Die Stichprobenvalidität wird im ersten Schritt gemäß der Ausführungen in Abschnitt 4.4.5.3 durch Vergabe der Validitätslabels bewertet. Abbildung 5-7 zeigt repräsentativ die Labelzuweisung für den Schwimmwinkelverlauf der ersten Konfigurationsstichprobe unter der Voraussetzung, dass der Simulation als Toleranz das Vertrauensintervall der Messung zugestanden wird. Das heißt, dass die größtmögliche nachweisbare Genauigkeit gefordert wird. Das Diagramm sagt aus, dass mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von  $\alpha = 5\%$  in allen neun untersuchten Arbeitspunkten ( $a_{y,m} = 1, 2, 3, \dots, 9 \text{ m/s}^2$ ) kein signifikanter Unterschied für die Schwimmwinkelprädiktionen zu erwarten ist. Allerdings gilt dieses Diagramm nur für eine der insgesamt 16 Konfigurationsstichproben. Die Zusammenfassung der Validitätsbewertungen für alle Konfigurationen folgt im nächsten Abschnitt 5.2.6. Abbildung 5-7 bestätigt die Vorabsimulation auch

<sup>334</sup> Die Abszisse der Diagramme ist ordinalskaliert. Zur besseren Lesbarkeit werden die Werte der Simulation und die der Messung bei der identischen Bezugsgröße mit einem Versatz in Richtung der Abszisse gegenübergestellt. Innerhalb der vertikalen Trennlinien ist die Bezugsgröße als konstant zu betrachten.

in der steigenden Unsicherheit der Kennwertidentifikation bei zunehmender Referenzquerbeschleunigung.

Der Vergleich zweier Konfigurationsstichproben, die sich ausschließlich in der Dämpferkonfiguration unterscheiden, belegt das Ergebnis der Sensitivitätsanalyse.<sup>335</sup> Etwaige Einflüsse nicht modellierter Dämpfereigenschaften auf die MVC gehen innerhalb der Unsicherheiten bzw. des Toleranzbereichs verloren und bleiben unentdeckt. Damit ist das Modell auch ohne Integration der Gasfeder mit hubabhängiger Steifigkeit für den adressierten quasistationären Anwendungsbereich der Simulation valide.

Am Ende von Stufe 5 liegt für jedes der 14 MVC eine eigene Validitätsbewertungskarte<sup>336</sup> vor. Beispieldarstellungen aus der Praxis folgen in der Vertikaldynamikstudie in Abschnitt 5.3.5.

### 5.2.6 Stufe 6: Validierungsergebnis

metrische Validitätskriterien		Stichprobenvalidität				Signifikanz $S_v$	Genauigkeitsanforderung
		Prädiktion absoluter Kennwerte $V_{abs} = (1   2   3)$ in %		Prädiktion relativer Kennwertänderungen $V_{rel} = (1   2   3   4)$ in %			
1	$\delta_{H,a_y=2}$	( 100   0   0 )		( 100   0   0   0 )		2,6	Definition ✓
2	$\delta_{H,a_y=6}$	( 31   63   6 )		( 100   0   0   0 )		3,7	Definition ✓
3	$\delta_{H,a_y=8}$	( 0   94   6 )		( 79   21   0   0 )		4,3	Definition ✓
4	$K_{US,linear}$	( 100   0   0 )		( 100   0   0   0 )		1,5	Definition ✓
5	$K_{US,a_y=6}$	( 0   100   0 )		( 0   97   0   3 )		2,4	Definition ✓
6	$K_{US,a_y=8}$	( 0   100   0 )		( 0   88   0   12 )		1,6	Definition ✗
7	$[d\beta/da_y]_{linear}$	( 88   0   12 )		( 100   0   0   0 )		1,6	max !
8	$\beta_{a_y=6}$	( 50   38   12 )		( 100   0   0   0 )		2,3	max !
9	$\beta_{a_y=8}$	( 94   6   0 )		( 100   0   0   0 )		2,1	max !
10	$[d(\Delta F_{z,front})/da_y]_{linear}$	( 25   38   37 )		( 58   24   0   18 )		3,8	Definition ✓
11	$[d(\Delta F_{z,rear})/da_y]_{linear}$	( 63   25   12 )		( 86   9   0   5 )		2,8	Definition ✓
12	$[d\varphi/da_y]_{linear}$	( 100   0   0 )		( 100   0   0   0 )		2,2	Definition ✓
13	$\varphi_{a_y=6}$	( 88   12   0 )		( 100   0   0   0 )		7,7	Definition ✓
14	$\varphi_{a_y=8}$	( 81   13   6 )		( 95   5   0   0 )		9,9	Definition ✓
		↑ $R_{V,abs} = \pm 3\%$ ↓		↑ $R_{V,rel} = \pm 0\%$ ↓			

Abbildung 5-8: Validitätsbewertungsbericht der Querdynamikstudie

Die Zusammenfassung der Validitätsbewertungskarten in Form der beiden Kennwerte  $V_{abs}$  und  $V_{rel}$  bilden die Kerninformation des Validitätsbewertungsberichts.<sup>337</sup> Dieser ist in kompakter

<sup>335</sup> Vgl. Abschnitt 5.2.2 (Stufe 2: Auslegung der Validierungsstudie).

<sup>336</sup> Vgl. Abschnitt 4.4.5.3 (Simulationsvalidierung).

<sup>337</sup> Vgl. Abschnitt 4.4.6 (Validierungsergebnis).

Form, d.h. ohne die Informationen zur Auslegung der Studie und ohne quantitative Angaben zum Vertrauens- und Toleranzbereich, in Abbildung 5-8 dargestellt.

Die wesentlichen Ergebnisse der Validierungsstudie, die sich aus Abbildung 5-8 ablesen lassen und stets unter Berücksichtigung der Anforderungsdefinition zu betrachten sind, lauten:

- Für metrische Validitätskriterien (MVC), die sich auf den linearen querdynamischen Bereich beziehen, werden mit Ausnahme von MVC Nr. 10 (dynamische Radlastverlagerung an der Vorderachse) mit hoher Wahrscheinlichkeit stichprobenvalide Simulationsergebnisse erzielt.
- Die Prädiktion relativer Kennwertänderungen weist im Durchschnitt eine höhere Stichprobenvalidität auf als die Prädiktion der absoluten MVC.
- Aufgrund der weitestgehend kleinen Signifikanzindikatoren  $S_V$  ist mit einer Generalisierung der Validierungsergebnisse vorsichtig umzugehen. Die relativ geringe Signifikanz ergibt sich aus zwei Aspekten:
  - Trotz der Bemühungen, die Versuche möglichst reproduzierbar zu gestalten, äußere Einflüsse zu minimieren und systematische Fehler weitestgehend auszuschließen, weisen die Kennwerte, unterstützt durch das geforderte Vertrauensniveau von  $\gamma = 95\%$ , große Vertrauensintervalle auf.
  - Die darstellbaren Stichprobenkonfigurationen führen zu vergleichsweise geringen Variationen der MVC. Dies zeichnete sich bereits im Voraus durch die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse ab.<sup>338</sup>

Dennoch sind die Konfigurationsstichproben für den definierten Gültigkeitsbereich der Studie unter den gegebenen Rahmenbedingungen bestmöglich ausgewählt und repräsentativ. Die Erweiterung des Parameterbereichs würde zwar die Signifikanz erhöhen, wäre jedoch für den geforderten Anwendungsbereich nicht repräsentativ. Die eigentliche Erkenntnis lautet deshalb, dass die – unter den oben genannten Aspekten – relativ geringe Reproduzierbarkeit der praktischen Fahrversuche in Kombination mit den Anforderungen eine stärkere Aussagekraft der Validierungsstudie verhindert. Dies stellt eine wichtige Erkenntnis für die Auslegung unterschiedlicher Fahrzeugvarianten dar. Denn es stellt sich die Frage, inwiefern unterschiedliche Fahrwerksauslegungen tatsächlich kunden- bzw. praxisrelevante Änderungen darstellen, wenn die Einflüsse der unterschiedlichen Fahrwerkskomponenten innerhalb eines Streubereichs verschwinden. Die Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf andere Fahrwerkselemente, als die in dieser Studie variierten, gilt es noch zu prüfen. Die folgende Vertikaldynamikstudie in Unterkapitel 5.3 beweist, dass Versuchsdurchführungen unter Laborbedingungen aufgrund enger Vertrauensbereiche zu höheren Signifikanzindikatoren führen.

- Die Genauigkeitsanforderungen, auf denen  $V_{\text{abs}}$  und  $V_{\text{rel}}$  basieren, werden in der rechten Spalte des Validitätsbewertungsberichts auf Gültigkeit geprüft. Ist die definierte Toleranz kleiner als der Vertrauensbereich der Messung, liegt eine unzulässige Anforderung

---

<sup>338</sup> Vgl. Abschnitt 5.2.2 (Stufe 2: Auslegung der Validierungsstudie).

vor, da bei Übernahme dieser Toleranz das geforderte Vertrauensniveau der Validitätsaussage nicht mehr eingehalten werden kann.<sup>339</sup> Einfach formuliert heißt dies, dass die referenzierten Messungen zu ungenau sind, um mit der gewünschten Granularität Falsifikationen aufzuzeigen.

Bei MVC Nr. 6 (Eigenlenkgradient im nichtlinearen Bereich) wird zur Demonstration eine solche unzulässige Toleranz gefordert und automatisiert im Validitätsbewertungsbericht mit einer Warnung versehen, damit der Anwender auf diesen Verstoß aufmerksam gemacht wird.

Bei den drei Schwimmwinkel-bezogenen MVC 7 bis 9 wird dieser Fehler umgangen, indem die Validitätskennwerte auf Basis der höchsten nachweisbaren Genauigkeit – dem Vertrauensbereich der Messung – berechnet werden, die hier im Mittel lediglich 2 % über der eigentlich geforderten absoluten Toleranz von 2 ° liegt. Bei den anderen MVC sind die Ergebnisse repräsentativ für die Genauigkeitsanforderungen aus Tabelle 5-3.

## 5.3 Validierungsstudie der Vertikaldynamik

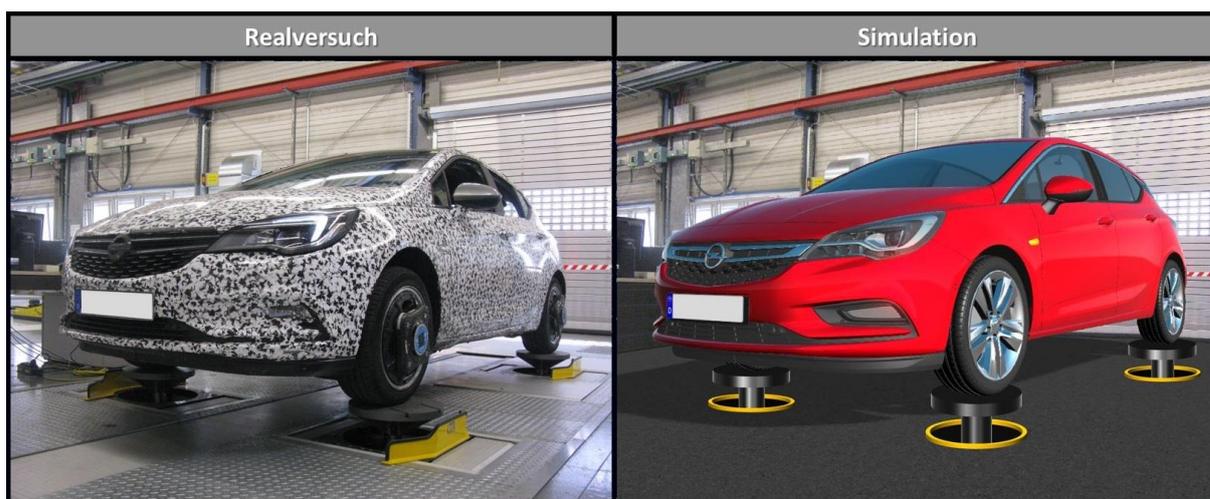


Abbildung 5-9: Reales und virtuelles Versuchsfahrzeug auf dem Vierstempelprüfstand<sup>340</sup>

Die in diesem Unterkapitel vorgestellte Vertikaldynamikstudie belegt, dass Prüfstandsversuche und nicht kundenrelevante Arbeitspunkte sinnvoll für die systematische Qualitätsbewertung von Simulationen genutzt werden können, insbesondere wenn die Analyse auf Komponenten,

<sup>339</sup> Vgl. Abschnitt 4.4.1 (Anforderungsdefinition).

<sup>340</sup> Quelle: Viehof, M. et al.: Validierungskonzept für die Vertikaldynamik, 2017, S. 151. Links: Foto; Rechts: Modifiziertes Bild aus IPGMovie (Visualisierungsprogramm als Teil der Simulationssoftware CarMaker der IPG Automotive GmbH).

Subsysteme oder einzelne Übertragungsstrecken erweitert wird.<sup>341</sup> Über die ersten vier Prozessstufen wird nachfolgend eine Übersicht gegeben. Weitere Details hierzu sind der vorbereitenden Veröffentlichung<sup>342</sup> dieser Arbeit von Viehof et al. zu entnehmen.

Gegenüber dem kundenrelevanten Fahrbetrieb werden im Versuch auf dem Vierstempelprüfstand Änderungen vorgenommen, wie z.B. stehende Reifen, gehemmte Spurweitenänderung, keine Antriebs- oder Bremsinflüsse, ausgeschalteter Verbrennungsmotor und betriebsunübliche Fußpunktanregung.<sup>343</sup> Aus diesem Grund ist es – wie Abbildung 5-9 verdeutlicht – für die Validierung erforderlich, auch das virtuelle Fahrzeug unter den gleichen Rahmenbedingungen zu beanspruchen, indem eine repräsentative virtuelle Prüfstands Umgebung mit den gleichen Lastfallkriterien umgesetzt wird.

### 5.3.1 Stufe 1: Anforderungsdefinition

Im Hinblick auf die simulationsbasierte Komfortbewertung, die als aktueller Trend in der Fahrwerkentwicklung zu verzeichnen ist, kommt der Prädiktion von frequenzbezogenen Aufbaubeschleunigungen eine hohe Bedeutung zu, da diese ein Maß für die Schwingungsexposition der Fahrzeuginsassen darstellen und zur Objektivierung herangezogen werden.<sup>344</sup> Das angestrebte Ziel ist die simulationsbasierte Ermittlung der auf den Fahrer einwirkenden Beschleunigungen für sämtliche praxisrelevanten Anregungen im Kontaktpunkt von Reifen und Fahrbahn. Die Arbeitspunkte sind charakterisiert über die Anregungsfrequenz und -amplitude, die Fahrzeuggeschwindigkeit sowie die wirkenden Längs- und Querbeschleunigungen inklusive der damit verbundenen Kräfte, die zu Änderungen der Fahrwerkscharakteristik und damit auch des Schwingungsverhaltens führen.

Ein erster Ansatz, dieser Komplexität systematisch zu begegnen, ist die Übertragung der Analyseverfahren aus der Längs- und Querdynamik auf die Vertikaldynamik. Wie Tabelle 5-1 und den in Unterkapitel 2.3 beschriebenen Manöverklassifizierungen entnommen werden kann, dienen Einzelfahrmanöver dazu, bestimmte Eigenschaften des Fahrzeugs isoliert und bestmöglich reproduzierbar zu untersuchen. Für die Vertikaldynamik sind vergleichbare Verfahren bisher nicht etabliert.<sup>343</sup>

In dieser Studie wird die Vertikalanregung des Gesamtfahrzeugs auf dem in Abbildung 5-9 gezeigten Vierstempelprüfstand untersucht. Die Versuche unter Laborbedingungen versprechen

---

<sup>341</sup> Die Simulationsvalidierung für den kundenrelevanten Fahrbetrieb erfordert zusätzliche Studien mit Fahrversuchen, die hier nicht näher erläutert werden.

<sup>342</sup> Viehof, M. et al.: Validierungskonzept für die Vertikaldynamik, 2017, S. 147 ff.

<sup>343</sup> Vgl. Viehof, M. et al.: Validierungskonzept für die Vertikaldynamik, 2017, S. 151 ff.

<sup>344</sup> Vgl. Claus, S.: Kompensation von Verzugszeiten im semiaktiven Fahrwerk, 2017, S. 28 ff / Claus, S. et al.: Preview-Potenzial für semiaktive Fahrwerke, 2015, S. 49 ff / VDI 2057: Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen, 2002 / Lennert, S.: Objektivierung von Schwingungskomfort, 2009 / Hartmann, F.: Komfortsimulation mit IPG CarMaker, 2016, S. 7 ff.

eine sehr hohe Reproduzierbarkeit des Lastfalls, eine präzise Erfassung der Weganregung in den Reifen-Fahrbahn-Kontaktstellen und Freiräume bei der Definition der Anregungsprofile. So ist es beispielsweise möglich, den Fahrzeugaufbau gezielt zum Heben, Nicken und Wanken anzuregen und für die unterschiedlichen Anregungssignale aus Tabelle 5-1 entsprechende Wegprofile auszuwählen. Niemann hat die theoretische Eignung des Vertikaldynamikprüfstands und die praktische Anwendbarkeit für den Validierungszweck nachgewiesen. Er zeigt auf, dass sich das Verfahren in der Validierung bewährt.<sup>345</sup>

Der Fokus dieser Studie liegt auf der Hub-Anregung. Das bedeutet, dass sich alle vier Stempel parallel bewegen. Gefordert wird eine frequenzselektive Bewertung zur Beantwortung der Frage, wie gut die Aufbaubeschleunigung bei harmonischer Anregung vorhergesagt werden kann. Als weitere Validitätskriterien werden die Systemdämpfung und die Eigenfrequenz definiert. Da das Simulationsmodell einen starren Aufbau aufweist, wird die Aufbaubewegung über der Vorderachse und über der Hinterachse betrachtet, sodass sich alle anderen Positionen des Aufbaus in der Simulation interpolativ daraus berechnen lassen. Auch wenn das zum Einsatz kommende Reifenmodell nominell nur bis zu einer Frequenz von 8 Hz ausgelegt ist, wird im Hinblick auf die Komfortbewertung der Frequenzbereich von 0 Hz bis 32 Hz adressiert.

Die Analyse von Teilübertragungstrecken, die sich aus der Systemdekomposition ergeben, stellt eine Zusatzanforderung dar. Durch die Aufteilung des Gesamtsystems gemäß Abbildung 5-10 und die Definition von Schnittstellen der Übertragungstrecken, kann die Qualitätsbewertung auf einzelne Komponenten bzw. Pfade heruntergebrochen werden.<sup>346</sup>

Die Genauigkeitsanforderung resultiert in dieser Studie aus der Weiterverwendung der Ausgangsgrößen im Entwicklungsprozess – nämlich zur Berechnung objektiver Komfortkennwerte, die auf frequenzselektiven Beschleunigungswerten basieren, und zur Auslegung von Fahrwerkregelsystemen.

Die weiteren Anforderungen an die statistische Absicherung stimmen mit denen aus der Querdynamikstudie überein.<sup>347</sup>

---

<sup>345</sup> Vgl. Niemann, H.: Eignungsanalyse eines Vierstempelprüfstands für die Validierung, 2017.

<sup>346</sup> Vgl. Viehof, M. et al.: Validierungskonzept für die Vertikaldynamik, 2017, S. 147 ff.

<sup>347</sup> Vgl. Abschnitt 5.2.1 (Stufe 1: Anforderungsdefinition).



Abbildung 5-10: Systemdekomposition<sup>348</sup>

### 5.3.2 Stufe 2: Auslegung der Validierungsstudie

Um die Simulationsgüte innerhalb einzelner Frequenzfenster bewerten zu können, werden als diskrete metrische Validitätskriterien die von Claus<sup>349</sup> zur Komfortbewertung eingeführten Effektivwerte der vertikalen Aufbaubeschleunigung im Oktavband  $a_{8va,eff,body}(f_m)$  für die Oktavmittenfrequenzen  $f_m = [1; 2; 4; 8; 16; 32]$  Hz herangezogen. Zur Berechnung dieser Oktaveffektivwerte  $a_{8va,eff,body}(f_m)$  kommen die in Abbildung 4-6 gezeigten Gewichtungsfunktionen  $w_{f_m}$  zum Einsatz:<sup>349</sup>

$$w_{f_m}(f_k) = \frac{1}{2} \cdot \left( \cos \left( \pi \cdot \log_2 \frac{f_k}{f_m} \right) + 1 \right) \quad \text{mit } f_k \in \left[ \frac{1}{2} f_m \dots 2 f_m \right] \quad (5.3)$$

$$a_{8va,eff,body}(f_m) = \sqrt{\sum_{f_k=\frac{1}{2}f_m}^{2f_m} w_{f_m}(f_k) \cdot P(f_k)} \quad (5.4)$$

„Die zur Berechnung der Effektivwerte benötigte Leistung  $[P(f_k)]$  wird dabei über den Zwischenschritt der Leistungsdichte  $PSD^{[258, 350]}$  aus dem Ergebnis einer diskreten Fouriertransformation berechnet.“<sup>351</sup>

<sup>348</sup> Quelle: Modifiziert nach Viehof, M. et al.: Validierungskonzept für die Vertikaldynamik, 2017, S. 156.

<sup>349</sup> Vgl. Claus, S.: Kompensation von Verzugszeiten im semiaktiven Fahrwerk, 2017, S. 31 ff.

<sup>350</sup> Vgl. Abschnitt 4.4.5.1 (Versuchsdatenvalidierung).

<sup>351</sup> Claus, S.: Kompensation von Verzugszeiten im semiaktiven Fahrwerk, 2017, S. 32.

Neben den Oktaveffektivwerten werden die Aufbaueigenfrequenz  $f_{0,\text{body}}$  und die Systemdämpfung  $D$  aus den Anforderungen in die Liste der metrischen Validitätskriterien übernommen.

Alle metrischen Validitätskriterien werden sowohl für die Aufbaubewegung über der Vorderachse (Index: f) und über der Hinterachse (Index: r) bestimmt und sind in Tabelle 5-4 zusammengefasst.

Tabelle 5-4: Metrische Validitätskriterien der Vertikaldynamik-Validierungsstudie

Nr.	metrisches Validitätskriterium		zulässige Toleranz
1	Aufbaueigenfrequenz (über Vorderachse)	$f_{0,\text{body},f}$	$\pm 8 \%$
2	Aufbaueigenfrequenz (über Hinterachse)	$f_{0,\text{body},r}$	
3	Systemdämpfung (über Vorderachse)	$D_f$	$\pm 15 \%$
4	Systemdämpfung (über Hinterachse)	$D_r$	
5	1 Hz-Oktaveffektivwert (über Vorderachse)	$a_{8\text{va,eff,body},f}(1 \text{ Hz})$	
6	2 Hz-Oktaveffektivwert (über Vorderachse)	$a_{8\text{va,eff,body},f}(2 \text{ Hz})$	
7	4 Hz-Oktaveffektivwert (über Vorderachse)	$a_{8\text{va,eff,body},f}(4 \text{ Hz})$	
8	8 Hz-Oktaveffektivwert (über Vorderachse)	$a_{8\text{va,eff,body},f}(8 \text{ Hz})$	
9	16 Hz-Oktaveffektivwert (über Vorderachse)	$a_{8\text{va,eff,body},f}(16 \text{ Hz})$	
10	32 Hz-Oktaveffektivwert (über Vorderachse)	$a_{8\text{va,eff,body},f}(32 \text{ Hz})$	
11	1 Hz-Oktaveffektivwert (über Hinterachse)	$a_{8\text{va,eff,body},r}(1 \text{ Hz})$	
12	2 Hz-Oktaveffektivwert (über Hinterachse)	$a_{8\text{va,eff,body},r}(2 \text{ Hz})$	
13	4 Hz-Oktaveffektivwert (über Hinterachse)	$a_{8\text{va,eff,body},r}(4 \text{ Hz})$	
14	8 Hz-Oktaveffektivwert (über Hinterachse)	$a_{8\text{va,eff,body},r}(8 \text{ Hz})$	
15	16 Hz-Oktaveffektivwert (über Hinterachse)	$a_{8\text{va,eff,body},r}(16 \text{ Hz})$	
16	32 Hz-Oktaveffektivwert (über Hinterachse)	$a_{8\text{va,eff,body},r}(32 \text{ Hz})$	

Die Eigenfrequenz folgt aus der Lage des Maximums der Übertragungsfunktion mit der Aufbaubeschleunigung als Ausgangsgröße und der Stempelbeschleunigung als Eingang.

Die Dämpfung ist proportional zur Amplitudenüberhöhung bei  $f_{0,\text{body}}$ . Die Übertragungsfunktion einer exemplarischen Messung ist in Anhang A.3.2 abgebildet. Unter der Annahme eines PT2-Glied-ähnlichen Verhaltens, lässt sich die Systemdämpfung  $D$  bei der Eigenkreisfrequenz  $\omega_0$  aus der analytischen Übertragungsfunktion bestimmen.<sup>352</sup>

<sup>352</sup> Vgl. Lunze, J.: Regelungstechnik, 2016, S. 301.

$$F(s) = \frac{K}{\frac{1}{\omega_0^2} s^2 + \frac{2D}{\omega_0} s + 1} \quad (5.5)$$

Einsetzen von  $F = A$ ,  $s = j\omega_0$  und  $K = A(\omega \rightarrow 0)$  liefert die Berechnungsgleichung für die Systemdämpfung, die antiproportional zur Amplitudenüberhöhung ist.<sup>353</sup>

$$D = \frac{1}{2} \cdot \frac{A(\omega \rightarrow 0)}{A(\omega_0)} = \frac{1}{2 \cdot A(\omega_0)} \quad \text{mit } \omega_0 = 2\pi f_0 \quad (5.6)$$

Der Prüfstand ist als Testumgebung durch die Anforderungen vorgegeben. Als Lastfall wird ein frequenzexponentieller Gleitsinus mit konstanter Geschwindigkeitsamplitude gewählt, der gleichermaßen auf alle vier Prüfstandsstempel aufgeprägt wird, um das Fahrzeug ausschließlich zum Heben anzuregen. Die Anregungsmomentanfrequenz  $f_c(t)$  und die zeitliche Stempelposition  $z_{\text{post}}(t)$  berechnen sich aus dem konstanten Amplituden-Frequenz-Produkt  $K_{\text{Amp,Freq}}$ , der Versuchsdauer  $T$  sowie der Startfrequenz  $f_{\text{start}}$  und der Endfrequenz  $f_{\text{end}}$  zu:

$$f_c(t) = f_{\text{start}} \cdot \left( \frac{f_{\text{end}}}{f_{\text{start}}} \right)^{\frac{t}{T}} \quad \text{mit } 0 \leq t \leq T \quad (5.7)$$

$$z_{\text{post}}(t) = \frac{K_{\text{Amp,Freq}}}{f_c(t)} \cdot \sin \left[ \left[ 2\pi \int_0^t f_c(t') dt' \right] + \frac{\pi}{2} \right] \quad (5.8)$$

Einsetzen von Formel 5.7 in 5.8 ergibt die Beschreibung des Anregungsprofils als Funktion der Zeit  $t$  und in Abhängigkeit von den konstanten Parametern  $K_{\text{Amp,Freq}}$ ,  $f_{\text{start}}$ ,  $f_{\text{end}}$  und  $T$ .

$$z_{\text{post}}(t) = \frac{K_{\text{Amp,Freq}}}{f_{\text{start}} \cdot \left( \frac{f_{\text{end}}}{f_{\text{start}}} \right)^{\frac{t}{T}}} \cdot \sin \left[ \frac{2\pi \cdot f_{\text{start}} \cdot T}{\ln \left( \frac{f_{\text{start}}}{f_{\text{end}}} \right)} \cdot \left[ \left( \frac{f_{\text{end}}}{f_{\text{start}}} \right)^{t/T} - 1 \right] + \frac{\pi}{2} \right] \quad (5.9)$$

Der Phasenwinkel von  $\pi/2$  ist in einer Prüfstandseigenschaft begründet, die erfordert, dass sich die Stempel zu Beginn der Anregung nach unten bewegen.

Dieses breitbandige Anregungssignal ist in Anhang A.3.3 abgebildet. Es bietet folgende Vorteile:

- Das Signal sorgt für hohe Effizienz, weil der gesamte Frequenzbereich mit einem vierminütigen Versuch frequenzselektiv und quasistationär analysiert werden kann, ohne dass das Fahrzeug bei einer bestimmten Frequenz zu hohe oder zu geringe Wegamplituden erfährt.

<sup>353</sup> Vgl. Orłowski, P.F.: Praktische Regeltechnik, 2011, S. 103 / Niemann, H.: Eignungsanalyse eines Vierstempelprüfstands für die Validierung, 2017, S. 13 f.

- Das Anregungsprofil ist repräsentativ, weil die konstante Geschwindigkeitsamplitude eine gute Annäherung an reale Straßenanregungen durch den Abfall der spektralen Leistungsdichte darstellt.<sup>354</sup>
- Die Frequenzoktaven sind klar voneinander getrennt und gleich aufgelöst. Dies bedeutet, dass jedes Oktavfenster die gleiche Dauer aufweist, wie Diagramm (b) in Anhang A.3.3 beweist.

Die Konfigurationsstichproben werden auch in dieser Studie durch Sensitivitätsanalysen ausgewählt und abgesichert. Die Auswahl der Parametervariationen umfasst die Dämpfer (in 3 Stufen), die Zuladung (in 3 Stufen) und die Anregungsstärke (in 2 Stufen), d.h. eine Lastfallvariation.<sup>355</sup> Niemann untersucht zusätzliche Konfigurationsstichproben, die sich bezüglich der reifengefederten Masse und der Reifenfülldrücke bzw. -radialsteifigkeiten unterscheiden.<sup>356</sup>

### 5.3.3 Stufe 3: Versuchsvorbereitung

Aufgrund der Effizienz der Testanwendung ist es in dieser Studie möglich, den Vollfaktorplan aller 18 Stichproben umzusetzen, sodass auf eine Versuchsplanoptimierung verzichtet wird.

Das Messsystem entspricht mit Ausnahme des Correvit-Sensors und der GPS-Antennen den Ausführungen in Abschnitt 5.1.2.

Die Implementierung des Prüfstands in der Simulationssoftware CarMaker gelingt über die MATLAB/Simulink-Schnittstelle. Dabei sind die besonderen Eigenschaften des Prüfstands zu berücksichtigen, wie z.B. die longitudinale Fixierung des Fahrzeugs und der Reifen-Fahrbahn-Kontakt, der in dieser Studie die präzise Parametrierung der Lateralsteifigkeit des stehenden Reifens erfordert, da der Prüfstand über keine Schwimmpfannen verfügt. Dies bedeutet, dass sich die Stempel und damit die Reifen-Fahrbahn-Kontaktfläche ausschließlich vertikal bewegen können und die auftretenden Spurweitenänderungen, die durch die Radhubkinematik hervorgerufen werden, über die laterale Elastizität des Reifens ausgeglichen werden.<sup>357</sup>

Die Datenerfassungs- und Datenverarbeitungsschritte erfolgen gemäß der vorherigen Erläuterungen.<sup>358</sup>

---

<sup>354</sup> Vgl. Mitschke, M.; Wallentowitz, H.: Dynamik der Kraftfahrzeuge, 2014, S. 340 ff / Heißing, B. et al.: Fahrwerkhandbuch, 2013, S. 78 f / Angrick, C.: Subsystemmethodik für die Komfortauslegung, 2017, S. 52 / Weidenfeller, C.: Komfortsimulation mit Mehrkörpersimulationsmodellen, 2017, S. 10 f.

<sup>355</sup> Vgl. Viehof, M. et al.: Validierungskonzept für die Vertikaldynamik, 2017, S. 151 ff.

<sup>356</sup> Vgl. Niemann, H.: Eignungsanalyse eines Vierstempelprüfstands für die Validierung, 2017, S. 22 ff.

<sup>357</sup> Vgl. Viehof, M. et al.: Validierungskonzept für die Vertikaldynamik, 2017, S. 159 ff.

<sup>358</sup> Vgl. Abschnitte 4.4.3.3 (Datenerfassung und -verarbeitung) und 5.2.3 (Stufe 3: Versuchsvorbereitung).

### 5.3.4 Stufe 4: Versuchsdurchführung

Die Versuche beschränken sich auf die strikte Durchführung des Versuchsplans, wobei vor jeder Versuchsreihe eine Systemkonditionierung in Form eines Einschwingprogramms vorzunehmen ist. Dieses sorgt dafür, dass die Dämpfer vor der Messdatenaufzeichnung ihre mittlere Betriebstemperatur erreichen und die Reproduzierbarkeit bei den anschließenden Versuchswiederholungen erhöht wird, da so der Einflussfaktor der Zeitvarianz weitestgehend entfällt.<sup>359</sup>

Die an die Simulation übermittelten Lastfallinformationen aus dem Realversuch sind die zeitabhängigen Positionen der vier Prüfstandsstempel. Da die Simulation keine zeitvarianten Systemeigenschaften abbildet, resultiert ihre Ergebnisstreuung lediglich aus der Varianz der gemessenen Weganregung.

### 5.3.5 Stufe 5: Empirische Validitätsanalyse

#### 5.3.5.1 Versuchsdatenvalidierung

In diesem Teilprozess kommt das in Abschnitt 4.4.5.1 erläuterte Verfahren des Sensordatenvergleichs zum Einsatz, um grobe systematische Fehler frühzeitig identifizieren zu können. Diese Fehleridentifikation basiert auf der Signalanalyse eines auf den Untersuchungszweck angepassten Messsystems und erfordert Systemverständnis.

In dieser Studie konnte eine fehlerhaft parametrisierte Steifigkeit frühzeitig erkannt und über die Iterationsschleife des Validierungsprozesses<sup>360</sup> effizient korrigiert werden. Nachfolgend sind die Schritte der Fehlererkennung und -lokalisierung kurz zusammengefasst:

1. Die CDF-Vergleiche der Federwegsignale und der Dämpferkräfte offenbaren eine ungenügende Übereinstimmungsgenauigkeit von Messung und Simulation.
2. Über den CDF-Vergleich der Stempelwege und Radträgerbeschleunigungen kann aufgrund guter<sup>361</sup> Übereinstimmung eine fehlerhafte Lastfallübertragung von der Messung in die Simulation ausgeschlossen werden.
3. Die Ableitung der Haupteinflussfaktoren für den Federweg aus der Modellvorstellung des gedämpften Einmassenschwingers führt zu der anschließenden Überprüfung der Dämpferparametrierung anhand der verfügbaren Sensorsignale. Über die geometrischen Beziehungen ermöglicht der Federwegsensor eine Abschätzung der Dämpfergeschwindigkeit. Wird die gemessene Dämpferkraft auf diese Geschwindigkeit bezogen, lässt sich trotz unterschiedlicher absoluter Feder- sowie Dämpferwege und Dämpferkräfte

---

<sup>359</sup> Vgl. Abschnitt 4.5.4 (Versuchsdurchführung in der Praxis).

<sup>360</sup> Vgl. Abbildung 4-3.

<sup>361</sup> Gute Übereinstimmung heißt, dass die Genauigkeitsanforderungen entsprechend Abbildung 5-11 erfüllt sind.

eine Prüfung der Dämpfercharakteristik auf Basis der ermittelten Kraft-Geschwindigkeit-Kennlinien umsetzen. Da diese zwischen Simulation und Messung ebenfalls gut übereinstimmen, wird die Dämpferparametrierung als Ursache ausgeschlossen. Als potenziell fehlerhafte Parameter verbleiben die Federsteifigkeit und die Aufbaumasse.

4. Der Vergleich mit den Parametrierungsdaten liefert die Erkenntnis, dass die Sekundärsteifigkeit des Fahrwerks in der Simulation einem systematischen Fehler unterliegt, der einfach korrigiert werden kann.

Wäre in Schritt 4 kein simulationsseitiger Fehler aufgedeckt worden, wäre dies ein Indikator für eine fehlerhafte Signalerfassung im Realversuch gewesen. Dieses Beispiel zeigt, dass sich die Zusatzanforderungen<sup>362</sup> und die damit verbundene Installation von Sensoren zur Charakterisierung von Bauteilen bzw. Teil-Übertragungstrecken auszahlen, um mit Systemverständnis und Kausalitätsprüfungen systematisch Fehler innerhalb der Vergleichsdaten auffinden und ggf. korrigieren zu können.

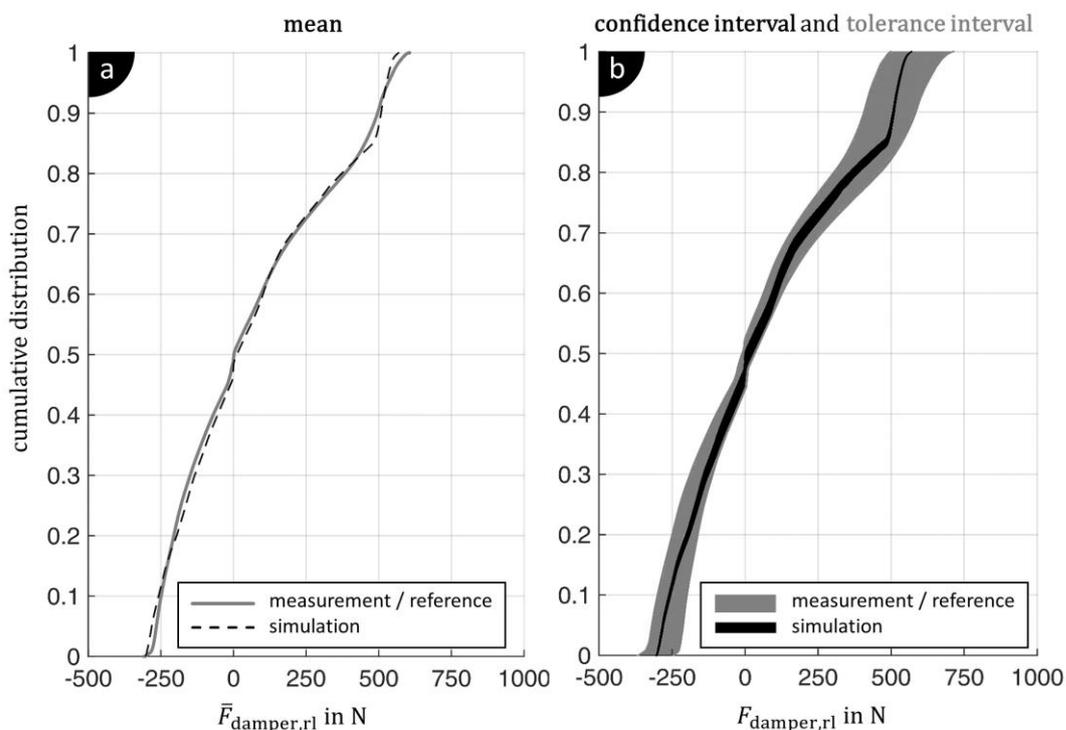


Abbildung 5-11: Vergleich der kumulativen Verteilungsfunktion (CDF) eines Dämpferkraftsensors

Abbildung 5-11 zeigt exemplarisch den CDF-Vergleich eines Dämpferkraftsensors. Diagramm (a) bildet die gemittelten Verteilungsfunktionen ab, während Diagramm (b) den Vertrauens- bzw. Toleranzbereich für die Objektivbewertung aufzeigt, die in diesem Fall positiv ausfällt, da der Vertrauensbereich der Simulation innerhalb des zulässigen Toleranzbereichs liegt.<sup>363</sup>

<sup>362</sup> Vgl. Abschnitt 4.4.1 (Anforderungsdefinition).

<sup>363</sup> Vgl. Viehof, M. et al.: Validierungskonzept für die Vertikaldynamik, 2017, S. 164 f.

### 5.3.5.2 Parametervalidierung

Die Parametervalidierung ist besonders dann zielführend, um Erkenntnisse über die interne Validität zu erhalten, wenn – wie in dieser Studie – einzelne Systemparameter variiert werden. Über eine einfache lokale Sensitivitätsanalyse können die Effekte der Variationsparameter in Bezug auf die Versuchsausgangsgrößen erfasst und auf Übereinstimmung geprüft werden. In der referenzierten Veröffentlichung wird am Beispiel der Dämpfervariation aufgezeigt, dass die Simulation die Realität qualitativ und quantitativ mit der geforderten Genauigkeit abbildet.<sup>364a</sup> Das in Abschnitt 4.4.5.2 zur allgemeinen Erklärung der Parametervalidierung herangezogene Diagramm (Abbildung 4-19) entstammt dieser Studie.

Die nachfolgende Simulationsvalidierung stellt eine größere Herausforderung für die Simulation dar, da auch sämtliche Kombinationen von Parameteränderungen bewertet werden.

Durch einen Vergleich der beiden Übertragungsstrecken von Prüfstandsstempel zu Aufbau und von Radzentrum zu Aufbau, quantifizieren Viehof et al. zudem die Unsicherheit, die das Rad- bzw. Reifenmodell in der Prädiktion der ersten drei Oktaveffektivwerte der vertikalen Aufbau-beschleunigung verursacht.<sup>364b</sup>

Niemann untersucht in einer weiterführenden Forschungsarbeit – zur Durchführung praktischer Sensitivitätsanalysen auf dem Vierstempelprüfstand – die Variation der Radmasse und der Radialsteifigkeit des Reifens. Damit fokussiert er die primäre Beeinflussung der Übertragungsstrecke zwischen Prüfstandsstempel und Radzentrum, deren Simulationsqualität maßgeblich durch das Reifenmodell geprägt ist. Die hierdurch erzielten Ergebnisse zeigen auf, dass die Stempel-Radzentrum-Übertragungsstrecke im Vergleich zur Radzentrum-Aufbau-Übertragungsstrecke statistisch häufiger invalide in der Simulation abgebildet ist und damit derzeit schlechter beherrscht wird.<sup>365</sup>

### 5.3.5.3 Simulationsvalidierung

Das Ziel der Simulationsvalidierung ist gemäß Abschnitt 4.4.5.3 die Vergabe der Labels und die damit verbundene Erstellung der einzelnen Validitätsbewertungskarten für jedes Validitätskriterium.

---

<sup>364</sup> Vgl. Viehof, M. et al.: Validierungskonzept für die Vertikaldynamik, 2017, (a) S. 165 f | (b) S. 171 f.

<sup>365</sup> Vgl. Niemann, H.: Eignungsanalyse eines Vierstempelprüfstands für die Validierung, 2017, S. 38 ff.

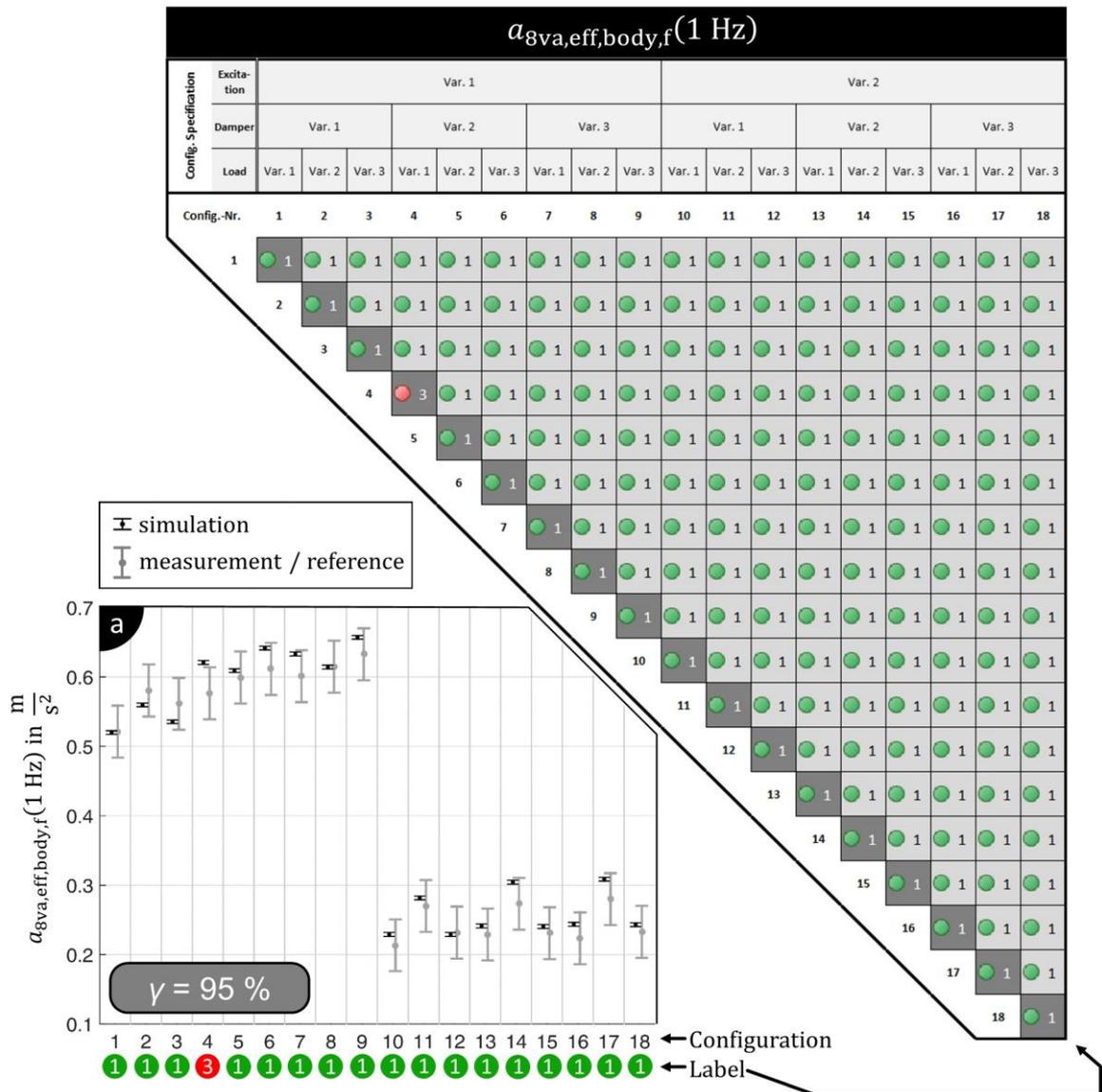


Abbildung 5-12: Validitätsbewertungskarte für  $a_{8va,eff,body,f}(1\text{ Hz})$  und Vergleichsdiagramme<sup>366</sup>

Die Validitätsbewertungskarte für den Oktaveffektivwert  $a_{8va,eff,body,f}(1\text{ Hz})$  ist in Abbildung 5-12 zu finden. Für die Genauigkeitsanforderungen und das festgelegte Vertrauensniveau wird mit Ausnahme einer absoluten Kennwertprädiktion (für Konfiguration Nr. 4) in allen Gegenüberstellungen Stichprobenvalidität verifiziert. Die Datengrundlage für die Labelvergabe ist in Diagramm (a) dargestellt. Es stellt für jede Konfigurationsstichprobe den Kennwert  $a_{8va,eff,body,f}(1\text{ Hz})$  aus der Simulation (inkl. des Vertrauensbereichs) dem Erwartungswert aus der Messung (inkl. des Toleranzbereichs) gegenüber.

<sup>366</sup> Die Abszisse der Diagramme ist ordinalskaliert. Zur besseren Lesbarkeit werden die Werte der Simulation und die der Messung bei der identischen Bezugsgröße mit einem Versatz in Richtung der Abszisse gegenübergestellt. Innerhalb der vertikalen Trennlinien ist die Bezugsgröße als konstant zu betrachten.

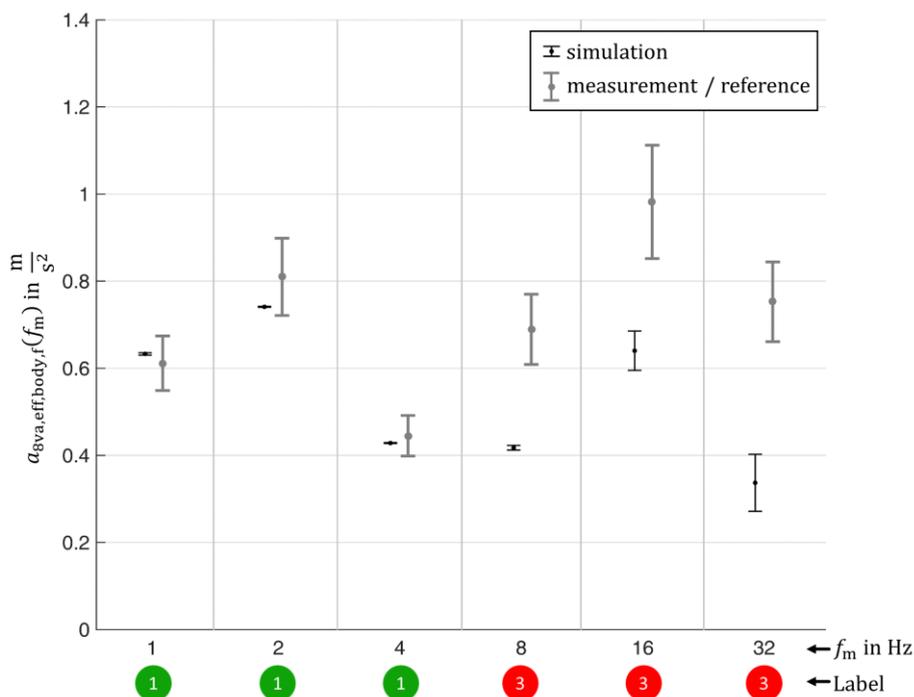


Abbildung 5-13: Vergleichsdiagramm für alle  $a_{8va,eff,body,f}(f_m)$  einer Konfigurationsstichprobe<sup>367</sup>

Im Gegensatz zu Abbildung 5-12, die eine Gegenüberstellung der Vergleichswerte aller Konfigurationsstichproben für ein metrisches Validitätskriterium zeigt, ist in Abbildung 5-13 dargestellt, wie sich die sechs Oktaveffektivwerte für eine feste Konfigurationsstichprobe entwickeln. Die zugewiesenen Validitätslabels entstammen somit der gleichen Stelle sechs unterschiedlicher Validitätsbewertungskarten.<sup>368</sup> Wie im nachfolgenden Abschnitt 5.3.6 anhand der statistischen Validitätskennwerte  $V_{abs}$  nachgewiesen wird, ist der aufgezeigte Zusammenhang repräsentativ für die unterschiedlichen Konfigurationsstichproben. Während die absoluten Oktaveffektivwerte für die Mittenfrequenzen bis 4 Hz mit hoher Wahrscheinlichkeit stichprobenvalide sind, stellt sich das Simulationsmodell für die Kennwerte mit Mittenfrequenzen  $f_m \geq 8$  Hz in vielen Fällen als nicht valide dar. Als Ursache der Invalidität sind die starre Koppelung von Motor und Aufbau sowie das Rad-/Reifenmodell zu nennen:

- Der Motor ist im Versuchsfahrzeug über vier Lager mit dem Aufbau verbunden. Die Eigenfrequenz der Motorvertikalschwingung liegt bei ca. 11 Hz<sup>369</sup>, sodass sich die Modellvereinfachung des starr gekoppelten Motors auf die Oktavwerte der beiden Mittenfrequenzen  $f_m = 8$  Hz und  $f_m = 16$  Hz auswirkt.<sup>370</sup>

<sup>367</sup> Die Abszisse der Diagramme ist ordinalskaliert. Zur besseren Lesbarkeit werden die Werte der Simulation und die der Messung bei der identischen Bezugsgröße mit einem Versatz in Richtung der Abszisse gegenübergestellt. Innerhalb der vertikalen Trennlinien ist die Bezugsgröße als konstant zu betrachten.

<sup>368</sup> Die sechs metrischen Validitätskriterien sind  $a_{8va,eff,body,f}(f_m)$  mit  $f_m = [1; 2; 4; 8; 16; 32]$  Hz.

<sup>369</sup> Dieser Wert stammt aus einer Sondermessung.

<sup>370</sup> Vgl. Anhang A.3.3 (Anregungsprofil des Vierstempelprüfstands) / Weidenfeller, C.: Komfortsimulation mit Mehrkörpersimulationsmodellen, 2017, S. 42 ff.

- Das MF-Reifenmodell ist bis 8 Hz ausgelegt.<sup>371</sup> Die bei höheren Frequenzen auftretenden dynamischen Effekte, z.B. die Dämpfungseigenschaften der Materialfeder ab Frequenzen von ca. 30 Hz, sind nicht Bestandteil der Modellierung. Eigenschwingungen zeigt der Reifen erst über 30 Hz, er ist aber massebedingt auch an den niederfrequenteren Schwingungen beteiligt. Die Eigenfrequenz der reifengefederten Massen liegt im Bereich von 10 Hz bis 20 Hz.<sup>372</sup> Das Validierungsergebnis bestätigt somit das Ergebnis der vorherigen Untersuchungen und der Arbeit von Niemann, dass die Übertragungstrecke zwischen Prüfstandsstempel und Radzentrum für die Simulation schwerer zu beherrschen und mit größeren Unsicherheiten behaftet ist.

### 5.3.6 Stufe 6: Validierungsergebnis

Der Validitätsbewertungsbericht in Abbildung 5-14 zeigt das Ergebnis der Vertikaldynamikstudie. Ergänzend zu dem Bericht der Querdynamikstudie<sup>373</sup> enthält dieser in den grau hinterlegten Feldern quantitative Informationen über den Vertrauens- und den Toleranzbereich sowie den mittleren absoluten Wert des Validitätskriteriums, der auch gleichzeitig den Bezugswert für die prozentualen Angaben darstellt. In der Praxis erweisen sich diese Informationen als notwendig, da Betrachter häufig nur über die quantitativen Kriterien entscheiden können, ob die Studie bzw. die Validitätsaussage für ihre persönlichen Einsatzzwecke repräsentativ bzw. gültig ist.<sup>374</sup>

---

<sup>371</sup> Vgl. Abschnitt 5.1.4 (Simulationsumgebung).

<sup>372</sup> Vgl. Overhoff, D.: Reifentechnik, 2016, S. 26 ff.

<sup>373</sup> Vgl. Abbildung 5-8.

<sup>374</sup> Vgl. Abschnitt 4.4.6.2 (Darstellung und Ausgabe der Validierungsergebnisse).

metrische Validitätskriterien (MVC)		Prädiktion absoluter Kennwerte		Prädiktion relativer Kennwertänderungen		Signifikanz $S_V$	Toleranz / Genauigkeitsanforderung	durchschnittlicher Vertrauensbereich der Messung ( $\gamma = 95\%$ )		durchschnittlicher Toleranzbereich der Simulation		Referenz-Mittelwert	Einheit
		$V_{abs} = (1   2   3)$ in %	$V_{rel} = (1   2   3   4)$ in %	$V_{abs} = (1   2   3)$ in %	$V_{rel} = (1   2   3   4)$ in %			abs. in Einheit	rel. in %	abs. in Einheit	rel. in %		
1	$f_{0, body, f}$	( 12   77   11 )	( 95   5   0   0 )	( 95   5   0   0 )	1,6	manuell	± 0,05	3,2	± 0,12	8,0	1,49	Hz	
2	$f_{0, body, r}$	( 83   11   6 )	( 98   1   0   1 )	( 98   1   0   1 )	1,2	manuell	± 0,05	3,2	± 0,12	8,0	1,49	Hz	
3	$D_f$	( 89   11   0 )	( 96   1   2   1 )	( 96   1   2   1 )	4,8	manuell	± 0,05	7,2	± 0,12	15,0	0,279	-	
4	$D_r$	( 89   0   11 )	( 100   0   0   0 )	( 100   0   0   0 )	1,8	manuell	± 0,05	5,6	± 0,12	15,0	0,288	-	
5	$a_{8va, eff, body, f}$ (1 Hz)	( 94   0   6 )	( 100   0   0   0 )	( 100   0   0   0 )	6,7	manuell	± 0,037	9,0	± 0,063	15,0	0,416	$m/s^2$	
6	$a_{8va, eff, body, f}$ (2 Hz)	( 72   6   22 )	( 97   0   3   0 )	( 97   0   3   0 )	6,5	manuell	± 0,05	10,4	± 0,089	15,0	0,395	$m/s^2$	
7	$a_{8va, eff, body, f}$ (4 Hz)	( 67   0   33 )	( 79   2   19   0 )	( 79   2   19   0 )	5,7	manuell	± 0,05	7,9	± 0,047	15,0	0,359	$m/s^2$	
8	$a_{8va, eff, body, f}$ (8 Hz)	( 0   0   100 )	( 88   7   4   1 )	( 88   7   4   1 )	5,5	manuell	± 0,05	4,9	± 0,085	15,0	0,337	$m/s^2$	
9	$a_{8va, eff, body, f}$ (16 Hz)	( 0   0   100 )	( 46   20   30   4 )	( 46   20   30   4 )	5,8	manuell	± 0,05	10,4	± 0,139	15,0	0,368	$m/s^2$	
10	$a_{8va, eff, body, f}$ (32 Hz)	( 0   0   100 )	( 41   0   0   59 )	( 41   0   0   59 )	3,9	manuell	± 0,05	6,7	± 0,092	15,0	0,439	$m/s^2$	
11	$a_{8va, eff, body, r}$ (1 Hz)	( 89   0   11 )	( 100   0   0   0 )	( 100   0   0   0 )	5,7	manuell	± 0,05	2,8	± 0,098	15,0	0,289	$m/s^2$	
12	$a_{8va, eff, body, r}$ (2 Hz)	( 100   0   0 )	( 100   0   0   0 )	( 100   0   0   0 )	5,1	manuell	± 0,05	1,0	± 0,09	15,0	0,306	$m/s^2$	
13	$a_{8va, eff, body, r}$ (4 Hz)	( 94   0   6 )	( 100   0   0   0 )	( 100   0   0   0 )	6,6	manuell	± 0,05	4,4	± 0,047	15,0	0,449	$m/s^2$	
14	$a_{8va, eff, body, r}$ (8 Hz)	( 50   11   39 )	( 100   0   0   0 )	( 100   0   0   0 )	7,3	manuell	± 0,05	2,9	± 0,095	15,0	0,399	$m/s^2$	
15	$a_{8va, eff, body, r}$ (16 Hz)	( 72   0   28 )	( 87   3   10   0 )	( 87   3   10   0 )	6,0	manuell	± 0,05	3,7	± 0,093	15,0	0,392	$m/s^2$	
16	$a_{8va, eff, body, r}$ (32 Hz)	( 0   82   18 )	( 0   63   10   27 )	( 0   63   10   27 )	6,7	manuell	± 0,05	5,2	± 0,098	15,0	0,395	$m/s^2$	
<b>Mittelwert aller MVC</b>		<b>( 57   12   31 )</b>	<b>( 83   6   5   6 )</b>	<b>( 83   6   5   6 )</b>									

Abbildung 5-14: Validitätsbewertungsbericht der Vertikaldynamikstudie

Die vergleichsweise hohen Signifikanzindikatoren (Durchschnitt: 6,0) für die Oktaveffektivwerte der Aufbaubeschleunigung demonstrieren, dass sich die Anstrengungen zur systematischen Auslegung der Studie auszahlen. Lediglich bei den Aufbaueigenfrequenzen und der Systemdämpfung der Hinterachse fallen die Variationsbereiche in Bezug auf die Toleranzbereiche gering aus. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die zulässige Toleranz (8 % bzw. 15 %) teilweise um eine Größenordnung oberhalb der Nachweisgenauigkeit liegt. Mit der Toleranzanhebung sinkt automatisch die Signifikanz.<sup>375</sup> Des Weiteren gelten auch hier die in der vorherigen Studie thematisierten Einflüsse der Parametervariationsbereiche, der Versuchsstreuungen und der Toleranzanforderungen.<sup>376</sup>

Es stellt sich die Frage, ob und ggf. wie mit der vorliegenden Validitätsbeurteilung das Vertrauen in die Simulationsergebnisse weiter gesteigert werden kann, wenn ein metrisches Validitätskriterium (MVC) nicht zu  $V_{\text{abs}} = (100|0|0) \%$  und  $V_{\text{rel}} = (100|0|0|0) \%$  stichprobenvalid ist. Die Antwort hierauf liefert ein erneuter Blick in die Validitätsbewertungskarte dieses MVC. Es gilt zu untersuchen, ob die verschiedenen Labels homogen verteilt sind oder ob sich Bereiche mit klaren Qualitätsunterschieden herausstellen.

Abbildung 5-15 demonstriert am Beispiel des Kriteriums  $a_{8\text{va,eff,body,f}}(4 \text{ Hz})$  mit  $V_{\text{abs}} = (67|0|33) \%$  und  $V_{\text{rel}} = (79|2|19|0) \%$ , dass der Validitätsbereich der Simulation in bestimmten Fällen weiter eingeschränkt werden kann. Bezogen auf den zweistufig variierten Parameter der Anregungsamplitude ergibt sich die aufgezeigte Einteilung in die Bereiche A, B und C. In Bereich A sind alle Validitätsbewertungen zu finden, die sich ausschließlich auf Versuche beziehen, in denen Fahrzeugkonfigurationen mit Anregungsvariante 1 (größere Anregungsamplitude) untersucht wurden. In Bereich C sind entsprechend alle Vergleiche zu finden, die sich ausschließlich auf Variante 2 (kleinere Anregungsamplitude) beziehen. In Bereich B sind alle Bewertungen für relative Kennwertänderungen zwischen zwei Konfigurationsstichproben enthalten, von denen jeweils eine die größere und eine die kleinere Anregungsamplitude erfahren hat. Durch die Struktur der Karte ist ersichtlich, dass Validität nur für Konfigurationsstichproben falsifiziert wurde, die mit der größeren Anregungsamplitude (Var. 1) beaufschlagt werden. Mit dieser Erkenntnis ist es zulässig, den Gültigkeitsbereich für das MVC  $a_{8\text{va,eff,body,f}}(4 \text{ Hz})$  auf Anregungsamplituden vom Typ Var. 2 zu reduzieren, für die zu 100 % Stichprobenvalidität vorliegt.

<sup>375</sup> Vgl. Formel 4.24 in Abschnitt 4.4.6.2 (Darstellung und Ausgabe der Validierungsergebnisse).

<sup>376</sup> Vgl. Abschnitt 5.2.6 (Stufe 6: Validierungsergebnis).

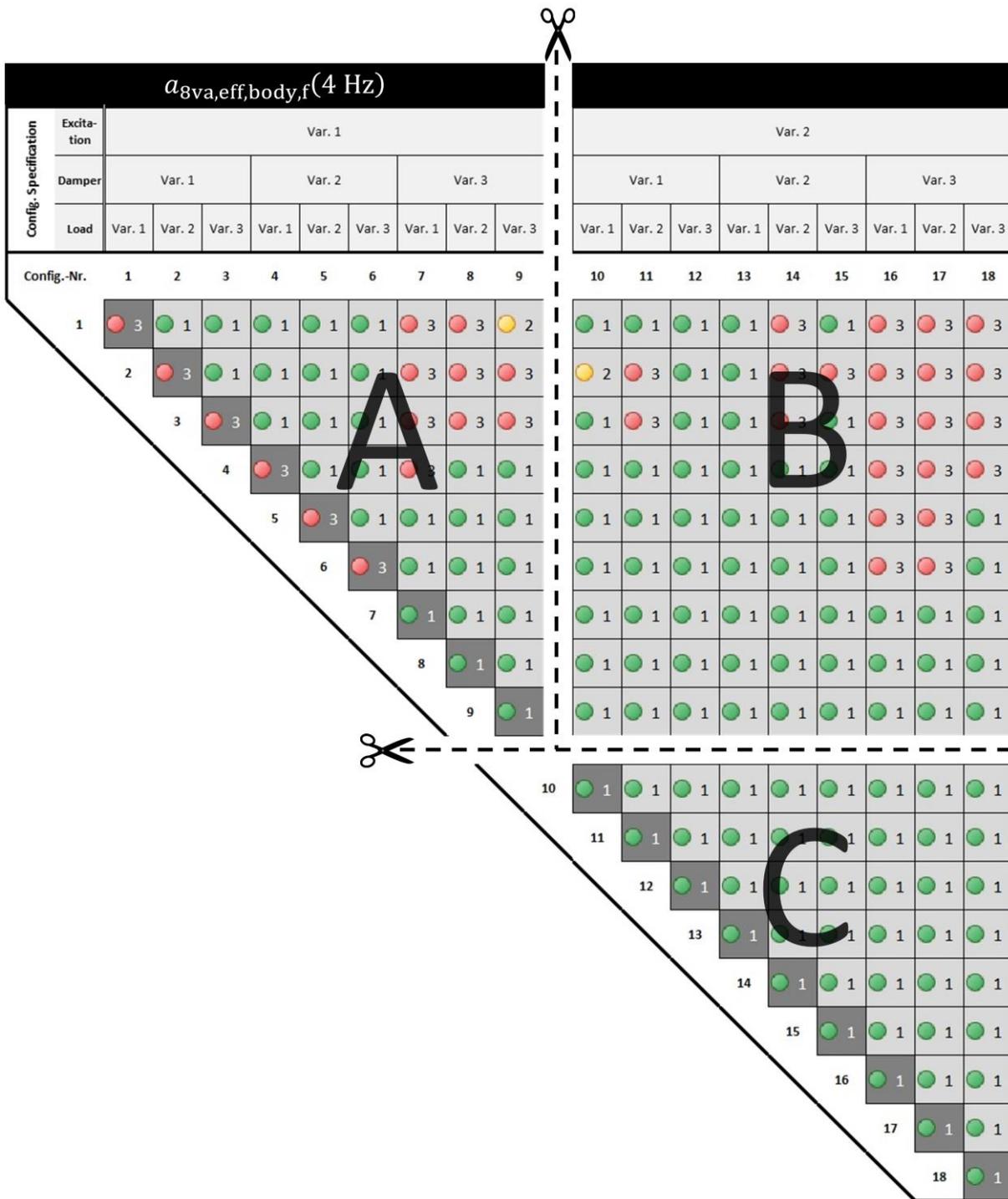


Abbildung 5-15: Einschränkung des Gültigkeitsbereichs auf Basis der Validitätsbewertungskarte

Auf Basis dieser Beobachtung für eines der 16 Validitätskriterien ist die Annahme zulässig, dass die Vergleichsdaten der Anregungsprofilvariante 1 unter Umständen einem systematischen Fehler unterliegen und die Abweichungen zwischen Messung und Simulation nicht auf eine Modellinvalidität in diesem Arbeitspunkt zurückzuführen sind. Um diesbezüglich Sicherheit in der Ergebnisinterpretation zu erhalten, wird innerhalb des Validitätsbewertungsberichts ein Fenster

zur Konfigurationskontrolle<sup>377</sup> angezeigt, das für die Vertikaldynamikstudie in Abbildung 5-16 vorzufinden ist. Es zeigt prozentual für jede Konfiguration bzw. in diesem Fall für jeden Variationsparameter, an wie vielen grünen (1), gelben (2), roten (3) und schwarzen (4) Labels dieser Parameter Anteil hat. Bei 18 Konfigurationen und 16 Validitätskriterien werden in dieser Studie insgesamt 2736 Validitätslabels zugewiesen, auf die sich die Prozentangaben beziehen. Abbildung 5-16 zeigt, dass die Labelvergabe sehr homogen auf die drei Variationsparameter und ihre insgesamt acht Faktorstufen verteilt sind. Diese Auswertung widerlegt somit die Vermutung, dass bei Anregungsprofilvariante 1 ein überdurchschnittlicher systematischer Fehler vorliegt, der sich in einer signifikanten Abweichung gegenüber den anderen Faktoren äußern würde. Aus diesem Grund darf das Validierungsergebnis für das Validitätskriterium  $a_{8va,eff,body,t}(4\text{ Hz})$  derart interpretiert werden, dass bei großer Anregungsamplitude ein Arbeitspunkt des Modells erreicht wird, in dem statistisch häufiger Invalidität auftritt als bei kleinen Anregungsamplituden.

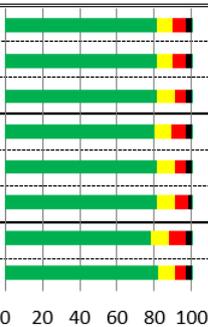
Variation bzw. Faktor	Variante bzw. Faktorstufe	Prozentuale Labelvergabe je Faktor				
		1	2	3	4	
Zuladung	1	81	9	7	3	
	2	81	9	7	3	
	3	81	10	6	3	
Dämpfer	1	80	9	8	3	
	2	81	10	6	3	
	3	81	10	7	2	
Anregungsprofil	1	78	10	9	3	
	2	82	9	6	3	

Abbildung 5-16: Konfigurationskontrolle im Validitätsbewertungsbericht

Die Ausführungen in diesem Abschnitt zeigen, dass neben der Gesamtübersicht zur Validierungsstudie auch die Möglichkeit der individuellen Anpassung und Interpretation der Validierungsergebnisse durch den Anwender möglich ist. Hierzu stehen ihm neben einer übersichtlichen Beschreibung der Validierungsstudie gemäß der Felder 1 und 2 in Abbildung 4-26 die statistischen Validitätsmaße, die Signifikanzindikatoren, die automatisierte Kontrolle der Genauigkeitsanforderungen, die quantitativen Informationen zum Vertrauens- und zum Toleranzbereich, die statistische Konfigurationskontrolle und die einzelnen Validitätsbewertungskarten zur Verfügung. Es ist nochmals hervorzuheben, dass sämtliche Angaben ohne Spielraum für subjektive Anpassungen aus den Vergleichsdaten der Simulation und Messung erhoben werden. Der Anwender bestimmt lediglich das Vertrauensniveau und die Genauigkeitsanforderungen, die dem Datenvergleich zugrunde zu legen sind. Beide Einstellungen können nachträglich angepasst werden, sodass der Validitätsbewertungsbericht und die einzelnen Validitätsbewertungskarten automatisiert aktualisiert werden.

<sup>377</sup> Vgl. Abschnitt 4.4.6.2 (Darstellung und Ausgabe der Validierungsergebnisse).

## 5.4 Fazit zur Methodenanwendung in der Fahrdynamik

Die praktische Durchführung von Validierungsstudien legt nahe, dass sich das neue Validierungskonzept in der Fahrdynamiksimulation verlässlich anwenden lässt. Der sechsstufige Validierungsprozess aus Unterkapitel 4.3 ist hier ohne domänenspezifische Adaptionen durchführbar. Zur Bestätigung sind jedoch weitere Studien durchzuführen, in denen sich das Validierungskonzept bewähren muss.

Sowohl im querdynamischen Fahrversuch als auch im vertikaldynamischen Prüfstandsversuch können unter strikter Einhaltung der Prozessschritte objektive Erkenntnisse über die statistische Validität der Versuchsausgangsgrößen erhoben werden. Dabei stellen sich die Objektivierungstechniken als geeignet – für ihren jeweiligen Zweck<sup>378</sup> im Validierungsprozess –, praktikabel und anwenderneutral heraus.

Die in Abschnitt 4.4.6 eingeführten Kontrollmechanismen, wie z.B. die Gültigkeitsprüfung der Genauigkeitsanforderungen oder der Signifikanzindikator, bewähren sich in der hier durchgeführten Praxisanwendung. Zudem zeichnen sich die Teilprozesse zur Studienauslegung und -vorbereitung aus, um Praktikabilität zu gewährleisten, was auch durch die Verträglichkeit der Methode für Kompromisse und Einschränkungen unterstützt wird. Eine zukünftige Integration des Validierungskonzepts in den Produktentwicklungsprozess der Automobilindustrie bietet Potenzial zur weiteren Effizienzsteigerung.

Wird neben der Bewertung der Stichprobenvalidität auch eine Korrektur etwaiger signifikanter Fehler innerhalb der Vergleichsdaten aus Simulation und Messung angestrebt, erweisen sich die ersten zwei Validierungsschritte – die Versuchsdaten- und die Parametervalidierung – als effektive Teilprozesse zur Fehleridentifikation, um notwendige Iterationen zur Fehlerbehebung einzuleiten.

Als größte Herausforderungen der Validierung in der Fahrdynamik stellen sich die Sensitivitätsmaximierung der metrischen Validitätskriterien (MVC) auf die Konfigurationsstichproben und die Minimierung der Versuchsstreuungen in der Praxis heraus, was möglichst geringe Sensitivitäten der MVC in Bezug auf systematische Fehler und nicht kontrollierbare Einflussfaktoren voraussetzt. Beide Aspekte adressieren eine Optimierung der Aussagekraft der Validierungsstudie – d.h. die Maximierung der Signifikanzindikatoren.

---

<sup>378</sup> Vgl. Unterkapitel 4.4 (Objektivierung und Verknüpfung der Teilprozesse).

---

## 6 Ergebnisse, Bewertung und Diskussion

Das Ziel dieses Kapitels ist der Abgleich der erreichten Forschungsergebnisse mit den formulierten Forschungszielen, um eine Potenzialbewertung und Diskussion der entwickelten Validierungsmethode vorzunehmen.<sup>379</sup>

### 6.1 Erfüllung der Konzeptanforderungen

Als Bewertungsgrundlage dienen die aus der Problemformulierung<sup>380</sup> und der Ist-Stand-Analyse<sup>381</sup> abgeleiteten Anforderungen, die in Unterkapitel 4.1 beschrieben sind. Diesen werden nachfolgend die Forschungsergebnisse gegenübergestellt. Aus der Allgemeingültigkeit der Methode und der Anwendung in den Fahrdynamikstudien geht eine grundsätzliche Erfüllung aller Anforderungen hervor, wenngleich sich die Methode zukünftig bezüglich einiger Anforderungen, für die keine Testspezifikationen definierbar sind, die mit den Ergebnissen dieser Arbeit eindeutig verifiziert werden könnten, erst noch bewähren muss:

#### *Anf. 1a) Effektivität durch einen erweiterten Gültigkeitsbereich*

Der erweiterte Gültigkeitsbereich wird durch die Untersuchung unterschiedlicher Systemvarianten (Konfigurationsstichproben) gewährleistet, sodass die Validitätsaussage nicht nur einen singulären Arbeitspunkt des Modells, sondern die Simulationsqualität innerhalb eines Parameterraums adressiert. Die statistischen Validitätsmaße  $V_{\text{abs}}$  und  $V_{\text{rel}}$  geben Auskunft darüber, in welchem Umfang die Simulationsvalidität über die gewählten Stichproben – und somit über den betrachteten Parameterraum – streut.

#### *Anf. 1b) Effektivität durch Bewertung der prädiktiven Fähigkeiten*

Die verschiedenen Konfigurationsstichproben spannen einen Parameterraum auf, innerhalb dessen die Validierungsergebnisse bei sprunghaftem Systemverhalten interpoliert werden können, wohingegen sich der Gültigkeitsbereich bisheriger Validierungsstudien auf singuläre Systemvarianten beschränkt. Bei bekanntem Systemverhalten können die Validierungsergebnisse auch auf einen größeren Parameterraum extrapoliert werden. Damit liegt eine objektiv abgesicherte Information – die wie alle statistikbasierten Aussagen eine Irrtumswahrscheinlichkeit aufweist – über die Simulationsqualität für Systemvarianten, die nicht in der Studie bewertet wurden, vor. Die Irrtumswahrscheinlichkeit von Validitätsaussagen für Systemvarianten, die

---

<sup>379</sup> Vgl. Abbildung 1-1.

<sup>380</sup> Vgl. Unterkapitel 1.1 (Motivation).

<sup>381</sup> Vgl. Kapitel 3 (Ist-Stand-Analyse).

nicht zum Stichprobenumfang gehören und die somit auf der Annahme zulässiger Interpolation oder Extrapolation beruhen, ist höher als die Irrtumswahrscheinlichkeit für die untersuchten Stichproben. Dies liegt daran, dass die Entscheidung, die Ergebnisse interpolativ oder extrapolativ auf andere Arbeitspunkte (Systemvarianten) zu übertragen, ebenfalls mit einer Unsicherheit verbunden ist. Trotz der intensiven Voruntersuchungen und der Objektivierung des Auslegungsprozesses kann nicht ausgeschlossen werden, dass das reale System zwischen zwei Stützstellen (Konfigurationsstichproben) einen unvorhersehbaren Sprung oder ein unerwartetes Extremwertverhalten aufweist.

**Anf. 1c) Effektivität durch Bewertung beider Einsatzzwecke**

Erst die gleichzeitige Betrachtung unterschiedlicher Systemvarianten ermöglicht es, die Simulation nicht nur für die Prädiktion absoluter metrischer Validitätskriterien (MVC) zu bewerten, sondern gleichzeitig auch für ihr zweites Einsatzgebiet, die Vorhersage des MVC-Unterschieds zwischen zwei Systemvarianten. Dieser Relativvergleich ist insbesondere in der Fahrzeugentwicklung ein sehr häufiger Anwendungszweck von Simulationen.

**Anf. 1d) Effektivität durch Trennung von Daten-, Modell- und Simulationsvalidität**

In der entwickelten Validierungsmethode wird eine strikte Trennung der Daten-, der Modell- und der Simulationsvalidität vorgenommen. Als Ergebnis liegen statistische Informationen über die Simulationsvalidität vor, d.h. eine Auskunft darüber, in wie vielen Fällen bei üblicher Streuung der Datenvalidität und bei gleichbleibender Modellvalidität die Simulationsergebnisse die geforderte Genauigkeit aufweisen. Wenn die Datenvalidität durch entsprechende Parametrierungsprozesse eine gute Kontrollierbarkeit erfährt, ist die Simulationsvalidität gemäß der Erläuterungen in Abschnitt 2.1.1 auch ein Indikator für die Modellvalidität. Zudem ist der neue dreistufige Validierungsprozess in der Lage, systematische Fehler, die die Datenvalidität betreffen, effektiv zu identifizieren, um iterativ Korrekturen vorzunehmen.

**Anf. 2) Effizienz durch statistische Absicherung**

Diese Anforderung steht in engem Zusammenhang mit Anf. 1b). Die Effizienzsteigerung im Vergleich zum heutigen Validierungsvorgehen tritt ein, wenn die neue Methode in Anwendungsgebieten zum Einsatz kommt, die den Rahmenbedingungen aus Unterkapitel 4.1 unterliegen, also wenn Simulationsanwendungen zyklisch für unterschiedliche Systemvarianten wiederholt werden. Die statistische Absicherung über eine endliche Anzahl von Stützstellen (Konfigurationsstichproben) ermöglicht eine einmalige Durchführung der Validierungsstudie für die Zielanwendung und für den relevanten Parametrierungsbereich. Für zukünftige bzw. andere Systemvarianten, die nicht zum Umfang der Konfigurationsstichproben gehören, haben die erhobenen Validitätsmaße Gültigkeit, sodass auf eine individuelle Validierung dieser Systemvarianten verzichtet werden kann.

Unter der Annahme, dass mit achtzehn Konfigurationsstichproben die notwendige statistische Absicherung erfolgen kann, ist die neue Validierungsmethode spätestens ab der Simulation der neunzehnten Systemvariante effizienter als das bisherige Vorgehen der Einzelabsicherung. In

den meisten Fällen sollte sich der Effizienzvorteil schon früher einstellen, da alle Versuche innerhalb des neuen Prozesses einer einzigen Versuchsplanung und Versuchsvorbereitung unterliegen, während die heutigen singulären Vergleichstests stets unabhängig voneinander erfolgen, sodass die Versuchsplanung und -vorbereitung wiederholt durchzuführen sind.

Der optimierte Validierungsprozess kann auch angewendet werden, wenn das Ziel die Validierung einer singulären Systemvariante ist. In diesem Fall würde zwar kein Effizienzvorteil durch eine statistische Absicherung mit mehreren Konfigurationsstichproben vorliegen – die Durchführung wäre ineffizient und in Bezug auf die Anforderungen unnötig –, aber die Validitätsuntersuchung würde dennoch von der Prozessoptimierung mit ihrer durchgängigen Systematik und Objektivität profitieren.

### **Anf. 3a)** *Vertrauen und Praxisrelevanz durch Anforderungsbezug*

Ein Hauptkritikpunkt, weshalb Validierungsstudien häufig kein Vertrauen vermitteln, ist der fehlende Anforderungsbezug für die Auslegung der Studie und für die Validitätsbewertung. Wie die Beschreibung des neuen Prozesses in den Unterkapiteln 4.3 und 4.4 aufzeigt und wie auch aus den beiden Validierungsstudien in Kapitel 5 hervorgeht, richten sich sämtliche Teilprozesse an der Anforderungsdefinition aus. Die Definition der Simulationsausgangsgrößen, der erforderlichen Genauigkeit, der zulässigen Irrtumswahrscheinlichkeit und der Rahmenbedingungen für die statistische Absicherung ist fester Bestandteil des ersten Teilprozesses.

### **Anf. 3b)** *Vertrauen und Praxisrelevanz durch Praktikabilität*

Das Praktikabilitätskriterium ist von besonders großer Bedeutung für die Akzeptanz der Methode und wird in dieser Arbeit im Hinblick auf die Anwendbarkeit in der Automobilindustrie analysiert. Die Validierungsmethode muss auch unter gegebenen Einschränkungen anwendbar sein. Diese betreffen insbesondere die realisierbaren bzw. verfügbaren Konfigurationsstichproben, die verfügbare Messtechnik, die durchführbaren Validierungsversuche und den Versuchsaufwand. Die vorgestellte Validierungsmethode zeigt diesbezüglich ihre Anpassungsfähigkeit und Toleranz. Die genannten Rahmenbedingungen werden bereits in der Auslegungsphase berücksichtigt. Es gilt jedoch zu beachten, dass Einschränkungen in der Versuchsauslegung dazu führen können, dass nicht die stichhaltigsten Arbeitspunkte der Simulation für den Validitätsnachweis ausgewählt werden, worunter die Aussagekraft und die Signifikanz der Validierungsergebnisse leiden können. Nichtsdestotrotz führen Einschränkungen in keinem Fall zu einer systematischen Falschaussage, wie sie bisher z.B. bei einer Bewertung per subjektiver Augenscheinvalidierung möglich ist.

### **Anf. 3c)** *Vertrauen und Praxisrelevanz durch Nachvollziehbarkeit*

In Unterkapitel 3.2 wird als Schwachstelle des bisherigen Validierungsvorgehens die fehlende Verknüpfung einiger Teilprozesse – insbesondere der Anforderungsdefinition und der Auslegung der Studie – identifiziert, die keine Nachvollziehbarkeit der Beweisführung ermöglicht und für Misstrauen sorgt. Aus diesem Grund sind in der neuen Prozessdefinition alle Teilpro-

zesse klar miteinander verknüpft und objektive Techniken ausgewählt, mit denen eine Transformation der jeweiligen Eingangs- in die erforderlichen Ausgangsinformationen erfolgt. Die detaillierte Beschreibung für jeden Teilprozess ist in Unterkapitel 4.4 zu finden.

**Anf. 3d) Vertrauen und Praxisrelevanz durch Objektivität**

Wie der Prozessübersicht in Tabelle 4-2 entnommen werden kann, wird jeder Teilprozess durch mindestens eine Objektivierungstechnik unterstützt, um größtmögliche Anwenderunabhängigkeit der Validierungsergebnisse zu erzielen. Die Techniken bewirken jedoch nicht nur eine robuste Prozessdurchführung. In der Auslegungsphase sorgt die Sensitivitätsanalyse für die Optimierung der Arbeitspunktauswahl (Konfigurationsstichproben). Die statistische Versuchsplanung reduziert den Versuchsaufwand auf ein notwendiges Minimum. Die Versuchsdatenvalidierung, in der kumulative Verteilungsfunktionen betrachtet werden, und die Parametervalidierung dienen dazu, systematische Fehler zu identifizieren. Die in Abschnitt 4.4.6 eingeführten Prüfmechanismen innerhalb des Validitätsbewertungsberichts – der Signifikanzindikator, die Gültigkeitskontrolle der Genauigkeitsanforderungen und die Konfigurationskontrolle – unterstützen die richtige Interpretation der Validierungsergebnisse.

**Anf. 4a) Vermeidung von Falschaussagen durch systematische Fehler**

Die Vermeidung systematischer Fehler ist eine der größten Herausforderungen in der Validierung, da konstante Fehler dieser Art nicht direkt anhand der Versuchsdaten identifiziert werden können. Die Vermeidung erfordert höchste Kontrollierbarkeit aller Einflussfaktoren auf die Vergleichsdaten von Messung und Simulation. Im Rahmen der Methodenentwicklung werden diverse Unsicherheiten benannt und Gegenmaßnahmen vorgestellt, die in Unterkapitel 4.5 zusammengefasst sind. Zudem unterstützen die Versuchsdaten- und die Parametervalidierung dabei, systematische Fehler frühzeitig zu identifizieren. Die Konfigurationskontrolle innerhalb des Validitätsbewertungsberichts prüft, ob einzelne Konfigurationsstichproben bzw. Variationsparameter mit statistisch geringerer Stichprobenvalidität simuliert werden als andere, was ein Anzeichen für konfigurationsindividuelle Unsicherheiten darstellen würde. Dennoch kann trotz dieser Maßnahmen nicht vollständig ausgeschlossen werden, dass systematische Fehler eine Falschaussage der Validierungsstudie bewirken. Dies gilt jedoch mindestens in gleichem Maße auch für Messdaten, die für äquivalente Zwecke herangezogen werden.

**Anf. 4b) Vermeidung von Falsch-Positiv-Aussagen**

Für die Praxis, in der Simulationen zunehmend Realversuche ersetzen, sind Falsch-Positiv-Aussagen auf Basis von Simulationsergebnissen besonders kritisch zu betrachten. Es stellt sich die Frage, in welchen Fällen mit der neuen Validierungsmethode Stichprobenvalidität verifiziert wird, obwohl unter Ausschluss aller Fehler Invalidität vorliegt. Nachfolgend werden mögliche Ursachen vorgestellt, anhand derer aufgezeigt wird, dass bereits viele Gegenmaßnahmen und Kontrollmechanismen in die Methode eingebettet sind, jedoch Falsch-Positiv-Aussagen nicht vollständig ausgeschlossen werden können:

- Systematische Fehler bei der Erhebung der Vergleichsdaten können dazu führen, dass metrische Validitätskriterien (entweder der Simulation oder der Messung) einen Offset

aufweisen, der eine bessere Übereinstimmungsgenauigkeit bewirkt. Hierbei gilt es, zwei Fälle zu unterscheiden:

- Sind nur wenige Konfigurationsstichproben von diesem Fehler betroffen, ist die Wahrscheinlichkeit groß, dass der Fehler im Rahmen der Versuchsdaten- oder der Parametervalidierung frühzeitig erkannt wird. Sollten diese optionalen Teilprozesse ausgelassen werden, dient immer noch die Anzeige der Konfigurationskontrolle innerhalb des Validitätsbewertungsberichts dazu, auf diesen Fehlertyp aufmerksam zu machen.<sup>382</sup>
- Die in Unterkapitel 4.5 beschriebenen Gegenmaßnahmen für negative Einflüsse sollen systematische Fehler, die die Vergleichsdaten aller Konfigurationsstichproben gleichermaßen betreffen, verhindern. Sollten dennoch solche Fehlereinflüsse auftreten, kann es auch mit der neuen Validierungsmethode zu Falsch-Positiv-Aussagen kommen.
- Fehlinterpretationen durch den Anwender können zu Falsch-Positiv-Aussagen führen, wenn dieser z.B. die Validierungsergebnisse auf einen Bereich überträgt, der nicht mit dem Gültigkeitsbereich der Studie übereinstimmt. Diesem Fehler wird durch maximale Transparenz und Auflistung aller relevanten Informationen zur Studiauslegung, zur statistischen Absicherung und zum Gültigkeitsbereich innerhalb des Validitätsbewertungsberichts entgegengewirkt.<sup>383</sup>
- Fehlerhafte Genauigkeitsanforderungen durch den Anwender können sowohl Falsch-Positiv- als auch Falsch-Negativ-Aussagen bewirken.
  - Reduziert der Anwender den Toleranzbereich derart, dass er kleiner als der Vertrauensbereich der Messdaten ist, liegt eine unzulässige Genauigkeitsanforderung vor, die die Wahrscheinlichkeit von Falsch-Negativ-Aussagen erhöht. Dieser Fehler wird durch eine Warnung im Validitätsbewertungsbericht angezeigt.<sup>384</sup>
  - Reduziert der Anwender die Genauigkeitsanforderung derart, dass der Toleranzbereich größer als der Variationsbereich der Erwartungswerte aus der Messung ist, was sich in einem Signifikanzindikator  $S_V < 1$  äußert, wird dies mit einer Warnung in Form einer roten Ampel im Validitätsbewertungsbericht angezeigt. Desto kleiner der Signifikanzindikator ist, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit für Stichprobenvalidität. Für  $S_V < 1$  darf das Validierungsergebnis jedoch nicht derart interpretiert werden, dass zu 100 % Stichprobenvalidität vorliegt, was einer Falsch-Positiv-Aussage entspricht. Die Studie ist in diesem Fall nicht für statistische Aussagen geeignet. Für die Kennwerte können dann keine Unterschiede mit Signifikanz aufgezeigt werden.<sup>383</sup>

<sup>382</sup> Vgl. Abschnitte 4.4.5 (Empirische Validitätsanalyse), 4.4.6 (Validierungsergebnis) und 5.3.6 (Stufe 6: Validierungsergebnis).

<sup>383</sup> Vgl. Abschnitt 4.4.6.2 (Darstellung und Ausgabe der Validierungsergebnisse).

<sup>384</sup> Vgl. Abschnitte 4.4.1 (Anforderungsdefinition) und 4.4.6.2 (Darstellung und Ausgabe der Validierungsergebnisse).

Wird die Schrittweite der Parametervariationen zwischen den Konfigurationsstichproben zu groß gewählt, ist es möglich, dass für eine Systemvariante die Interpolation von Stichprobenvalidität unzulässig ist. Dies kann nur eintreten, wenn diese Systemvariante selbst nicht in der Validierungsstudie untersucht wurde. So ist es möglich, dass beispielsweise genau bei dieser Parametrierung eine Resonanzfrequenz getroffen wird, bei der das Modell nicht valide ist, oder dass aufgrund einer Nichtlinearität im realen System, die das Modell nicht abbildet, dieser Arbeitspunkt nicht für die statistische Absicherung ausgewählt wurde. Diesem Fehler kann nur durch Voruntersuchungen im realen System und durch möglichst viele Konfigurationsstichproben mit geringer Variationsschrittweite begegnet werden. Beide Maßnahmen stehen im Konflikt mit der Praktikabilität und Effizienz, d.h. dem notwendigen Aufwand, des Verfahrens.

Es ist fraglich, ob Falsch-Positiv-Aussagen in der Validierungspraxis wirklich ausgeschlossen werden können bzw. müssen. Die Wahrscheinlichkeit, heute Falsch-Positiv-Aussagen auf Basis von Messdaten zu treffen, erscheint höher als bei konsequenter Anwendung der neuen Validierungsmethode. Hierbei handelt es sich jedoch um eine erfahrungsbasierte Aussage, die derzeit nicht verifiziert werden kann.

### **Anf. 5a) Ergebnisdarstellung: Enthält relevante Informationen**

Gemäß der Struktur des Validitätsbewertungsberichts (VAR) in Abbildung 4-26 enthält dieser alle als relevant eingestuft Informationen zur Untersuchungsumgebung, wie z.B. die Spezifikation der Versuchsumgebung, die Testanwendung, die Konfigurationsstichproben und den Umfang der Validierungsversuche. Die beiden Kennwerte der statistischen Simulationsvalidität  $V_{\text{abs}}$  und  $V_{\text{rel}}$  werden ergänzt um den Signifikanzindikator und die Kontrolle der Genauigkeitsanforderung. Zudem stellt sich im Praxiseinsatz die Angabe quantitativer Informationen zur Streuung der Referenzdaten und zur geforderten Genauigkeit als notwendig heraus. Neben der Konfigurationskontrolle als Indikator für systematische konfigurationsbezogene Fehler wird der VAR um die Validitätsbewertungskarte jedes metrischen Validitätskriteriums ergänzt, so dass gemäß des Beispiels in Abschnitt 5.3.6 der Anwender nähere Details zum Validitätsbereich einsehen kann. Im zukünftigen Praxiseinsatz muss sich die Ergebnisdarstellung weiter bewähren, um sicherzustellen, dass keine relevanten Informationen fehlen. Auf Basis der bisherigen Studien liegt kein Anzeichen für unzureichenden Informationsgehalt vor.

### **Anf. 5b) Ergebnisdarstellung: Dynamisch an Genauigkeitsanforderungen anpassbar**

Innerhalb des Validitätsbewertungsberichts können die Toleranzbereiche für jedes metrische Validitätskriterium manuell und nachträglich angepasst werden. Die Validitätsbewertungskarten, die Validitätsmaße  $V_{\text{abs}}$  und  $V_{\text{rel}}$  sowie die Kontrollfenster werden automatisch aktualisiert. Somit ist es möglich, dass Nutzer die Validitätsbewertung für ihre individuellen Genauigkeitsanforderungen auswerten und anzeigen lassen. Die Vergleichsdaten aus der Simulation und Messung bleiben hiervon unberührt.

**Anf. 5c) Ergebnisdarstellung:** *Als Entscheidungsgrundlage geeignet*

Bei ausreichend hohen Signifikanzindikatoren und gültigen Genauigkeitsanforderungen liefert die Validierungsstudie objektive und abgesicherte Informationen über die Simulationsqualität in dem definierten Anwendungsbereich. Der Informationsgehalt ist wesentlich umfangreicher als derjenige heutiger singulärer Vergleiche, deren Übertragbarkeit auf andere Systemvarianten meist reinen Spekulationen unterliegt. Dennoch gilt, dass für Konfigurationsstichproben, die keinem Vergleich von Mess- und Simulationsdaten unterzogen werden, kein verifizierter Nachweis für Validität, sondern lediglich eine statistische Validitätsabsicherung, vorliegt. Über die Validitätsbewertungskarten kann bei einer Stichprobenvalidität kleiner als 100 % eine Einschränkung des Validitätsbereichs untersucht werden, wie es in Abschnitt 5.3.6 demonstriert wird.

**Anf. 5d) Ergebnisdarstellung:** *Für den Vergleich von Validierungsstudien geeignet*

Validitätsbewertungsberichte können direkt zum Vergleich unterschiedlicher Validierungsstudien herangezogen werden. Insbesondere wenn mit zwei unterschiedlichen Simulationswerkzeugen die gleichen Realversuche nachsimuliert werden, ist aufgrund der übereinstimmenden Konfigurationsstichproben ein direkter Vergleich der Simulationsgüte beider Programme möglich. Beziehen sich zwei Studien auf das gleiche Simulationsmodell, aber unterschiedliche Testanwendungen, kann die Versuchsabhängigkeit der Prädiktionsgüte gleicher metrischer Validitätskriterien aufgezeigt werden.

**Anf. 5e) Ergebnisdarstellung:** *Verständlich und aussagekräftig*

Die gesamte Validitätsbewertung unterliegt formalen Beziehungen, deren Ursprung die Gegenüberstellung eines Simulationswerts inklusive seines Konfidenzintervalls und eines Mess- bzw. Referenzwerts inklusive des zulässigen Toleranzbereichs für die Simulation ist. Diese Informationen werden aus Versuchswiederholungen unter Anwendung der  $t$ -Statistik und unter Einbeziehung der Genauigkeitsanforderungen erhoben. Im nächsten Schritt erfolgt die automatisierte Labelzuweisung gemäß der Bedingungen in Abbildung 4-21 in Anlehnung an den Signifikanztest. Die weiteren Schritte zur Bestimmung der Maße für Stichprobenvalidität  $V_{\text{abs}}$  und  $V_{\text{rel}}$  basieren auf Häufigkeitsverteilungen. In der bisherigen Praxisanwendung zeigt sich eine hohe Akzeptanz dieser Kennwerte, die zusätzlich über die gestapelten Balkendiagramme visualisiert werden und deren Aussage einfach zu kommunizieren ist. Zudem bewerten die bisherigen Anwender die Inhalte des Validitätsbewertungsberichts als besonders verständlich und aussagekräftig. Verständlichkeit und Aussagekraft sind keine Testkriterien, die sich zum derzeitigen Forschungsstand verifizieren lassen. Deshalb muss die Methode bezüglich Anf. 5e) zukünftig weiter geprüft werden.

## 6.2 Anwendungsbereiche

Wie in Unterkapitel 4.1 beschrieben, ist die entwickelte Validierungsmethode im eigentlichen Sinne eine in vielen Bereichen und nicht ausschließlich für den Zweck der Validierung anwendbare Vergleichsmethode. Diese Universalität und die Erkenntnisse zum Einsatz für die Validierung in der Fahrdynamiksimulation werden nachfolgend diskutiert.

### 6.2.1 Anwendbarkeit der Vergleichsmethode

Abstrahiert betrachtet kann die zur Validierung vorgestellte Methode zum Vergleich zweier Systemabbilder bzw. -anschauungen herangezogen werden, wobei die Übereinstimmungsgenauigkeit zwischen diesen beiden Sichtweisen bewertet wird.<sup>385</sup> Hierzu ist es üblich, aber nicht zwingend erforderlich, eine Systemabbildung als Referenz für eine andere zu definieren. Für den Zweck der Simulationsvalidierung wird die virtuelle Systemabbildung in der Simulation in Bezug auf die reale Systembeobachtung, die hier anhand von Messungen erfolgt, analysiert und bewertet. Das heißt, in sämtlichen Ausführungen dieser Arbeit lässt sich die Verallgemeinerung umsetzen, indem die Simulation durch die zu bewertende Systemanschauung und die Messung durch die referenzierte Systemanschauung ersetzt wird. Einige Beispiele hierfür sind in Tabelle 4-1 zusammengefasst.

Da von einer uneingeschränkten Universalität nicht auszugehen ist, stellt sich die Frage, welchen Anwendbarkeitsgrenzen das verallgemeinerte Vergleichskonzept unterliegt. Hierzu werden nachfolgend einige Beispiele diskutiert:

- Die Methode baut auf der Erhebung und dem Vergleich formal äquivalenter Daten aus beiden Systemabbildungen auf. Die Umkehrung bedeutet, dass die Vergleichsmethode nicht anwendbar ist, wenn die Informationen aus beiden Systemanschauungen nicht direkt zueinander korrespondieren.
- Bei den Vergleichsdaten muss es sich um quantitative Kennwerte mit einem individuellen Erwartungswert handeln. Wenn die Übereinstimmungsgenauigkeit nicht ausschließlich binär – die Erwartungswerte beider Systemabbildungen sind identisch oder nicht identisch – bewertet werden soll, sind für die zu untersuchende Systemabbildung Vertrauensbereiche und für das referenzierte Systemabbild Toleranzbereiche festzulegen.
- Die Zuweisung der neu eingeführten Validitätslabels ist abhängig von der Signifikanz der Abweichung zwischen den Simulationsergebnissen und den referenzierten Größen aus der Messung. Der adressierte Kernanwendungsbereich der Methode erfordert, gemäß der Ausführungen in Abschnitt 4.4.5, die Validitätsbewertung anhand diskreter Grenzwerte, wie sie auch im Signifikanztest Anwendung finden.

---

<sup>385</sup> Vgl. Unterkapitel 4.1 (Diversität der Anwendungsbereiche und Anforderungen an die Methode).

In Anwendungsbereichen, die sich z.B. durch eine größere Datengrundlage (d.h. größere Stichproben) auszeichnen und innerhalb derer Unsicherheiten und externe Einflüsse besser bekannt sind, sodass sie ihrerseits mittels Verteilungsfunktionen beschrieben werden können, ist auch eine kontinuierliche Validitätsbewertung möglich, die auf der Ähnlichkeitsbewertung zweier statistischer Verteilungen beruht und damit die Boolesche Logik, wie sie in dieser Arbeit angewendet wird, verlässt. Hierbei gilt es jedoch stets zu berücksichtigen, ob ein solches kontinuierliches Maß gegenüber der hier eingeführten diskreten Labelbewertung einen erhöhten Nutzen verspricht. Für den Zweck der Simulationsvalidierung scheint nach aktuellem Forschungsstand hierin kein Mehrwert vorzuliegen.

- Nutzen verspricht das neue Konzept, wenn die Vergleichsergebnisse eine längere Gültigkeitsdauer aufweisen. Das heißt, dass sie nach der Durchführung des Vergleichs noch für mehrere zukünftige Systemvarianten Gültigkeit haben. Würden sich die unterschiedlichen Systemvarianten beispielsweise zeitlich unvorhersehbar verändern, wären die statistischen Ergebnisse der Übereinstimmungsgenauigkeit nicht oder nur auf wenige zukünftige Systemvarianten übertragbar. Die fahrdynamischen Eigenschaften von Kraftfahrzeugen bzw. – allgemein betrachtet – Systemeigenschaften, die auf physikalischen Zusammenhängen basieren, unterliegen einer solchen Veränderung nicht, da sich die zugrundeliegenden physikalischen Effekte nicht verändern. Dies setzt jedoch voraus, dass für die Validierung Systemvarianten ohne z.B. alters- oder beschädigungsbedingte Veränderungen herangezogen werden.
- Zeichnen sich Systemvarianten durch unterschiedliche Strukturen aus, die durch veränderte Theorien oder Simulationsmodelle beschrieben werden müssen, ist die Übertragbarkeit der Vergleichsergebnisse zunächst zu hinterfragen und kritisch zu prüfen. Würde das Versuchsfahrzeug aus der Vertikaldynamikstudie beispielsweise mit einer Luftfeder anstatt der herkömmlichen Schraubenfeder ausgestattet, müssten die Progressivität der Federsteifigkeit und die thermischen Eigenschaftsänderungen der Luftfeder durch ein angepasstes Submodell innerhalb des Gesamtfahrzeugmodells abgebildet werden. In diesem Fall wäre zunächst – vorzugsweise mittels einer Sensitivitätsanalyse oder durch praktische Versuchsreihen – zu ermitteln, welchen Einfluss das Luftfedermodell auf die metrischen Validitätskriterien hat. Auf Basis der Ergebnisse kann entschieden werden, ob die Validierungsergebnisse, die ausschließlich auf Fahrzeugen mit Schraubenfedern basieren, trotzdem übertragbar sind, oder ob ergänzende Validierungsversuche notwendig sind.

Wenn in einer Anwendungsdomäne wiederkehrende Strukturänderungen, wie sie im letzten Punkt beschrieben sind, regulär auftreten, kann die Vergleichsmethode dennoch angewendet werden. Im Anwendungsbereich der Simulationsvalidierung ist dann so vorzugehen, dass Konfigurationsstichproben sowohl Parameter- als auch Submodellvariationen umfassen. Das statistische Validitätsmaß ist nun gleichzeitig für einen Parametrierungsbereich und unterschiedliche Modellvarianten gültig. Jedoch besteht hierbei die Möglichkeit, dass klare Sprünge in der statistischen Stichprobenvalidität für die Modellvarianten vorliegen, sodass ein gemitteltes Ge-

samtergebnis wenig Nutzen in der Praxis erbringt. In diesem Fall müsste die Validitätsbewertung wiederum nach den Modellvarianten aufgespalten werden, was letztlich einer Durchführung individueller Validierungsstudien für jede einzelne Modellvariante gleichkommt.

Prädestiniert erscheint die entwickelte Methode für den Vergleich von Theorien jeglicher Art, die quantitative Aussagen über ein Systemverhalten treffen und für den Vergleich technischer Systeme konstanter Struktur, wobei alle geläufigen Systemabbildungen, wie z.B. Messungen, Schätzungen, Berechnungen und Simulationen, infrage kommen und beliebig miteinander kombiniert werden können.

## 6.2.2 Validierungsmethode für die Fahrdynamik

Aus der Durchführung der Fahrdynamik-Validierungsstudien<sup>386</sup> gehen keine anwendungsspezifischen Probleme hervor, die aus der Adaption der Vergleichsmethode für die Simulationsvalidierung mit Messdaten als Referenz resultieren, so wie sie in den Unterkapiteln 4.2 bis 4.5 beschrieben ist.

Die beiden Studien liefern wichtige Erkenntnisse über anwendungsspezifische Besonderheiten und Herausforderungen, die insbesondere die Auslegung der Validierungsstudie und die Praktikabilität betreffen:

- Bei der Definition der Konfigurationsstichproben stehen die Kontrollierbarkeit der Datenvalidität und der Gültigkeitsbereich der Ergebnisse – d.h. die Anzahl der betrachteten Variationsparameter und ihre Verstellbereiche – in einem Zielkonflikt. Aus diesem resultiert die Entscheidung, ob Eigenschaftsänderungen an einem Basisfahrzeug vorgenommen werden oder ob unterschiedliche Fahrzeuge zum Einsatz kommen. Die Praktikabilität ist wiederum abhängig von der Komplexität des Messsystems und der Verfügbarkeit der Versuchsträger.
- Die Kontrollierbarkeit der Datengenauigkeit stellt sich als eine der größten Herausforderungen in der Fahrdynamikvalidierung heraus. Neben der Stichprobenkonfiguration betrifft dies auch die Reproduzierbarkeit der praktischen Versuche. Die Forderung eines hohen Vertrauensniveaus in Kombination mit vergleichsweise großen Kennwertstreuungen führt zu einer Reduktion der Trennschärfe und somit zu einer Signifikanzreduktion der Validierungsergebnisse, wie sie für einige metrische Validitätskriterien der Querdynamikstudie in Unterkapitel 5.2 zu beobachten ist. Eine bei gleicher Irrtumswahrscheinlichkeit genauere Schätzung des Erwartungswertes erfordert eine größere Anzahl von Versuchsdurchführungen, was wiederum in Konflikt zur Praktikabilität der Studie steht.
- Trotz maximaler Ausnutzung der Variationsbereiche auf Komponentenebene für den geforderten Gültigkeitsbereich der Studie ergeben sich sogar im Prüfstandsversuch in Unterkapitel 5.3 teilweise relativ geringe Variationen der metrischen Validitätskriterien (in

---

<sup>386</sup> Vgl. Kapitel 5 (Anwendbarkeitsanalyse in der Fahrdynamik).

diesem Fall z.B. der Aufbaueigenfrequenzen). In solchen Fällen gilt es, den Validierungsversuch und das metrische Validitätskriterium (MVC) zu hinterfragen:

- Gibt es einen alternativen Versuch, in dem das MVC eine höhere Sensitivität aufweist?
- Ist das MVC so robust, dass auch im kundenrelevanten Praxisbetrieb keine signifikanten Änderungen eintreten? In diesem Fall würde es sich um eine einfach beherrschbare, robuste Fahrzeugeigenschaft handeln, da sie eine geringe Abhängigkeit von den Lastfällen und der Fahrzeugauslegung aufweist.
- In den vorgestellten Validierungsstudien wird die Kontrollierbarkeit der Datenvalidität durch Parametervariationen an einem Fahrzeug zur Generierung der unterschiedlichen Fahrzeugkonfigurationen gewährleistet.<sup>387</sup> Die Konfidenzintervalle der Simulation, die stets kleiner ausfallen als die Toleranzintervalle um den Erwartungswert der Messung, resultieren ausschließlich aus den Variationen der Lastfallsignale, die aus den Realversuchen in die Simulationsumgebung überführt werden. Das heißt, dass von einer konstanten Parametrierungsgenauigkeit aller Fahrzeugkonfigurationen ausgegangen wird. Dies ist hier zulässig, da es sich stets um das gleiche Basisfahrzeug handelt und die Eigenschaftsänderungen präzise erfasst werden, um die Konfigurationsparametrierungen entsprechend anzupassen. Bei der Verwendung unterschiedlicher Fahrzeuge mit vollständig verschiedenen Parameterdatensätzen, kann die Annahme gleicher bzw. konstanter Datenvalidität unzulässig sein.

Klassen hat diesbezüglich eine Studie zur Erfassung der Parameterunsicherheiten innerhalb eines Fahrdynamiksimulationsmodells durchgeführt und hat die Sensitivitäten vertikal dynamischer Validitätskriterien in Bezug auf diese Unsicherheiten ermittelt.<sup>388</sup> Als Ergebnis liegen Informationen über die notwendige Vergrößerung der Vertrauensintervalle vor, die sich aus den Parametrierungsunsicherheiten ergeben. Zudem stellt die nach Effektstärke sortierte Parameterhierarchie eine wertvolle Information dar, die zur Optimierung des Parametrierungsprozesses genutzt werden kann.

## 6.3 Gesamtfazit zur neuen Validierungsmethode

Aufgrund der Erfüllung der methodenbezogenen Anforderungen<sup>389</sup> und der positiven Bewertung zur Anwendbarkeit des überarbeiteten Validierungsprozesses in den bereits durchgeführten Validierungsstudien erweist sich das neue Validierungskonzept als zielführend für die Erhöhung des Vertrauens in die Ergebnisse von Fahrdynamiksimulationen. In zukünftigen Anwendbarkeitsanalysen muss sich das Konzept jedoch weiter bewähren.

---

<sup>387</sup> Vgl. Abschnitt 5.1.1 (Versuchsfahrzeug und Fahrzeugkonfigurationen).

<sup>388</sup> Vgl. Klassen, C.: Einfluss der Modellparametrierung, 2018.

<sup>389</sup> Vgl. Unterkapitel 6.1 (Erfüllung der Konzeptanforderungen).

Die durchgeführten Studien im Entwicklungsprozess eines Automobilherstellers zeigen auf, dass die Art der Nachweisführung und die Effektivität, d.h. der Erkenntnisumfang, der aus den Studien hervorgeht, die Anforderungen an eine objektive Grundlage für den Abwägungsprozess, ob die Simulation ein verlässliches Untersuchungswerkzeug zur Bestimmung bestimmter Fahrzeugcharakteristika ist, erfüllen. Die Validierungsmethode reduziert durch strategische Ausrichtung und systematische sowie objektive Beweisführung effektiv das Misstrauen gegenüber Simulationsergebnissen, wenn die Validitätsmaße  $V_{\text{abs}}$  und  $V_{\text{rel}}$  eine hohe statistische Sicherheit für Stichprobenvalidität ausdrücken.

Trotz des Mehraufwands der statistischen Untersuchung gegenüber einfacher Vergleichsmessungen mit nur einer singulären Systemvariante hält sich – bedingt durch die gezielte Auswahl der Konfigurationsstichproben und die Versuchsplanoptimierung – der Aufwand auf einem praxistauglichen Niveau. Sofern die Validierungsergebnisse für mehrere Systemvarianten Gültigkeit aufweisen, zeichnet sich das neue Validierungskonzept auch durch eine erhöhte Effizienz gegenüber dem heute üblichen Vorgehen aus.

Die nähere Auseinandersetzung offenbart, dass sich die Validierungsmethode zu einer in weiten Bereichen anwendbaren Vergleichsmethode zweier Systemabbildungen abstrahieren lässt.

Aus der Bewertung und Diskussion der Ergebnisse folgt die Erkenntnis, dass das neue Validierungskonzept – in Verbindung mit dem hierfür angepassten Validierungsprozess – die eingangs formulierten Forschungsziele erfüllt und eine Lösung für die motivierende Problemstellung dieser Forschungsarbeit darstellt.

---

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Simulationsergebnisse erfahren in vielen Anwendungsbereichen – insbesondere auch in der Fahrdynamik – Misstrauen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der heutige Validitätsnachweis für Simulationen nicht zielführend ist und einer Optimierung bedarf.

Eine Analyse des aktuellen Forschungsstands offenbart ein typisches Validierungsvorgehen, das einer festen Prozessstruktur unterliegt. Aus der Ist-Stand-Analyse gehen die allgemeingültigen Stufen eines Validierungsprozesses sowie die Prozessabfolge des verbreiteten Validierungsansatzes hervor. Das Misstrauen gegenüber Simulationsergebnissen lässt sich auf Basis struktureller und systematischer Defizite, die diesem Prozess zugrunde liegen, erklären. Diese sind:

- Einzelne Stichprobenversuche mit jeweils einem Fahrzeug sind nicht geeignet, um Erkenntnisse über Prädiktionsfähigkeit und anwendungsbezogene Validität – losgelöst von einem singulären Fahrzeug – zu gewinnen.
- Der fehlende Anforderungsbezug hinterlässt beim Nutzer der Simulationsergebnisse offene Fragen bezüglich des Gültigkeitsbereichs der Validierungsergebnisse.
- Teilprozesse innerhalb der Validierung sind nicht klar miteinander verknüpft und führen zu mangelnder Nachvollziehbarkeit.
- Die kritische Auseinandersetzung mit dem Validierungsvorgehen und eine fachliche Beurteilung der Kennwerte fehlen in vielen Studien.
- Das Validierungsergebnis ist durch subjektive Entscheidungen stark vom Anwender geprägt und unterliegt in vielen Fällen keinen objektiven Kriterien.

Aus der ganzheitlichen Betrachtung, wann eine Validierungsstudie einen hohen Praxisnutzen verspricht, welche Defizite zu vermeiden bzw. zu kompensieren sind und was Validierungsstudien aus wissenschaftlicher Sicht leisten können, lassen sich Anforderungen an eine verbesserte Validierungsmethode ableiten, die fünf Aspekte betreffen:

1. Effektivitätssteigerung
2. Effizienzsteigerung
3. Erfüllung von Qualitätsmerkmalen zur Stärkung des Vertrauens und der Praxisrelevanz
4. Vermeidung von Falschaussagen
5. Ergebnisdarstellung

Durch eine Überarbeitung der Prozessstruktur, eine klare Definition essentieller Teilprozesse und die Objektivierung des Prozesses durch Auswahl, Adaption und Integration geeigneter Techniken können die Anforderungen erfüllt werden, wobei die Vermeidung von Falschaussagen nicht verifiziert werden kann, sondern lediglich umfassende Maßnahmen und Kontrollmechanismen eingeführt werden können. Zudem muss sich die Methode bezüglich der Anforderungen zur Praxisrelevanz und Ergebnisdarstellung in zukünftigen Validierungsstudien erst noch weiter bewähren.

Kern des neuen Validierungskonzepts ist die Durchführung einer anwendungs- und anforderungsbezogenen Validierungsstudie, die eine statistische Aussage über die Validität der simulationsbasierten Kennwertprädiktion ermöglicht. Hierzu werden einmalig Vergleichsdaten aus der Simulation und dem Realversuch für unterschiedliche Systemvarianten – in diesem Fall Fahrzeuge die sich in anwendungsrelevanten Eigenschaften unterscheiden – erhoben. Aus der statistischen Auswertung der Übereinstimmungsgenauigkeit von Simulation und Messung für diese Stichproben kann eine Wahrscheinlichkeit für Stichprobenvalidität berechnet werden. Stichprobenvalidität ist ein neu eingeführter Validitätsbegriff, der aussagt, dass sich die Simulation in Stichprobenversuchen bewährt, da ihre Gültigkeit für die untersuchten Stichproben nicht falsifiziert werden kann. Stichprobenvalidität kann im Gegensatz zu allgemeiner Validität verifiziert werden.

Die Auswahl der erforderlichen Konfigurationsstichproben – hier sind es Fahrzeugvarianten – erfolgt mittels Sensitivitätsanalysen, die basierend auf den Anforderungen an die Studie den Gültigkeitsbereich, d.h. den Parameterraum, und die Testanwendung inklusive der daraus hervorgehenden Ausgangsgrößen – auch als metrische Validitätskriterien bezeichnet – berücksichtigen. Für die Validierung sind Konfigurationsstichproben, also Arbeitspunkte des Simulationsmodells, auszuwählen, in denen die metrischen Validitätskriterien besonders sensitiv auf die Eigenschaftsvariationen des Systems reagieren, da hier die höchste Simulationsgenauigkeit gefordert ist. Bei Untersuchung dieser Arbeitspunkte weisen die statistischen Validitätskennwerte die höchste Aussagekraft bzw. Signifikanz auf.

Der Gesamtprozess wird durch weitere Objektivierungstechniken unterstützt, um eine möglichst anwenderunabhängige Bewertung der Simulationsgüte zu gewährleisten. Die Übereinstimmungsgenauigkeit von Messung und Simulation wird mit vier objektiv zugewiesenen Validitätslabels bewertet. Die Zuweisung basiert auf Boolescher Logik und erfolgt in analoger Weise zu statistischen Signifikanztests, wobei nicht binär, sondern über eine zusätzliche Zwischenstufe für Unsicherheit bezüglich Stichprobenvalidität, bewertet wird. Die Häufigkeit der Vergabe der unterschiedlichen Labels bestimmt über die Werte der beiden statistischen Validitätsmaße. Diese adressieren beide Anwendungsgebiete der Simulation.  $V_{abs}$  beschreibt die Wahrscheinlichkeit von Stichprobenvalidität für absolute Kennwertvorhersagen, während  $V_{rel}$  die Prädiktionsfähigkeit relativer Kennwertänderungen adressiert – d.h. eine Bewertung, wie gut die Simulation für die Durchführung von A-B-Vergleichen unterschiedlicher Systemvarianten geeignet ist.

Das Ergebnis der Validierungsstudie wird in Form von Validitätsbewertungskarten und eines Validitätsbewertungsberichts ausgegeben. In diesem sind alle relevanten Informationen zur Studie enthalten, wie z.B. organisatorische Angaben, Informationen zur Untersuchungsumgebung inklusive der Konfigurationsstichproben- und Testanwendungsbeschreibung, die statistische Validitätsbewertung, quantitative Informationen zur Genauigkeit der Vergleichsdaten und zum zulässigen Toleranzbereich sowie verschiedene Kontrollmechanismen, die Auskunft über die Gültigkeit und Signifikanz der Validierungsergebnisse geben.

Die Methode wird in quer- und vertikaldynamischen Validierungsstudien erfolgreich adaptiert und getestet. Der Prozess ist hier ohne domänenspezifische Adaptionen durchführbar. Als

größte Herausforderung stellt sich die Kontrollierbarkeit äußerer Einflüsse und der Datenvalidität heraus. Hierzu werden verschiedene Maßnahmen eingeführt, die helfen, eine möglichst hohe Reproduzierbarkeit der Versuche zu erreichen und damit die Streuung der Versuchsausgangsgrößen zu minimieren. Als wichtige Erkenntnis der Fahrdynamikstudien geht hervor, dass Konfigurationsstichproben, die sich in einem vergleichsweise kleinen Parameterraum bewegen, teilweise nur geringe Varianzen der metrischen Validitätskriterien im Vergleich zu deren Streuung, d.h. der Unsicherheit bei deren Erfassung, aufweisen. Dieser Zustand reduziert die Signifikanz der Validitätsaussage. Er ist jedoch nicht als Fehler bzw. Problem der neuen Validierungsmethode aufzufassen, sondern vielmehr eine domänenspezifische Eigenschaft. So ist beispielsweise kritisch zu hinterfragen, ob bestimmte Fahrwerksanpassungen tatsächlich kundenrelevante – d.h. im wahrsten Wortsinn erfahrbare – Eigenschaftsänderungen hervorrufen, ob diese in einem Unsicherheits- bzw. Streubereich verschwinden oder ob die praktischen Versuche, die die Referenzdaten für die Simulation liefern, schlichtweg zu ungenau sind. Die Praxisanwendung zeigt, dass das neue Validierungskonzept zusätzliche Erkenntnisse hervorbringt, die für den Entwicklungsprozess wertvolle Informationen über Unsicherheiten, Streuungen, systematische Fehler und Einflüsse nicht kontrollierbarer Faktoren darstellen und für Prozessoptimierungen genutzt werden können.

Die zur Validierung vorgestellte Methode stellt abstrahiert betrachtet eine objektive Vergleichsmethode für zwei unterschiedliche Systemabbildungen dar. Sie kann einerseits zur Validierung von Simulationen – insbesondere technischer Systeme – herangezogen werden, aber auch zum Vergleich von Theorien und anderen Systembeschreibungen, die quantitative Informationen über ein Systemverhalten bereitstellen.

Diese Forschungsarbeit stellt die Konzeptdefinition, den angepassten Validierungsprozess und Anwendungsanalysen mit einem vergleichsweise einfachen Simulationsmodell in der Fahrdynamik bereit. Hierdurch erfolgt eine erste positive Konzeptbewertung. Der Ausblick dieser Forschungsarbeit basiert auf ausstehenden Nachweisen und weiterführenden Forschungsfragen, die in der Prozessanwendung aufgekommen sind:

- Aus den bisherigen Validierungsstudien kann noch nicht auf eine Allgemeingültigkeit und uneingeschränkte Erfüllung aller Anforderungen geschlossen werden.<sup>390</sup> Deshalb gilt es, die Methode in weiteren Studien und Anwendungsdomänen zu testen und zu prüfen, ob sie sich auch dort uneingeschränkt bewährt.
- In den vorgestellten Validierungsstudien werden Regelsysteme außer Acht gelassen. Diese stellen, ebenso wie Fahrzeugkomponenten, Submodelle des Gesamtfahrzeugs dar und sind in analoger Weise zu betrachten.

Keune wendet in seiner Forschungsarbeit das neue Validierungskonzept bereits auf ein Mittelklassefahrzeug mit adaptiven Dämpfern an, dessen Eigenschaften ebenfalls auf dem Vierstempel-Vertikaldynamikprüfstand untersucht werden. Hierbei zeigt er, dass

---

<sup>390</sup> Vgl. Unterkapitel 6.1 (Erfüllung der Konzeptanforderungen).

die Methode auch für Validitätskriterien, die das Reglerverhalten für die Verstelldämpfer betreffen, geeignet ist.<sup>391</sup>

In modernen Fahrzeugen spielen mechatronische Systeme, die viele Closed-Loop-Effekte aufweisen, eine immer bedeutendere Rolle. Auch die Systemkomplexität nimmt stetig zu. Deshalb gilt es, die Validierung auf Subsystemebene näher zu untersuchen. Verschiedene Softwarevarianten und unterschiedlichste Systemausführungen können zu einer sehr großen Anzahl potenzieller Variationsparameter für den Validierungsprozess führen, was in einem Konflikt zur Praktikabilität und Effizienz der Methode resultieren kann. Ein möglicher Ansatz, um diese Komplexität zu beherrschen, ist die Validierung des Fahrzeugmodells ausgehend von den relevanten Schnittstellen – entsprechend des nachfolgenden Listenpunktes – und eine Validierung der mechatronischen Systeme, z.B. am Prüfstand. Ob diese Vorgehensweise praktikabel und legitim ist, um daraus auf die Validität des Gesamtsystems von Fahrzeug und mechatronischem System zu schließen, bedarf weiterer Forschung.

- Ein häufiger Anwendungszweck von Simulationsmodellen in der Fahrzeugentwicklung ist das Testen von Subsystemen im Gesamtfahrzeug. Beispiele hierfür sind verschiedene Bremssysteme oder Lenksysteme. Zur Entwicklung dieser Subsysteme benötigen die Fachabteilungen Fahrdynamikmodelle, die eine geeignete Schnittstelle liefern, um den Einfluss unterschiedlicher Subsystemvarianten auf die fahrdynamischen Eigenschaften des Gesamtfahrzeugs untersuchen zu können. Hierzu ist ein Gesamtfahrzeugmodell erforderlich, das für die Übertragungsstrecke zwischen den Schnittstellen zum Subsystem und den fahrdynamischen Ausgangsgrößen stichprobenvalid ist. Es ist zu erwarten, dass die Validierungsmethode für diesen Anwendungszweck geeignet ist. Eine Verifikation in Form einer konkreten Anwendung steht jedoch aus. Als Herausforderung kann sich die Kontrollierbarkeit der Schnittstellengrößen herausstellen, die im praktischen Versuch mit Sensoren erfasst werden müssen.
- In vielen potenziellen Anwendungsbereichen werden die Systemmodelle auf Submodellebene verändert, z.B. weil eine Systemkomponente nach einem anderen physikalischen Prinzip funktioniert. Für diesen Fall stellt sich die Frage, inwiefern bestehende statistische Validierungsergebnisse hierfür gültig sind und welche zusätzlichen Nachweise ggf. erbracht werden müssen. Offensichtlich ist zur Beantwortung dieser Frage die Sensitivität der Simulationsausgangsgrößen auf diese Systemänderungen zu bewerten.
- Ähnlich zum vorherigen Listenpunkt ist bei einer Erweiterung der Anforderungen, z.B. bezüglich des Parameterbereichs oder der Testanwendungen, die Frage zu beantworten, ob zusätzliche Arbeitspunkte der Simulation zu testen sind. Durch die beliebige Erweiterbarkeit der Validitätsbewertungskarten können die Versuchsergebnisse zusätzlicher Konfigurationsstichproben sehr einfach in eine Aktualisierung der Validitätsbewertung eingebunden werden.

---

<sup>391</sup> Vgl. Keune, A.: Anwendung eines neuen Validierungskonzepts, 2018, S. 32 ff.

- Die Optimierung der Testanwendungen für den Zweck der Validierung gilt es weiter zu erforschen. Derzeit kann noch keine abgesicherte Aussage darüber getroffen werden, ob standardisierte Testverfahren der Fahrdynamik tatsächlich die effektivsten und effizientesten Testanwendungen für die Validierung von Fahrdynamiksimulationen sind. Die Aspekte der betriebspunktabhängigen Fahrzeugeigenschaften und der notwendigen Robustheit der Kennwerterfassung werden in der vorliegenden Arbeit zwar kritisch hinterfragt und bei der Versuchsauslegung bereits berücksichtigt. Jedoch weisen die Versuchs- und Betriebspunktauswahl für den Zweck der Validierung noch Potenzial für eine stärkere Bindung an die Anforderungen, die an die Validierungsstudie gestellt werden, auf. Eine optimale Testanwendung zeichnet sich aus durch ...
  - hohe Sensitivität der Versuchsausgangsgrößen bzw. der metrischen Validitätskriterien (MVC) auf die kontrollierbaren Versuchsparameter (z.B. Geschwindigkeit oder Bahnradius), ...
  - hohe Sensitivität der Versuchsausgangsgrößen bzw. MVC auf die kontrollierbaren Systemeigenschaften (z.B. Fahrzeugparameter) in den gewählten Arbeitspunkten, ...
  - geringe Sensitivität der Versuchsausgangsgrößen auf nicht kontrollierbare Versuchseinflüsse (z.B. Reibbeiwert), ...
  - Robustheit der Kennwertidentifikation (d.h. geringe Streubereiche), ...
  - Abdeckung möglichst vieler, relevanter (Anforderungsbezug!) Betriebspunkte, ...
  - Durchführbarkeit mit den gegebenen Ressourcen.

Diese Vielzahl von Anforderungen zeigt auf, dass die Testanwendungen selbst einer Optimierung unterliegen sollten. Die Entwicklung eines solchen Verfahrens bedarf in Zukunft weiterer Forschung.

Zuletzt sei das Eingangszitat dieser Arbeit von Albert Einstein nochmal aufgegriffen:

*„Mache die Dinge so einfach wie möglich – aber nicht einfacher.“*

Dieses Zitat benennt die Motivation für die Verwendung von Modellen und für die Anwendung von Simulationen äußerst präzise. Das für seinen Anwendungszweck beste Modell liegt dann vor, wenn es seine Validitätsanforderungen genau trifft und diese somit weder über- noch unterschreitet. Denn genau dann erreicht die Simulation ihre höchste Effizienz. Der Stand der Forschung und die Praxis zeigen, dass eine derartige Ausrichtung des Modells auf den individuellen Anwendungszweck aus Komplexitätsgründen und wegen der Einhaltung gewisser Standards im industriellen Anwendungsfeld häufig nicht möglich ist, sodass nicht immer die höchste Modelleffizienz erzielt wird. Aber mit der in dieser Arbeit vorgestellten Validierungsmethode steht ein Verfahren bereit, das seinerseits effektiv und effizient nachweisen kann, dass das Modell für seinen Anwendungszweck nicht zu einfach, d.h. nicht invalide, und damit nützlich ist. Damit leistet das neue Validierungskonzept einen entscheidenden Beitrag für einen effektiveren Einsatz von Simulationen in vielen technischen Bereichen und äquivalenten Anwendungsdomänen.

# A Anhang

## A.1 Validierungsprozess

### A.1.1 Leitfragen der Anforderungsdefinition

**ANFORDERUNGSDEFINITION** für die Simulationsvalidierung

---

**1. Globale Hauptanforderungen**

**a. Simulationszweck**

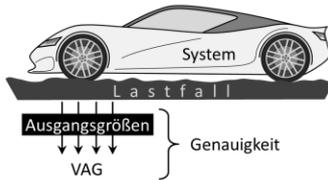
- Was sind die objektiven, messbaren Ausgangsgrößen (VAG) der zu simulierenden Anwendung?
- Welche Erkenntnisse sollen aus der Simulation gewonnen werden?

**b. Lastfall**

- Bestehen Vorgaben an die Testanwendung?
- Gibt es Einschränkungen bezüglich relevanter Betriebspunkte, in denen das System zu untersuchen ist?
- Unter welchen einschränkenden Rahmenbedingungen (z.B. äußere Einflüsse) müssen die Systemeigenschaften untersucht werden?

**c. Genauigkeit**

- Welche jeweilige absolute und/oder relative Genauigkeit wird von den definierten Ausgangsgrößen erwartet?
- Wie werden die Simulationsergebnisse weiterverwendet? Ergibt sich hieraus eine erforderliche Trennschärfe bzw. Auflösung der Ausgangsgrößen?



---

**2. Subsystem- und Zusatzanforderungen (optional)**

**a. Systemdekomposition**

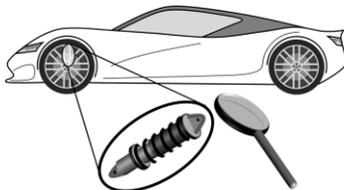
- Welche Subsystemeigenschaften (z.B. bezogen auf Komponenten oder Übertragungsstrecken) nehmen Einfluss auf die Hauptanforderungen?
- Welche optionalen Ausgangsgrößen sollen in der Validierung berücksichtigt werden?

**b. Schnittstellen zur lokalen Modellbewertung**

- Welche Schnittstellen charakterisieren die Subsysteme?
- Welche Wirkzusammenhänge bestehen zwischen unterschiedlichen Zustandsgrößen des Systems?

**c. Erweiterte Eigenschaften**

- Welche Eigenschaften und Ausgangsgrößen, die nicht unmittelbar die globalen Hauptanforderungen betreffen, sollen zusätzlich untersucht werden?
- Welche Genauigkeit wird für diese erweiterten Eigenschaften vorausgesetzt?



---

**3. Absicherungsanforderungen**

**a. Konfigurationsstichproben**

- Für welche Systemvarianten muss die Validierungsstudie aussagekräftig sein?
- Für welchen Parameterbereich soll die Validierungsstudie Gültigkeit aufweisen?

**b. Absicherungsgrad**

- Wie viele unterschiedliche Konfigurationsstichproben sollen / können untersucht werden?
- In welcher Auflösung bzw. Granularität sollen die Parametervariationen erfolgen?

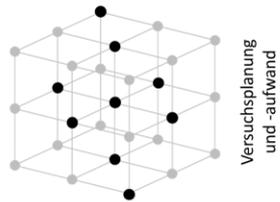


Abbildung A.1-1: Fragenkatalog zur Anforderungsdefinition<sup>392</sup>

<sup>392</sup> Vgl. Viehof, M. et al.: Validierungskonzept für die Vertikaldynamik, 2017, S. 154.

## A.1.2 Beispiel für die Komprimierung mittels Gewichtungsfunktionen

In Abbildung A.1-2 wird die Gewichtungsfunktion<sup>393</sup> aus Diagramm (b) auf ein zeitbezogenes Testsignal in Diagramm (a), dem eine Störung in Form einer höherfrequenten Schwingung aufgeprägt ist, angewendet. Das Beispiel demonstriert in Diagramm (a) den Vorteil der Gewichtung über einen Zeitraum von 2 s, um den Funktionswert bei der Absolutzeit 5 s zu ermitteln. Während der gewichtete Kennwert das Streuband robust in der Mitte trifft, besteht bei der Abtastung des Signals zum Zeitpunkt 5 s eine sehr große Unsicherheit, da der Signalwert schon bei einer Toleranz von 0,1 s um absolut 0,5 bzw. relativ um ca. 50 % variiert.

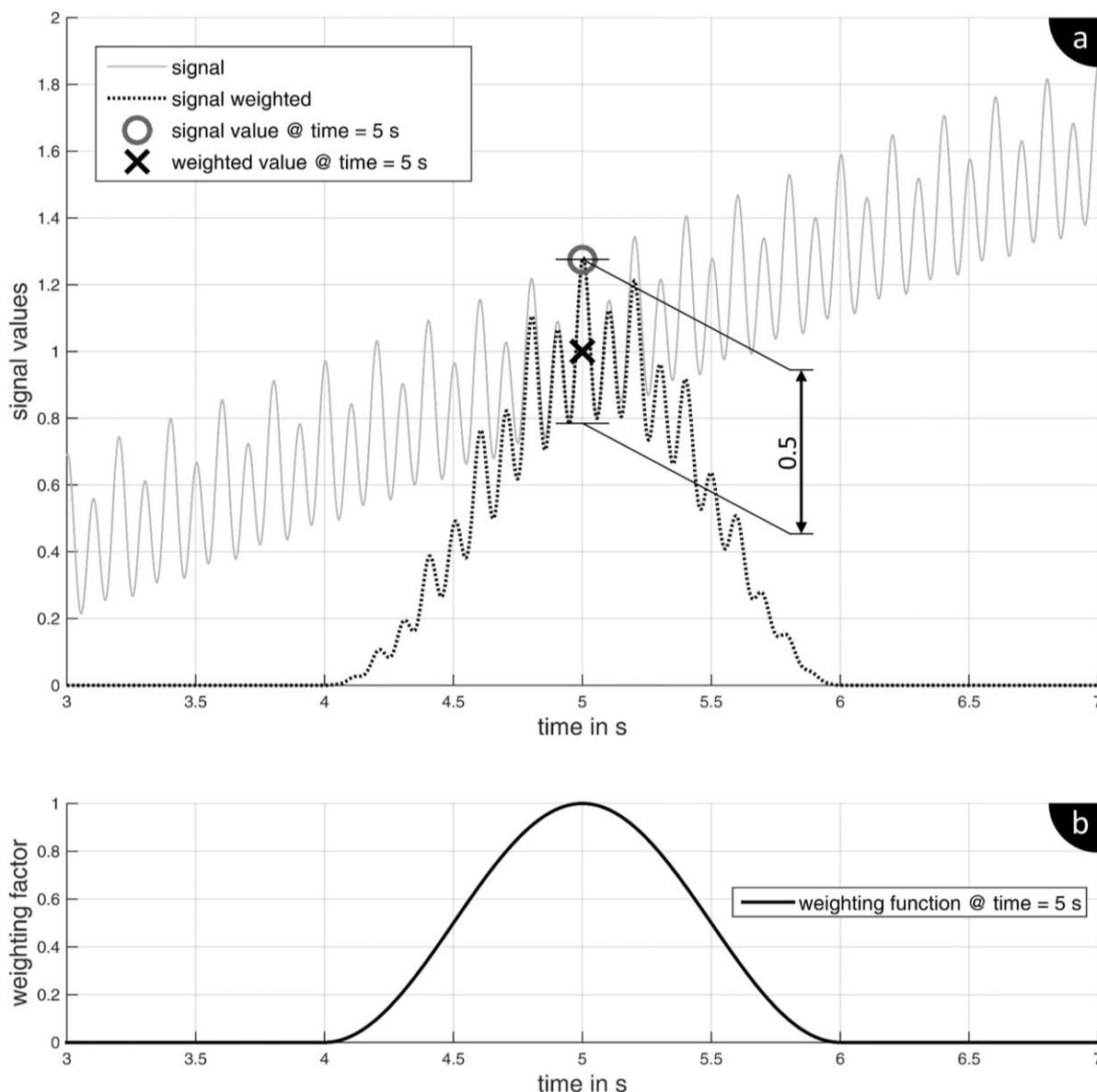


Abbildung A.1-2: Beispiel für die Kennwertkomprimierung mittels Gewichtungsfunktion

<sup>393</sup> Vgl. Abschnitt 4.4.2.1 (Metrische Validitätskriterien).

### A.1.3 Beispiel für die Sensitivitätsanalysetechnik eFAST

Nachfolgend wird das Prinzip der Sensitivitätsanalyse (SA) für das Verfahren eFAST anhand eines Beispiels erläutert. Betrachtet wird das folgende mathematische Modell mit der Ausgangsgröße  $y$  und den vier Variationsparametern  $x_i$ , die auch als Faktoren<sup>394</sup> bezeichnet werden:

$$y(x_i) = x_1 + x_2 + x_1 \cdot x_2 + 2 \cdot x_3 + x_4 \quad \text{mit } x_i \in [-1 \dots 1] \quad (\text{A.1-1})$$

Jedem Variationsparameter wird eine Änderungsfrequenz  $\omega$  zugewiesen. Diese gibt an, wie schnell der Parameter sinusförmig innerhalb seines Wertebereichs über der SA-Versuchsanzahl variiert und ist deshalb einheitslos. Im betrachteten Beispiel werden eine hohe ( $\omega_{\text{high}} = 6$ ) und eine niedrige ( $\omega_{\text{low}} = 1$ ) Grundfrequenz bzw. Faktorfrequenz unterschieden. Die Sensitivitätsanalyse basiert hier auf  $N_S = 15$  SA-Stichprobenversuchen. Abbildung A.1-3 zeigt die Stichprobendefinition und verdeutlicht, dass die Anwendung von eFAST eine kontinuierliche Parametervariation voraussetzt, was eine Umsetzung in der Praxis meist ausschließt.<sup>395</sup> Die Kurven, anhand derer die Werte der Variationsparameter festgelegt werden, werden auch als Suchkurven im Parameterraum bezeichnet. Für eine aussagekräftige globale Sensitivitätsanalyse ist es wichtig, dass der Parameterraum durch die Suchkurven möglichst vollständig und gleichmäßig abgedeckt wird.<sup>396</sup>

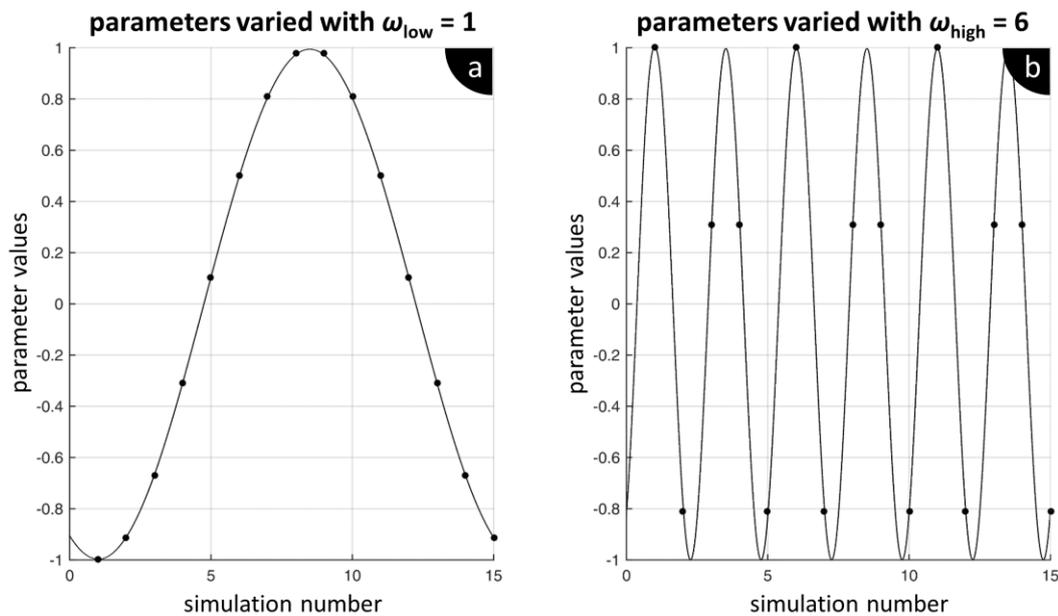


Abbildung A.1-3: eFAST-Beispiel – Stichprobendefinition

<sup>394</sup> Vgl. Kleppmann, W.: Versuchsplanung, 2016, S. 14 / Siebertz, K. et al.: Statistische Versuchsplanung, 2010, S. 6.

<sup>395</sup> Vgl. Niemann, H.: Eignungsanalyse eines Vierstempelprüfstands für die Validierung, 2017, S. 22 ff.

<sup>396</sup> Vgl. Saltelli, A. et al.: A Method for Global Sensitivity Analysis, 1999, S. 43 f / Sippel, M.: Vergleich unterschiedlicher Validierungsstrategien, 2016, S. 26 ff.

Nach der Festlegung der  $N_S$  SA-Stichproben wird das Modell mit jedem dieser SA-Parametersätze ausgeführt. „Die zu analysierende Ausgangsvariable  $y$  zeigt dabei je nach der Abhängigkeit von den verschiedenen Faktoren unterschiedlich starke periodische Oszillationen bei den gewählten Frequenzen [...]  $[\omega_i]$ . Bei einer starken Abhängigkeit zwischen dem Faktor [...]  $[x_i]$  und  $y$  würde somit eine Frequenzanalyse [in Form einer Fast-Fourier-Transformation (FFT)] der Ausgangsvariable  $y$  eine stärkere Amplitude bei der [zugewiesenen] Frequenz [...]  $[\omega_i]$  und deren harmonischen Schwingungen aufweisen als bei Frequenzen unwichtiger Faktoren.“<sup>397</sup> Dies ist das Prinzip des FAST zur Ermittlung der Haupteffekte. Die Technik eFAST erweitert den Erkenntnisgewinn um die zusätzliche Identifikation von Interaktions- und Total-effekten.<sup>398</sup> Parameterinteraktionen zeigen sich im Amplitudenfrequenzspektrum bei den Linearkombinationen (Summen und Differenzen) der zugewiesenen Frequenzen.<sup>399</sup> Prinzipiell könnte jedem Faktor eine eigene Variationsfrequenz zugewiesen werden. Die Herausforderung dabei ist jedoch, sicherzustellen, dass die zugewiesenen Faktorfrequenzen und deren ersten Harmonische nicht identisch mit den Linearkombinationen dieser Grundfrequenzen sind, da bei Überlagerung eine Trennung der beiden Effekttypen in der Auswertung nicht mehr möglich ist. Derartige Interferenzen sind schon bei einer relativ geringen Anzahl von Variationsparametern kaum noch zu verhindern, wenn gleichzeitig die Frequenzen niedrig gehalten werden sollen.<sup>400</sup> Letzteres ist ein zweites Auslegungsziel, da die höchste zugewiesene Faktorfrequenz entsprechend des Shannonschen Abtasttheorems – auch als Nyquist-Theorem bezeichnet – über die Anzahl der Abtastpunkte je Parameterkurve, d.h. über die Versuchsanzahl, entscheidet.<sup>401</sup> Unter der Voraussetzung, dass jeder SA-Variationsparameter eine individuelle Frequenz  $\omega_i$  besitzt, berechnet sich die Mindestanzahl  $N_S$  an Versuchen für die Sensitivitätsanalyse aus der höchsten zugewiesenen Faktorfrequenz  $\omega_{\max}$ , der Anzahl der Suchkurven  $N_r$  und dem Interferenzfaktor  $M$ , der die Anzahl der Harmonischen angibt, die für die Berechnung der Effekte herangezogen werden sollen:<sup>402</sup>

$$N_S = (2 \cdot M \cdot \omega_{\max} + 1) \cdot N_r \quad (\text{A.1-2})$$

Aus den genannten Gründen haben Saltelli et al. die Frequenzzuweisung des eFAST vereinfacht, um auch mit einer größeren Anzahl von Variationsparametern die Sensitivitätsanalyse

<sup>397</sup> Siebertz, K. et al.: Statistische Versuchsplanung, 2010, S. 256.

<sup>398</sup> Die Summe des Haupt- und Interaktionseffekts wird als Totaleffekt bezeichnet.

<sup>399</sup> Vgl. Siebertz, K. et al.: Statistische Versuchsplanung, 2010, S. 256 / Saltelli, A. et al.: A Method for Global Sensitivity Analysis, 1999, S. 45 f / Niemann, H.: Eignungsanalyse eines Vierstempelprüfstands für die Validierung, 2017, S. 19 f.

<sup>400</sup> Vgl. Niemann, H.: Eignungsanalyse eines Vierstempelprüfstands für die Validierung, 2017, S. 19 / Saltelli, A. et al.: A Method for Global Sensitivity Analysis, 1999, S. 45 ff.

<sup>401</sup> Das Abtasttheorem von C.E. Shannon lautet: „Ein kontinuierliches Signal der Bandbreite  $B$  kann aus seiner abgetasteten Version (Abtastfrequenz  $f_A$ ) nur dann fehlerfrei rekonstruiert werden, wenn  $f_A > 2B$  ist.“ (Meyer, M.: Signalverarbeitung, 2014, S. 159).

<sup>402</sup> Vgl. Saltelli, A. et al.: A Method for Global Sensitivity Analysis, 1999, S. 44.

effizient durchführen zu können. Abbildung A.1-4 verdeutlicht für die oben aufgeführte Modellgleichung A.1-1 wie die Effekte nach dieser Methode bestimmt werden. Die Diagramme (a) bis (d) zeigen die Simulationsergebnisse und in den Diagrammen (e) bis (h) werden die Ergebnisse der FFT angezeigt. Das letzte Diagramm (i) weist jedem Faktor seine Effekte zu, die unmittelbar aus den Amplitudenfrequenzgängen resultieren. Die Vereinfachung beruht darauf, dass für die Faktoren lediglich zwei unterschiedliche Grundfrequenzen definiert werden, eine hohe (im Beispiel:  $\omega_{\text{high}} = 6$ ) und eine niedrige Frequenz (im Beispiel:  $\omega_{\text{low}} = 1$ ). Die  $N_S$  Simulationen pro Suchkurve werden bei  $n$  Variationsparametern nun  $n$ -mal durchgeführt, wobei jedem Faktor einmalig die hohe Frequenz und allen anderen Faktoren die gleiche niedrige Grundfrequenz zugewiesen wird.<sup>403a</sup> Die Anzahl  $C$  der Simulationen für die gesamte Sensitivitätsanalyse wird von Saltelli et al. als Kosten<sup>404</sup> bezeichnet und berechnet sich für diese Art der Frequenzzuweisung zu:<sup>403b</sup>

$$C = n \cdot N_S \quad (\text{A.1-3})$$

Hiermit ist es zwar bei vielfachen Interaktionen nicht mehr möglich, zu analysieren, welcher Faktor mit welchem anderen Variationsparameter wie stark interagiert, aber für jeden Faktor wird identifiziert, wie stark er in Summe mit allen anderen in Interaktion steht. Diese Information ist in den Diagrammen (e) bis (h) der Abbildung A.1-4 in den Amplituden bei den Frequenzen  $\omega = 5$  und  $\omega = 7$  enthalten<sup>405</sup> und ist insbesondere für den Zweck der Auslegung von Konfigurationsstichproben des Validierungsprozesses vollkommen ausreichend. Der Vorteil dieser Frequenzzuweisung ist, dass auch bei vielen Variationsparametern die Anzahl der Abtastpunkte und damit die Versuchsanzahl vergleichsweise gering gehalten werden kann.

---

<sup>403</sup> Vgl. Saltelli, A. et al.: A Method for Global Sensitivity Analysis, 1999, (a) S. 45 f | (b) S. 46.

<sup>404</sup> Englische Bezeichnung: computational cost (C).

<sup>405</sup> Dies sind die Linearkombinationen der Grundfrequenzen  $\omega_{\text{low}} = 1$  und  $\omega_{\text{high}} = 6$ .

Model description:  $y(x_i) = x_1 + x_2 + x_1 \cdot x_2 + 2 \cdot x_3 + x_4$  mit  $x_i \in [-1 \dots 1]$

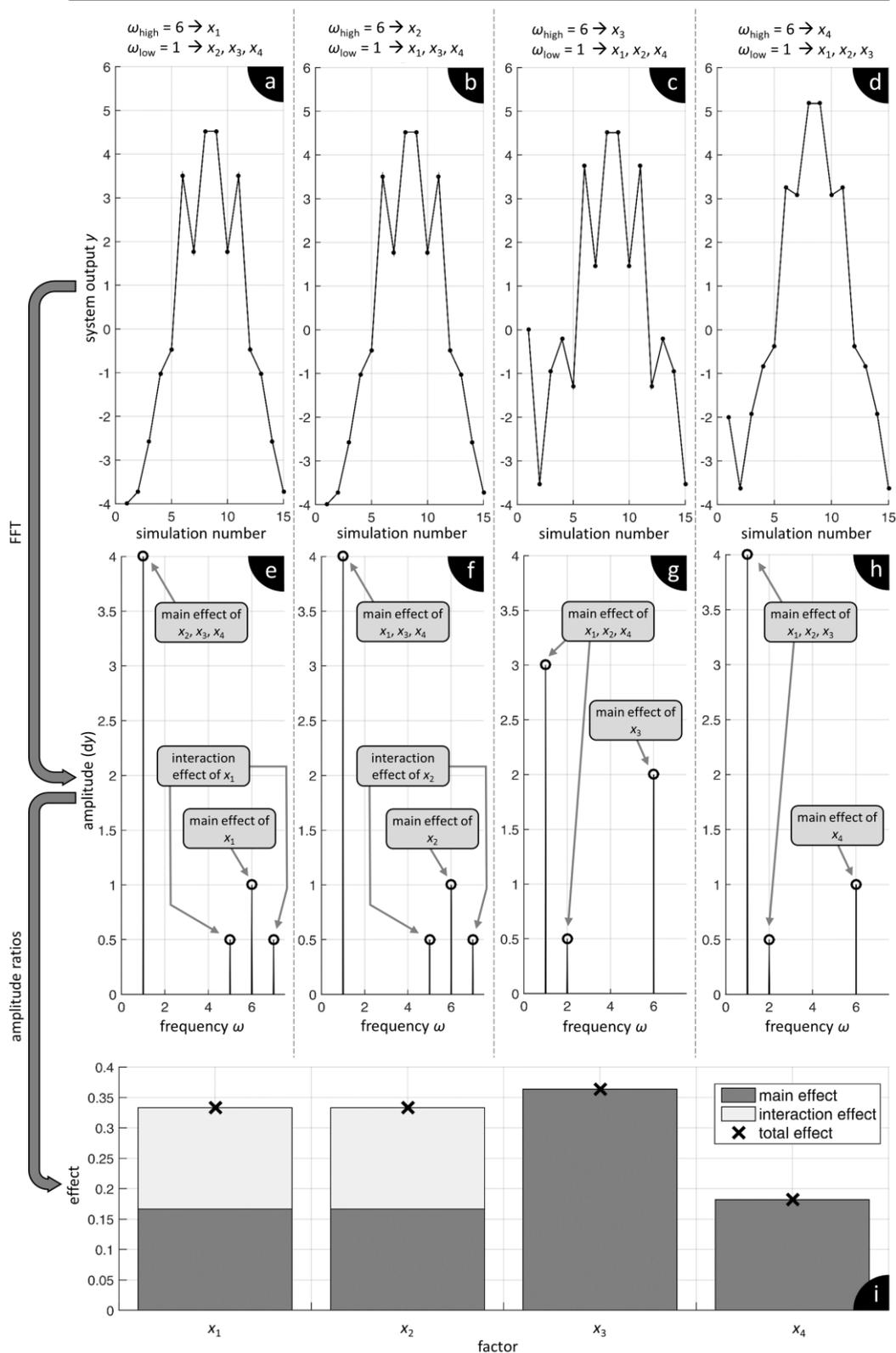


Abbildung A.1-4: eFAST-Beispiel – Ermittlung der Effekte<sup>406</sup>

<sup>406</sup> Der Effekt ist der auf die Gesamtvariation der Ausgangsgröße  $y$  normierte Anteil des jeweiligen Faktors  $x_i$ .

Die Auslegungskriterien des eFAST betreffen die Frequenzzuweisung<sup>407a</sup> sowie die Art und die Anzahl der Parameterkurven, worauf nachfolgend kurz eingegangen wird:

- Die ermittelten Sensitivitäten bzw. Effekte werden maßgeblich von den Verstellbereichen der Faktoren beeinflusst. Deshalb ist im Voraus genau zu überlegen, wie der relevante Faktorraum definiert ist.
- Saltelli et al. erklären, dass dreieckförmige Suchkurven den Parameterraum gleichmäßiger durchdringen als sinusförmige Kurven.<sup>408</sup> „Im Gegenzug sind Falschinterpretationen möglich, da bei der Fourier-Transformation nicht nur die Grundfrequenz, sondern auch ungerade Oberwellen entstehen, die insbesondere bei Überdeckung mit den Grundfrequenzen anderer Parameter deren Sensitivitätsaussage verfälschen.“<sup>409</sup> Vergleiche zeigen, dass dreieckförmige Parameterkurven eine höhere Anzahl von Abtastpunkten als sinusförmige Suchkurven erfordern, um die gleiche Ergebnisgenauigkeit zu erzielen.
- Die Durchdringung des Parameterraums kann verbessert werden, indem mehrere Suchkurven untersucht werden, die mit unterschiedlichen Phasenwinkeln beginnen und damit eine andere Lage im Parameterraum aufweisen.<sup>407b</sup> Zudem verbessert sich die Durchdringung, wenn den Suchkurven linear unabhängige Frequenzen zugewiesen werden.<sup>410</sup> Auf diese Weise wird vermieden, dass sich Parameterkombinationen wiederholen, wie es in der beispielhaften Suchkurve in Abbildung A.1-3 der Fall ist. Innerhalb der 15 Stichproben wiederholen sich dort sieben Parameterkombinationen, sodass statt 15 lediglich acht unterschiedliche Simulationen durchgeführt werden müssen. Sippel stellt fest, dass ab einer relativ geringen Anzahl  $N_S$  von Abtastpunkten je Suchkurve eine Erhöhung von  $N_S$  keine Genauigkeitssteigerung der Effekte bewirkt und sich die Effizienz des Verfahrens – also das Verhältnis aus Ergebnisgenauigkeit und Versuchsaufwand – damit sogar reduziert. An diesem Sättigungspunkt können jedoch durch Erhöhung der Suchkurvenanzahl  $N_r$  die Genauigkeit und Effizienz meist noch erhöht werden.<sup>411</sup> Deshalb wird in jedem Fall empfohlen, mit  $N_r > 1$  Suchkurven zu arbeiten.

Wohlrab hat in seiner Forschungsarbeit einen auf unterschiedlichen Suchkurven basierenden Qualitätsindikator für die SA-Effekte eingeführt. Für jede der  $N_r$  Suchkurven wird eine eigene Auswertung vorgenommen. Das bedeutet, dass aus jeder Suchkurve die Effekte der einzelnen Faktoren hervorgehen. Das Gesamtergebnis ergibt sich dann aus der Mittelung der Effekte und unter Angabe des Streubereichs der Totaleffekte.<sup>412</sup> Desto geringer dieser Streubereich ist, desto höher ist das Vertrauen in das SA-Ergebnis, da einerseits eine hohe Reproduzierbarkeit und

---

<sup>407</sup> Vgl. Saltelli, A. et al.: A Method for Global Sensitivity Analysis, 1999, (a) S. 45 ff | (b) S. 43 f.

<sup>408</sup> Saltelli, A. et al.: A Method for Global Sensitivity Analysis, 1999, S. 43.

<sup>409</sup> Viehof, M. et al.: Objektivierungspotenzial der operativen Validierung, 2016, S. 428.

<sup>410</sup> Vgl. Siebertz, K. et al.: Statistische Versuchsplanung, 2010, S. 256 / Saltelli, A. et al.: A Method for Global Sensitivity Analysis, 1999, S. 55.

<sup>411</sup> Vgl. Sippel, M.: Vergleich unterschiedlicher Validierungsstrategien, 2016, S. 39 f.

<sup>412</sup> Vgl. Wohlrab, S.: Einflussanalyse von Parametervariationen am Fahrzeug, 2016, S. 47 f.

damit Repräsentativität nachgewiesen wurde. Andererseits spricht ein geringer Streubereich für ein robustes Systemverhalten in den unterschiedlichen Arbeitspunkten, die von den einzelnen Suchkurven abgedeckt werden. Der Qualitätsindikator ist auch in Abbildung 5-5, die ein Ergebnis aus der Querdynamik-Validierungsstudie zeigt, dargestellt.

### A.1.4 Werte für den $t$ -Faktor

Tabelle A.1-1:  $t$ -Faktor in Abhängigkeit der Versuchsanzahl und des Vertrauensniveaus<sup>413</sup>

Anzahl $n$ der Versuche bzw. Werte	$t$ -Faktor nach Vertrauensniveau $\gamma$		
	$\gamma = 68,3 \%$	$\gamma = 95 \%$	$\gamma = 99 \%$
2	1,84	12,71	63,66
3	1,32	4,30	9,93
4	1,20	3,18	5,84
5	1,15	2,78	4,60
⋮	⋮	⋮	⋮
8	1,08	2,37	3,50
⋮	⋮	⋮	⋮
10	1,06	2,26	3,25
⋮	⋮	⋮	⋮
15	1,04	2,14	2,98
⋮	⋮	⋮	⋮
20	1,03	2,09	2,86
⋮	⋮	⋮	⋮
30	1,02	2,05	2,76
⋮	⋮	⋮	⋮
50	1,01	2,01	2,68
⋮	⋮	⋮	⋮
100	1,00	1,98	2,63
⋮	⋮	⋮	⋮
$\infty$	1,00	1,96	2,58

<sup>413</sup> Vgl. Papula, L.: Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler, 2016, S. 672.

### A.1.5 Übersicht zum $t$ -Test

Nachfolgend wird der  $t$ -Test am Beispiel zweier empirischer Stichproben aus dem Realversuch und aus der Simulation für ein metrisches Validitätskriterium (MVC) erläutert.

Der im Fokus stehende Stichprobenkennwert des  $t$ -Tests ist die Differenz  $\Delta\overline{MVC}$  der beiden Stichprobenmittelwerte  $\overline{MVC}_M$  (aus der Messung) und  $\overline{MVC}_S$  (aus der Simulation):<sup>414</sup>

$$\Delta\overline{MVC} = \overline{MVC}_M - \overline{MVC}_S \quad (\text{A.1-4})$$

Um der Simulation Stichprobenvalidität attestieren zu können, ist es erforderlich, nachzuweisen, dass eine Differenz der Mittelwerte zufällig zustande gekommen ist und somit unter Berücksichtigung des Signifikanzniveaus kein bedeutender Unterschied zwischen den beiden normalverteilten Stichproben existiert. In diesem Fall gilt die Nullhypothese  $H_0$ , die postuliert, dass keine Mittelwertsdifferenz vorliegt, als erfüllt:<sup>415</sup>

$$H_0 : \Delta\overline{MVC} = 0 \quad (\text{A.1-5})$$

Die Alternativhypothese  $H_1$  lautet:<sup>415</sup>

$$H_1 : \Delta\overline{MVC} \neq 0 \quad (\text{A.1-6})$$

Es gilt, stets die Irrtumswahrscheinlichkeit zu berücksichtigen. Das Signifikanzniveau  $\alpha$  „ist die Wahrscheinlichkeit dafür, dass die Nullhypothese  $H_0$  abgelehnt wird, obwohl sie richtig ist (sog. Fehler 1. Art [...]) und heißt daher auch Irrtumswahrscheinlichkeit.“<sup>416</sup>

Im Folgenden wird die  $t$ -Verteilung eingeführt, die als Entscheidungsgrundlage dient.

*„Für die Bewertung der Auftretenswahrscheinlichkeit einer empirisch gefundenen Differenz ist ein standardisiertes Maß für eine Mittelwertsdifferenz sehr hilfreich. [...] Die Standardisierung der Stichprobenkennwertverteilung erfolgt [...] an ihrer geschätzten Streuung. Die standardisierten Stichprobenkennwerte heißen  $t$ -Werte, die standardisierten Verteilungen sind die  $t$ -Verteilungen (im Englischen auch »Student's  $t$ -distribution« genannt). Sie entsprechen nicht ganz der Standardnormalverteilung, sondern sind schmalgipfliger [vgl. Abbildung A.1-5]. Das liegt daran, dass die Form einer  $t$ -Verteilung von der Stichprobengröße bzw. den Freiheitsgraden der Verteilung abhängig ist [...]. In einer  $t$ -Verteilung ist die Wahrscheinlichkeit für die einzelnen  $t$ -Werte genau ablesbar.“<sup>417</sup>*

Wenn der  $t$ -Test – wie hier – als Nullhypothesensignifikanztest angewendet wird, berechnet sich die Testvariable aus der Mittelwertsdifferenz  $\Delta\overline{MVC}$  und ihrem geschätzten Standardfehler  $s_{\Delta\overline{MVC}}$  gemäß Formel 4.17:<sup>418</sup>

<sup>414</sup> Vgl. Rasch, B. et al.: Quantitative Methoden, 2014, S. 34.

<sup>415</sup> Vgl. Papula, L.: Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler, 2016, S. 565.

<sup>416</sup> Papula, L.: Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler, 2016, S. 546.

<sup>417</sup> Rasch, B. et al.: Quantitative Methoden, 2014, S. 38.

<sup>418</sup> Vgl. Rasch, B. et al.: Quantitative Methoden, 2014, S. 38 / Papula, L.: Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler, 2016, S. 564.

$$t_{df} = \frac{\overline{\Delta MVC}}{s_{\Delta MVC}} = \frac{\overline{\Delta MVC}}{\sqrt{\frac{s_{MVC_M}^2}{n_{TE,M}} + \frac{s_{MVC_S}^2}{n_{TE,S}}}} \quad (\text{A.1-7})$$

Die Form der  $t$ -Verteilung ist abhängig vom Stichprobenumfang  $n_{TE}$ . Sie verläuft grundsätzlich flacher als die Standardnormalverteilung, sodass eine konservative Bewertung vorgenommen wird. Das heißt, dass die Quantile bei betragsmäßig größeren Werten liegen. Je größer die Stichprobenanzahl  $n_{CS}$  ist, desto stärker nähert sich die  $t$ -Verteilung der Standardnormalverteilung an.<sup>419</sup> Welche  $t$ -Verteilung für den jeweiligen Fall heranzuziehen ist, wird durch den Freiheitsgrad  $df$  bestimmt, der von den beiden Stichprobenumfängen der Messung ( $n_{TE,M}$ ) und der Simulation ( $n_{TE,S}$ ) abhängig ist. Da im neuen Validierungskonzept stets genauso viele Simulationen wie Messungen durchgeführt werden, gilt:<sup>420</sup>

$$df = n_{TE,M} + n_{TE,S} - 2 = 2n_{TE} - 2 \quad (\text{A.1-8})$$

Dieser Freiheitsgrad ist für die Bestimmung des kritischen  $t$ -Werts entscheidend:

*„Je flacher die  $t$ -Verteilung, desto größer wird also die Auftretenswahrscheinlichkeit eines bestimmten  $t$ -Werts. Auf der praktischen Ebene ist deshalb unter Annahme der Nullhypothese eine bestimmte empirische Mittelwertsdifferenz bei großen Stichproben unwahrscheinlicher als bei kleinen Stichproben. Für die Bestimmung der Wahrscheinlichkeit eines gefundenen  $t$ -Werts müssen [...] erst die Freiheitsgrade berechnet werden, um damit die richtige Fläche unter der Kurve zu erhalten.“<sup>421</sup>*

Der kritische  $t$ -Wert, anhand dessen über die Annahme von  $H_0$  entschieden wird, folgt aus der Bedingung:<sup>422</sup>

$$P(-t_{\text{crit}} \leq t_{df} \leq t_{\text{crit}})_{H_0} = 1 - \alpha \quad (\text{A.1-9})$$

Die beschriebenen Zusammenhänge sind in Abbildung A.1-5 zusammengefasst.

<sup>419</sup> Vgl. Abschnitt 4.4.3.1 (Versuchsplanung und Versuchsplanoptimierung) / Rasch, B. et al.: Quantitative Methoden, 2014, S. 39.

<sup>420</sup> Vgl. Rasch, B. et al.: Quantitative Methoden, 2014, S. 39.

<sup>421</sup> Rasch, B. et al.: Quantitative Methoden, 2014, S. 39.

<sup>422</sup> Vgl. Papula, L.: Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler, 2016, S. 565.

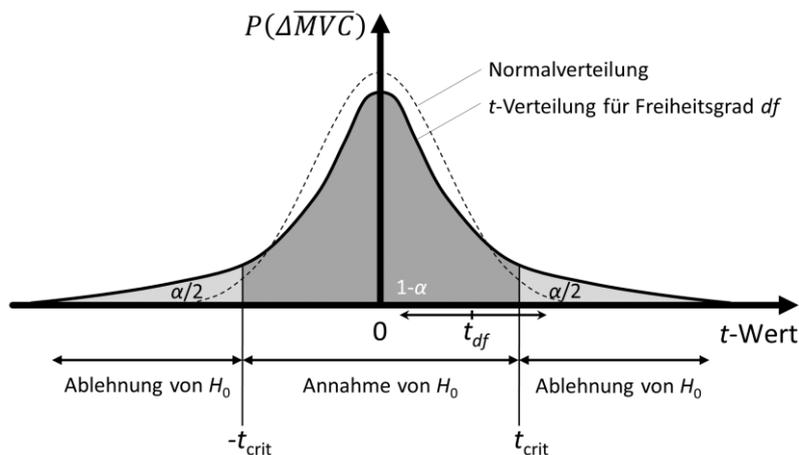


Abbildung A.1-5: Entscheidungsfindung im  $t$ -Test<sup>423</sup>

Analog zum  $t$ -Faktor in Abschnitt 4.4.3.1 kann das Quantil  $t_{\text{crit}}$  in Abhängigkeit des Freiheitsgrades  $df$  und des Signifikanzniveaus  $\alpha$  aus Tabellen<sup>424</sup> entnommen werden. Die Nullhypothese  $H_0$  wird bei Erfüllung der Bedingung  $-t_{\text{crit}} \leq t_{df} \leq t_{\text{crit}}$  nicht abgelehnt. In Analogie zur Validierung<sup>425</sup> kann die Hypothese nicht verifiziert werden, da stets die Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha$  besteht. Der neu eingeführte Begriff der Stichprobenvalidität<sup>426</sup> wäre hier auch anwendbar.

<sup>423</sup> Eigene Darstellung in Anlehnung an Papula, L.: *Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler*, 2016, S. 566 / Rasch, B. et al.: *Quantitative Methoden*, 2014, S. 39 ff.

<sup>424</sup> Vgl. Papula, L.: *Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler*, 2016, S. 748 / Rasch, B. et al.: *Quantitative Methoden*, 2014, S. 139.

<sup>425</sup> Vgl. Abschnitt 2.1.2 (Wissenschaftsphilosophische Betrachtung).

<sup>426</sup> Vgl. Unterkapitel 4.2 (Validierungskonzept).

### A.1.6 Erstellung einer kumulativen Verteilungsfunktion

Abbildung A.1-6 gibt Aufschluss über die Erzeugung einer kumulativen Verteilungsfunktion.

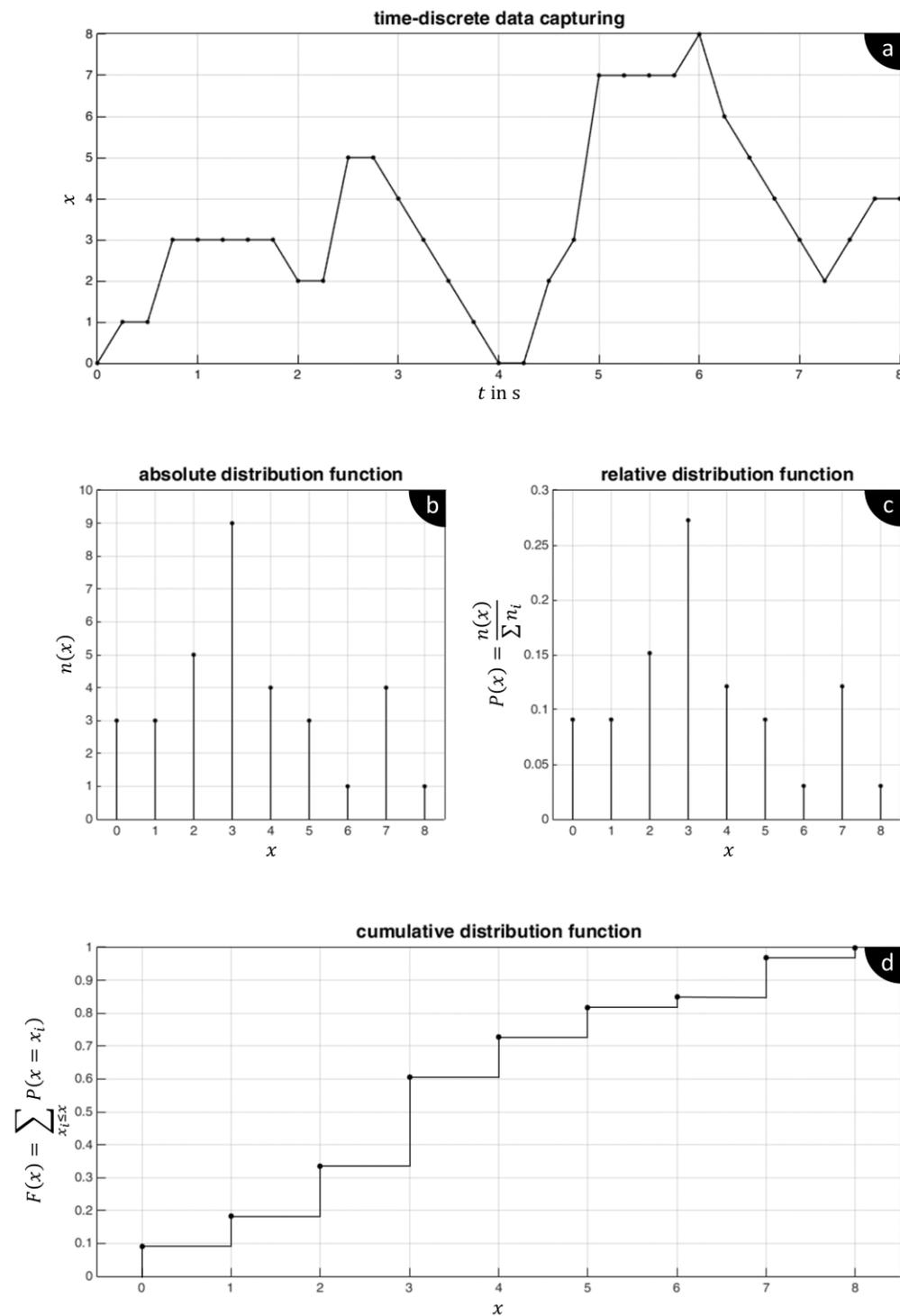


Abbildung A.1-6: Erzeugung einer CDF aus einem zeitdiskreten Messsignal

Die Diagramme (a) bis (d) werden nachfolgend beschrieben:<sup>427</sup>

- a. Das Testsignal  $x = f(t)$  weist eine konstante Abtastrate von 4 Hz auf. Bei variabler Abtastrate müssten zunächst eine Interpolation des Signals und eine anschließende Abtastung mit konstanter Schrittweite vorgenommen werden.
- b. Im nächsten Schritt wird der äquidistante Zeitstempel verworfen und nur noch der Signalvektor betrachtet. Für jeden Signalwert  $x_i$  wird die Häufigkeit seines Auftretens  $n(x_i)$  bestimmt.
- c. Die Verteilungs- bzw. relative Häufigkeitsfunktion  $P(x)$  resultiert aus dem Bezug der absoluten Häufigkeit  $n(x)$  auf die Gesamtanzahl der Signalwerte.
- d. Die CDF  $F(x)$  ist die kumulative Summe von  $P(x)$  und wird deshalb auch Summenhäufigkeitsfunktion genannt. Über dem Wertebereich des Signals  $x$  steigt sie von 0 auf 1 monoton an. Für diskrete Signale wie hier ist sie stufenförmig.

### A.1.7 Fehleridentifikation mittels kumulativer Verteilungsfunktionen

Dass sich die drei relevanten Fehlertypen innerhalb der Versuchsdatenvalidierung, die zu Beginn von Abschnitt 4.4.5.1 beschrieben werden, mit einem CDF-Vergleich identifizieren lassen, demonstrieren die drei nachfolgenden Abbildungen A.1-7 bis A.1-9, in denen jeweils der Einfluss eines Fehlertyps auf die CDF untersucht wird.

In allen drei Abbildungen ist die Systembeobachtung in Diagramm (c) in Abhängigkeit vom Lastfall (a) und der Systemeigenschaft (b), die gleichzeitig auch die Parametrierung des Simulationsmodells widerspiegelt, dargestellt. Aus der Systembeobachtung wird jeweils die CDF berechnet, die in Diagramm (d) dargestellt ist. In Abbildung A.1-7 und in Abbildung A.1-8 werden der Lastfall bzw. die Systemeigenschaft variiert, während die Datenerfassung als fehlerfrei angenommen wird. Abbildung A.1-9 zeigt, in welcher Form sich unterschiedliche Datenerfassungsfehler (c) auf die CDF auswirken. Unterliegt das Systemverhalten einer Zeitvarianz, wirkt sich diese in ähnlicher Form aus, wie das gezeigte Beispiel für die Sensorsignaldrift.

---

<sup>427</sup> Vgl. Papula, L.: Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler, 2016, S. 474 ff.

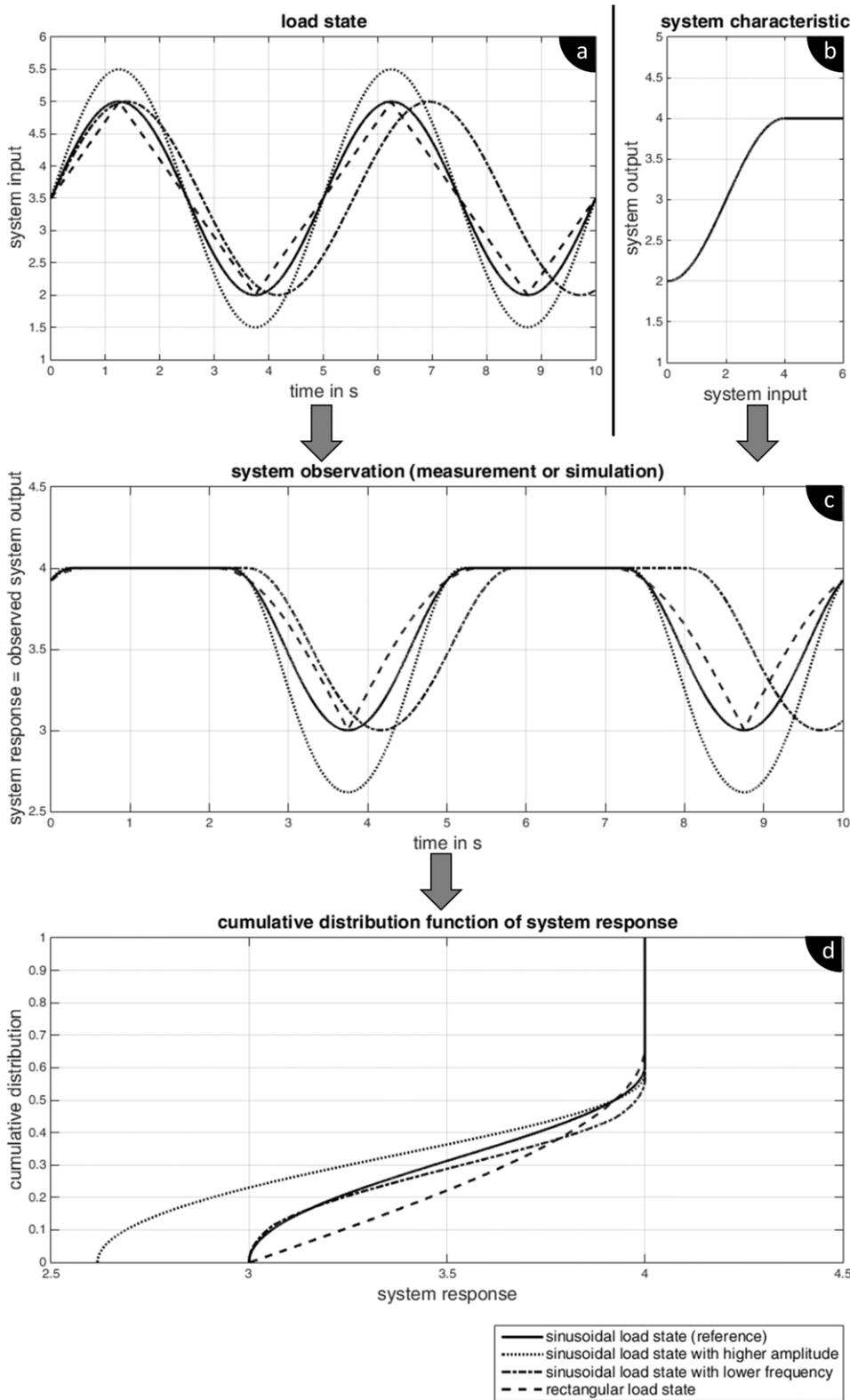


Abbildung A.1-7: Versuchsdatenvalidierung – Auswirkung fehlerhafter Lastfallübertragung

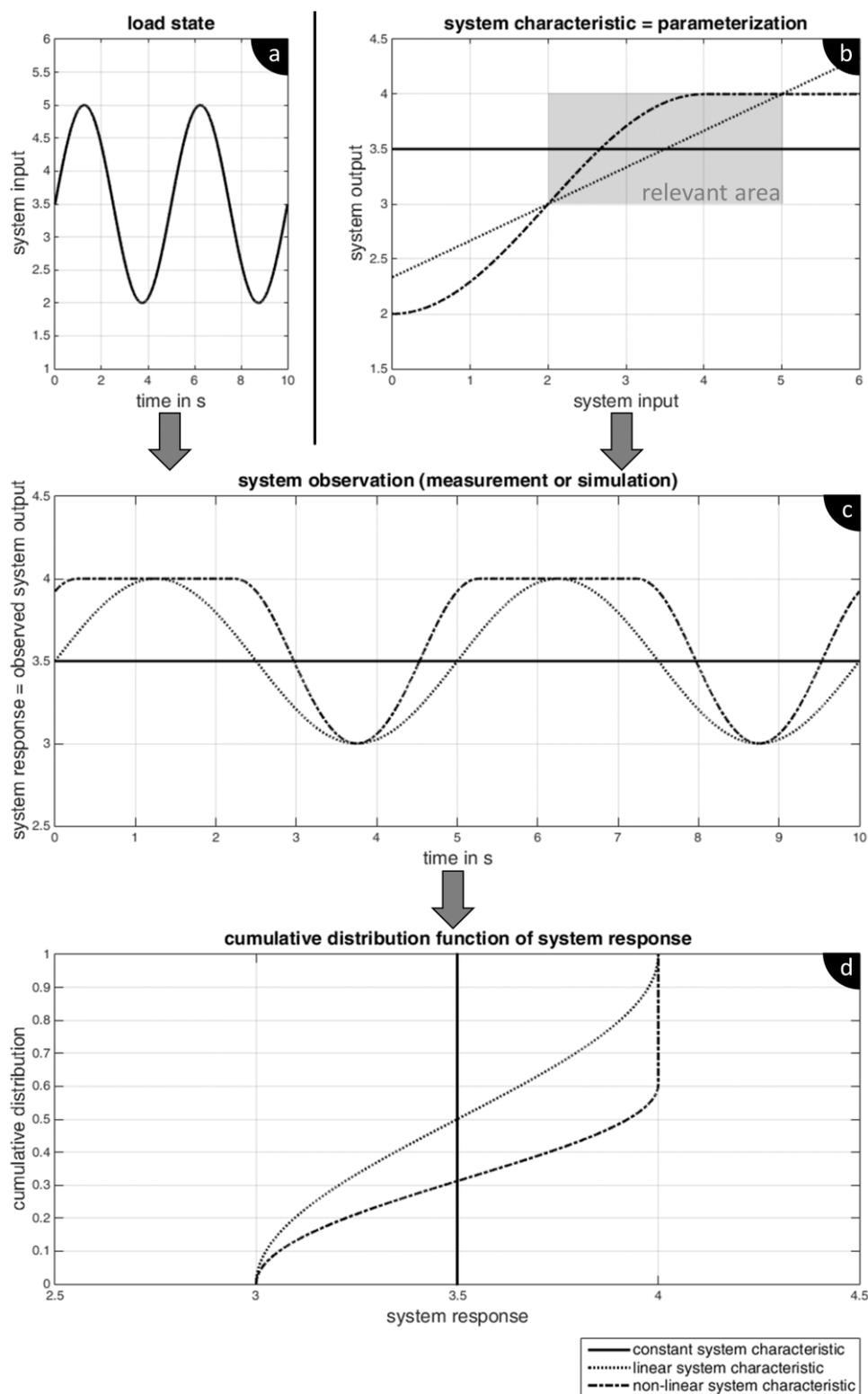


Abbildung A.1-8: Versuchsdatenvalidierung – Auswirkung fehlerhafter Modellparametrierung

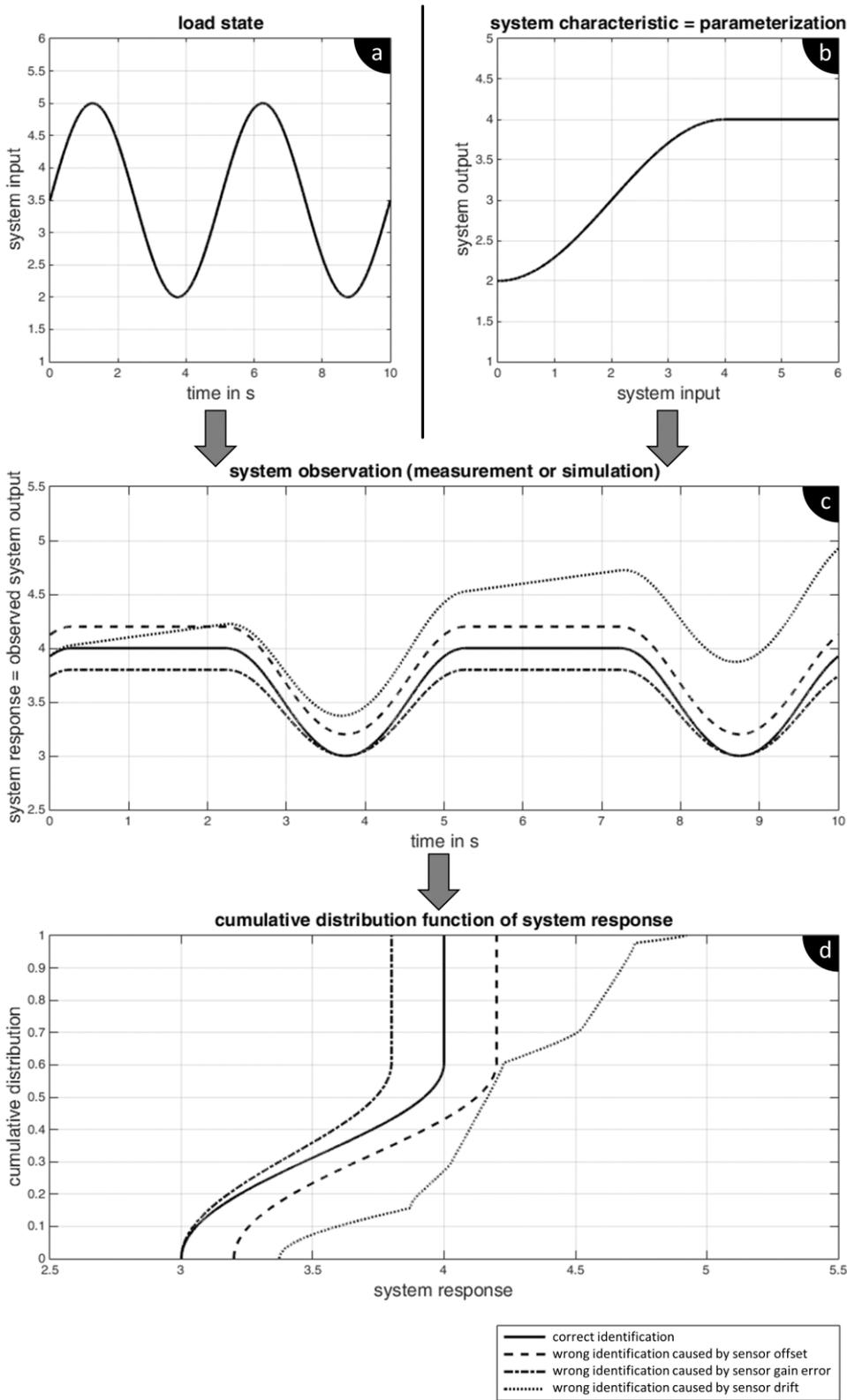


Abbildung A.1-9: Versuchsdatenvalidierung – Auswirkung fehlerhafter Datenerfassung

## A.2 Versuchsfahrzeug

### A.2.1 Verschaltung der Messtechnik

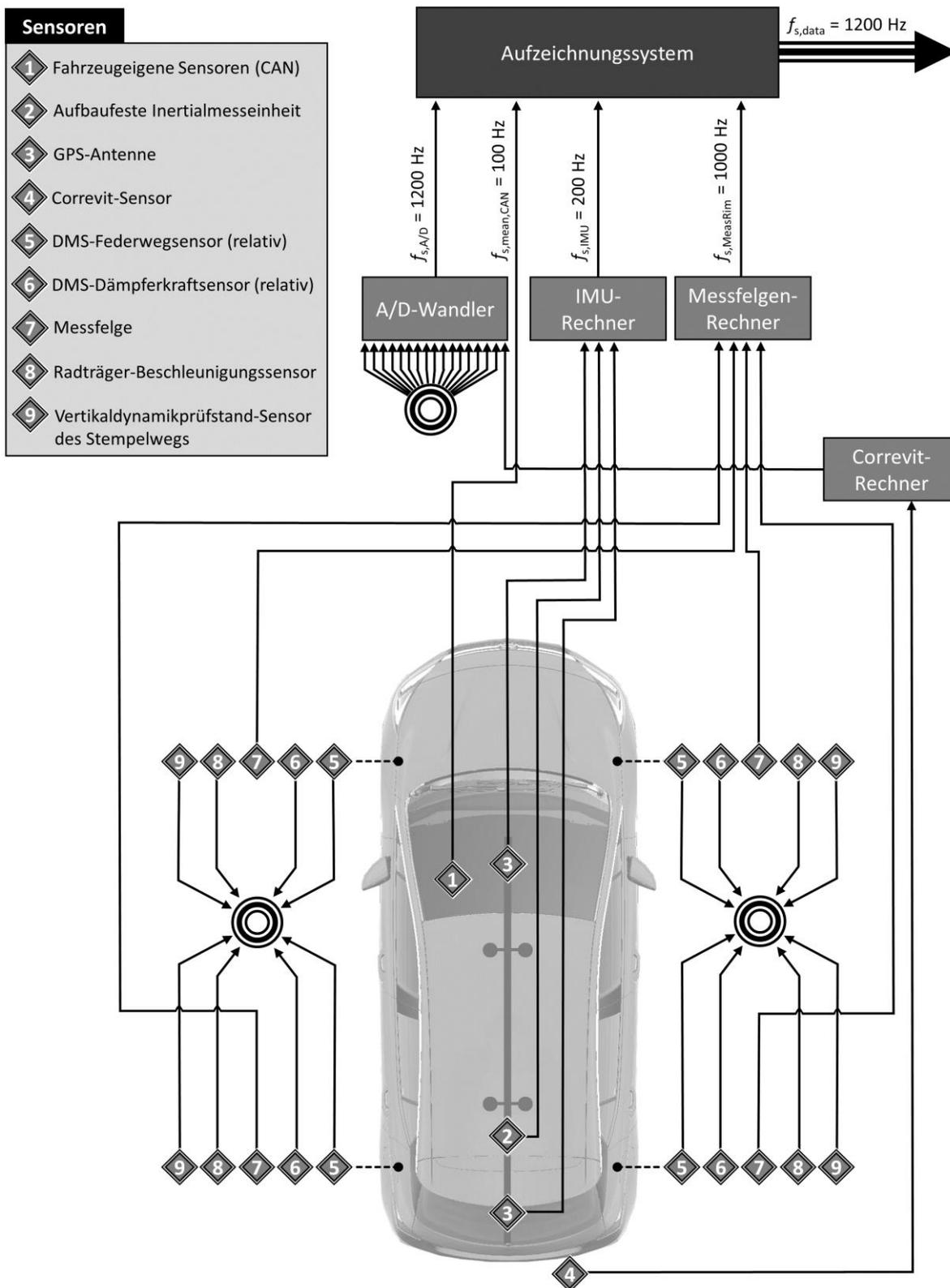


Abbildung A.2-1: Verschaltung der Messtechnik

## A.2.2 Übersicht der Messgrößen

Tabelle A.2-1: Messgrößen

Signal-Nr.	Gruppe	Signal	Einheit
1	Fahrzeug-CAN	Geschwindigkeit	m/s
2	Fahrzeug-CAN	Längsbeschleunigung	m/s <sup>2</sup>
3	Fahrzeug-CAN	Längsbeschleunigung	m/s <sup>2</sup>
4	Fahrzeug-CAN	Querbeschleunigung	m/s <sup>2</sup>
5	Fahrzeug-CAN	Querbeschleunigung	m/s <sup>2</sup>
6	Fahrzeug-CAN	Lenkradwinkel	rad
7	Fahrzeug-CAN	Lenkradmoment	Nm
8	Fahrzeug-CAN	Gaspedalposition	%
9	Fahrzeug-CAN	Bremspedalposition	%
10	Fahrzeug-CAN	Bremspedalbetätigungsgeschwindigkeit	%/s
11	Fahrzeug-CAN	Gang-Nummer	-
12	Fahrzeug-CAN	Radgeschwindigkeit vl	m/s
13	Fahrzeug-CAN	Radgeschwindigkeit vr	m/s
14	Fahrzeug-CAN	Radgeschwindigkeit hl	m/s
15	Fahrzeug-CAN	Radgeschwindigkeit hr	m/s
16	Fahrzeug-CAN	Gierrate	rad/s
17	Fahrzeug-CAN	Motordrehzahl	1/min
18	Fahrzeug-CAN	Motormoment	Nm
19	Fahrzeug-CAN	gefordertes Antriebsmoment	Nm
20	Fahrzeug-CAN	Bremsdruck (HBZ)	Pa
21	Aufbaubewegungssensor	Geschwindigkeit	m/s
22	Aufbaubewegungssensor	Längsbeschleunigung	m/s <sup>2</sup>
23	Aufbaubewegungssensor	Querbeschleunigung	m/s <sup>2</sup>
24	Aufbaubewegungssensor	Vertikalbeschleunigung	m/s <sup>2</sup>
25	Aufbaubewegungssensor	Nickrate	rad/s
26	Aufbaubewegungssensor	Wankrate	rad/s
27	Aufbaubewegungssensor	Gierrate	rad/s
28	Aufbaubewegungssensor	Breitengrad	-
29	Aufbaubewegungssensor	Längengrad	-
30	Aufbaubewegungssensor	Anzahl Satelliten	-
31	Aufbaubewegungssensor	Schwimmwinkel	rad
32	Aufbaubewegungssensor	Uhrzeit	s
33	Federwegsensoren	Federwegänderung vl	m
34	Federwegsensoren	Federwegänderung vr	m
35	Federwegsensoren	Federwegänderung hl	m
36	Federwegsensoren	Federwegänderung hr	m
37	Dämpferkraftsensoren	Kolbenstangenkraft vl	N
38	Dämpferkraftsensoren	Kolbenstangenkraft vr	N
39	Dämpferkraftsensoren	Kolbenstangenkraft hl	N
40	Dämpferkraftsensoren	Kolbenstangenkraft hr	N
41	Dämpferkraftsensoren	Anschlagpufferkraft vl	N
42	Dämpferkraftsensoren	Anschlagpufferkraft vr	N
43	Dämpferkraftsensoren	Anschlagpufferkraft hl	N
44	Dämpferkraftsensoren	Anschlagpufferkraft hr	N
45	Radträgersensoren	Radträgerbeschleunigung längs vl	m/s <sup>2</sup>
46	Radträgersensoren	Radträgerbeschleunigung quer vl	m/s <sup>2</sup>
47	Radträgersensoren	Radträgerbeschleunigung vertikal vl	m/s <sup>2</sup>

Signal-Nr.	Gruppe	Signal	Einheit
48	Radträgersensoren	Radträgerbeschleunigung längs vr	m/s <sup>2</sup>
49	Radträgersensoren	Radträgerbeschleunigung quer vr	m/s <sup>2</sup>
50	Radträgersensoren	Radträgerbeschleunigung vertikal vr	m/s <sup>2</sup>
51	Radträgersensoren	Radträgerbeschleunigung längs hl	m/s <sup>2</sup>
52	Radträgersensoren	Radträgerbeschleunigung quer hl	m/s <sup>2</sup>
53	Radträgersensoren	Radträgerbeschleunigung vertikal hl	m/s <sup>2</sup>
54	Radträgersensoren	Radträgerbeschleunigung längs hr	m/s <sup>2</sup>
55	Radträgersensoren	Radträgerbeschleunigung quer hr	m/s <sup>2</sup>
56	Radträgersensoren	Radträgerbeschleunigung vertikal hr	m/s <sup>2</sup>
57	Correvit	Längsgeschwindigkeit (Sensor)	m/s
58	Correvit	Quergeschwindigkeit (Sensor)	m/s
61	Messfelgen	Radnabekraft $F_x$ vl	N
62	Messfelgen	Radnabekraft $F_y$ vl	N
63	Messfelgen	Radnabekraft $F_z$ vl	N
64	Messfelgen	Radnabemoment $M_x$ vl	Nm
65	Messfelgen	Radnabemoment $M_y$ vl	Nm
66	Messfelgen	Radnabemoment $M_z$ vl	Nm
67	Messfelgen	Radrotationswinkel vl	rad
68	Messfelgen	Radrotationswinkelgeschwindigkeit vl	rad/s
69	Messfelgen	Radnabekraft $F_x$ vr	N
70	Messfelgen	Radnabekraft $F_y$ vr	N
71	Messfelgen	Radnabekraft $F_z$ vr	N
72	Messfelgen	Radnabemoment $M_x$ vr	Nm
73	Messfelgen	Radnabemoment $M_y$ vr	Nm
74	Messfelgen	Radnabemoment $M_z$ vr	Nm
75	Messfelgen	Radrotationswinkel vr	rad
76	Messfelgen	Radrotationswinkelgeschwindigkeit vr	rad/s
77	Messfelgen	Radnabekraft $F_x$ hl	N
78	Messfelgen	Radnabekraft $F_y$ hl	N
79	Messfelgen	Radnabekraft $F_z$ hl	N
80	Messfelgen	Radnabemoment $M_x$ hl	Nm
81	Messfelgen	Radnabemoment $M_y$ hl	Nm
82	Messfelgen	Radnabemoment $M_z$ hl	Nm
83	Messfelgen	Radrotationswinkel hl	rad
84	Messfelgen	Radrotationswinkelgeschwindigkeit hl	rad/s
85	Messfelgen	Radnabekraft $F_x$ hr	N
86	Messfelgen	Radnabekraft $F_y$ hr	N
87	Messfelgen	Radnabekraft $F_z$ hr	N
88	Messfelgen	Radnabemoment $M_x$ hr	Nm
89	Messfelgen	Radnabemoment $M_y$ hr	Nm
90	Messfelgen	Radnabemoment $M_z$ hr	Nm
91	Messfelgen	Radrotationswinkel hr	rad
92	Messfelgen	Radrotationswinkelgeschwindigkeit hr	rad/s
93	Vierstempelprüfstand	Stempelhöhe hr	m
94	Vierstempelprüfstand	Stempelhöhe vr	m
95	Vierstempelprüfstand	Stempelhöhe vl	m
96	Vierstempelprüfstand	Stempelhöhe hl	m

## A.3 Validierungsstudien

### A.3.1 Struktur der Sensitivitätsanalyse-Umgebung

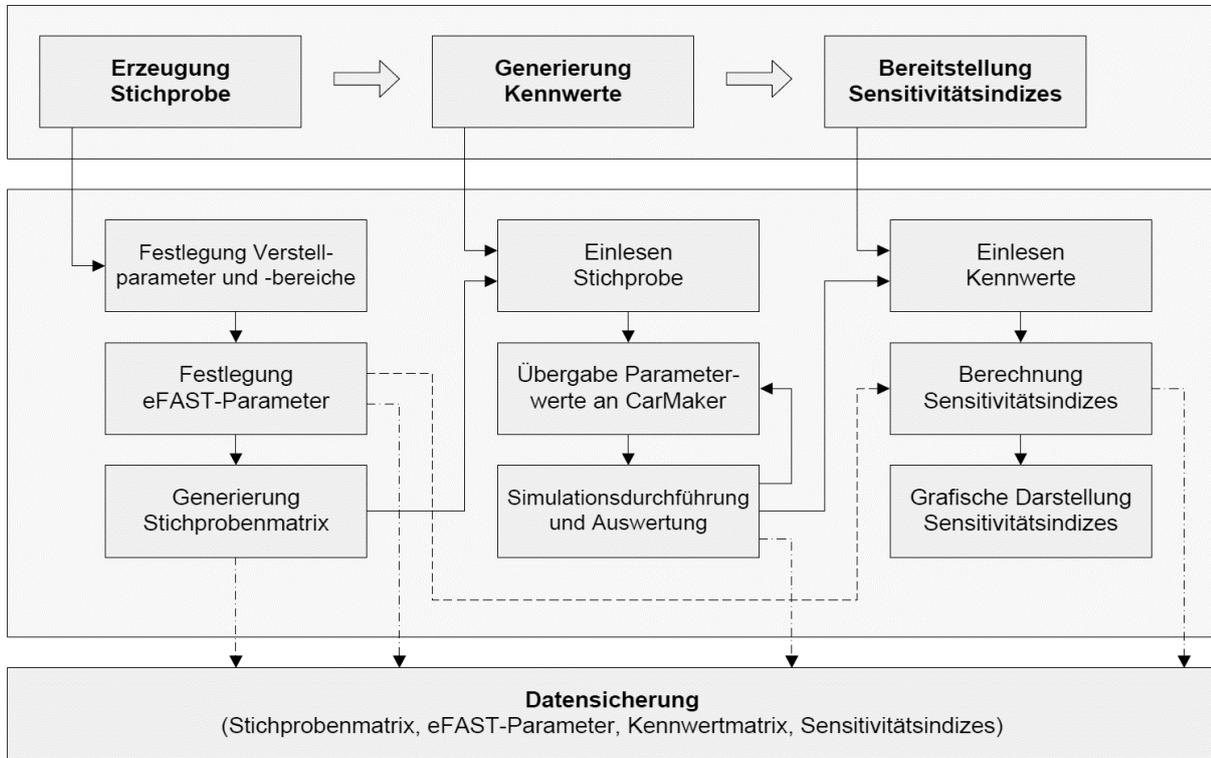


Abbildung A.3-1: Ablaufplan der Sensitivitätsanalyse<sup>428</sup>

<sup>428</sup> Quelle: Wohlrab, S.: Einflussanalyse von Parametervariationen am Fahrzeug, 2016, S. 38.

### A.3.2 Übertragungsfunktion auf dem Vierstempelprüfstand

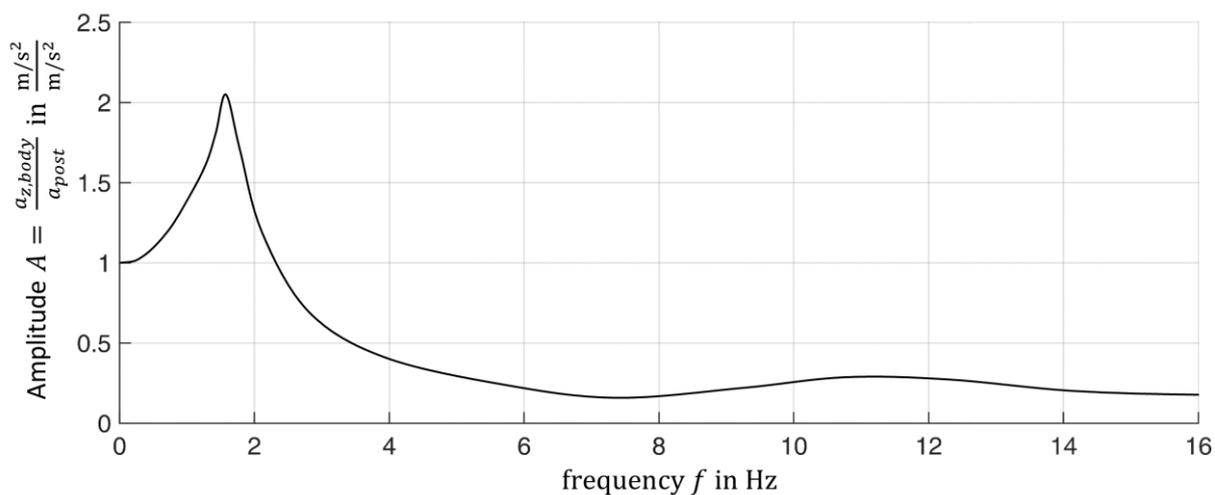


Abbildung A.3-2: Übertragungsfunktion Prüfstandstempel  $\rightarrow$  Fahrzeugaufbau

### A.3.3 Anregungsprofil des Vierstempelprüfstands

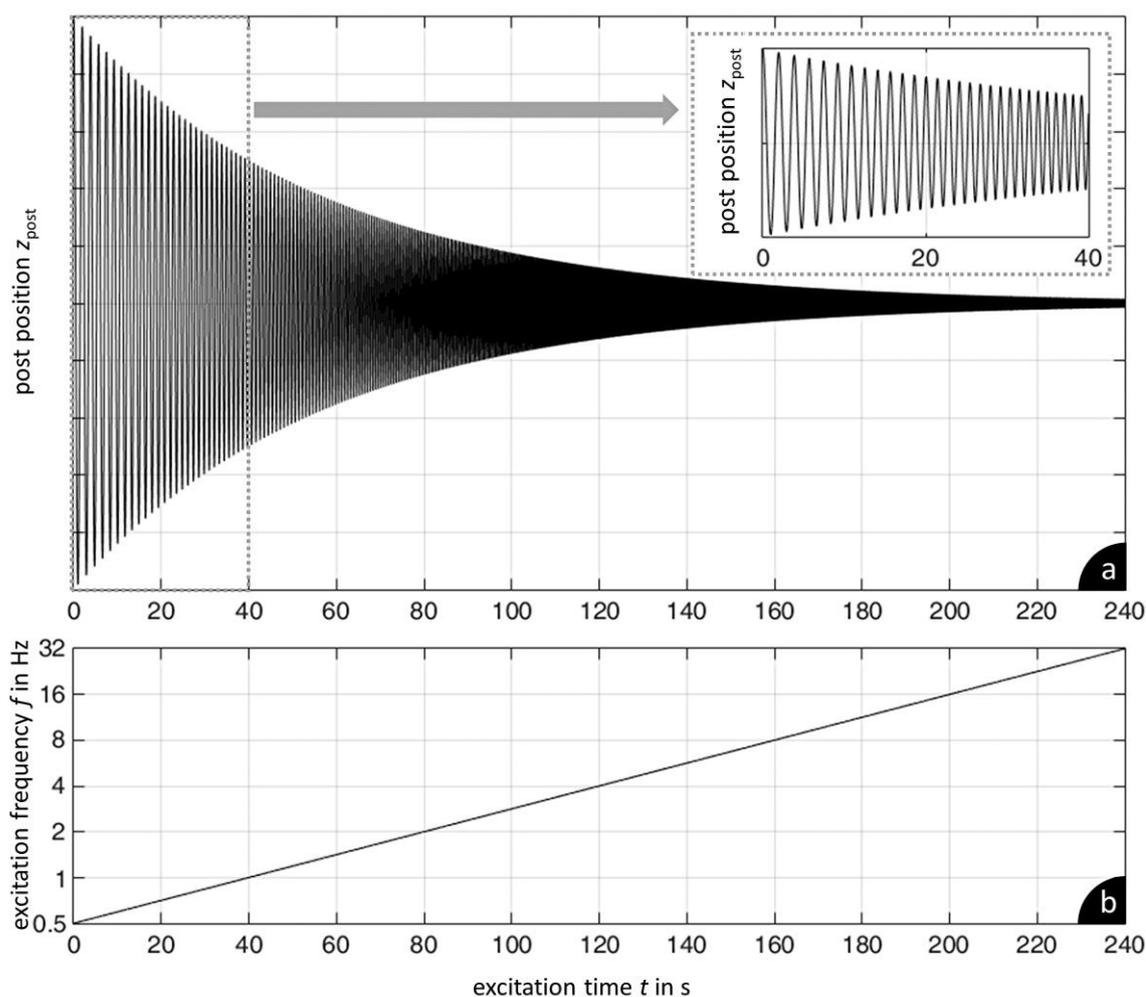


Abbildung A.3-3: Frequenzexponentieller Gleitsinus mit konstanter Geschwindigkeitsamplitude

## Literaturverzeichnis

**Adamski, D.:** Simulation in der Fahrwerktechnik, 2014

Adamski, D.: Simulation in der Fahrwerktechnik – Einführung in die Erstellung von Komponenten- und Gesamtfahrzeugmodellen. ATZ/MTZ-Fachbuch, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014

**Alasty, A.; Ramezani, A.:** Parameter Identification of a Ride Model, 2002

Alasty, A.; Ramezani, A.: Genetic Algorithm Based Parameter Identification of a Nonlinear Full Vehicle Ride Model. SAE Technical Paper 2002-01-1583, 2002

**Allen, R.W. et al.:** Validation of Ground Vehicle Computer Simulations, 1992

Allen, R.W.; Rosenthal, T.J.; Klyde, D.H.; Owens, K.J.; Szostak, H.T.: Validation of Ground Vehicle Computer Simulations Developed for Dynamics Stability Analysis. SAE Technical Paper 920054, 1992, S. 59-78

**Allen, R.W. et al.:** Validation of vehicle dynamics simulation, 2002

Allen, R.W.; Chrstos, J.P.; Howe, G.; Klyde, D.H.; Rosenthal, T.J.: Validation of a non-linear vehicle dynamics simulation for limit handling. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D, Journal of Automobile Engineering, Vol. 216(4), 2002, S. 319-327

**Allen, R.W. et al.:** Vehicle Dynamics Validation for Real-Time Simulation, 2001

Allen, R.W.; Lee, D.C.; Klyde, D.H.; Howe, G.; Chrstos, J.P.; Rosenthal, T.J.: Vehicle Dynamics Validation for Real-Time Simulation. In: Proceedings of the 1st Human-Centered Transportation Simulation Conference, The University of Iowa, Iowa-City, 2001

**Allen, R.W.; Rosenthal, T.J.:** Vehicle Dynamics Simulation Models, 1994

Allen, R.W.; Rosenthal, T.J.: Requirements for Vehicle Dynamics Simulation Models. SAE Technical Paper 940175, 1994

**Angrick, C.:** Subsystemmethodik für die Komfortauslegung, 2017

Angrick, C.: Subsystemmethodik für die Auslegung des niederfrequenten Schwingungskomforts von PKW. Dissertation Technische Universität Dresden, Schriftenreihe des Lehrstuhls Kraftfahrzeugtechnik, Cuvillier Verlag, Göttingen, 2017

**Babuska, I.; Oden, T.:** V&V in Computational Engineering and Science, 2003

Babuska, I.; Oden, T.: V&V in Computational Engineering and Science. In: ICES Report 03-52, The University of Texas at Austin, 2003

- Bach, C.:** Effizienzsteigerung von Validierungstests, 2017  
Bach, C.: Effizienzsteigerung von Validierungstests durch Anwendung von Kombinatorik. Masterthesis Nr. 638/17 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt, Darmstadt, 2017
- Balci, O.:** Guidelines for Simulation Studies, 1990  
Balci, O.: Guidelines for Successful Simulation Studies. In: Proceedings of the 1990 Winter Simulation Conference, 1990, S. 25-32
- Balci, O.:** Principles and Techniques of Simulation Validation, 1995  
Balci, O.: Principles and Techniques of Simulation Validation, Verification, and Testing. In: Proceedings of the 1995 Winter Simulation Conference, 1995, S. 147-154
- Balci, O.:** Requirements for Model Development Environments, 1986  
Balci, O.: Requirements for Model Development Environments. In: Computers & Operations Research, Volume 13(1), 1986, S. 53-67
- Balci, O.:** Verification, Validation and Accreditation of Simulation Models, 1997  
Balci, O.: Verification, Validation and Accreditation of Simulation Models. In: Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference, 1997, S. 135-141
- Balci, O.:** Verification, Validation and Accreditation, 1998  
Balci, O.: Verification, Validation and Accreditation. In: Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference, 1998, S. 41-48
- Balci, O.:** Verification, Validation and Testing, 1998  
Balci, O.: Verification, Validation and Testing. In: Banks, J.: Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice. John Wiley & Sons, 1998, S. 335-393
- Balci, O.:** Verification, Validation, and Certification, 2003  
Balci, O.: Verification, Validation, and Certification of Modeling and Simulation Applications. In: Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference, 2003, S. 150-158
- Banks, J.:** Principles of Simulation, 1998  
Banks, J.: Principles of Simulation. In: Banks, J.: Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice. John Wiley & Sons, 1998, S. 3-30
- Bernard, J.E.; Clover, C.L.:** Validation of Vehicle Dynamics Simulations, 1994  
Bernard, J.E.; Clover, C.L.: Validation of Computer Simulations of Vehicle Dynamics. SAE Technical Paper 940231, 1994
- Birta, L.G.; Özmizrak, F.N.:** Knowledge-Based Approach for Validation, 1996  
Birta, L.G.; Özmizrak, F.N.: A Knowledge-Based Approach for the Validation of Simulation Models: The Foundation. In: ACM Transactions on Modeling and Computer Simulations, Vol. 6(1), 1996, S. 76-98

- Braess, H.H.; Seiffert, U.:** Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, 2013  
Braess, H.H.; Seiffert, U.: Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. ATZ/MTZ-Fachbuch, 7. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2013
- Breuer, S.; Rohrbach-Kerl, A.:** Fahrzeugdynamik, 2015  
Breuer, S.; Rohrbach-Kerl, A.: Fahrzeugdynamik – Mechanik des bewegten Fahrzeugs. ATZ/MTZ-Fachbuch, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015
- Carson, J.S.:** Model Verification and Validation, 2002  
Carson, J.S.: Model Verification and Validation. In: Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference, 2002, S. 52-58
- Cassara, S.J. et al.:** Validation of a Tractor-Semitrailer Model, 2004  
Cassara, S.J.; Anderson, D.C.; Olofsson, J.M.: A Multi-Level Approach for the Validation of a Tractor-Semitrailer Ride and Handling Model. SAE Technical Paper 2004-01-2694, 2004
- Claus, S. et al.:** Preview-Potenzial für semiaktive Fahrwerke, 2015  
Claus, S.; Viehof, M.; Winner, H.: Analyse der Regelstrecke semiaktiver Fahrwerkregelungen hinsichtlich des Potenzials von Preview-Fahrbahninformationen für den Reglerentwurf. In: VDI-Berichte 2241, 15. Internationale VDI-Tagung Reifen – Fahrwerk – Fahrbahn 2015, 14.-15. Oktober, Hannover, 2015, S. 43-59
- Claus, S.:** Kompensation von Verzugszeiten im semiaktiven Fahrwerk, 2017  
Claus, S.: Vorausschauende Kompensation von Verzugszeiten im Regelkreis der semiaktiven Fahrwerkregelung. Dissertation Technische Universität Darmstadt, Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12 Nr. 805, Düsseldorf, 2017
- Claus, S.:** Potenzialbewertung zukünftiger Fahrwerkregelungen, 2011  
Claus, S.: Methode zur Potenzialbewertung zukünftiger semiaktiver Fahrwerkregelungen auf Basis dreidimensionaler Fahrbahndaten. Diplomarbeit Nr. 486/10 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt, Darmstadt, 2011
- Davis, P.K.:** Methods of Verification, Validation, and Accreditation, 1992  
Davis, P.K.: Generalizing Concepts and Methods of Verification, Validation, and Accreditation (VV&A) for Military Simulations. RAND, Santa Monica, 1992
- DIN ISO 4138:** Stationäre Kreisfahrt, 1984  
DIN ISO 4138: Straßenfahrzeuge – Stationäre Kreisfahrt. Deutsche Norm, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1984
- DIN ISO 7975:** Bremsen in der Kurve, 1987  
DIN ISO 7975: Straßenfahrzeuge – Bremsen in der Kurve – Testverfahren im offenen Regelkreis. Deutsche Norm, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1987

**DIN ISO 9816:** Lastwechselreaktionen, 1995

DIN ISO 9816: Personenkraftwagen – Lastwechselreaktionen eines Fahrzeugs bei Kreisfahrt – Testverfahren im offenen Regelkreis. Deutsche Norm, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1995

**Focus Online:** Einstein – Schlagfertiges Jahrhundert-Genie, 2006

Focus Online: Einstein – Schlagfertiges Jahrhundert-Genie. Internetquelle, [https://www.focus.de/wissen/jahrhundert-genie\\_did\\_10966.html](https://www.focus.de/wissen/jahrhundert-genie_did_10966.html), Bild 8/29, 2006, Abruf: 29.01.2018

**Garrot, W.R. et al.:** Methodology for Validating Vehicle Dynamics, 1997

Garrot, W.R.; Grygier, P.A.; Chrstos, J.P.; Heydinger, G.J.; Salaani, K.; Howe, J.G.; Guenther, D.A.: Methodology for Validating the National Advanced Driving Simulator's Vehicle Dynamics (NADSdyna). SAE Technical Paper 970562, 1997

**Gaß, L.:** Fahrereinfluss im Manöver Sinuslenken, 2017

Gaß, L.: Untersuchung des Fahrereinflusses im Lenkungsmanöver „Sinuslenken mit steigender Frequenz“. Bachelorthesis Nr. 1281/16 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt, Darmstadt, 2017

**Gass, S.I.; Joel, L.S.:** Concepts of model confidence, 1981

Gass, S.I.; Joel, L.S.: Concepts of model confidence. In: Computers & Operations Research, Volume 8(4), 1981, S. 341-346

**Haken, K.L.:** Grundlagen der Kraftfahrzeugtechnik, 2013

Haken, K.L.: Grundlagen der Kraftfahrzeugtechnik. 3. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2013

**Hartmann, F.:** Komfortsimulation mit IPG CarMaker, 2016

Hartmann, F.: Analyse des Potenzials der Komfortsimulation mit IPG CarMaker. Masterthesis Nr. 611/16 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt, Darmstadt, 2016

**Heißing, B. et al.:** Fahrwerkhandbuch, 2013

Heißing, B.; Ersoy, M.; Gies, S.: Fahrwerkhandbuch – Grundlagen • Fahrdynamik • Komponenten • Systeme • Mechatronik • Perspektiven. ATZ/MTZ-Fachbuch, 4. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2013

**Heydinger, G.J. et al.:** Validating Vehicle Dynamics Simulations, 1990

Heydinger, G.J.; Garrot, W.R.; Chrstos, J.P.; Guenther, D.A.: A Methodology for Validating Vehicle Dynamics Simulations. SAE Technical Paper 900128, 1990

**Hoffmann, R.; Wolff, M.:** Intelligente Signalverarbeitung, 2014

Hoffmann, R.; Wolff, M.: Intelligente Signalverarbeitung 1 – Signalanalyse. 2. Auflage, Springer Vieweg, Berlin Heidelberg, 2014

**Isermann, R.:** Fahrdynamik-Regelung, 2006

Isermann, R.: Fahrdynamik-Regelung – Modellbildung, Fahrerassistenzsysteme, Mechatronik. ATZ/MTZ-Fachbuch, 1. Auflage., Friedr. Vieweg & Sohn Verlag | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2006

**ISO 12021-1:** Sensitivity to lateral wind, 1996

ISO 12021-1: Road vehicles – Sensitivity to lateral wind – Part 1: Open-loop test method using wind generator input. International Organization for Standardization, 1996

**ISO 13674-1:** Weave test, 2010

ISO 13674-1: Road vehicles – Test method for the quantification of on-centre handling – Part 1: Weave test. International Organization for Standardization, 2010

**ISO 13674-2:** Transition test, 2016

ISO 13674-2: Road vehicles – Test method for the quantification of on-centre handling – Part 2: Transition test. International Organization for Standardization, 2016

**ISO 14512:** Braking on surfaces with split coefficient of friction, 1999

ISO 14512: Passenger cars – Straight-ahead braking on surfaces with split coefficient of friction – Open-loop test procedure. International Organization for Standardization, 1999

**ISO 14793:** Lateral transient response test methods, 2003

ISO 14793: Road vehicles – Heavy commercial vehicles and buses – Lateral transient response test methods. International Organization for Standardization, 2003

**ISO 17288-1:** Steering-release test – Part 1, 2002

ISO 17288-1: Passenger cars – Free-steer behaviour – Part 1: Steering-release open-loop test method. International Organization for Standardization, 2002

**ISO 17288-2:** Steering-pulse test – Part 2, 2004

ISO 17288-2: Passenger cars – Free-steer behaviour – Part 2: Steering-pulse open-loop test method. International Organization for Standardization, 2004

**ISO 3888-1:** Double lane-change, 1999

ISO 3888-1: Passenger cars – Test track for a severe lane-change manoeuvre – Part 1: Double lane-change. International Organization for Standardization, 1999

**ISO 3888-2:** Obstacle avoidance, 2002

ISO 3888-2: Passenger cars – Test track for a severe lane-change manoeuvre – Part 2: Obstacle avoidance. International Organization for Standardization, 2002

**ISO 7401:** Lateral transient response test methods, 2003

ISO 7401: Road vehicles – Lateral transient response test methods – Open-loop test methods. International Organization for Standardization, 2003

- ISO/FDIS 21994:** Straight-line braking with ABS, 2007  
ISO/FDIS 21994: Passenger cars – Stopping distance at straight-line braking with ABS – Open-loop test method. International Organization for Standardization, 2007
- ISO/TR 16250:** Objective rating metrics for dynamic systems, 2013  
ISO/TR 16250: Road vehicles – Objective rating metrics for dynamic systems. Technical Report, International Organization for Standardization, 2013
- ISO/TS 18571:** Objective rating metric for non-ambiguous signals, 2014  
ISO/TS 18571: Road vehicles – Objective rating metric for non-ambiguous signals. Technical Specification, International Organization for Standardization, 2014
- ISO/TS 20119:** Dispersion metrics for straight-line driving, 2002  
ISO/TS 20119: Road vehicles – Test method for the quantification of on-centre handling – Determination of dispersion metrics for straight-line driving. Technical Specification, International Organization for Standardization, 2002
- Kersting, G.; Wakolbinger, A.:** Elementare Stochastik, 2008  
Kersting, G.; Wakolbinger, A.: Elementare Stochastik. Birkhäuser Verlag AG, Basel, 2008
- Keune, A.:** Anwendung eines neuen Validierungskonzepts, 2018  
Keune, A.: Anwendung eines neuen Validierungskonzepts auf ein Mittelklasse-Fahrzeug mit semiaktiven Dämpfern. Masterthesis Nr. 651/17 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt, Darmstadt, 2018
- Klassen, C.:** Einfluss der Modellparametrierung, 2018  
Klassen, C.: Identifikation und Analyse des Einflusses der Modellparametrierung auf die Übereinstimmungsgenauigkeit von Simulation und Messung im Anwendungsbereich der Vertikaldynamik. Masterthesis Nr. 650/17 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt, Darmstadt, 2018
- Klein, E.E.; Herskovitz, P.J.:** Philosophical foundations of validation, 2005  
Klein, E.E.; Herskovitz, P.J.: Philosophical foundations of computer simulation validation. In: Simulation and Gaming, Vol. 36(3), 2005, S. 303-329
- Kleindorfer, G.B. et al.:** Validation: Positions in the Philosophy of Science, 1998  
Kleindorfer, G.B.; O'Neill, L.; Ganeshan, R.: Validation in Simulation: Various Positions in the Philosophy of Science. In: Management Science, Vol. 44(8), 1998, S. 1087-1099
- Klemmer, J. et al.:** Validation Process for Vehicle Simulation Models, 2011  
Klemmer, J.; Lauer, J.; Formanski, V.; Fontaine, R.; Kilian, P.; Sinsel, S.; Erbes, A.; Zäpf, J.: Definition and Application of a Standard Verification and Validation Process for Dynamic Vehicle Simulation Models. SAE Technical Paper 2011-01-0519, In: International Journal of Materials and Manufacturing, Vol. 4(1), 2011, S. 743-758

**Kleppmann, W.:** Versuchsplanung, 2016

Kleppmann, W.: Versuchsplanung – Produkte und Prozesse optimieren. 9. Auflage, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2016

**Kutluay, E.:** Validation Methodology for Lateral Dynamics, 2012

Kutluay, E.: Development and Demonstration of a Validation Methodology for Vehicle Lateral Dynamics Simulation Models. Dissertation Technische Universität Darmstadt, Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12 Nr. 765, Düsseldorf, 2012

**Kutluay, E.; Winner, H.:** A Review on Validation, 2014

Kutluay, E.; Winner, H.: Validation of vehicle dynamics simulation models - a review. In: Vehicle System Dynamics – International Journal of Mechanics and Mobility, Vol. 52(2), 2014, S. 186-200

**Kutluay, E.; Winner, H.:** Methodology for Vehicle Dynamics Validation, 2012

Kutluay, E.; Winner, H.: Assessment Methodology for Validation of Vehicle Dynamics Simulations Using Double Lane Change Maneuver. In: Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference, 2012, S. 3180-3191

**Kuttern, T.:** Praxiswissen Schwingungsmesstechnik, 2015

Kuttern, T.: Praxiswissen Schwingungsmesstechnik. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015

**Law, A.M.; McComas, M.G.:** Valid and Credible Simulation Models, 2001

Law, A.M.; McComas, M.G.: How to Build Valid and Credible Simulation Models. In: Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference, 2001, S. 22-29

**Lehmann, I.; Schulz, W.:** Mengen – Relationen – Funktionen, 2016

Lehmann, I.; Schulz, W.: Mengen – Relationen – Funktionen. Lehrbuch, 4. Auflage, Springer, Wiesbaden, 2016

**Lennert, S.:** Objektivierung von Schwingungskomfort, 2009

Lennert, S.: Zur Objektivierung von Schwingungskomfort in Personenkraftwagen – Untersuchung der Wahrnehmungsdimensionen. Dissertation Technische Universität Darmstadt, Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12 Nr. 698, Düsseldorf, 2009

**Logan, R.W. et al.:** Model Assessed Reliability, 2005

Logan, R.W.; Nitta, C.K.; Chidester, S.K.: Risk Reduction as the Product of Model Assessed Reliability, Confidence, and Consequence. In: The Journal of Defense Modeling and Simulation: Applications, Methodology, Technology, Vol. 2(4), 2005, S. 191-207

**Logan, R.W.; Nitta, C.K.:** Process and Levels Leading to Validation Statements, 2004

Logan, R.W.; Nitta, C.K.: Verification & Validation: Process and Levels Leading to Qualitative or Quantitative Validation Statements. SAE Technical Paper 2004-01-1752, 2004

**Logan, R.W.; Nitta, C.K.:** Validation, Uncertainty, and Reliability, 2003

Logan, R.W.; Nitta, C.K.: Validation, Uncertainty, and Quantitative Reliability at Confidence (QRC). In: Conference: American Institute of Aeronautics and Astronautics 2003, 41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 6.-9. Januar, Reno (Nevada), 2003

**Logan, R.W.; Nitta, C.K.:** Verification & Validation, 2002

Logan, R.W.; Nitta, C.K.: Verification & Validation (V&V) Methodology and Quantitative Reliability at Confidence (QRC): Basis for an Investment Strategy. Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-ID-150874, 2002

**Lugner, P.; Plöchl, M.:** Modelling in vehicle dynamics, 2004

Lugner, P.; Plöchl, M.: Modelling in vehicle dynamics of automobiles. In: ZAMM – Journal of Applied Mathematics and Mechanics / Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik, Vol. 84(4), 2004, S. 219-236

**Lunze, J.:** Regelungstechnik, 2016

Lunze, J.: Regelungstechnik 1 – Systemtheoretische Grundlagen, Analyse und Entwurf einschleifiger Regelungen. Lehrbuch, 11. Auflage, Springer Vieweg, Berlin Heidelberg, 2016

**Meyer, M.:** Signalverarbeitung, 2014

Meyer, M.: Signalverarbeitung – Analoge und digitale Signale, Systeme und Filter. Lehrbuch, 7. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014

**Miser, H.J.:** Validation in operational research, 1993

Miser, H.J.: A foundational concept of science appropriate for validation in operational research. In: European Journal of Operational Research 66, 1993, S. 204-215

**Mitschke, M.; Wallentowitz, H.:** Dynamik der Kraftfahrzeuge, 2014

Mitschke, M.; Wallentowitz, H.: Dynamik der Kraftfahrzeuge. 5. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014

**Niemann, H.:** Eignungsanalyse eines Vierstempelprüfstands für die Validierung, 2017

Niemann, H.: Analyse der Eignung von Versuchen auf einem Vierstempelprüfstand für die vertikaldynamische Modellvalidierung. Masterthesis Nr. 614/16 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt, Darmstadt, 2017

**Oberkampf, W.L. et al.:** Verification, validation, and predictive capability, 2004

Oberkampf, W.L.; Trucano, T.G.; Hirsch, C.: Verification, validation, and predictive capability in computational engineering and physics. In: The American Society of Mechanical Engineers, Applied Mechanics Reviews, Vol. 57(5), 2004, S. 345-384

**Oberkampf, W.L.; Barone, M.F.:** Validation metrics, 2006

Oberkampf, W.L.; Barone, M.F.: Measures of agreement between computation and experiment: Validation metrics. In: Journal of Computational Physics 217, 2006, S. 5-36

- Oberkampf, W.L.; Trucano, T.G.:** Validation in computational fluid dynamics, 2002  
Oberkampf, W.L.; Trucano, T.G.: Verification and validation in computational fluid dynamics. In: Progress in Aerospace Sciences 38, 2002, S. 209-272
- Online Lexikon für Psychologie und Pädagogik:** Hypothese, 2018  
Online-Enzyklopädie aus den Wissenschaften Psychologie und Pädagogik: Hypothese. Internetquelle, <http://lexikon.stangl.eu/1011/hypothese/>, 2018, Aufruf: 16.01.2018
- Orlowski, P.F.:** Praktische Regeltechnik, 2011  
Orlowski, P.F.: Praktische Regeltechnik – Anwendungsorientierte Einführung für Maschinenbauer und Elektrotechniker. 9. Auflage, Springer, Berlin Heidelberg, 2011
- Overhoff, D.:** Reifentechnik, 2016  
Overhoff, D.: Reifentechnik. Skriptum zur Vorlesung Reifentechnik im Wintersemester 2016/2017, Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2016
- Papula, L.:** Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler, 2016  
Papula, L.: Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler Band 3 – Vektoranalysis, Wahrscheinlichkeitsrechnung, Mathematische Statistik, Fehler- und Ausgleichsrechnung. Lehrbuch, 7. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2016
- Pfeffer, P.; Harrer, M.:** Lenkungshandbuch, 2013  
Pfeffer, P.; Harrer, M.: Lenkungshandbuch – Lenksysteme, Lenkgefühl, Fahrdynamik von Kraftfahrzeugen. ATZ/MTZ-Fachbuch, 2. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2013
- Popper, K.:** Logik der Forschung, 1994  
Popper, K.: Logik der Forschung. 10. Auflage, J.C.B. Mohr (Paul Siebeck), Tübingen, 1994
- Popper, K.:** The Logic of Scientific Discovery, 2005  
Popper, K.: The Logic of Scientific Discovery. Routledge Classics, Routledge, London und New York, 2005
- Rabe, M. et al.:** Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik, 2008  
Rabe, M.; Spieckermann, S.; Wenzel, S.: Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik – Vorgehensmodelle und Techniken. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2008
- Rasch, B. et al.:** Quantitative Methoden, 2014  
Rasch, B.; Friese, M.; Hofmann, W.; Naumann, E.: Quantitative Methoden 1 – Einführung in die Statistik für Psychologen und Sozialwissenschaftler. Lehrbuch, 4. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2014

**Rau, J.:** Grußwort – 125 Jahre Albert Einstein, 2004

Rau, J.: Grußwort von Bundespräsident Johannes Rau beim Festakt „125 Jahre Albert Einstein“. Internetquelle, [http://www.bundespraesident.de/SharedDocs/Reden/DE/Johannes-Rau/Reden/2004/03/20040314\\_Rede.html](http://www.bundespraesident.de/SharedDocs/Reden/DE/Johannes-Rau/Reden/2004/03/20040314_Rede.html), Ulm, 2004, Abruf: 28.01.2018

**Refsgaard, J.C.; Henriksen, H.J.:** Modelling guidelines, 2004

Refsgaard, J.C.; Henriksen, H.J.: Modelling guidelines – terminology and guiding principles. In: *Advances in Water Resources* 27, 2004, S. 71-82

**Regh, F.:** Sicherheitsrelevante Auswirkungen durch Fahrwerkmodifikationen, 2012

Regh, F.: Objektive Bestimmung der sicherheitsrelevanten Auswirkungen durch Fahrwerkmodifikationen. Dissertation Technische Universität Darmstadt, Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12 Nr. 761, Düsseldorf, 2012

**Rompe, K.; Heißing, B.:** Objektive Testverfahren für Fahreigenschaften, 1984

Rompe, K.; Heißing, B.: Objektive Testverfahren für die Fahreigenschaften von Kraftfahrzeugen. Fahrzeugtechnische Schriftenreihe, Verlag TÜV Rheinland GmbH, Köln, 1984

**Saltelli, A. et al.:** A Method for Global Sensitivity Analysis, 1999

Saltelli, A.; Tarantola, S.; Chan, K.P.-S.: A Quantitative Model-Independent Method for Global Sensitivity Analysis of Model Output. In: *Technometrics*, Vol. 41(1), 1999, S. 39-56

**Sargent, R.G. et al.:** Strategic Directions in Validation, 2000

Sargent, R.G.; Glasow, P.A.; Kleijnen, J.P.C.; Law, A.M.; McGregor, I.; Youngblood, S.: Strategic Directions in Verification, Validation, And Accreditation Research. In: *Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference*, 2000, S. 909-916

**Sargent, R.G.:** Verification and validation of simulation models, 2009

Sargent, R.G.: Verification and validation of simulation models. In: *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference*, 2009, S. 162-176

**Schad, J.:** Untersuchungsumgebung für standardisierter Fahrmanöver, 2016

Schad, J.: Entwicklung einer modularen Untersuchungsumgebung zur Simulation standardisierter Fahrmanöver und Untersuchung der Manöveranforderungen. Masterthesis Nr. 594/15 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt, Darmstadt, 2016

**Schlesinger, S. et al.:** Terminology for model credibility, 1979

Schlesinger, S.; Crosbie, R.E.; Gagné, R.E.; Innis, G.S.; Lalwani, C.S.; Loch, J.; Sylvester, R.J.; Wright, R.D.; Kheir, N.; Bartos, D.: Terminology for model credibility. In: *Simulation*, Vol. 32(3), 1979, S. 103-104

**Schramm, D. et al.:** Simulation der Dynamik von Kraftfahrzeugen, 2013

Schramm, D.; Hiller, M.; Bardini, R.: Modellbildung und Simulation der Dynamik von Kraftfahrzeugen. 2. Auflage, Springer Vieweg, Berlin Heidelberg, 2013

- Schüßler, H.W.:** Digitale Signalverarbeitung, 2008  
Schüßler, H.W.: Digitale Signalverarbeitung 1 – Analyse diskreter Signale und Systeme. 5. Auflage, Springer, Berlin Heidelberg, 2008
- Seipel, G.:** Entstehung und Intensität von Reifenspuren, 2013  
Seipel, G.: Analyse der Einflussgrößen auf die Entstehung und Intensität von Reifenspuren. Dissertation Technische Universität Darmstadt, Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12 Nr. 772, Düsseldorf, 2013
- Siebertz, K. et al.:** Statistische Versuchsplanung, 2010  
Siebertz, K.; van Bebber, D.; Hochkirchen, T.: Statistische Versuchsplanung – Design of Experiments (DoE). Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2010
- Sippel, M.:** Vergleich unterschiedlicher Validierungsstrategien, 2016  
Sippel, M.: Anwendung und Vergleich unterschiedlicher Validierungsstrategien an einem Gesamtfahrzeug-Simulationsmodell in standardisierten Fahrmanövern. Masterthesis Nr. 593/15 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt, Darmstadt, 2016
- Trzesniowski, M.:** Rennwagentechnik, 2012  
Trzesniowski, M.: Rennwagentechnik – Grundlagen, Konstruktion, Komponenten, Systeme. ATZ/MTZ-Fachbuch, 3. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2012
- Übler, J.:** Das bringen größere Felgen und Breitreifen, 2009  
Übler, J.: Das bringen größere Felgen und Breitreifen. Internetquelle, <https://www.auto-motor-und-sport.de/testbericht/optionsreifen-das-bringen-groessere-felgen-und-breitreifen-1494812.html>, 2009, Abruf: 27.12.2017
- Uni-Journal Jena:** Einsteins Bedeutung für Ihre Wissenschaft, 2009  
Uni-Journal Jena: Welche Bedeutung hat Einstein für Ihre Wissenschaft?  
Internetquelle, [https://www.uni-jena.de/uni\\_journal\\_07\\_2005\\_Titelthema.html](https://www.uni-jena.de/uni_journal_07_2005_Titelthema.html), 2009, Abruf: 28.01.2018
- VDI 2057:** Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen, 2002  
VDI 2057: Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen – Ganzkörper-Schwingungen. VDI-Richtlinien, Beuth Verlag, Berlin, 2002
- VDI 2206:** Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme, 2004  
VDI 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. VDI-Richtlinien, Beuth Verlag, Berlin, 2004
- VDI 2221:** Methodik zum Entwickeln technischer Produkte, 1993  
VDI 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. VDI-Richtlinien, Beuth Verlag, Berlin, 1993
- VDI 3633:** Simulation von Produktionssystemen, 2013  
VDI 3633: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Begriffe. VDI-Richtlinien, Beuth Verlag, Berlin, 2013

- Viehof, M. et al.:** Objektivierungspotenzial der Validierung, 2016  
Viehof, M.; Niemann, H.; Kochem, M.; Winner, H.: Objektivierungspotenzial der operativen Validierung im Anwendungsbereich der Fahrdynamiksimulation. In: VDI-Berichte 2279, 18. Kongress SIMVEC – Simulation und Erprobung in der Fahrzeugentwicklung 2016, 22.-23. November, Baden-Baden, 2016, S. 417-438
- Viehof, M. et al.:** Validierungskonzept für die Vertikaldynamik, 2017  
Viehof, M.; Niemann, H.; Kochem, M.; Winner, H.: Validierungskonzept für vertikaldynamische Fahrzeugeigenschaften. In: VDI-Berichte 2296, 16. Internationale VDI-Tagung Reifen – Fahrwerk – Fahrbahn 2017, 25.-26. Oktober, Hannover, 2017, S. 147-174
- Viehof, M.:** Querdynamisches Potenzial von Torque Vectoring, 2014  
Viehof, M.: Untersuchung des querdynamischen Potenzials von Torque Vectoring an der Hinterachse eines Fahrzeugs mit eAWD. Masterthesis Nr. 531/13 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt, Darmstadt, 2014
- Viehof, M.; Winner, H.:** Forschungsstand der Validierung, 2017  
Viehof, M.; Winner, H.: Stand der Technik und der Wissenschaft: Modellvalidierung im Anwendungsbereich der Fahrdynamiksimulation. Forschungsbericht, TUprints 6662, urn:nbn:de:tuda-tuprints-66621, Darmstadt, 2017
- Viehof, M.; Winner, H.:** Research Methodology for a New Validation Concept, 2018  
Viehof, M.; Winner, H.: Research Methodology for a New Validation Concept in Vehicle Dynamics. In: Automotive and Engine Technology – The International Journal of WKM, <https://doi.org/10.1007/s41104-018-0024-1>, Springer International Publishing, 2018
- Wang, Y.:** Charakterisierung der Raddynamikmesstechnik, 2018  
Wang, Y.: Charakterisierung und Modellierung der Raddynamikmesstechnik für die Validierung von Fahrdynamikmodellen. Dissertation Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2018
- Wang, Y.; Winner, H.:** Measurement Characteristics of Wheel Force Sensor, 2015  
Wang, Y.; Winner, H.: Research of Dynamic Measurement Characteristics of Wheel Force Sensor. In: 4th International Tyre Colloquium, 20.-21. April, Guildford (England), 2015
- Wang, Y.; Winner, H.:** Measurement of Tyre Contact Force, 2015  
Wang, Y.; Winner, H.: Study of Measurement Behaviour of Wheel Force Sensor for Increasing Accuracy in Dynamic Measurement of Tyre Contact Force. In: 24th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology 2015. 5.-7. Oktober, Aachen, 2015
- Weidenfeller, C.:** Komfortsimulation mit Mehrkörpersimulationsmodellen, 2017  
Weidenfeller, C.: Analyse des Potenzials der Komfortsimulation mit Mehrkörpersimulationsmodellen. Masterthesis Nr. 606/16 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt, Darmstadt, 2017

**Whitner, R.B.; Balci, O.:** Guidelines for Verification Techniques, 1989

Whitner, R.B.; Balci, O.: Guidelines for Selecting and Using Simulation Model Verification Techniques. In: Proceedings of the 1989 Winter Simulation Conference, 1989, S. 559-568

**Wohlrab, S.:** Einflussanalyse von Parametervariationen am Fahrzeug, 2016

Wohlrab, S.: Einflussanalyse von Parametervariationen am Fahrzeug auf die Fahrdynamik und die charakteristischen Kennwerte in standardisierten Fahrmanövern. Masterthesis Nr. 592/15 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt, Darmstadt, 2016

**Zomotor, A. et al.:** Bewertung des Fahrverhaltens – Teil 1, 1997

Zomotor, A.; Braess, H.H.; Rönitz, R.: Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von Personenkraftwagen – Ein Rückblick auf die letzten 20 Jahre – Teil 1. In: ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 99, Ausgabe 12/1997, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 1997, S. 780-786

**Zomotor, A. et al.:** Bewertung des Fahrverhaltens – Teil 2, 1998

Zomotor, A.; Braess, H.H.; Rönitz, R.: Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von Personenkraftwagen – Ein Rückblick auf die letzten 20 Jahre – Teil 2. In: ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 100, Ausgabe 3/1998, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 1998, S. 236-243

**Zomotor, A.:** Fahrverhalten, 1991

Zomotor, A.: Fahrwerktechnik: Fahrverhalten. Vogel-Fachbuch, 2. Auflage, Vogel Verlag, Würzburg, 1991

## **Eigene Veröffentlichungen**

**Claus, S.; Viehof, M.; Winner, H.:** Analyse der Regelstrecke semiaktiver Fahrwerkregelungen hinsichtlich des Potenzials von Preview-Fahrbahninformationen für den Reglerentwurf. In: VDI-Berichte 2241, 15. Internationale VDI-Tagung Reifen – Fahrwerk – Fahrbahn 2015, 14.-15. Oktober, Hannover, 2015, S. 43-59

**Viehof, M.; Niemann, H.; Kochem, M.; Winner, H.:** Objektivierungspotenzial der operativen Validierung im Anwendungsbereich der Fahrdynamiksimulation. In: VDI-Berichte 2279, 18. Kongress SIMVEC – Simulation und Erprobung in der Fahrzeugentwicklung 2016, 22.-23. November, Baden-Baden, 2016, S. 417-438

**Viehof, M.; Niemann, H.; Kochem, M.; Winner, H.:** Validierungskonzept für vertikaldynamische Fahrzeugeigenschaften. In: VDI-Berichte 2296, 16. Internationale VDI-Tagung Reifen – Fahrwerk – Fahrbahn 2017, 25.-26. Oktober, Hannover, 2017, S. 147-174

**Viehof, M.; Winner, H.:** Research Methodology for a New Validation Concept in Vehicle Dynamics. In: Automotive and Engine Technology – The International Journal of WKM, <https://doi.org/10.1007/s41104-018-0024-1>, Springer International Publishing, 2018

**Viehof, M.; Winner, H.:** Stand der Technik und der Wissenschaft: Modellvalidierung im Anwendungsbereich der Fahrdynamiksimulation. Forschungsbericht, TUprints 6662, urn:nbn:de:tuda-tuprints-66621, Darmstadt, 2017

## Betreute studentische Arbeiten

**Bach, Christian:** Effizienzsteigerung von Validierungstests durch Anwendung von Kombinatorik. Masterthesis Nr. 638/17 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt, extern durchgeführt bei der Opel Automobile GmbH

**Gaß, Lukas:** Untersuchung des Fahrereinflusses im Lenkungsmanöver „Sinuslenken mit steigender Frequenz“. Bachelorthesis Nr. 1281/16 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt, extern durchgeführt bei der Opel Automobile GmbH

**Hartmann, Florian:** Analyse des Potenzials der Komfortsimulation mit IPG CarMaker. Masterthesis Nr. 611/16 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt, extern durchgeführt bei der Opel Automobile GmbH

**Heinz, Georg:** Untersuchung des Einflusses der Variation von Prozessparametern auf den Rollwiderstand von Hochleistungsreifen bei Pirelli Deutschland GmbH. Masterthesis Nr. 676/17 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt, extern durchgeführt bei der Pirelli Deutschland GmbH

**Hofmann, Tobias:** Identifikation und Ermittlung der dynamischen Stabilität eines Gepans in Abhängigkeit von Dämpfercharakteristiken mit Hilfe der Fahrdynamiksimulation. Bachelorthesis Nr. 1203/14 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt

**Keune, Alexander:** Anwendung eines neuen Validierungskonzepts auf ein Mittelklasse-Fahrzeug mit semiaktiven Dämpfern. Masterthesis Nr. 651/17 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt, extern durchgeführt bei der Opel Automobile GmbH

**Klassen, Christian:** Identifikation und Analyse des Einflusses der Modellparametrierung auf die Übereinstimmungsgenauigkeit von Simulation und Messung im Anwendungsbereich der Vertikaldynamik. Masterthesis Nr. 650/17 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt, extern durchgeführt bei der Opel Automobile GmbH

**Niemann, Hartmut:** Analyse der Eignung von Versuchen auf einem Vierstempelprüfstand für die vertikaldynamische Modellvalidierung. Masterthesis Nr. 614/16 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt, extern durchgeführt bei der Opel Automobile GmbH

**Schad, Julian:** Entwicklung einer modularen Simulationsumgebung zur Simulation standardisierter Fahrmanöver und Untersuchung der Manöveranforderungen. Masterthesis Nr. 594/15 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt

**Shao, Zhanjun:** Identifikation und Ermittlung der dynamischen Stabilität eines Gespanns in Abhängigkeit von Dämpfercharakteristiken durch die Änderung des Wankverhaltens des Systems. Masterthesis Nr. 571/15 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt

**Sippel, Marco:** Anwendung und Vergleich unterschiedlicher Validierungsstrategien an einem Gesamtfahrzeug-Simulationsmodell in standardisierten Fahrmanövern. Masterthesis Nr. 593/15 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt

**Tichi, Benedikt:** Entwicklung eines Konzepts für eine Messdienstleistung zur Parametrierung und Validierung von Fahrdynamik-Simulationsmodellen. Masterthesis Nr. 669/17 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt

**Weidenfeller, Christian:** Analyse des Potenzials der Komfortsimulation mit Mehrkörpersimulationsmodellen. Masterthesis Nr. 606/16 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt, extern durchgeführt bei der Opel Automobile GmbH

**Wohlrab, Sebastian:** Einflussanalyse von Parametervariationen am Fahrzeug auf die Fahrdynamik und die charakteristischen Kennwerte in standardisierten Fahrmanövern. Masterthesis Nr. 592/15 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt