

Ein Beitrag zur objektiven und subjektiven Evaluierung des Lenkkomforts von Kraft- fahrzeugen

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
von der Fakultät für Maschinenbau der
Universität Karlsruhe

genehmigte
Dissertation
von

Dipl.-Ing. Alexander K. Zschocke
aus Tegernau

Tag der mündlichen Prüfung: 28. April 2009

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

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

Kurzfassung

Im Produktentwicklungsprozeß eines Automobils nimmt das objektive Fahrverhalten eine wichtige Stellung ein. Denn der Fahrzeuglenker nimmt es subjektiv wahr, evaluiert es und lässt die Meinung darüber in sein Urteil über das Fahrzeug mit einfließen. Um diese subjektiven Eindrücke in den verschiedenen Phasen der Automobilentwicklung durchgängig zu verankern und die Reifegrade mit einer Referenz abzugleichen, bedarf es objektiver Methoden der Validierung, mit deren Erforschung und Entwicklung sich das IPEK - Institut für Produktentwicklung der Universität Karlsruhe (TH) einging und gesamthaft beschäftigt.

In der Praxis wird die Ausprägung des Fahrverhaltens allerdings noch immer hauptsächlich subjektiv gestaltet. Um den monetären, qualitativen und zeitlichen Herausforderungen in der Entwicklung zu begegnen, erfordert es vielmehr objektiver Parameter, die sowohl experimentell als auch simulativ und somit in vorgelagerten Stadien bestimmt werden können. Die vorliegende Arbeit trägt zu neuen objektiven Kenngrößen bei, die den subjektiven, querdynamischen Gesamteindruck mit Fokus auf die fahrdynamische Größe Lenkmoment beschreiben.

Zu Beginn der Ausarbeitung wird nach den einleitenden Überlegungen die Thematik anhand objektiver und subjektiver Gesichtspunkte der Fahreigenschaftsbeschreibung getrennt betrachtet bzw. bisherige Korrelationsanalyseergebnisse zwischen den beiden Aspekten präsentiert. Daraus werden Forderungen für diese Arbeit abgeleitet und mit Hilfe von experimentellen und modellbasierten Methoden auf Basis eines statistischen Auswerteverfahrens beantwortet.

Am Beispiel von zehn realen Fahrzeugen spiegeln die objektiven Prüfmanöver mit den daraus extrahierten Kenngrößen den subjektiven Lenkkomfort-Eindruck des Gesamtfahrzeugs im Eigenlenken, Schwimmen, Gieren, Querschleunigen und Wanken sehr gut wider. Aufgeworfene Fragestellungen wie nach der Rolle des Lenkmoments in Spurwechseln und beim Hochgeschwindigkeitsgeradeauslauf werden im nächsten Schritt mit einer Basisanforderung der Lenkmomenthysterese aufgeklärt. Zur notwendigen stationären Grundabstimmung des Lenkmoments wird eine modellbasierte Methode vorgestellt, mit deren Hilfe das Lenkmoment eindeutig als Lenkcharakter-Größe identifiziert und die Brücke zwischen experimenteller und virtueller Produktentwicklung geschlagen werden kann. Darüber hinaus werden an einem weiteren Beispiel interkulturelle Unterschiede und Gemeinsamkeiten in der Evaluierung von Lenkmomenten aufgedeckt. Infolge der Analysen kann der subjektive Lenkcharakter hinsichtlich der Größe Lenkmoment in objektive Kenngrößen in Form von Beträgen, Steigungen und Hysterese Maße überführt werden.

Abstract

Objective handling performance of an automobile plays a key role within the product development process. Since drivers subjectively perceive the vehicle dynamics, they evaluate it and incorporate their opinion into the integral assessment of a car. Its validation requires objective methods, which allow for continuous anchorage of these subjective impressions within different phases of the vehicle development and for matching particular degrees of maturity with a specific reference. The IPEK - Institute of Product Development, University of Karlsruhe, is engaged on this field of research in a neat and holistic way.

However, in practice, shaping the vehicle handling is still mainly accomplished in a subjective way. Meeting the monetary, qualitative and time challenges necessitates objective parameters, which can be determined both experimentally and virtually, and for this reason in front-loaded stages. The work at hand contributes to new objective measures that describe the subjective lateral overall picture with a main focus on the driving dynamics quantity steering torque.

At the beginning of the thesis, this topic is considered separately for objective and subjective aspects of handling characteristics. Moreover, hitherto correlation analyses results of previous research on these two aspects are presented. Hence, demands for this work are derived from and answered with the help of experimental and model-based methods based on a statistical analysis procedure.

Exemplified by ten real cars, measures extracted from objective test manoeuvres reflect very well the subjective steering comfort regarding vehicle steer, slip, yaw, lateral acceleration and roll. Questions posed related to the role of steering torque in lane-changes and high-speed driving are clarified in subsequent steps with the property of steering torque hysteresis. A model-based method is introduced for the purpose of a basic stationary steering torque set-up. Thus, steering torque can be identified as a steering character quantity and the gap between experimental and virtual product development can be bridged. Furthermore, based on another example, intercultural differences and similarities in steering torque evaluations can be disclosed. In consequence of the analyses, it is now possible to transfer subjective steering character concerning the quantity steering torque into objective measures in the form of magnitudes, gradients and hysteresis parameters.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Forschung und Technik.....	5
2.1	Fahreigenschaften von Kraftfahrzeugen.....	5
2.1.1	Die Modellvorstellung: das Einspurfahrzeug	6
2.1.2	Der „Weg“ über das Gesamtfahrwerk von der Fahrbahn zum Fahrer.....	8
2.1.3	Das Teilsystem Hilfskraftlenkung	10
2.1.4	Die subjektiven Eindrücke der Fahreigenschaften	12
2.1.5	Die objektive Beschreibung des Fahrverhaltens	16
2.2	Arbeiten über die Objektivierung des subjektiven Fahreindrucks	24
2.2.1	Objektivierungsarbeiten in Bezug auf querdynamische Fahrmanöver.....	26
2.2.2	Objektivierungsarbeiten mit Hilfe von Modellansätzen.....	33
2.3	Modellbasierte Systemanalyse und Simulation.....	38
2.3.1	Modellbasierte Fahrdynamikanalyse durch ein Erweitertes Einspurmodell.....	39
2.3.2	Lenkungsmodelle	40
2.4	Werkzeuge zur Analyse von potentiellen Korrelationen.....	48
2.4.1	Das subjektive „Meßinstrument“: der Fragebogen	48
2.4.2	Meßtechnik im objektiven Fahrdynamikversuch	52
2.4.3	Statistische Auswertemethoden	53
2.4.4	Anmerkungen zu den Versuchsbedingungen	59
3	Ziele der Arbeit.....	63
4	Suche nach subjektiv-objektiv Zusammenhängen des Lenkkomforts auf Basis realer Fahrzeuge	67
4.1	Objektive Aspekte	67
4.1.1	Durchführung der Open-Loop Fahrdynamiktestmanöver.....	67
4.1.2	Versuchsergebnisse und extrahierte Kenngrößen	68
4.2	Subjektive Aspekte.....	86
4.2.1	Fahrprofile und Fahrerfeld.....	86
4.2.2	Kriterien- und Fragebogenentwicklung.....	88
4.3	Auswertemethoden und Auswerteablauf	93
4.3.1	Deskriptive Statistik und Hypothesentests: z-Transformation, Verteilungs- und Ausreißertests, Reliabilität und Varianzanalyse.....	93

4.3.2	Redundanz- und Korrelationsbetrachtung innerhalb der subjektiven Daten	98
4.3.3	Redundanzbetrachtung innerhalb der objektiven Daten	103
4.3.4	Korrelationsanalyse zwischen den objektiven und subjektiven Daten	106
4.4	Hauptfunde der Einzelverknüpfungen zwischen subjektiver Bewertung und objektiver Kenngröße	112
4.4.1	Im Stadtverkehr	112
4.4.2	Auf der Landstraße	113
4.4.3	Auf der Autobahn	115
4.4.4	Im ISO-Spurwechsel	117
4.5	Multivariate Betrachtung der Zusammenhänge zwischen subjektiver Bewertung und objektiven Kenngrößen	119
5	Modellbasierte Ansätze zur Untersuchung des Lenkcharakters	127
5.1	Entwicklungswerkzeug Lenkmomentensteller	128
5.2	Rolle des Lenkmoments im dynamischen Fall eines Fahrspurwechsels	129
5.2.1	Hintergrund und Modellbildung	129
5.2.2	Versuchsplan	132
5.2.3	Versuchsergebnisse	136
5.3	Rolle des Lenkmoments bei Hochgeschwindigkeitsfahrt.....	140
5.3.1	Abhängigkeit der Lenkmomenthysterese von Fahrgeschwindigkeit und Querbeschleunigung	140
5.3.2	Versuchsplan zur Untersuchung des Geradeauslaufs im Zusammenhang mit der Lenkmomenthysterese.....	142
5.3.3	Versuchsergebnisse	145
5.4	Verknüpfung des virtuellen und realen Fahrversuchs über parameteridentifizierte Lenkmomentencharakteristika am Beispiel einer Landstraßenfahrt	147
5.4.1	Methode zum Erfahrbarmachen modellbasierter Lenkmomente	148
5.4.2	Variantengenerierung durch Modellparametrierungen	154
5.4.3	Versuchsplan	156
5.4.4	Versuchsergebnisse	161
5.4.5	Rekapitulation der Methode zur Objektivierung	167
5.5	Ausprägung des Lenkcharakters in Bezug auf US-amerikanische Fahrer.....	169
5.5.1	Versuchsplan	169
5.5.2	Versuchsergebnisse	174
6	Zusammenfassung und Ausblick	179

7	Literaturverzeichnis.....	183
	7.1 Referenzen.....	183
	7.2 Bibliographie	194
	Anhang.....	198
	Lebenslauf	202

1 Einleitung

Fahrer heutiger Kraftwagen erfahren zahlreiche, vielfältige Impressionen während sie ihre Fahrzeugführungsaufgabe erfüllen und bilden sich so eine integrale Meinung über den Charakter eines Fahrzeugs. Die Herausforderung für die Automobilentwickler ist es, jeden einzelnen Aspekt, den die Kunden wahrnehmen, zu befriedigen. Hierbei unterliegen sie im Produktentwicklungsprozeß zeitlichen und monetären Randbedingungen. Im Hinblick auf die Querdynamik von Kraftfahrzeugen bzw. ihrer Lenkeigenschaften, dem „Handling“, wird nach wie vor überwiegend ein Ansatz verfolgt, bei dem verschiedene Fahrwerks- und Lenkungskomponenten an Prototypen umgebaut und danach im Fahrbetrieb subjektiv beurteilt werden. Diese Herangehensweise schließt Schwächen wie mangelnde Reproduzierbarkeit oder Reliabilität mit ein. Demgegenüber stehen kurze und kürzer werdende Produktlebenszyklen, die eine Verlagerung von Entwicklungsinhalten in die frühe, virtuelle Phase des Produktentstehungsprozesses (PEP) bedingen („Frontloading“), welche die Ingenieure nur mit Hilfe objektiver Werkzeuge bewältigen können.

Produktentstehungsprozesse sind zwar phasenspezifisch ähnlich, aber situations- und umfeldbezogen je nach Sparte individuell angepaßt. In der Produktentwicklung wird ein Zielsystem über den Zeitstrahl hinweg innerhalb eines Handlungssystems konkretisiert und so in das Objektsystem, das Produkt, überführt¹. Für das Produkt Kraftfahrzeug bedeutet das eine Überführung im Prozeßmodell von einer Phase der Profilierung meistens in Anlehnung an eine Vorgängerbaureihe oder als Derivat bis zum Recycling, siehe Abb. 1.1. Der vorliegende Beitrag konzentriert sich auf die Konzept- und Gestaltrealisierungsphase, die Validierungen beinhaltet². Zur Zieldefinition und zur Zielüberwachung des Systems bedarf es Kriterien; bezogen auf die Fahrwerks- und Lenkungsabstimmung des Fahrzeugs werden diese Kriterien durch Kenngrößen ausgedrückt. Die einzelnen Prozeßschritte sind vernetzt und laufen teilweise simultan ab. Einzelne Problemlösungs-

¹ Albers / Meboldt 2006

² Albers et al. 2006

prozesse sind über den Lebenszyklus hinweg und innerhalb der einzelnen Phasen des Referenzmodells kaskadiert, die wiederum phasenübergreifend interagieren. Übertragen auf die Fahrzeugentwicklung werden die Entwicklungsziele in Konzept- und Lastenheften dokumentiert, in der virtuellen Umgebung simuliert, mit Prototypenteilen in Aggregateträgern erstmals real erprobt, mit Prototypfahrzeugen gesamthaft entwickelt und mit Vorserienfahrzeugen feinabgestimmt. Die verschiedenen Fachbereiche, die diese Entwicklungsphasen bearbeiten und verantworten, können sich dabei immer wiederum auf die Zieldefinitionen berufen.

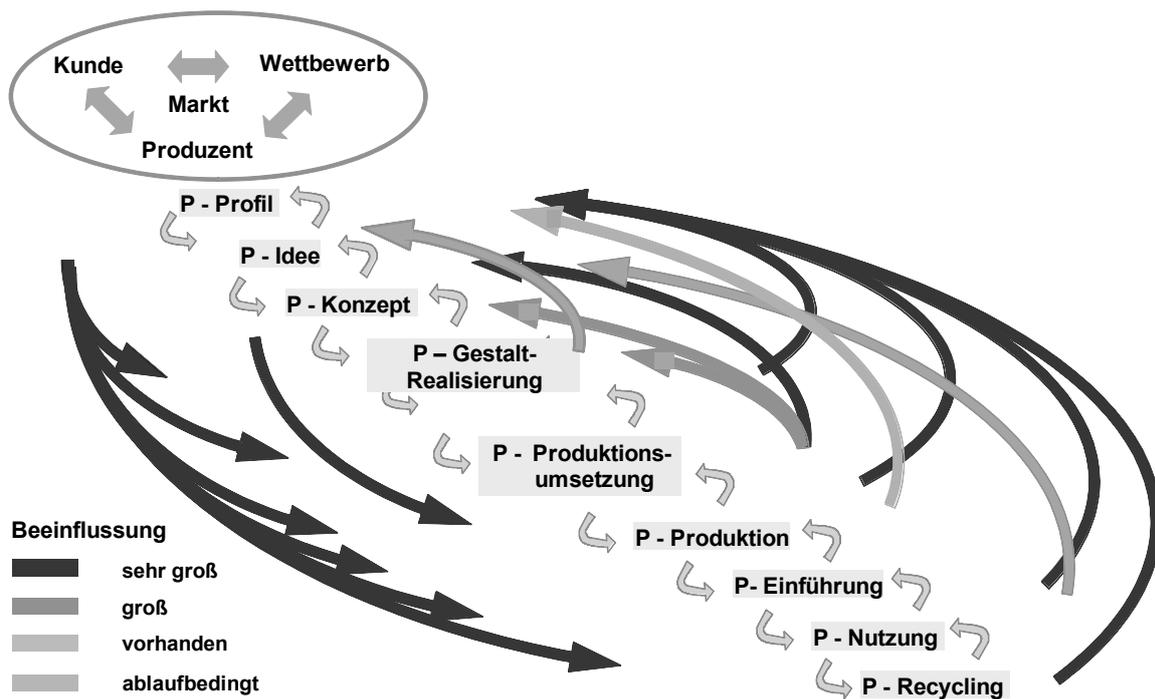


Abb. 1.1: Phasenmodell der Produktentstehung³.

Wie kann, den gesamten Produktentstehungsprozeß hindurch, der subjektive, querdynamische Fahreindruck objektiv in Zieldefinitionen verankert werden? Dieser Frage wird hier nachgegangen, womit der vorliegende Beitrag das IEPK-Forschungsgebiet der Längsdynamik-Komfortobjektivierung⁴ ergänzt.

Die Arbeit beinhaltet zwei Hauptteile; zum einen wird in Kapitel 4 ein Ansatz verfolgt, bei dem mehrere auf dem Markt befindliche Fahrzeuge sowohl objektiv in Open-Loop Fahrdynamikmanövern als auch subjektiv in alltäglichen Fahrprofilen vermessen werden. Die vorgestellten Fahrmanöver liefern objektive Kennwerte,

³ aus Albers 2008

⁴ Albers / Albrecht 2002, Albers / Albrecht 2003, Albers / Albrecht 2004a, Albers / Albrecht 2004b, Albers et al. 2007, Albers et al. 2008a, Albers et al. 2008c

die auf Zusammenhänge mit den subjektiven Fahreindrücken untersucht werden. Zum anderen stehen in Kapitel 5 demgegenüber modellbasierte Ansätze und ein reales Entwicklungswerkzeug, mit Hilfe derer Einzelaspekte der Lenkmomentcharakteristik in einem Versuchsträger betrachtet werden. Die Untersuchungsthemen zur Rolle des Lenkmoments reichen von einfachen Spurwechseln über den Hochgeschwindigkeitsgeradeauslauf bis zur Verknüpfung (durch virtuelle Bauteilveränderungen) von gezielt variierten Kennwerten mit den subjektiven Haupteindrücken über das Lenkmoment. Dazu werden im Einzelnen das Entwicklungswerkzeug, die jeweiligen Modelle, die Kennwerte aus den Manövern, die subjektiven „Meßinstrumente“ Fragebögen und die Korrelationsergebnisse aufgeführt. Diesen beiden Hauptteilen ist im nachfolgenden Kapitel 2 eine Literaturrecherche zum Stand der Forschung und Technik der Fahreigenschaften, Objektivierung und Modellbildung bzw. sind in Kapitel 3 die Ziele der Arbeit vorgelagert. Eine Zusammenfassung mit Ausblick bildet den Abschluß.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Um für den virtuellen und realen Produktentwicklungsprozeß Kenngrößen zur Validierung des gewünschten Lenkcharakters und Lenkdiskomforts abzuleiten, werden in der vorliegenden Ausarbeitung, neben einer Analyse von subjektiven und objektiven Daten über mehrere reale Fahrzeuge, modellbasierte Methoden eingesetzt. Auf Basis des in Kapitel 2 ermittelten Standes der Forschung und Technik werden in Kapitel 3 die Ziele dieser Arbeit formuliert.

Kapitel 4 beschäftigt sich zum einen mit der Vorstellung der statistischen Analysemethoden, die durchgängig in allen Untersuchungen implementiert ist, und zum anderen mit der Suche von Zusammenhängen zwischen dem subjektiven Fahrereindruck und objektiven Charakteristika auf Basis von zehn Fahrzeugen. Aus der Analyse ergeben sich validierte Erkenntnisse zur Beschreibung des Gesamtfahrzeugverhaltens und Indikatoren für Lenkmoment-Kenngrößen. Insbesondere hinsichtlich der Verknüpfung des subjektiven Gefallens- mit dem Niveau-Empfinden werden neue Fragestellungen aufgeworfen.

Kapitel 5 greift diese „weißen“ Felder aus dem vorhergehenden Abschnitt auf und bearbeitet sie gezielt in den Fahrzuständen „Spurwechsel“ und „Hochgeschwindigkeitsfahrt“. Dies geschieht mit Hilfe von parametrischen Modellen über das dynamische Lenkmomentverhalten in Kombination mit einem realen Entwicklungswerkzeug, dem Lenkmomentensteller. Des Weiteren wird ein modell-basierter Ansatz zur Fahrdynamik-Analyse in Bezug auf die Komponenten- und Gesamtfahrzeugebene zu einer Methode der Lenkmoment-Objektivierung ausgebaut. Die Methode ermöglicht die virtuelle Veränderung von Bauteileigenschaften und damit des Gesamtfahrzeugverhaltens bzw. seiner es beschreibenden Kenngrößen sowie ihr Erfahren in einem Versuchsträger. So wird eine Analyse der subjektiv-objektiv Zusammenhänge im quasi-stationären Fahrbereich ermöglicht. Am Beispiel einer zweiten, amerikanischen Probandengruppe wird die Methode exemplarisch nochmals angewandt, um Unterschiede in der subjektiven Lenkcharakterevaluierung aufgrund der geographischen Herkunft und Marktsozialisation aufzuzeigen.

Die Objektivierung ging von der zentralen Hypothese aus, daß Zusammenhänge zwischen dem subjektiven Eindruck und objektiv bestimmbar Charakteristika

des Gesamtfahrzeugverhaltens, hier insbesondere des Lenkmoments, bestünden. Dies kann mittels der etablierten reliablen, validen und objektiven Methode durch signifikant hohe Korrelationskoeffizienten zwischen den subjektiven und objektiven Niveau-Evaluationen im relevanten Betriebsraum belegt werden. Hinsichtlich der notwendigen stationären Grundabstimmung und dazu hinreichendem dynamischen Verhalten des Lenkmoments wurden Indikatoren für Kenngrößen gefunden. Das Niveau und subjektive Gefallen mehrerer Aspekte, wie z.B. des Wankens, lassen sich im gesamten Fahrgeschwindigkeitsbereich eindeutig verknüpfen.

Aus den Analysen der subjektiven und objektiven Fahrzeugevaluationen folgten zu den in den Zielen der Arbeit formulierten, verfeinerte Hypothesen: erstens, das Lenkmoment habe Einfluß auf das Empfinden des Aufbauverhaltens und des Geradeauslaufs, speziell bei hohen Geschwindigkeiten. Diese Hypothesen bestätigen sich durch Untersuchungen über Verläufe des Lenkmoments im dynamischen Bereich von Spurwechseln. Fällt die Lenkmomenthysterese im relevanten Frequenzbereich überschneidend aus, wird das Verhalten als unpräzise, eckig und z.T. als instabil bezeichnet. Vergleichbares gilt in einem weitaus kleineren Lenkwinkel- und höheren Fahrgeschwindigkeitsbereich für den Geradeauslauf, da sich die Fahrerregelgüte bei fehlender oder zu großer Hysterese verschlechtert.

Die weiteren Hypothesen lauteten: Mit Hilfe eines modellbasierten Ansatzes kann die Lenkkomfort-Klassifikation des Lenkmoments eindeutig getroffen, der Einfluß von Bauteileigenschaften auf das Gesamtverhalten analysiert und grundsätzlich die Validierungsgüte erhöht werden. Letzterer Punkt bemißt sich an den, auch für die Normalfahrer, konsistenten Korrelationen. Zum Zweiten, der modellbasierte Ansatz bildet das reale Verhalten in den virtuell gefahrenen Prüfmanövern hinreichend gut ab, so daß Auswirkungen von Parameteränderungen auf die Kenngrößen analysiert werden können. Außerdem ermöglicht die Methode das Erfahren und Evaluieren verschiedener Fahrzeugmodelle und Modifikationen mittels des Lenkmomentenstellers. Es können gezielt Eigenschaften eingestellt werden, die eine große Spreizung der Lenkmoment-Kennwerte bewirken. So ist es möglich, das Lenkmoment als Lenkcharakter-Gesichtspunkt zu identifizieren, was die Hypothese abschließend bestätigt. Für die stationäre Lenkmomentauslegung sind die Steigung und Höhe der Weave-Hysterese und die Lenkmomentbeträge aus Lenkungsziehen von Bedeutung.

Als Erweiterung der Erkenntnisse über die Einordnung des Lenkmoments in die Lenkkomfortgattung Lenkcharakter wurde die Hypothese aufgestellt, daß interkulturelle Unterschiede in der Wahrnehmung von Lenkmomenten existierten. Diese Hypothese muß teilweise verworfen werden, weil die Normal- und Expertenfahrer beider Probandengruppen (deutsche und amerikanische) ähnlich enge bis sehr enge Verknüpfungen im Niveau aufweisen. Des Weiteren sollte die Lenkmoment-

charakteristik im Mittenbereich ähnlich abgestimmt werden, wohingegen sich das allgemein bevorzugte Lenkmomentniveau signifikant unterscheidet; die amerikanischen Probanden bevorzugen im Off-Centre Bereich niedrigere Lenkmomente.

Ausblickend stellen sich hieraus weitere Ideen und Aufgaben für die Forschung:

- Es sollte versucht werden, das Zeitverhalten der Fahrzeugreaktionen zu objektivieren.
- Die Wirkkette und -mechanismen hinter der fahrgeschwindigkeitsabhängigen Gierdämpfung sind genau zu untersuchen. Der grundsätzliche Zusammenhang zwischen subjektivem Fahreindruck und Lenkmomentenhysterese könnte als Funktion des Anlenkmoment-Niveaus beleuchtet werden.
- Durch die präsentierte Methode sind für die einzelnen Kenngrößen Zielbereiche bestimmbar. Damit ein Fahrzeug den gewünschten Wert der Kenngröße annimmt, können die Bauteilkonfigurationen des Fahrzeugs (aber auch mit zusätzlichem Modellierungsaufwand die EPS-Reglerparameter) über eine Rückwärtsrechnung des modell-basierten Ansatzes bestimmt werden („Reverse Engineering“).
- Mit Hilfe eines kombinierten Stellers, der sowohl Lenkwinkel als auch Lenkmoment verändert, kann das Zusammenspiel aus Fahrzeugreaktion, z.B. der Gierreaktion, und Lenkmoment objektiviert, oder aber auch z.B. die Linearität der Fahrzeugreaktion genauer untersucht werden.
- Da die ermittelten Charakterausprägungen der jeweiligen Kenngröße eine gesamthafte Gültigkeit vorweisen, werden die Lenkmomente auf Kundenwunsch hin innerhalb der Zielbereiche für die verschiedenen Fahrzeugtypen, wie z.B. SUV oder Sportwagen, nuanciert.

Die in dem vorliegenden Beitrag entwickelten, eingesetzten und validierten Methoden bestätigen objektive Kenngrößen, siehe Abb. 6.1, die den subjektiven Lenkkomfort beschreiben. Diese validen Kenngrößen können im Produktentwicklungsprozeß als Referenzen für digitale Prototypensimulationen und reale Prototypenerprobungen genutzt werden. Entsprechend der Organisation des PEP werden digitale Prototypen getestet und auf Einhaltung der objektiven Kennwerte überprüft noch bevor reale Fahrzeuge gebaut sind. Dies dient einer Basisabstimmung der zu realisierenden Komponenten. Mit fortschreitender Entwicklungsreife werden die Kenngrößen parallel an Ergebnissen aus Gesamtfahrzeugerprobungen reflektiert.

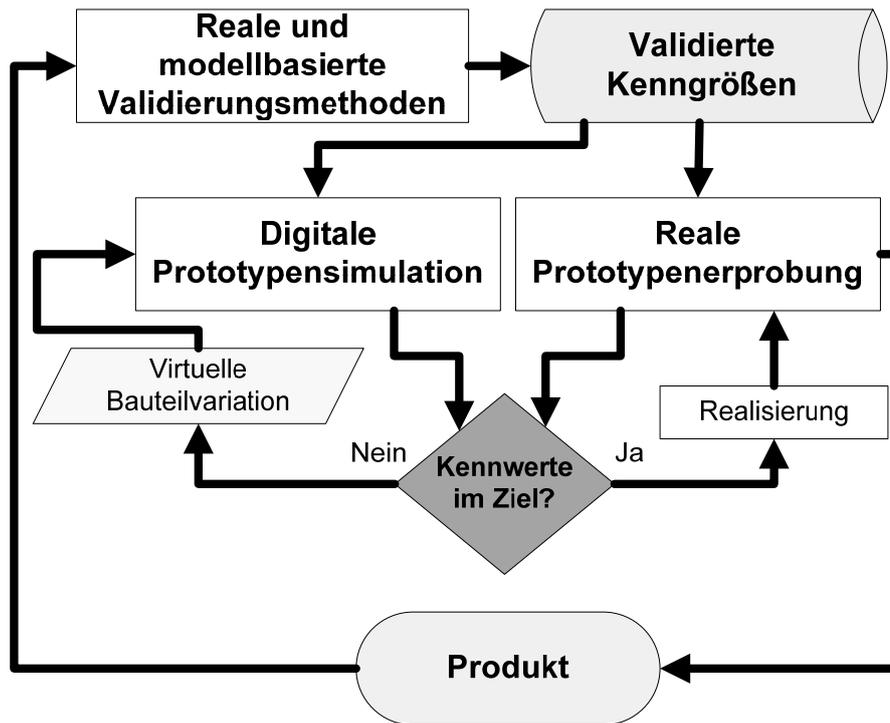


Abb. 6.1: Einsatz der validierten Kenngrößen in der Produktoptimierung.

Diese Ergebnisse werden idealerweise wiederum in die Simulation zur Feinoptimierung zurückgespiegelt. Am Ende dieser Iterationen steht das Produkt, das im Hinblick auf Folgegenerationen neuerlich den Validierungsmethoden unterzogen werden kann, um Kenngrößen weiterzuentwickeln oder Zielbereiche zu fokussieren.