

Die Entwicklung von Personenkraftwagen (PKW) befindet sich in einem kontinuierlichen Veränderungsprozess, insbesondere mit den Zielen, das Fahrerlebnis für die Kunden zu verbessern, den Entwicklungsprozess effizienter zu gestalten und um neue gesetzliche Vorschriften zu erfüllen. Die zwei zuerst genannten Ziele sind aus Sicht eines Fahrzeugherstellers sowohl intrinsisch als auch extrinsisch motiviert, wobei der hohe Wettbewerbsdruck in der Automobilbranche eine entscheidende Rolle spielt. Nichtsdestotrotz dauert ein Fahrzeugentwicklungsprozess in der Regel etwa vier bis sechs Jahre, was eine kurzfristige Reaktion auf neuartige Produktentwicklungen von Wettbewerbern oder gesellschaftliche Forderungen z.B. nach Elektromobilität erschwert. Die lange Entwicklungszeit ist auf die hohe Komplexität der Fahrzeugentwicklung zurückzuführen und Anlass an weiteren Verbesserungen zu forschen.

Zur Strukturierung des komplexen Entwicklungsprozesses wird in der Automobilbranche häufig nach „Systems Engineering“ (siehe z.B. ISO/IEC/IEEE 15288 [ISO23]) bzw. „Automotive Systems Engineering“ (siehe z.B. [MW13, WPM18, HKS21]) vorgegangen, das in Abbildung 1.1 beispielhaft mit einem V-Modell für die Lenksystementwicklung veranschaulicht wird. Die Grundprämisse dieses Vorgehens ist, das zu entwickelnde Fahrzeug von Beginn an entsprechend definierter Kundenanforderungen auszulegen. Aufgrund der Systemkomplexität ist eine Aufteilung des Gesamtfahrzeugs in Subsysteme (ggf. mehrere Ebenen<sup>1</sup>) und Komponenten sinnvoll (siehe z.B. [Abe19, Büc20, Fon21]), wobei ausgehend von den Kundenanforderungen immer die Anforderungen der darüber liegenden Ebene zu erfüllen sind. Diese stufenweise Zielwertableitung (engl. „target cascading“) ist Hauptbestandteil der Konzeptphase nach Systems Engineering und wird meist bis zur Subsystemebene beim Fahrzeughersteller durchgeführt. Die Komponentenentwicklung auf Basis von Lastenheften erfolgt in der Regel bei Zulieferern. Die anschließende schrittweise Integration der Komponenten bis zum Gesamtfahrzeug findet wieder beim Fahrzeughersteller statt und beinhaltet neben Funktions- und Sicherheitstests eine Überprüfung inwieweit die in der Konzeptphase gestellten Anforderungen erfüllt sind. Sofern alle erforderlichen Tests bestanden sind, erfolgt die Serienfreigabe des Fahrzeugs.

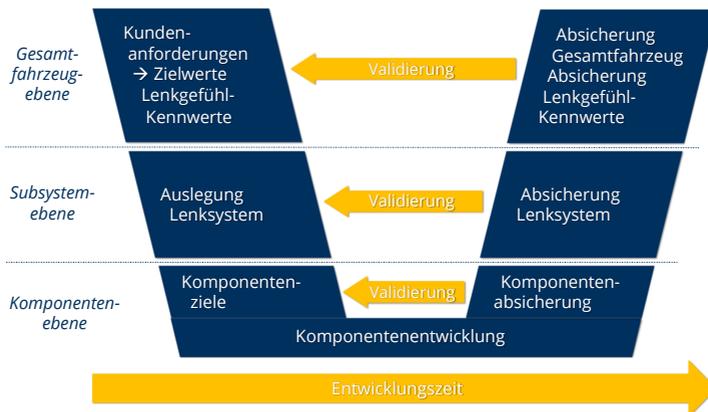


Abbildung 1.1.: V-Modell Lenksystementwicklung im Automobilentwicklungsprozess

<sup>1</sup> Alternativ können die Ebenen inkl. der Gesamtfahrzeugebene auch als Systemebene 0, 1, 2, usw. bezeichnet werden.

## 1. Einleitung

Da in der Konzeptphase meist noch keine Hardware-Prototypen zur Verfügung stehen, ist ein Einsatz von virtuellen Prototypen unerlässlich. Allerdings besteht die Schwierigkeit, dass die virtuellen Prototypen nicht mit Messungen realer Prototypen parametrierbar sind und eine zuverlässige Auslegung ermöglichen. Die Erfordernis für virtuelle Prototypen wird zusätzlich durch den Wunsch nach Kosteneinsparung im rechten Ast des V-Modells verstärkt, indem mit geeigneten Simulationsmodellen die Anzahl an Hardware-Prototypen reduziert werden soll. Weiterhin gilt, dass Kosten zur Problembehebung umso geringer ausfallen, je früher ein Problem im Entwicklungsprozess festgestellt wird (siehe z.B. [May15, Lan16, Büc20]). Daher wird ein sogenanntes „Front-Loading“ angestrebt, wobei Absicherungsschritte in der Regel so früh wie möglich mit virtuellen Methoden starten sollen. Insgesamt ist die Entwicklung und Verbesserung von Simulationsmodellen eines der wichtigsten aktuellen Forschungsfelder in der Automobilbranche.

Ein zentrales Entwicklungsziel aller Fahrzeughersteller ist ein möglichst gutes Fahrgefühl für die Fahrzeuginsassen, wobei der Fokus auf dem Fahrer<sup>2</sup> liegt. Hintergrund dieses Entwicklungsziels sind neben dem Kundengefallen auch Sicherheitsaspekte. Beispielsweise benötigt der Fahrer zur sicheren Fahrzeugführung Rückmeldung zu Kräften zwischen Fahrbahn und Reifen, um auch in kritischen Situationen (z.B. Ausweichmanöver) das Fahrzeug zu kontrollieren. Daraus entsteht der Regelkreis Fahrer-Fahrzeug-Umwelt (siehe z.B. [Bra15, Hof17, SFHP19]) in dem die Regelgüte des Fahrers von der präzisen Rückmeldung von Regelabweichungen abhängt. In diesem Zusammenhang ist u.a. das Lenkgefühl von entscheidender Bedeutung, da es die Rückmeldung zur Kursführung des Fahrzeugs beinhaltet.

Die Relevanz des Lenkgefühls für die Fahrzeugbewertung zeigt sich auch in Plesstests (siehe z.B. [Kac19, Sie20, Wit23]), die in aller Regel eine Beurteilung des Lenkgefühls beinhalten und bei negativer Bewertung gegebenenfalls Kunden vom Fahrzeugkauf abhalten können. Dies bestätigt sich z.B. in Umfragen des Insurance Institute for Highway Safety [MW10] und Parment [Par16] bei denen „Handling“ als Bestandteil des Lenkgefühls ein sehr wichtiges Kaufkriterium für Kunden darstellt. Mit der Einführung von hoch- und vollautomatisierten Fahrzeugen (Level 4 & 5 [ISO21]) wird die Relevanz des Lenkgefühls in der jetzigen Form abnehmen. Allerdings lässt die Entwicklungsgeschwindigkeit der vergangenen Jahre vermuten, dass ein verbreiteter Einsatz vollautomatisierter Fahrzeuge frühestens im kommenden Jahrzehnt realistisch ist (siehe z.B. [RKW23, Ken23, N.N23]). Außerdem ist zu erwarten, dass per Hand gesteuertes Lenken als wählbares Fahrerlebnis erhalten bleibt.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das Lenkgefühl ein wichtiger Bestandteil der Kunden- und auch der Sicherheitsanforderungen im Fahrzeugentwicklungsprozess ist und mittelfristig bleiben wird. Daher ist es im Rahmen des System Engineerings in der Konzeptphase einzubinden, woraus sich die folgende Hauptforschungsfrage dieser Arbeit ergibt.

***Hauptforschungsfrage: Wie sind Lenksysteme von PKW in der Konzeptphase auszulegen, um ein definiertes Lenkgefühl zu erreichen?***

Das daraus hervorgehende Hauptziel der Arbeit ist, einen strukturierten Entwicklungsprozess für das Lenksystem in der Konzeptphase zu definieren. Dieser Prozess soll ausgehend vom angestrebten Lenkgefühl des Fahrers auf Gesamtfahrzeugebene Eigenschaften des Lenksystems auf Subsystemebene ableiten. Dabei ergeben sich möglicherweise auch Anforderungen an Reifen und Fahrwerk, die zusammen mit dem Lenksystem Fahrer und Straße verbinden, was in Nebenforschungsfrage 1 festgehalten ist.

---

<sup>2</sup>Mit „Fahrer“ sind Personen jeden Geschlechts gemeint. Mit dem Ziel der sprachlichen Kompaktheit wird im Rahmen dieser Arbeit immer die kürzeste Wortform verwendet.

*Nebenforschungsfrage 1: Welche Anforderung müssen von Reifen und Fahrwerk erfüllt werden, um vorgegebene Lenkgefühl-Zielwerte zu realisieren?*

Zur Beantwortung der genannten Forschungsfragen ist als Ausgangsbasis entsprechend Nebenforschungsfrage 2 zunächst das subjektive Lenkgefühl des Fahrers zu objektivieren.

*Nebenforschungsfrage 2: Welche Lenkgefühl-Eigenschaften sind für den Fahrer relevant und wie können sie objektiv beschrieben werden?*

Damit sich mit den wenigen Fahrzeuginformationen in der Konzeptphase die ermittelten Lenkgefühl-Eigenschaften vorhersagen lassen, sind passende Simulationsmodelle für Lenksystem, Fahrwerk und Reifen erforderlich, die in ein Gesamtfahrzeugsimulationsmodell eingebunden sind. Die konkrete Gestaltung dieser Modelle klärt Nebenforschungsfrage 3.

*Nebenforschungsfrage 3: Wie lassen sich Lenksystem, Fahrwerk und Reifen mit den Randbedingungen der Konzeptphase geeignet modellieren, um die relevanten Lenkgefühl-Eigenschaften abzubilden?*

Mit dem generierten Gesamtfahrzeugsimulationsmodell und den objektivierten Lenkgefühl-Eigenschaften ist die Grundlage für das genannte Hauptziel der Arbeit gelegt. Als letzter Zwischenschritt ist in Nebenforschungsfrage 4 zu klären, wie Lenksystem, Fahrwerk und Reifen die Lenkgefühl-Eigenschaften quantitativ beeinflussen. Daraus folgt das erforderliche Wirkkettenverständnis zur Beantwortung der Hauptforschungsfrage.

*Nebenforschungsfrage 4: Wie beeinflussen Lenksystem, Fahrwerk und Reifen die Lenkgefühl-Eigenschaften?*

Der Aufbau der Arbeit orientiert sich an den fünf Forschungsfragen und ist in Abbildung 1.2 veranschaulicht. Nach der Einleitung wird in Kapitel 2 der Stand der Forschung zur Hauptforschungsfrage präsentiert und daraus die erforderlichen Grundlagen für die Arbeit abgeleitet. Daraufhin wird in Kapitel 3 Nebenforschungsfrage 2 untersucht und als Ergebnis ein Katalog an objektiven Lenkgefühl-Kennwerten entwickelt. Auf dieser Basis erfolgt in Kapitel 4 eine Erweiterung der verwendeten Simulationsmodelle für Lenksystem, Fahrwerk und Reifen, um Nebenforschungsfrage 3 zu beantworten. Das daraus hervorgehende finale Gesamtfahrzeugmodell wird in Kapitel 5 mit einer Sensitivitätsanalyse untersucht. Diese Untersuchung dient in Kapitel 6 zur quantitativen Wirkkettenanalyse für die Lenkgefühl-Eigenschaften im Rahmen von Nebenforschungsfrage 4. In Kapitel 7 wird aufbauend auf der Wirkkettenanalyse die Hauptforschungsfrage unter Berücksichtigung von Nebenforschungsfrage 1 beantwortet, indem ein strukturierter Entwicklungsprozess für die Lenkgefühl-Eigenschaften vorgestellt wird. Den Abschluss bilden Zusammenfassung und Ausblick in Kapitel 8.

Um die Themenvielfalt der Arbeit etwas einzugrenzen werden abgesehen vom Unterstützungsmotor des Vorderachslenksystems keine aktiven Systeme untersucht und in die Simulationen integriert. Das heißt kombinierte Längs- und Querdynamik mit Einflüssen durch den Fahrzeugantrieb sowie Fahrerassistenzsysteme, die das Lenkgefühl beeinflussen können (z.B. Spurhalteassistent, ESP), werden nicht berücksichtigt. Weiterhin sind Hinterachs- und Überlagerungslenkung sowie Steer-by-Wire Lenksysteme kein Bestandteil der Simulationsmodelle, jedoch ist die in Kapitel 3 durchgeführte Objektivierung des Lenkgefühls auch für Fahrzeuge mit derartigen Systemen gültig. Lediglich das Simulationsmodell müsste für diese Systeme angepasst und die Wirkketteneinflüsse beachtet werden. Dies gilt auch für eine variable Feder-/Dämpferregelung und aktive Wankstabilisatoren.



Abbildung 1.2.: Struktur der Arbeit

## 2. Stand der Forschung



In diesem Kapitel werden zuerst Auslegungsmethodiken für Lenksysteme präsentiert, was die Grundlage zur Beantwortung der Hauptforschungsfrage (siehe Kapitel 1) darstellt. Es folgt eine Literaturübersicht zur objektiven Beschreibung des Lenkgefühls in Kapitel 2.2 als Voraussetzung für Kapitel 3. Der aktuelle Forschungsstand hinsichtlich der Gesamtfahrzeugmodellierung wird in Kapitel 2.3 mit dem Hauptfokus auf Lenksystem, Fahrwerk und Reifen vorgestellt, worauf Kapitel 4 aufbaut. Abschließend sind in Kapitel 2.4 wichtige Grundlagen zur Sensitivitätsanalyse aufgeführt, die in Kapitel 5 angewendet werden.

## 2.1. Auslegungsmethodiken für Lenksysteme

Ein wichtiger Orientierungspunkt für diese Arbeit ist die Dissertation von Wimmer [Wim13], welche ebenfalls einen virtuellen Entwicklungsprozess für elektromechanische Lenksysteme präsentiert und weitgehend gleiche Ziele wie diese Arbeit verfolgt. Die Dissertation von Wimmer [Wim13] wird daher im Folgenden vergleichsweise ausführlich vorgestellt, wobei der darauf aufbauende Forschungsbedarf erläutert wird. Insgesamt ist problematisch, dass Wimmer [Wim13] aus Geheimhaltungsgründen absolute Werte meidet und in Abbildungen Relativdarstellungen verwendet sowie Kennwertübersichten unvollständig sind.

Der erste wichtige Aspekt der Arbeit von Wimmer ist die „Objektive Beschreibung von Lenkeigenschaften“ [Wim13] als Ausgangspunkt für die virtuelle Entwicklung. Objektive Lenkgefühl-Kennwerte stellen auch in dieser Arbeit die Grundlage für die Lenksystementwicklung dar (siehe Kapitel 2.2 und 3), wobei viele Kennwerte den Bewertungskriterien von Wimmer [Wim13] ähneln. Wimmer [Wim13] baut in seiner Arbeit großteils auf den Ergebnissen von Harrer [Har06] auf und führt eine Probandenstudie zum Parkieren selbst durch.

Analog zu dieser Arbeit (siehe Kapitel 2.3 und 4) schließt sich bei Wimmer [Wim13] die Erstellung von Simulationsmodellen an die objektive Beschreibung des Lenkgefühls an. Wimmer [Wim13] entwickelt ein Lenksystemmodell mit fünf Freiheitsgraden und einer vergleichsweise detaillierten Abbildung der physikalischen Effekte einzelner Bauteile. Für die Bewertung des Frequenzbereichs bis 4 Hz verzichtet Wimmer [Wim13] durch Zusammenlegen von zwei Trägheiten auf einen Freiheitsgrad. Für stationäre Betrachtungen erfolgt eine noch stärkere Vereinfachung mit Vernachlässigung der Trägheitsterme und der dynamischen Reibungseffekte, wodurch eine Parametrierung in der Konzeptphase möglich sein soll [Wim13]. Als Reifenmodell für Querdynamikmanöver setzt Wimmer [Wim13] das Magic Formula Reifenmodell [PB92] (siehe Kapitel 2.3.2) ein. Beim Parkieren im Stand und zur Simulation von Reifenschwingungen wird von Wimmer [Wim13] das FTire-Reifenmodell [Gip07] (siehe Kapitel 2.3.2) angewendet. Die Simulation des Fahrwerks wird in der Arbeit von Wimmer [Wim13] größtenteils mit einem Mehrkörper-Simulationsmodell (MKS) und vereinzelt mit einem kennfeldbasierten Zweispurmodell ausgeführt. Für ausgewählte Themen präsentiert Wimmer [Wim13] auch eine Einspurmodell mit einem Freiheitsgrad für die Wankbewegung.

Wimmer [Wim13] teilt den virtuellen Entwicklungsprozess in eine „Lenkungsgrundausslegung“ und eine „Integrationsphase“ auf. Die Grundausslegung umfasst die Leistungsbestimmung des Unterstützungsmotors beim Parkieren im Stand, die Lenkungsrückstellung und die stationäre Fahrdynamik. Für die Simulation des Parkierens im Stand verwendet Wimmer [Wim13] ein MKS-Modell mit FTire-Reifenmodell, was den Zielen der Konzeptphase widerspricht und nur mit der Modellparametrierung eines ähnlichen Vorgängerfahrzeugs schätzungsweise möglich ist. Bei der Bewertung der Lenkungsrückstellung bei 10 km/h vernachlässigt Wimmer [Wim13] den wichtigen Anteil des Bohrmoments. Die stationäre Fahrdynamik wird nicht ausreichend strukturiert ausgelegt, weshalb die gesamte Grund-

## 2. Stand der Forschung

auslegung „häufig durchlaufen werden und zwischen den einzelnen Anforderungen gewichtet werden“ [Wim13] muss. In der Integrationsphase leisten die Modelle von Wimmer [Wim13] eine Unterstützung zur Integration der Hardwarekomponenten in das Lenksystem und anschließend in das Gesamtfahrzeug. Ein wichtiger Aspekt ist die Untersuchung des Schwingungsverhaltens des Lenksystems hinsichtlich Stör- und Nutzeninformationen. Außerdem werden Lenkungsrückstellung und Fahrstabilität bewertet. Zusätzlich führt Wimmer [Wim13] eine Optimierung des „Lenkcharakters“ durch, wobei Modellparameter genutzt werden, die in dieser Entwicklungsphase noch anpassbar sind.

Die oben erwähnte Integrationsphase erfolgt in der rechten Hälfte des V-Modells (siehe Abbildung 1.1). Dementsprechend gelingt es Wimmer [Wim13] nicht die objektiven Lenkgefühl-Kennwerte bereits in der Konzeptphase ohne Hardware vollständig auszulegen. Der Hauptgrund hierfür ist die gewählte Modellstruktur mit einem MKS-Modell für das Fahrwerk, einem detaillierten Lenkungsmodell mit bis zu fünf Freiheitsgraden sowie der Verwendung des FTire-Reifenmodells. Die Parametrierung dieser Modelle ist zu umfangreich, um sie bereits in der Konzeptphase durchzuführen. Das ist eine zentrale Erkenntnis für die Modellierung der Lenkgefühl-Kennwerte in dieser Arbeit.

Eine große Anzahl weiterer Literaturquellen beschäftigt sich mit einzelnen Aspekten, welche für die virtuelle Auslegung des Lenksystems bedeutend sind. Die jeweiligen relevanten Informationen dieser Literaturquellen, werden insbesondere in den folgenden Kapiteln 2.2, 2.3 und 2.4 aufgegriffen.

Da die Lenkbewegungen über Fahrwerk und Reifen auf die Straße übertragen werden und umgekehrt die resultierenden Kräfte auf das Lenksystem wirken, sind auch Auslegungsmethoden für Fahrwerk und Reifen für die Ziele dieser Arbeit wichtig. Dabei sind Veröffentlichungen hervorzuheben, die Fahrwerk und Reifen gemeinsam in der Konzeptphase auslegen, um Gesamtfahrzeugzielwerte für Längs-, Quer- und Vertikaldynamik zu erreichen. Hierzu gehört insbesondere die Dissertation von Abel [Abe19], weshalb die Arbeit analog zu Wimmer [Wim13] ausführlich vorgestellt wird. Weiterhin zu erwähnen sind die Arbeiten von Kim et al. [KRPS01, KMPJ03], Cao et al. [CSA11], Mäder [Mäd12], Röski [Rös12] und Angrick [Ang17].

Abel [Abe19] beschäftigt sich in seiner Dissertation intensiv mit der Fahrwerk- und Reifenauslegung im Normalfahrbereich während der Konzeptphase. Dabei berücksichtigt Abel [Abe19] auch den Einfluss des Lenksystems auf den Lenkgradwinkelgradienten, jedoch keine weiteren Lenkgefühl-Kennwerte. Zu Beginn analysiert Abel [Abe19] den „Arbeitsraum des Fahrzeugs eines Normalfahrers“, womit die Grenzen der Arbeit u.a. hinsichtlich Quer- und Längsbeschleunigung sowie Fahr- und Lenkgeschwindigkeiten ermittelt werden. Der Normalfahrbereich erstreckt sich bis zu einer Querbeschleunigung von  $4 \text{ m/s}^2$ , was in etwa auch dem Bereich eines näherungsweise linearen Verhaltens (Linearbereich) von Fahrwerk und Reifen entspricht. Für die Vertikaldynamik nutzt Abel [Abe19] die Unterteilung in „Primary Ride“, „Secondary Ride“ und „Noise-Vibration-Harshness“ entsprechend Harrison [Har04] und Badiru [BC13]. In seiner Arbeit beschränkt sich Abel [Abe19] auf den Primary Ride mit Frequenzbereich von 0,5-6 Hz, der insbesondere Aufbauschwingungen umfasst. Höherfrequente Schwingungen werden nicht in die Auslegungsmethodik integriert. Die für die Auslegungsmethodik erforderlichen objektiven Gesamtfahrzeugkennwerte hinsichtlich Quer-, Längs- und Vertikaldynamik leitet Abel [Abe19] aus der Literatur ab.

Weiterer Bestandteil der Arbeit von Abel [Abe19] ist die Analyse der Subsysteme Lenkung, Fahrwerk und Reifen, um relevante Eigenschaften für die Auslegung zu ermitteln. Diese Eigenschaften werden mit „Einfachmodellen“ in Form eines „Hub-Nick-Schwingers“ für die Längs- und Vertikaldynamik sowie eines „erweiterten Einspurmodells“ für die Querdyna-

mik simuliert [Abe19]. Dabei ist hervorzuheben, dass Abel [Abe19] die Modelle vollständig analytisch herleitet und eine Parametrierung in der Konzeptphase möglich ist. Insgesamt acht Parameter werden in beiden Modellen verwendet. Jedoch gelingt Abel [Abe19] für die Auslegungsmethodik eine Zuordnung der Parameter zu nur jeweils einem Modell entsprechend der wichtigsten Wirkzusammenhänge. Dadurch ist eine nahezu wechselwirkungs-freie Auslegung der Parameter der beiden Modelle möglich.

Abel [Abe19] teilt die Auslegung in zwei Phasen auf. Zuerst werden „effektive Achscharakteristika“ [Abe19] aus den Gesamtfahrzeugzielwerten abgeleitet. Hierzu sind vier Schritte für den Hub-Nick-Schwinger und acht Schritte für das erweiterte Einspurmodell erforderlich. In der zweiten Phase sollen die effektiven Achscharakteristika durch Auslegung der Sub-systemeigenschaften von Fahrwerk, Reifen und Lenksystem erreicht werden. Sofern dies gelingt, ist von einer Erfüllung der Gesamtfahrzeugzielwerte auszugehen. Zur Verringerung der Entwicklungszeit und zum Aufzeigen weiterer Lösungsmöglichkeiten präsentiert Abel [Abe19] die Verwendung des Solution-Space-Algorithmus (siehe z.B. [ZH13, Gra13, Eic18]) für die Auslegungsmethodik. Abel [Abe19] weist abschließend anhand einer Beispielauslegung nach, dass die Verwendung der Auslegungsmethodik sowohl mit manueller Durchführung als auch mit dem Solution-Space-Algorithmus funktioniert.

Die von Abel [Abe19] entwickelte Auslegungsmethodik für die Konzeptphase ist eine wichtige Grundlage für diese Arbeit. Allerdings hat Abel [Abe19] das Lenkgefühl nur hinsichtlich des Lenkradwinkelgradienten betrachtet und viele nichtlineare Effekte, wie z.B. Reibung im Lenksystem, vernachlässigt. Hierfür sind aufwendigere Modelle und zahlreichere weitere Kennwerte auf Gesamtfahrzeugebene zur Beschreibung des Lenkgefühls erforderlich, die in dieser Arbeit entwickelt werden.

## 2.2. Objektive Beschreibung des Lenkgefühls

Entsprechend der Herleitung im vorangegangenen Kapitel 2.1 sind objektive Kennwerte zur Beschreibung des Lenkgefühls essentiell für eine virtuelle Lenksystementwicklung in der Konzeptphase. Daher werden in diesem Kapitel die Grundlagen zur Objektivierung des Lenkgefühls erläutert, bevor in Kapitel 3 konkrete objektive Lenkgefühl-Kennwerte vorgestellt und analysiert werden. In Ketzmerick et al. [KZA<sup>+</sup>22] ist bereits ein Überblick zum Forschungsstand der Lenkgefühlobjektivierung veröffentlicht worden, der als Basis für die nachfolgende Darstellung dient.

Der erste wichtige Schritt zur Objektivierung des Lenkgefühls ist eine Aufteilung des komplexen Gesamteindrucks in einzelne Subjektivkriterien. Dabei fokussiert sich diese Arbeit auf Lenkgefühlseigenschaften im sogenannten „engeren Sinn“ [Wol09, GWK17], der Eigenschaften enthält, die direkt am Lenkrad spürbar sind (z.B. Lenkradwinkel oder -moment). Eigenschaften des „erweiterten Sinns“ [Wol09, GWK17] beschreiben das Fahrzeugverhalten bei Kurvenfahrt (z.B. Eigenlenkverhalten oder Wankwinkel) und werden häufig auch als „Querdynamik“ bezeichnet. Detaillierte Untersuchungen zu diesem Thema sind u.a. in [Abe19] und [Kra11] zu finden.

In der Literatur werden von verschiedenen Autoren Kataloge mit subjektiven Lenkgefühlseigenschaften im engeren Sinn präsentiert (siehe z.B. [Har06, Zsc09, Wol09, NHS<sup>+</sup>14, Sch17]). Beispielsweise unterteilt Harrer [Har06] das Lenkgefühl in Manövrierbarkeit, Parkieren, Geradeausverhalten, Kurvenverhalten und Lenkungsrückmeldung<sup>3</sup>. Alle fünf Kategorien ent-

<sup>3</sup>Übersetzt aus dem Englischen: „Manouverability“, „Parking“, „Straight Ahead Ability“, „Cornering Ability“, „Steering Feedback“

halten Unterpunkte, sodass insgesamt 20 Bewertungskriterien vorhanden sind. Zschocke [Zsc09] verwendet separate Fragebögen für Stadtverkehr, ISO-Spurwechsel [ISO18] und Autobahnverkehr, wobei die Kategorien Parkieren, Rücklauf, Lenkmoment, Lenkwinkel und Fahrzeugreaktion bewertet werden und sich in Summe 32 Einzelkriterien ergeben. Als drittes Beispiel sei ein zur Verfügung stehender subjektiver Bewertungskatalog zu nennen, der in der Automobilindustrie angewendet wird. Hier erfolgt eine Unterteilung in Lenken im Stand, Lenkansprache aus der Mitte, Lenken mit geringer und hoher Dynamik während der Fahrt, Lenkungsrückstellung, Rückwirkung von Längskräften sowie Lenkradschwingungen, wobei 22 Einzelkriterien bewertet werden. Aus diesen drei unabhängigen Beispielen geht hervor, dass eine Vielzahl an subjektiven Kriterien in verschiedenen Fahrmanövern zur Beschreibung des Gesamteindrucks des Lenkgefühls erforderlich sind. Dabei ist zu beachten, dass nahezu jeder Bewertungskatalog unterschiedliches Vokabular verwendet, obwohl häufig vergleichbare subjektive Eigenschaften gemeint sind. In diesem Zusammenhang sei auf die Arbeit von Rothhämel et al. [RD10] verwiesen, die durch Befragung von ca. 60 Experten 163 Begriffe zur Beschreibung des Lenkgefühls auf 35 unabhängige Begriffe reduzierten. Einen Überblick zu einer Vielzahl weiterer Literaturquellen zu Lenkgefühlseigenschaften geben Wolf [Wol09] und Gómez et al. [GNBD16].

Der nächste wichtige Schritt für die Objektivierung des Lenkgefühls ist die Zuordnung von objektiven Kennwerten zu den subjektiven Lenkgefühlseigenschaften. Dafür ist eine quasi-objektive Formulierung der subjektiven Bewertungskriterien hilfreich, die bei den drei oben beispielhaft vorgestellten Subjektivkatalogen größtenteils zum Einsatz kommt. Ein entsprechendes Beispiel ist die Beschreibung des Kraftaufwands beim Parkieren. Harrer [Har06] verwendet das Subjektivkriterium „Lenkradmomentenhöhe“<sup>4</sup> in der Kategorie Parkieren und Zschocke [Zsc09] lässt das „Parkiermoment“ bewerten. Gómez et al. [GNBD16] präsentieren eine Übersicht von ca. 40 objektiven Kennwerten, für die in Forschungsarbeiten vor 2016 Zusammenhänge zu subjektiven Kriterien angegeben werden. Allerdings ist zu beachten, dass keine Redundanzen zwischen den Kennwerten berücksichtigt werden.

In der Zeit nach 2016 sind insbesondere die Dissertationen von Schaare [Sch17], Grau [Gra17] und van Ende [End16] als wichtige Beiträge zur Objektivierung des Lenkgefühls zu nennen. Schaare beschäftigt sich mit der Identifikation eines markttypischen Lenkgefühls, auch Hersteller-DNA genannt. Grau untersucht das Lenkgefühl im Grenzbereich und van Ende gibt einen detaillierten Einblick in die Einflüsse von Lenksystem und Fahrzeugeigenschaften auf das Mittengefühl. Darüber hinaus sind auch Fahrsimulatoren in den vergangenen Jahren mehrfach für Objektivierungsversuche verwendet worden. Hier sind beispielhaft die Arbeiten von Dang et al. [DCL<sup>+</sup>16] und Skarzynska [Ska18] zu nennen. Dang et al. haben Probanden stark variierte Lenkradmomentenverläufe im Mittenbereich bewerten lassen, um einen optimalen Lenkradmomentenverlauf zu finden. Skarzynska hat mit einer Probandenstudie den Einfluss von Reibung auf das Mittengefühl untersucht. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass sich das Fahrgefühl zwischen Simulator und Realität unterscheidet. Gómez et al. [GEC<sup>+</sup>16] konnten daher bei einem Vergleich beider Versuchsmethoden nur für 62% der verwendeten objektiven Lenkgefühl-Kennwerte und für 78% der Lenkgefühl-Subjektivkriterien gleiche Tendenzen zwischen Fahrversuch und Fahrsimulator feststellen.

Trotz der weiteren Arbeiten behält eine Aussage von Gómez et al. [GNBD16] aus dem Jahr 2016 seine Gültigkeit: „Obwohl jeder Fahrzeughersteller objektive Anforderungen und Verifizierung für die Fahrzeugdynamik wünscht und seit mehr als einem halben Jahrhundert daran geforscht wird, befindet sich das Forschungsfeld nach wie vor in einem unreifen

---

<sup>4</sup>Übersetzt aus dem Englischen: „Steering Wheel Torque Magnitude“