# 1 Einleitung

Im Folgenden wird zunächst die Motivation für die Durchführung der vorliegenden Arbeit dargelegt. Der Stand der Technik und Forschung wird vorgestellt und ausgewertet, um daraus die Zielsetzung abzuleiten.

## 1.1 Motivation

Bei Lenksystemen im PKW ist seit mehreren Jahren ein starker Trend hin zu mechatronischen Systemen zu beobachten. Die hydraulische Lenkhilfe wird durch elektromechanische Systeme (EPS) ersetzt, um Energie einzusparen und zusätzliche Funktionen zu realisieren. Solche EPS-Lenkungen ermöglichen prinzipiell die freie Gestaltung des Lenkradmoments in Abhängigkeit beliebiger Parameter. Überlagerungslenkungen ermöglichen die freie Veränderung der Lenkübersetzung, z. B. abhängig vom Lenkwinkel oder der Fahrgeschwindigkeit. Auch die Kombination beider Systeme ist bereits in einem Serienfahrzeug verfügbar, womit sich die Größen Lenkradwinkel und -moment von Winkel und Rückstellmoment an den Rädern funktional entkoppeln lassen. Die nächste denkbare Entwicklungsstufe ist die voll elektrische Lenkung ohne mechanische Verbindung zwischen Bedienelement (z. B. Lenkrad) und Rädern, bei der diese Größen auch physikalisch entkoppelt sind. Solche Lenksysteme sind unter dem Begriff *Steer-by-Wire* (SbW) bekannt.

Vorteile der SbW-Technologie gegenüber der Kombination von EPS und Überlagerungslenkung sind z. B. nach [34] und [80] optimiertes Package, verbesserte Innenraumergonomie, Variantenreduktion sowie erhöhte passive und aktive Sicherheit auf funktionaler Ebene.

Eine direkte Folge der mechanischen Entkopplung ist jedoch der Wegfall der Rückmeldung des Reifen-Fahrbahn-Kontakts in Form des heute systemimmanenten Lenkmoments. Die im Lenkmoment enthaltenen Informationen über „den Fahrzustand, den Straßenzustand, externe Störungen und die Stellgröße“ [22] sind ein wichtiger Teil des Fahrer-Fahrzeug-Regelkreises [20] und für eine sichere Fahrzeugführung von großer Bedeutung. Beispielsweise sind eine glatte Fahrbahn oder das Erreichen des fahrdynamischen Grenzbereichs durch Änderungen im Lenkmoment spürbar. Die Bedeutung der Rückmeldeinformation spiegelt sich z. B. in [43] wieder; drei der zehn genannten Anforderungen an das gesamte Fahrverhalten eines Fahrzeugs beziehen sich dort auf die Rückmeldung:

- „gute Rückmeldung über Fahrzeugreaktion und Fahrbahnbeschaffenheit
- Rückmeldung über die Annäherung an den physikalischen Grenzbereich
- präzises, intuitives Lenkverhalten, das … ein Gefühl für die Straße vermittelt“

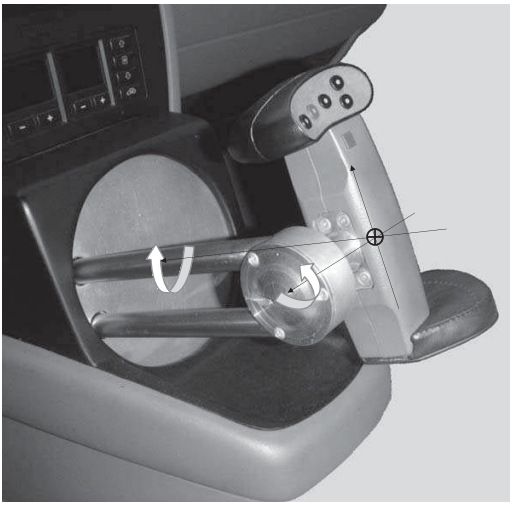

**Bild 1.1**: Beispiel für eine Joystick-Bedienung [89]

Auch bei Steer-by-Wire Lenksystemen sollten dem Fahrer folglich relevante Informationen über den fahrdynamischen Zustand des Fahrzeugs übermittelt werden.

Bei der herkömmlichen Lenkung dient das Bedienelement Lenkrad als Schnittstelle zur Informationsübertragung. Der Mensch nutzt den haptischen Sinneskanal zur Aufnahme dieser Information. Die Wahrnehmung über den haptischen Sinneskanal erfolgt schneller als beispielsweise die Wahrnehmung visueller Reize (vgl. [22, 39]). Das Bedienelement ist somit als haptische Schnittstelle zur Übermittlung zeitkritischer Informationen wie etwa dem Erreichen des Grenzbereichs gut geeignet.

Als Bedienelement muss bei SbW nicht zwingend ein Lenkrad verwendet werden. Die mechanische Entkopplung ermöglicht große Freiheiten bei der Gestaltung des Bedienelements. In mehreren Arbeiten wurden andere Bedienelemente als Alternativen zu Lenkrad und Pedalen untersucht. Eine umfangreiche Übersicht alternativer Bedienelemente für die Längs- und Querdynamik bieten Winner und Heuss in [89]. Am häufigsten sind Joysticks bzw. Sidesticks anzutreffen [17, 26, 47, 52, 58].

Obgleich diese in manchen Disziplinen vorteilhaft sind, beispielsweise in der Längsdynamikregelung, zeigen vergleichende Untersuchungen im Fahrsimulator keine greifbaren Vorzüge hinsichtlich der Querdynamik [4, 31]. Die Kopplung von Längs- und Querdynamik in einem Bedienelement ist ebenfalls kritisch zu sehen, sie kann beispielsweise zu ungewollten *schwänzelnden* Fahrzeugbewegungen führen [52]. Für die Regelung der Querdynamik

scheint das herkömmliche Lenkrad sogar eher vorteilhaft, da „sich das Lenkrad durch eine feinere Dosierbarkeit auszeichnet“ [34]. In den genannten Untersuchungen wurden zudem vorwiegend alltägliche Fahrsituationen betrachtet. Zusätzlich „muß sowohl einer gewachsenen Gewöhnung an das Lenkgefühl hydraulischer Servolenkungen Rechnung getragen als auch die schwierige Aufgabe der Rückmeldung von Straßenzustand, Umweltsituation und Fahrzustand bis hin zu Warnhinweisen auf Grenzfahrtbereiche gemeistert werden“ [33]. Insbesondere für geübte Fahrer, bei denen hohe Anforderungen an die Rückmeldung des Fahrzustands und genaue innere Modelle der Fahrdynamik (vgl. dazu [79]) aufeinander treffen, ist die Eignung von Joysticks fraglich. Wahrscheinlich werden auch Fahrzeuge mit SbW-Lenkung, zumindest im ersten Schritt, mit einem herkömmlichen Lenkrad ausgestattet.

„Entwicklungsbedarf im Bereich der authentischen Lenkgefühlgenerierung verhindert hier den kurzfristigen Serieneinsatz (von SbW, d. Verf.)“ [48] — diese Einschätzung von Holle wird von der Auswertung zum Stand der Forschung in Kapitel 1.2 bestätigt. Sie bildet zugleich den Ausgangspunkt der vorliegenden Arbeit.

Die künstliche Nachbildung des Lenkgefühls wird dabei nicht nur als Notwendigkeit begriffen, sondern gleichzeitig als Möglichkeit, mit den zusätzlichen Freiheitsgraden das Lenkgefühl gegenüber heutigen Lenkungen zu verbessern.

## 1.2 Stand der Technik

Im Folgenden wird der Begriff *Lenkgefühl* eingegrenzt und seine Bedeutung für das Fahrverhalten dargelegt. Dadurch wird u. a. deutlich, warum es sinnvoll ist, viele der Eigenschaften einer herkömmlichen Lenkung auf Steer-by-Wire zu übertragen. Des Weiteren werden Arbeiten zur Optimierung des Lenkgefühls mit aktiven Lenksystemen vorgestellt (Kapitel 1.2.1). Anschließend werden frühere Forschungsarbeiten zur Simulation des Lenkgefühls bei SbW beschrieben (Kapitel 1.2.2).

### 1.2.1 Das Lenkgefühl und seine Bedeutung

Das *Lenkgefühl* ist eine entscheidende Eigenschaft des Fahrverhaltens von PKW. So „bestimmt das Lenkgefühl ganz wesentlich, ob man ein großes Fahrzeug als handlich, oder einen Kleinwagen als eher schweres Fahrzeug empfindet; das Lenkgefühl ist damit eine ganz wesentliche Komponente des sog. Fahrspaßes“ [18].

Das am Lenkrad spürbare Moment erfüllt mehrere Aufgaben: „Wird ein Steuerungssystem mit elektrischen oder hydraulischen Kraftverstärkern ausgerüstet, sind dennoch Betätigungswiderstände vorzusehen, um die Wegrückmeldung durch eine zusätzliche Kraftrückmeldung zu ergänzen und um unbeabsichtigte Handbewegungen, Körperschwankungen und Handtremor zu dämpfen“ [72]. So zeigen zum Beispiel Untersuchungen von Buschardt [22] und Toffin et al. [83] die schlechte Regelgüte des Fahrers bei einer kraftfreien Lenkung.

Zudem dient das Lenkgefühl als Informationsquelle über den Fahrzustand und den Reifen-Fahrbahn-Kontakt. Es ist vorteilhaft, dass diese Informationen über den haptischen Sinneskanal aufgenommen werden, da sie der Mensch dadurch schneller aufnehmen und verarbeiten kann, als beispielsweise visuelle Reize. Harnett und Buschardt bieten zu diesem Thema Übersichten und weiterführende Quellen (vgl. [22, 39]).

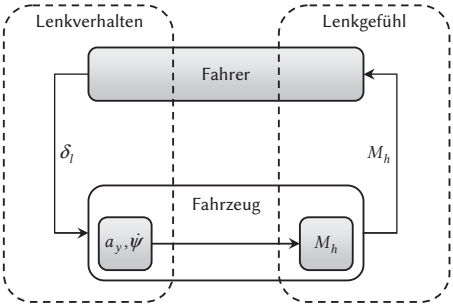


**Bild 1.2**: Schematische Unterscheidung der Begriffe Lenkverhalten und Lenkgefühl

Bisherige Arbeiten zum Thema Lenkgefühl werden in den folgenden Kapiteln im Überblick dargestellt. Zunächst ist zu definieren, was genau unter dem Begriff Lenkgefühl zu verstehen ist und welche qualitativen Anforderungen an ein *gutes* Lenkgefühl gestellt werden, vgl. Kapitel 1.2.1.1. Zahlreiche Arbeiten befassen sich mit der Quantifizierung des Lenkgefühls. Hierbei geht es im Wesentlichen darum, das Lenkgefühl zahlenmäßig zu beschreiben und eine Verknüpfung zwischen messbaren Größen und subjektiven Urteilen herzustellen. Kapitel 1.2.1.2 führt in diesen Themenkomplex ein.

Anschließend wird in Kapitel 1.2.1.3 ein Überblick gegeben über Untersuchungen zur Optimierung des Lenkgefühls mit aktiven Lenksystemen. *Aktiv* bedeutet in diesem Fall die Möglichkeit zur weitgehend freien Gestaltung des Lenkmoments, wie sie z. B. elektromechanische Lenkungen oder Steer-by-Wire bieten.

#### 1.2.1.1 Qualitative Beschreibung des Lenkgefühls

Das Lenkgefühl ist ein relativ komplexes und vor allem schwierig abzugrenzendes Themengebiet. Im weitesten Sinne fallen unter den Begriff Lenkgefühl sowohl die Reaktion des Fahrzeugs auf Lenkbewegungen, als auch die Rückmeldung fahrdynamischer Zustände in Form des Lenkmoments. Zusammengenommen ergibt sich daraus eine Vielzahl von Aspekten des Lenkgefühls, die von verschiedensten Fahrzeugeigenschaften beeinflusst werden - vom Trägheitsmoment des Fahrzeugaufbaus über Reifen, Achskinematik und Lenkunterstützung bis hin zur Trägheit und Oberflächenbeschaffenheit des Lenkrads. Wolf unterscheidet zwischen Lenkgefühl im *engeren Sinne* (Lenkwinkeleingaben und Lenkmoment) und im *erweiterten Sinne* (Reaktion des Fahrzeugs auf Lenkeingaben) (vgl. [90]). Zur weiteren Präzisierung wird im Folgenden der Begriff Lenkgefühl nur im engeren Sinne verwendet. Das Lenkgefühl im erweiterten Sinne wird als *Lenkverhalten* bezeichnet (siehe Bild 1.2).

Trotz dieser enger gefassten Definition kommt dem Lenkgefühl eine Doppelaufgabe zu. Das Lenkrad hat als bidirektionale Schnittstelle zwischen Fahrer und Fahrzeug zwei primäre Aufgaben:

- Übermittlung des Fahrerwunschs an das Fahrzeug

- Übermittlung von Fahrdynamik-Zuständen an den Fahrer

Bei beiden ist das Lenkgefühl von Bedeutung. Im ersten Fall möchte der Fahrer einen Wunsch-Lenkradwinkel einstellen. Im Gegensatz zum oben definierten Lenkverhalten geht es hierbei nicht darum, wie der Lenkradwinkel in eine Fahrzeugbewegung umgesetzt wird, sondern wie gut der Fahrer einen Wunschwinkel einstellen oder halten kann. Dafür sollen die „Betätigungswiderstände hinsichtlich optimaler propriozeptiver Bewegungskontrolle“ [72] gestaltet werden, d. h. es soll einen eindeutigen und einfachen Zusammenhang zwischen Lenkradwinkel und Lenkmoment geben, um den Fahrer über den haptischen Sinneskanal bei der Lenkwinkel-Einstellung zu unterstützen. Weil das Lenkmoment sehr indirekt aus den Seitenkräften an den Vorderrädern entsteht, müssen zahlreiche Fahrwerkskomponenten aufeinander abgestimmt werden, um dieses Ziel zu erreichen. Servolenkungen, insbesondere aktive, z. B. elektrische, Systeme, erleichtern dies durch gezielte Gestaltung des Lenkmoments mit Hilfe der Servounterstützung. Theoretisch günstig ist ein hoher Gradient des Lenkmoments über dem Lenkradwinkel, da kleine Winkeländerungen im Vergleich große Lenkmomentänderungen hervorrufen, welche leichter zu detektieren sind (vgl. [22]). Aus den Messwerten in [83] lässt sich ablesen, dass beim Vergleich zweier Lenkungskennlinien ein steilerer Anstieg des Lenkmoments über dem Lenkwinkel zu kleineren Kursabweichungen führt. Alleine aus Komfortgründen ist der Gradient jedoch bereits begrenzt.

Im zweiten Fall ist es wichtig, dem Fahrer nützliche Informationen zu vermitteln, ohne Störungen zu übertragen. Nützlich sind im Wesentlichen Rückmeldungen über den Fahrzustand:

- kontinuierlicher Anstieg des Lenkmoments über der Querbeschleunigung
- Änderung des Lenkmoments in Relation zum Reibwert
- Verminderung des Lenkmomentanstiegs im fahrdynamischen Grenzbereich
- Rückmeldung von Fahrbahneigenschaften

Bereits der erste Punkt verdeutlicht, dass das Lenkgefühl auch in seiner enger gefassten Definition nicht vollkommen isoliert vom restlichen Fahrzeug und der Fahrdynamik betrachtet werden kann. Die obige Definition wird zur Präzisierung des Begriffs trotzdem als sinnvoll erachtet.

Als Störungen sind v. a. Stöße und Schwingungen zu sehen, verursacht etwa durch Fahrbahnschäden oder Radunwucht. Untersuchungen von Harrer und Brunn legen nahe, dass sich Störungen und Nutzinformationen an Hand ihrer Frequenz teilweise voneinander trennen lassen. Nutzinformationen werden vorrangig niedrigeren Frequenzen zugeordnet, bis ca. 15 Hz (vgl. [19]). Frequenzen darüber sind demnach eher störend, ohne klaren Nutzwert. Jedoch gibt es einen Übergangsbereich, so dass keine exakte Trennung von Nutz- und Störinformationen möglich ist (vgl. auch Bild 3.7).

Zusammengefasst bietet ein *gutes* Lenkgefühl also viel Rückmeldung ohne Störungen und gute Unterstützung der Propriozeption bei geringem Diskomfort.

Die beschriebenen Anforderungen lassen sich noch deutlich feiner untergliedern, was beispielsweise zur detaillierten Bewertung eines Lenksystems im Entwicklungsprozess sinnvoll

ist. Kriterien, die die einzelnen Aspekte des Lenkgefühls beschreiben, finden sich z. B. in [18, 36, 41, 44]. In Kapitel 4.2.2 wird ebenfalls ein Katalog solcher Anforderungen entwickelt, um darauf aufbauend Probandenversuche durchzuführen.

#### 1.2.1.2 Quantitative Beschreibung des Lenkgefühls

Die einfachste Form der quantitativen Beschreibung des Lenkgefühls ist die subjektive Bewertung in Form einer Note. Dies setzt eine Bewertungsskala voraus, die qualitativen Bewertungen eine Zahl zuordnet. Es existieren zahlreiche Arten von Bewertungsskalen, wobei die sog. *10er-Skala* in der Automobilindustrie weite Verbreitung gefunden hat. In Kapitel 4 wird dieses Thema nochmals aufgegriffen.

##### Klassische Objektivierung

Interessanter ist jedoch eine Quantifizierungsmöglichkeit, die eine Bewertung des Lenkgefühls ohne Probanden ermöglicht. Die subjektive Bewertung des Lenkgefühls durch Probanden unterliegt zwei wesentlichen Einschränkungen. Zum einen ist die Reproduzierbarkeit der Bewertung begrenzt und zum anderen ist eine Subjektivbewertung erst in einem späten Stadium der Produktentwicklung möglich, wenn bereits reale Fahrzeuge verfügbar sind. Die Reproduzierbarkeit lässt sich zwar durch Schulung und Erfahrung steigern, was jedoch einen nicht zu vernachlässigenden Aufwand bedeutet. Deswegen wird vielfach nach einer objektiven Bewertung gestrebt, die reproduzierbar numerische Kennwerte generiert, aus denen sich wiederum rechnerisch Subjektivurteile ableiten lassen. Untersuchungen zu diesem Thema sind unter dem Stichwort *Objektivierung* bekannt.

Zomotor, Braess und Rönitz geben in [93–96] einen generellen Überblick über objektive „Verfahren zur Bewertung des Fahrverhaltens“, ebenso Rompe und Heißing in [70]. Die Objektivierung von Handlingeigenschaften ist ein sehr weites Feld, das hier nicht vollständig dargestellt werden soll. Im Folgenden wird ein Überblick über Untersuchungen gegeben, die sich zumindest teilweise mit dem Lenkgefühl befassen. Zur Vertiefung der Thematik sei im Hinblick auf die Objektivierung des Lenkverhaltens beispielsweise auf Harrer verwiesen (vgl. [41]).

Ein intensiv bearbeitetes Forschungsfeld stellt das *On-Center-Handling* dar. Nach Farrer ist dieses durch das Zusammenspiel von Lenkaktivität, Lenkgefühl und Fahrzeugreaktion bei kleinen Lenkbewegungen um die Mittellage charakterisiert (vgl. [32]). Nach den internationalen Normen ISO 13674-1 und -2 können im sog. *Weave Test* und *Transition Test* Kennwerte zur Beschreibung des On-Center-Handling erzeugt werden [1, 2]. Beim Weave Test handelt es sich um sinusförmige Lenkbewegungen bei konstanter Fahrgeschwindigkeit, Frequenz und Amplitude. Beim Transition Test wird bei konstanter Fahrgeschwindigkeit langsam aus der Mittellage herausgelenkt. Aus den gemessenen fahrdynamischen Größen beider Manöver werden zahlreiche Kennwerte ermittelt, die beispielsweise das Zusammenspiel von Lenkmoment und Lenkwinkel, Gierrate und Lenkwinkel oder Lenkmoment und Querbeschleunigung kennzeichnen (Beispiele siehe Bilder 1.3 und 1.4). Diese Normen gehen unter anderem auf die Arbeiten von Norman [62] und Farrer [32] zurück. Weitere Untersuchungen zu diesem Thema wurden z. B. von Deppermann [28], Dettki [29], Salaani et al. [73] und Sato et al. [75] durchgeführt.

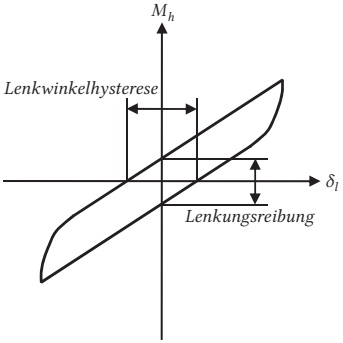


**Bild 1.3:** Ermittlung der Lenkungsreibung und -hysterese mittels Weave Test nach ISO 13674-1 [1]

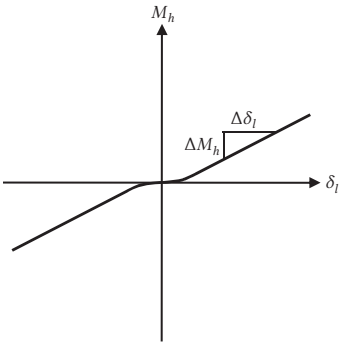


**Bild 1.4:** Ermittlung des Lenkmomentgradienten um die Mitte durch den Transition Test nach ISO 13674-2 [2]

Peppler et al. und Farrer führen auch den nächsten Schritt der „klassischen" Objektivierung durch, eine Subjektiv-Objektiv-Korrelation (vgl. [32, 67]). Beide konzentrieren sich auf das On-Center-Handling.

Brunn und Harrer zeigen in [19] Untersuchungen zur Objektivierung der Lenkungsrückmeldung durch Analyse des Lenkmoments im Frequenzbereich.

Harrer stellt in [40] Korrelationsanalysen mit einer großen Anzahl an bewerteten Fahrzeugen vor. Die Untersuchung geht zudem deutlich über das reine On-Center-Handling hinaus. Eine ähnlich große Zahl von Fahrzeugen und Bewertungskriterien ist bei Koide und Kawakami zu finden. Auch dort wird versucht, Subjektivurteile durch statistische Werkzeuge mit Messdaten zu verknüpfen [54]. Gies und Marusic beschreiben eine Methode, die nicht nur Expertenurteile und Messwerte verknüpft, sondern eine bessere Korrelation von Kundenurteilen und Messwerten erlauben soll [36].

### Alternative Methoden zur Objektivierung

Ein etwas anderer Ansatz als die klassische Verknüpfung von Messwerten mit Subjektivurteilen ist die Nutzung mathematischer Fahrermodelle zur Objektivierung. Ein realer Fahrer vollzieht im Simulator oder Realfahrzeug eine Bewertungsfahrt. Der dabei entstehende Lenkradwinkelverlauf wird von einem Fahrermodell nachgebildet, z. B. auf Basis einer Vorausschau-Krümmung und der Abweichung vom Soll-Kurs. Die Grundidee ist, dass sich ein menschlicher Fahrer an das Fahrzeugverhalten und die Fahrsituation adaptiert, um unabhängig vom Fahrzeug ein möglichst konstantes Fahrer-Fahrzeug-Verhalten einzustellen. Die Parameter des Fahrermodells sollen ein Maß für diese Adaption darstellen (vgl. [45]). Diese Adaption in Form der Fahrermodell-Parameter kann dann wiederum mit Subjektivurteilen verknüpft werden. Die grundsätzliche Methode ähnelt also der klassischen Objektivierung, jedoch werden die objektiven Kennwerte auf andere Art gewonnen. Decker reißt die Objektivierung mit Fahrermodellen an [27], Henze [45] wendet diese Methode im Fahrsimulator an. Schimmel et al. erweitern sie auf die Anwendung im Fahrversuch, wodurch reale Fahrphysik und reales Fahrverhalten sichergestellt sind [68, 76].

Eine weitere Methode zur Gewinnung objektiver Kennwerte ist der Fahrversuch im Simulator. Bei den zuvor beschriebenen Methoden werden viele unterschiedliche Fahrzeuge vermessen und bewertet, um eine Funktion zu finden, die Messwerte Subjektivurteilen zuordnet. Teilweise wird dabei auch versucht, optimale Ausprägungen zu finden, d. h. Wertebereiche, die gute Subjektivurteile versprechen. Im Fahrsimulator kann diese Suche nach Optimalwerten gegenüber dem Realversuch verfeinert werden. Bertollini et al. [16] sowie Zong et al. [97] haben Probanden die Möglichkeit gegeben, das Lenkmomentniveau so lange einzustellen, bis es ihnen am besten gefallen hat. Dies wurde bei Bertollini et al. bei verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten durchgeführt und bei Zong et al. zusätzlich bei verschiedenen Querbeschleunigungswerten. Ergebnis sind Kennlinien mit optimalem Verlauf des Lenkmomentniveaus über Geschwindigkeit bzw. Querbeschleunigung wie z. B. in Bild 1.5 dargestellt.

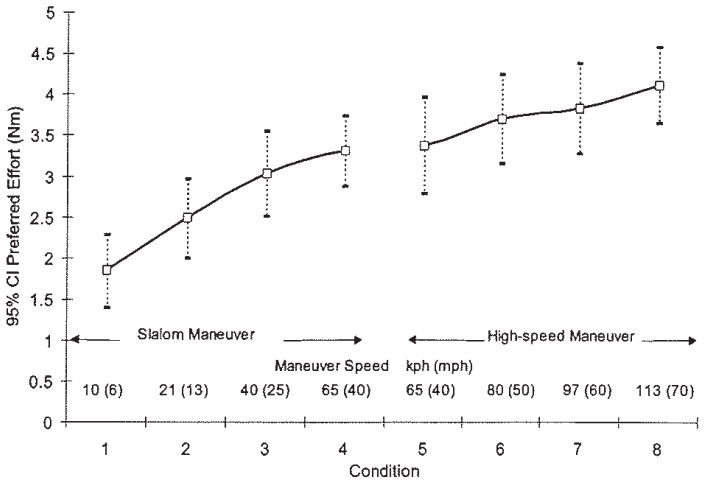


**Bild 1.5:** Bevorzugtes Lenkmomentniveau über der Fahrgeschwindigkeit nach Bertollini et al. [16]

### Anwendung

Ein Beispiel für die erfolgreiche Anwendung objektiver Beurteilungskriterien ist in [23] zu finden. Camuffo et al. optimieren das Unterstützungsmoment und die Dämpfung einer elektromechanischen Servolenkung in der Simulation. Objektive Beurteilungskriterien dienen zur numerischen Bewertung der Optimierungsmaßnahmen. Durch die vorgeschlagene Vorgehensweise wird die anschließende Abstimmung im Realfahrzeug verkürzt.

Der Stand der Technik hinsichtlich der objektiven Bewertung des Lenkgefühls lässt jedoch noch einige Fragen offen. Beispielsweise fehlen Methoden zur abschließenden Beurteilung der Fahrbahnrückmeldung oder der Degression im Grenzbereich.

Zomotor et al. haben im Jahr 1977 festgestellt, dass die „Prüfung des Fahrverhaltens durch Spezialisten im Fahrbetrieb … die heute noch immer wirksamste Methode“ sei [95]. Und auch 2008 bestätigt Harrer dies zum größten Teil: es „… wurde gezeigt, dass eine Verknüpfung der subjektiven Bewertungen der Lenkeigenschaften mit objektiven Parametern für den On-Centre Bereich der Fahrdynamik möglich ist und die gewonnenen Erkenntnisse den Fahrwerksentwicklungsprozess durch eine entsprechende Zielbereichsdefinition unterstützen können. Dennoch kann das … Fahrerlebnis nicht zur Gänze objektiviert bzw. in Zahlen gefasst werden. In der Gesamtheit kann es heute und in absehbarer Zukunft nur mit Hilfe aller Sinne erfahren und genossen werden“ [41].

#### 1.2.1.3 Optimierung des Lenkgefühls mit aktiven Lenksystemen

Aktive Lenksysteme erlauben durch freie Gestaltung des Lenkmoments oder Addition beliebiger Momente die Umsetzung verschiedener Funktionen zur Optimierung des Lenkgefühls. Dazu durchgeführte Arbeiten werden im Folgenden vorgestellt, gegliedert nach dem verwendeten Lenksystem. Ein zusätzlicher Elektromotor ermöglicht bei einer hydraulischen Servolenkung die Lenkmomentüberlagerung, bis hin zur nahezu vollständigen Kompensation der realen Rückstellkräfte. Elektromechanische Lenksysteme und Steer-by-Wire erlauben von Haus aus die aktive Veränderung, bzw. Gestaltung, des Lenkmoments.

**Lenkmomentüberlagerung**

Buschardt hat verschiedene Versuche durchgeführt, bei denen dem Lenkmoment einer hydraulischen Servolenkung ein zusätzliches Lenkmoment durch einen Elektromotor in der Lenksäule überlagert wird [22]. Durch den Überlagerungsantrieb kann das Lenkmoment der Servolenkung komplett aufgehoben und zusätzlich ein synthetisches Moment überlagert werden. Es werden verschiedene Lenkmomentfunktionen umgesetzt und in einer Versuchsreihe subjektiv bewertet. Eine momentenfreie Lenkung ohne jegliche Kraftrückwirkung weist demnach ein deutlich schlechteres Lenkgefühl auf, als eine herkömmliche Servolenkung. Ein rein lenkwinkelproportionales Lenkmoment mit simulierter Reibung wird ähnlich beurteilt, wie eine herkömmliche Lenkung, jedoch mit deutlichen Abstrichen hinsichtlich Fahr- und Straßenzustand. Um Reibwertänderungen zwischen Reifen und Fahrbahn deutlicher spürbar zu machen, wird eine Variante realisiert, bei der dem Lenkmoment der Servolenkung eine simulierte Reibung überlagert wird. Der Betrag der Reibung wird bei Verringerung des Fahrbahnreibwerts ebenfalls reduziert. Die Probanden bewerteten diese Variante besser, als die herkömmliche Lenkung. Zwei weitere Varianten dienen der Untersuchung von querbeschleunigungs- bzw. gierratenproportionalen Lenkmomenten. Beide werden tendenziell besser bewertet, als die Servolenkung, nachteilig sind jedoch ein schlechtes Mittengefühl und ein instabiles Rückstellverhalten bei höheren Geschwindigkeiten. Zur Verbesserung der Mittellage wird ein lenkwinkelabhängiges Moment um die Mitte eingeführt. Die Rückstellung wird mit Dämpfungsanteilen stabilisiert, zum einen abhängig von der Fahrgeschwindigkeit, zum anderen abhängig vom Quadrat der Lenkwinkelgeschwindigkeit.

Barthenheier et al. verwenden einen ähnlichen Versuchsaufbau wie Buschardt mit der Möglichkeit, einer hydraulischen Servolenkung zusätzliche Momente elektromotorisch zu überlagern (Vgl. Bild 1.6) [12, 13, 88]. Es wird darauf hingewiesen, dass nicht alle Anteile des Handmoments der Servolenkung ausgeblendet werden können, bedingt durch die Dynamik des elektrischen Antriebs und seiner Regelung. Dies trifft beim verwendeten System vor allem auf Vibrationen zu, die sich oberhalb der Regelkreiseckfrequenz von ca. 20 Hz befinden.

Ziel der durchgeführten Untersuchungen sind grundlegende Erkenntnisse, ob je nach Streckenart, Geschlecht, Alter oder Fahrstil des Fahrers verschiedene Lenkmomentcharakteristiken bevorzugt werden. Dazu werden bei Fahrten in der Stadt, auf einer Landstraße und einer Autobahn Lenkmomentfunktionen mit Variation von Rückstellmoment, Reibung und Dämpfung untersucht. Insgesamt 180 Probanden wurden nach der Fahrt befragt zu Ihrem Empfinden von Komfort, Sportlichkeit/Fahrspaß und Sicherheit sowie einer allgemeinen Bevorzugung der jeweiligen Variante. Bei der Auswertung werden tatsächlich unterschiedliche