

David G. Stampfl

# Objektivierung des Lenkgefühls

## DIPLOMARBEIT

Zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Diplom-Ingenieurs

Studienrichtung: Maschinenbau

Technische Universität Graz  
Erzherzog-Johann-Universität  
Fakultät für Maschinenbau

Betreuer:

DI Cornelia Lex, Institut für Fahrzeugtechnik, TU Graz  
DI Gerhard Rieder, Magna Steyr Fahrzeugtechnik, Graz

Eingereicht bei:

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Wolfgang Hirschberg

Juni 2011

## **Danksagung**

Für die Durchführung dieser Arbeit möchte ich mich besonders bei dem gesamten EPS-Team bei Magna Steyr bedanken, die mich sowohl in technischen als auch organisatorischen Belangen ohne Einschränkung unterstützt haben. Dabei gilt es, den Dank auch an all jene Mitarbeiter der Firma Magna Steyr zu richten, die mit ihrem Beitrag an der Verwirklichung der Arbeit mitgeholfen haben. Außerdem seien vor allem meine Betreuer Dr. Daniel Kollreider und DI Joachim Ecker erwähnt, die mit ihren Beiträgen und ihrem Wissen große Teile der Arbeit geprägt haben.

Diese Worte richten sich vor allem an jene, die mich bis zu diesen Zeilen begleitet, unterstützt und eine solche Danksagung erst ermöglicht haben. Großen Dank an meine Mutter und meinen Vater. Sie begleiten mich wohl die längste Zeit meines Daseins und sind damit zu unaustauschbaren geistigen Säulen meines Lebens geworden. Auch haben sie mich erst in die wirtschaftliche Lage versetzt, meinen erwünschten Bildungsweg zu realisieren. Zur erforderlichen Abwechslung abseits jedweder Bildung haben besonders meine Geschwister einiges dazu beigetragen und so gilt der Dank auch ihnen, mich als ältesten mit all meinen Eigenheiten so nehmen wie ich bin. Auch unserem verstorbenen Bruder ist hier eine Zeile gewidmet, im Geiste begleitet er mich seit seinem Tod bei vielen meiner Entscheidungen. Das herzlichste Dankeschön sei hier aber an meine Freundin Marie-Theres gerichtet. Sie ist mein Wegbegleiter, eine Kraft, die mich in schweren Zeiten schon weit getragen hat, und ein Freund mit wunderbar viel Geduld.

David G. Stampfl

Deutsche Fassung:

Beschluss der Curricula-Kommission für Bachelor-, Master- und Diplomstudien vom 10.11.2008

Genehmigung des Senates am 1.12.2008

## **Eidesstattliche Erklärung**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am .....

.....

(Unterschrift)

Englische Fassung:

## **Statutory declaration**

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

.....

date

.....

(signature)

## **Kurzfassung**

Einer der Entwicklungsschwerpunkte in der Fahrzeugindustrie liegt in der Effizienzsteigerung von Haupt- und Nebenaggregaten. Spätestens seit der Einführung der elektrischen Servolenkung als Ersatzsystem für die herkömmliche hydraulische Lenkhilfepumpe ist auch das Thema Lenkgefühl in aller Munde. Die freie Parametrisierung der dafür verwendeten Elektromotoren ermöglicht zusätzlich die Wahl verschiedener Unterstützungskennlinien und damit Lenkcharakteristika für den Fahrer. Das wirft die Frage auf, welches Lenkgefühl dem Fahrer übermittelt werden soll. Diese Arbeit hat sich zum Ziel gesetzt, das subjektiv vermittelte Lenkgefühl zu objektivieren. Im ersten Teil bewerten Probanden in vorgegebenen Fahrzeugen das Lenkgefühl in bestimmten Fahrsituationen. Der zweite Teil beschäftigt sich mit der objektiven Messung der Testfahrzeuge, dabei wird das Lenkmoment während standardisierter Fahrmanöver aufgezeichnet. Anschließend ist zunächst eine statistische und mathematische Aufbereitung der Fragebögen als auch der Messdaten erforderlich. Die abschließende Analyse klärt die Frage, welche Zusammenhänge zwischen den Einschätzungen der Fahrer und den gemessenen Größen hinsichtlich des Lenkmomentes auftreten. Welche Rückschlüsse die Ergebnisse der Erhebung zulassen ist im letzten Abschnitt dieser Arbeit zusammengefasst.

## **Abstract**

A major focus for automotive development is to increase the efficiency of main and auxiliary units. At the latest since the launch of the electric-power-steering (EPS), the topic of steering feel is on everyone's lips. The possibility to parameterize therefore used electrical motors enables new dimensions to design assistance characteristic curves and thereby the steering-wheel feedback to the driver. But that generates the question, which steering-feel do the driver prefer. This diploma thesis deals with the topic to objectify the subjective perception of the steering feel. In the first part, probands fill out a questionnaire during assess the steering-fell at a predefined selection of cars. The second part deals with the objective measurement of the same given cars. During proceeding the standardized maneuvers a complex measurement equipment is recording the steering torque on the steering wheel. Subsequently a evaluation of all data is necessary, for the questionnaires as well as for the objective data series. The final analysis shows if there are correlations between the drivers evaluation and the measured physical value. The last chapter highlights the results and which conclusions can be drawn out of that investigation.

# Inhaltsverzeichnis

Danksagung.....	2
Eidesstattliche Erklärung.....	3
Kurzfassung .....	4
Abstract.....	5
Inhaltsverzeichnis .....	6
Abkürzungen, Formelzeichen, Indizes.....	8
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>11</b>
1.1 Wirtschaftliche, Ökologische Lage .....	11
1.2 Systeme, Stand der Technik.....	12
1.3 Das Lenkgefühl im Fahrzeug .....	13
<b>2 Ziel der Arbeit und die angewandte Methodik.....</b>	<b>14</b>
<b>3 Grundlagen zur Bewertung des Lenkgefühls.....</b>	<b>15</b>
3.1 Querdynamik .....	15
3.1.1 Einspurmodell.....	16
3.1.2 Charakteristische Kennwerte für das Einspurmodell.....	17
3.2 Grundlagen der subjektiven Bewertung.....	24
3.3 Grundlagen der objektiven Bewertung.....	25
3.3.1 On Center Handling, ISO 13674-2.....	25
3.3.2 Stationäre Kreisfahrt (Steady-State Cornering), ISO 4138.....	26
3.3.3 Lenkungszuziehen.....	27
3.3.4 Sinus-Sweep (Frequenzgang), ISO 8726.....	27
3.3.5 Weave-Test, ISO 13674-1.....	27
3.3.6 Gierverstärkung .....	28
3.3.7 Lenkwinkelsprung, ISO 7401 .....	28
3.3.8 Parkiermoment .....	29
3.3.9 Lenkungsrücklauf.....	29
3.4 Grundlagen und Ansätze aus der Statistik.....	32
3.4.1 Möglichkeiten subjektiver Bewertungsskalen .....	32
3.4.2 Multivariate Analyseverfahren .....	34
3.4.3 Der Boxplot .....	38
<b>4 Ablauf der subjektiven Bewertung.....</b>	<b>40</b>

4.1	Vorbereitungen zur subjektiven Bewertung .....	40
4.1.1	Streckenabschnitte .....	40
4.1.2	Fahrzeuge .....	41
4.2	Entwicklung des Fragebogen .....	43
4.2.1	Definition der zu bewertenden Kriterien .....	43
4.2.2	Gewählte Skalen für „Gefallen“ und „Niveau“ .....	46
4.3	Durchführung der Bewertung.....	50
<b>5</b>	<b>Ablauf der objektiven Bewertung.....</b>	<b>52</b>
5.1	Messtechnik.....	52
5.1.1	Testbedingungen .....	55
5.1.2	Signalverarbeitung während der objektiven Messung.....	56
<b>6</b>	<b>Auswertung.....</b>	<b>57</b>
6.1	Auswertung der Fragebögen.....	57
6.1.1	Standardisierung der subjektiven <i>Gefallen</i> Werte .....	57
6.1.2	Fahrerbezogene Korrelationsanalyse der subjektiven Bewertung .....	58
6.1.3	Korrelationsanalyse zwischen Gefallen und Niveau.....	60
6.1.4	Verteilung, Streuung und Mittelwerte der Datensätze .....	61
6.2	Auswertung der objektiven Messfahrten.....	63
6.3	Korrelation zwischen subjektiven und objektiven Daten .....	65
<b>7</b>	<b>Ergebnisse .....</b>	<b>67</b>
7.1	Analyse und Schlussfolgerungen der Korrelationen .....	67
7.1.1	Lenkmoment.....	68
7.1.2	Lenkwinkleingabe und Fahrzeugreaktion.....	73
7.1.3	Verhalten im Stadtverkehr .....	80
7.2	Mögliche Weiterführung und Optimierungsvorschläge.....	83
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>86</b>
	Literaturverzeichnis.....	89
	Abbildungsverzeichnis.....	91
	Anhang.....	93

## Abkürzungen, Formelzeichen, Indizes

$a$		Schnittpunkt der Geraden mit der y-Achse
$b$		Geradensteigung
$f$	$Hz$	Hertz
$l$	$m$	Achsabstand
$m$	$kg$	Fahrzeugmasse
$m'$		Mittelwert der standardisierten Werte
$n$		Anzahl der Stichproben
$p$		Signifikanz
$r$	$m$	Bahnradius
$s'$		Standardabweichung der standardisierten Werte
$t$	$s$	Zeit
$v$	$m/s$	Fahrzeuggeschwindigkeit im Schwerpunkt,
$x$		unabhängige Variable, Einflussgröße
$y$		abhängige Variable, Zielgröße
$\hat{y}_i$		Vektor der Schätzwerte
$\dot{\psi}_{stat}$	$^\circ/s$	stationäre Giergeschwindigkeit
$c_{SH}$	$N/m$	Reifenseitensteifigkeit an der Hinterachse
$c_{SV}$	$N/m$	Reifenseitensteifigkeit an der Vorderachse
$i_S$		Gesamtlenkübersetzung
$l_H$	$m$	Abstand vom Schwerpunkt zur Hinterachse
$l_V$	$m$	Abstand vom Schwerpunkt zur Vorderachse
$m_x$		Mittelwert, Wert aus Vektor X
$m_y$		Mittelwert, Wert aus Vektor Y
$r_{xy}$		Korrelationskoeffizient der Vektoren X und Y
$s_x$		Standardabweichung, Vektor X
$s_y$		Standardabweichung, Vektor Y
$t_0$	$s$	50 % des maximalen Lenkwinkels beim Lenkwinkelsprung
$v_H$	$m/s$	Geschwindigkeit im hinteren Radaufstandspunkt,



$v_V$	$m/s$	Geschwindigkeit im vorderen Radaufstandspunkt,
$v_{char}$	$m/s$	charakteristische Fahrzeuggeschwindigkeit
$v_{krit}$	$m/s$	kritische Fahrzeuggeschwindigkeit
$v_{max}$	$m/s$	maximal mögliche Fahrzeuggeschwindigkeit
$x_F$		Fahrzeuginnenachse, Fahrzeugfestes Koordinatensystem
$x$		Globales Koordinatensystem
$x_i$		Messwert, Bezugswert aus Vektor X
$y$		Globales Koordinatensystem
$y_F$		Fahrzeugquerrachse, Fahrzeugfestes Koordinatensystem
$y_i$		Messwert, Bezugswert aus Vektor Y
$z_i$		standardisierter Messwert
$CG$		Center of Gravity (deutsch: Fahrzeugschwerpunkt)
$EG$	$^\circ/(m/s^2)$	Eigenlenkgradient
$F_{SH}$	$N$	Reifenseitenkraft an der Hinterachse
$F_{SV}$	$N$	Reifenseitenkraft an der Vorderachse
$M_L$	$Nm$	Lenkmoment
$M$		Aktueller Momentanpol der Fahrzeugbewegung
$R$		Korrelation
$R^2$		Bestimmtheitsmaß
$TB$	$^\circ \cdot s$	TB-Wert
$T_{\psi,max}$	$s$	Peak-Response-Time
$T_{R,\psi}$	$s$	Response-Time
$U_{a_y}$		Überschwingweite der Querschleunigung
$U_{\dot{\psi}}$		Überschwingweite der der Giergeschwindigkeit
$\alpha_H$	$^\circ$	Schräglaufwinkel an der Hinterachse
$\alpha_V$	$^\circ$	Schräglaufwinkel an der Vorderachse
$\dot{\beta}$	$^\circ/s$	Schwimmwinkelgeschwindigkeit
$\beta_{stat}$	$^\circ$	stationärer Schwimmwinkel
$\delta_A$	$^\circ$	Ackermannwinkel

$\delta_{H,stat}$	°	maximaler Lenkwinkel beim Lenkwinkelsprung
$\dot{\nu}$	°/s	Bahnwinkelgeschwindigkeit
$\dot{\psi}$	°/s	Giergeschwindigkeit
$\Delta\alpha$	°	Schräglaufwinkeldifferenz
$\beta$	°	Schwimmwinkel
$\delta$	°	Lenkwinkel an der Vorderachse
$\nu$	°	Bahnwinkel
$\psi$	°	Gierwinkel
ABS		Anti Blockier System
EHPS		Electro-Hydraulic Power Steering (deutsch: elektrohydraulische Servolenkung)
EPS		Elektric Power Steering (deutsch: elektromechanische Servolenkung)
ESP		Elektronisches Stabilitäts Programm
FSO		Full-Scale-Offset
GPS		Global Positioning System
HPS		Hydraulic Power Steering (deutsch: hydraulische Servolenkung)
LWS		Lenkwinkelsprung
MSF		Magna Steyr Fahrzeugtechnik
MSW		Measurement-Steering-Wheel
NVH		Noise, Vibration and Harshness (deutsch: Geräusch, Vibration und Rauheit)
OCH		On-Center-Handling
OEM		Original Equipment Manufacturer (deutsch: Erstausrüster)
PRT		Peak-Response-Time

# 1 Einleitung

## 1.1 Wirtschaftliche, Ökologische Lage

Die Diskussion um den steigenden Kohlendioxid Anteil in unserer Atmosphäre hat in den letzten Jahren viele Industriezweige zum Umdenken bewegt. Biokraftstoffe sind im Gespräch, welche zwar den Vorteil von ruß- und schadstoffarmer Verbrennung haben, aber aufgrund ihrer Herstellung aus Zuckerrüben, Mais oder Getreide einer ethischen Diskussion ausgesetzt sind. Die Energiegewinnung aus regenerativen Quellen wie Sonnenenergie, Wasserkraft oder Windenergie hat großes Potential, das vor allem für dezentrale Versorgung mit Strom und Wärme von besiedelten Gebieten genutzt werden kann. Für die Fahrzeugindustrie ist diese Energie dann sinnvoll einsetzbar, wenn die Möglichkeiten des Ladungsspeichers auch für mobile Einheiten eine ausreichende Leistungsdichte mit praxisrelevanten Kapazitäten vorweisen. In jedem Fall ist eine Reduzierung des Energiebedarfs von größter Bedeutung und die Verbrauchsenkung in der Fahrzeugtechnik eines der primären Entwicklungsziele bei den Herstellern. Der Verkauf des Toyota Prius startete in Japan bereits 1997. Mit einem Normverbrauch von 5,1 Liter Superbenzin auf 100 km, was einem CO<sub>2</sub>-Ausstoß von 120 g/km entspricht, wurde ein Maßstab hinsichtlich des CO<sub>2</sub> Ausstoßes von Fahrzeugen in der Automobilindustrie gesetzt. Die Optimierung der Fahrzeuge in Hinblick auf Verbrauch beschränkt sich dabei nicht nur auf die, derzeit noch primär verwendete, Verbrennungskraftmaschine. Der Luftwiderstand wird dezimiert, die Rollreibung der Reifen minimiert und auf das Gesamtgewicht wird vermehrt Rücksicht genommen, das erheblich die erforderliche Motorleistung und dadurch den Verbrauch beeinflusst. Einen nicht zu vernachlässigenden Faktor spielen dabei auch die Nebenaggregate. Sie dienen teilweise dem Beschicken des Motors mit den erforderlichen Betriebsmitteln aber auch dazu, den Komfortansprüchen der Fahrzeuginsassen gerecht zu werden. Für die Klimatisierung muss etwa der Kältemittelkompressor, für die Heizung die Wasserpumpe und für die hydraulische Servolenkung die Ölförderpumpe betrieben werden. Sind diese Unterstützungsantriebe über Keilriemen direkt mit der Kurbelwelle verbunden, ist deren Leistungsabgabe und der Verbrauch der Fahrzeuge von der Motordrehzahl abhängig und nicht vom aktuellen Bedarf der momentanen Fahrsituation. Werden sie jedoch entkoppelt und über Elektromotoren autark betrieben, können diese Aggregate die erforderliche Leistung bedarfsgerecht liefern ohne unnötig Energie zu verschwenden.

## 1.2 Systeme, Stand der Technik

Dieser Ansatz führte Mitte der Neunzigerjahre zur forcierten Entwicklung der Elektromechanischen Servolenkung (Electric-Power-Steering, **EPS**) in kleinen bis mittleren Fahrzeugbaureihen. Bei diesem System wird ein Servomotor systemabhängig entweder in die Lenksäule oder parallel zum Lenkgetriebe auf der Zahnstange integriert. Der Motor dient zur direkten Lenkunterstützung des Fahrers ist aber auch mit einer Vielzahl von neuartigen Entwicklungsaufgaben verknüpft.

Bei herkömmlichen hydraulischen Systemen (Hydraulic-Power-Steering, **HPS**), wird das aufgebrachte Lenkmoment des Fahrers über einen Torsionsstab gemessen, der daraus eingestellte Verdrehwinkel gibt unterschiedliche Öffnungen am Ventilturm der Servolenkung frei. Je höher das Drehmoment, desto größer ist die freigegebene Fläche für den Durchfluss des Hydrauliköls, das den Hilfszylinder beaufschlagt und die Lenkkraft unterstützt. Bei diesem System wird ein permanenter Volumenstrom erzeugt, der durch die direkte mechanische Verbindung zur Kurbelwelle auch bei der Geradeausfahrt das Hydrauliköl im Kreis gepumpt. In dieser Fahrsituation ist praktisch keine Lenkunterstützung erforderlich, durch die Strömungswiderstände in den Leitungen und die so anfallende Pumpleistung wird jedoch der Treibstoffbedarf erhöht. Diese Tatsache führte zur Entwicklung der elektrohydraulischen Servolenkung (Electro-Hydraulic Power Steering, **EHPS**), bei der ein Elektromotor bedarfsgerecht die Hydraulikpumpe und somit den Ölfluss steuert. Dieses System bringt schon Verbrauchseinsparungen gegenüber der HPS, impliziert aber nach wie vor die Verluste des Hydraulischen Kreislaufs und kann nicht das Spektrum an Komfortfunktionen der EPS abdecken.

Die vergleichsweise Energieaufnahme der EPS resultiert in einem deutlich reduzierten Kraftstoffverbrauch von ziraka 0,8 Liter auf 100 km/h [1] und führt außerdem zu einem geringeren Bauteilbedarf womit weitere Kosteneinsparungen realisiert werden können. Zusätzlich zur absolut uneingeschränkten Regelungsmöglichkeit des Elektromotors in seiner Grundfunktion, der Lenkmomentunterstützung des Fahrers, ist eine Vielzahl an sicherheitsrelevanten Aufgaben über den Unterstützungsmotor realisierbar. So ist ein aktives Rückstellen des Lenkrades nach Kurvenfahrt oder die Bedämpfung von Lenkradschwingungen möglich [2]. Aber auch selbständiges Lenken bei Einparkhilfen (Park-Assistent), Spurhalteassistenten (Lane-Keeping-Assistant) oder dem Spurwechselassistenten (Lane-Change-Assistant) ist umsetzbar. Dabei lenkt der Elektromotor selbständig bei Erkennung einer sich nähernden Gefährdung. Das kann bis zur eigenständigen Einleitung eines Ausweichmanövers bei einer Unfallerkennung führen.

Das Regelsystem der EPS kann also einen wesentlichen Beitrag zu aktiver Sicherheit leisten. Im Gegensatz zu den Stabilitätsprogrammen wie ESP oder ABS, die nur in besonderen Fahrsituationen aktiv im Einsatz sind, ist die Regelung der EPS ständig aktiv und muss dem Fahrer permanentes Feedback über das resultierende Lenkmoment geben. Damit sind die Anforderungen an das System und seine Regelung wesentlich höher und setzen eine gute Abstimmung voraus um die Qualität des Lenkgefühls klassischer HPS Lenkungen zu erreichen [2].

### 1.3 Das Lenkgefühl im Fahrzeug

Heute wird vom Kunden eine gelungene Abstimmung des Gesamtfahrzeugs vorausgesetzt und so sind die Themen Komfort und NVH (Noise, Vibration, Harshness) auch bei den Herstellern von großer Bedeutung. Es ist in der Entwicklungsphase essentiell, den Kundenwunsch so früh als möglich in den Prozess einzubinden. Da viele Abläufe in der Entwicklung computerbasierend erfolgen, ist es wichtig, kaufentscheidende Fahrzeugeigenschaften wie das Lenkgefühl objektiv darzustellen. So können diese als auch ähnliche Kriterien rechtzeitig in den Prozess integriert werden [3]. Ein direkter Zusammenhang zwischen subjektiver Erfahrung des Fahrers und der messbaren Größe kann nur über eine Objektivierung des Lenkgefühls hergestellt werden. Das geschieht durch eine Korrelationsuntersuchung, wobei die gefühlten physikalischen Größen den objektiv gemessenen Größen gegenübergestellt werden. Die Schwierigkeit liegt darin, das subjektiv zu bewertende Gefühl so unmissverständlich durch ein Kriterium zu definieren, dass ein direkter Zusammenhang mit den Kennwerten der objektiven Messung hergestellt werden kann. Das Lenkgefühl stellt sich als sehr komplexe Komforteigenschaft dar. Es ist abhängig von Fahrgeschwindigkeit, Querschleunigung, Lenkwinkel und Lenkgeschwindigkeit und gibt dem Fahrer durch seinen permanenten Kontakt zum Lenkrad ununterbrochen Rückmeldung über die Fahrsituation. Um dieses Feedback für den Fahrer möglichst angenehm zu gestalten, ist die Kenntnis über das *Gefallen* der Kunden wichtig. Der Weg dahin wird in dieser Diplomarbeit verfolgt. Dafür bewerten ausgewählte Fahrer mittels Fragebogen unterschiedliche Kriterien an Fahrzeugen mit unterschiedlicher Lenkcharakteristik. Zusätzlich erfolgt eine objektive Messung der Fahrzeuge durch standardisierte Fahrmanöver. Welche Lenkeigenschaften den Probanden schlussendlich gefallen, wird über eine statistische Analyse und Gegenüberstellung der subjektiven und objektiven Daten ermittelt. Der schematische Ablauf der Forschungsarbeit wird in Kapitel 2 genau dargestellt.

## 2 Ziel der Arbeit und die angewandte Methodik

Ziel der Arbeit ist, das subjektive Lenkgefühl durch objektive Werte auszudrücken. Um das zu erreichen, ist ein gegliederter Ablauf notwendig, der ein breites Spektrum von Aufgabengebieten umfasst. Um dem Leser einen Leitfaden durch die Struktur der Kapitel zu bieten, greift dieses Kapitel dem inhaltlichen dieser Arbeit vor und beschreibt kurz den methodischen Aufbau der Durchführung. In Abbildung 2-1 wird der inhaltliche Umfang und chronologische Ablauf der Diplomarbeit dargestellt.

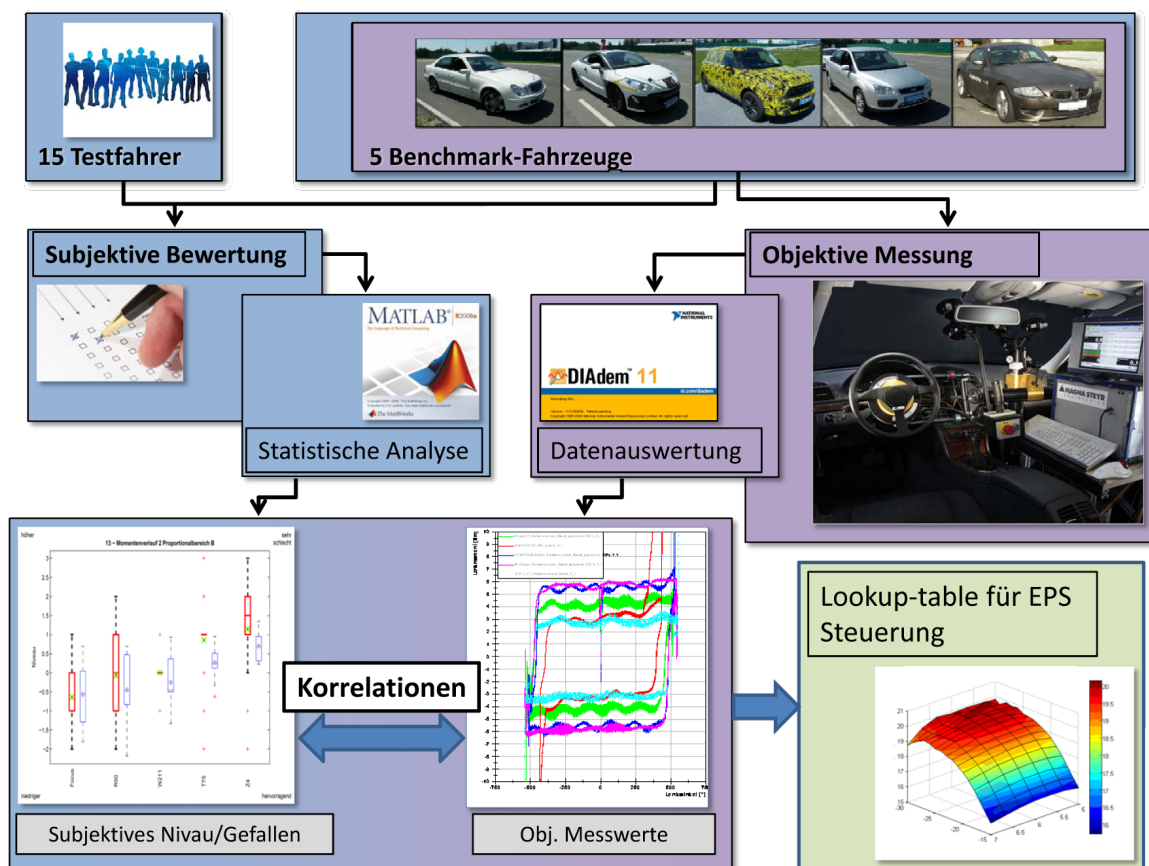


Abbildung 2-1: Schematischer Ablauf der Arbeit

Der linke Ast in Abbildung 2-1 zeigt die stichprobenartige Erfassung des Lenkgeföhls anhand 15 Probanden und fünf Fahrzeugen sowie das Auswerten der Antworten, wobei die Analyse statistische Methoden erfordert. Der rechte Ast verfolgt die objektive Erhebung von Fahrdynamischen Kenngrößen. Um aus den objektiven Messungen der Fahrzeuge relevante Kennwerte zu erhalten, ist eine umfangreiche Aufbereitung aller Daten notwendig. Für beide Äste stehen dieselben fünf Fahrzeuge zu Verfügung. Bei der Gegenüberstellung der Werte aus blauem und violetter Ast ist das Ziel, bevorzugte Rückmeldungen des Lenkgeföhls in Zahlen zu erfassen die als Grundlagen für die Entwicklung von Kennlinien für Lenksysteme mit EPS dienen.

### 3 Grundlagen zur Bewertung des Lenkgefühls

Vor der Durchführung der Objektivierung an sich sind einige Begriffserklärungen, Definitionen und Grundlagen aus der Fahrzeugtechnik nötig, die in diesem Kapitel zusammengeführt und in kurzen Worten beschrieben werden.

Das Fahrverhalten eines Fahrzeuges kann in drei wesentlichen Bewegungsrichtungen des Aufbaus eingeteilt werden:

- Längsdynamik
- Vertikaldynamik
- Querdynamik

Die *Längsdynamik* stellt die Charakteristik der komplexen Einheit von Motor, Getriebe und Antrieb als auch der Bremsanlage dar. Beschleunigungs- sowie Verzögerungsmanöver haben durch die Trägheit des Fahrzeugs Einfluss auf das Aufbaunicken. Die *Vertikaldynamik* beschreibt die Aufbaubewegung, eingeleitet durch Fahrbahnunebenheiten und innere Anregungen wie mechanische Vibrationen im Antriebstrang oder Motor. Auf die Anforderungen der *Querdynamik* soll in dieser Arbeit näher eingegangen werden.

#### 3.1 Querdynamik

Bei nicht richtungsgebundenen Verkehrsmitteln spielt der Fahrer eine wesentliche Rolle für die Spurführung. Er wählt die Fahrtroute, gibt den gewünschten Soll-Kurs durch den eingestellten Lenkradwinkel vor, sorgt für das Beibehalten des Kurses durch ständige Lenkwinkelvariation und reagiert auf unerwartete Kursstörungen von außen. Im, in Abbildung 3-1 dargestellten geschlossenen Regelkreis (closed-loop), wirkt der Fahrer als Regler, das Fahrzeug als Regelstrecke und Einflüsse von Fahrbahn, Wind oder Kollisionen als Störgrößen. Die Regelgröße ist für den Fahrer der Lenkradwinkel, mit dem er die Wunschrichtung des Fahrzeugs vorgibt und Abweichungen von Soll- zu Ist-Kurs korrigiert und das Fahrzeug entgegen äußeren Einflüssen stabil hält. Primär hängen die Gesetzmäßigkeiten für das Fahrverhalten von physikalischen Grenzen ab welche Eingriffsmöglichkeiten des Fahrers beschränken [4].

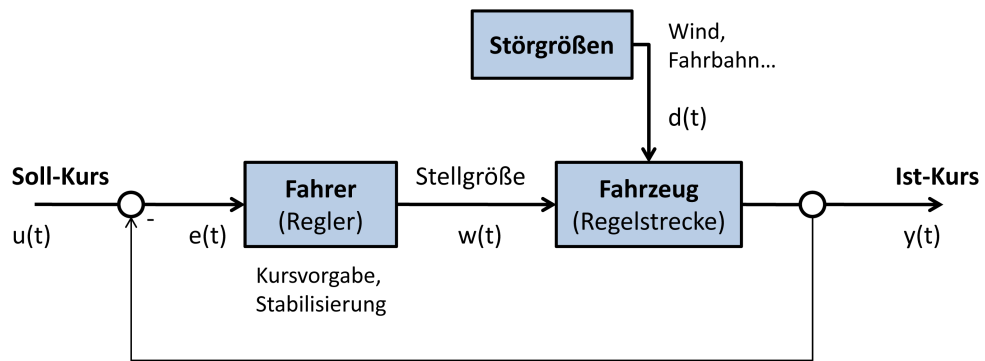


Abbildung 3-1: Geschlossener Fahrer-Fahrzeug Regelkreis

Die Regelstrecke wird unter anderem von Federsteifigkeiten, Dämpfungsraten, Reifeneigenschaften und Gewichtsverteilung beeinflusst, deren fahrdynamische Auswirkungen der Fahrer während der Spurführung ständig berücksichtigen muss. Für eine subjektive Bewertung des Lenkgefühls wird vom Fahrer ein vollständiges Ausblenden von einzelnen Einflüssen verlangt. Er betrachtet die Vorgänge zwischen Lenkrad und Radaufstandsfläche als „Black-Box“.

### 3.1.1 Einspurmodell

Zur Erfassung der Querdynamik werden Kenngrößen und charakteristische Werte definiert und mathematisch formuliert. Um die Zusammenhänge anschaulich darzustellen wird oft das vereinfachte Einspurmodell verwendet (Abbildung 3-2). Das Modell findet unter Berücksichtigung zweier Voraussetzungen Anwendung. Erstens werden die Seitenführungskräfte der Vorder- und Hinterachse in den Schnittpunkten mit der fahrzeugfesten x-Achse zusammengefasst und zweitens wird angenommen, dass der Schwerpunkt in der Fahrbahnebene liegt, so ist das Fahrzeug als eben zu betrachten. Dadurch finden idealerweise keine Radlastschwankungen statt.



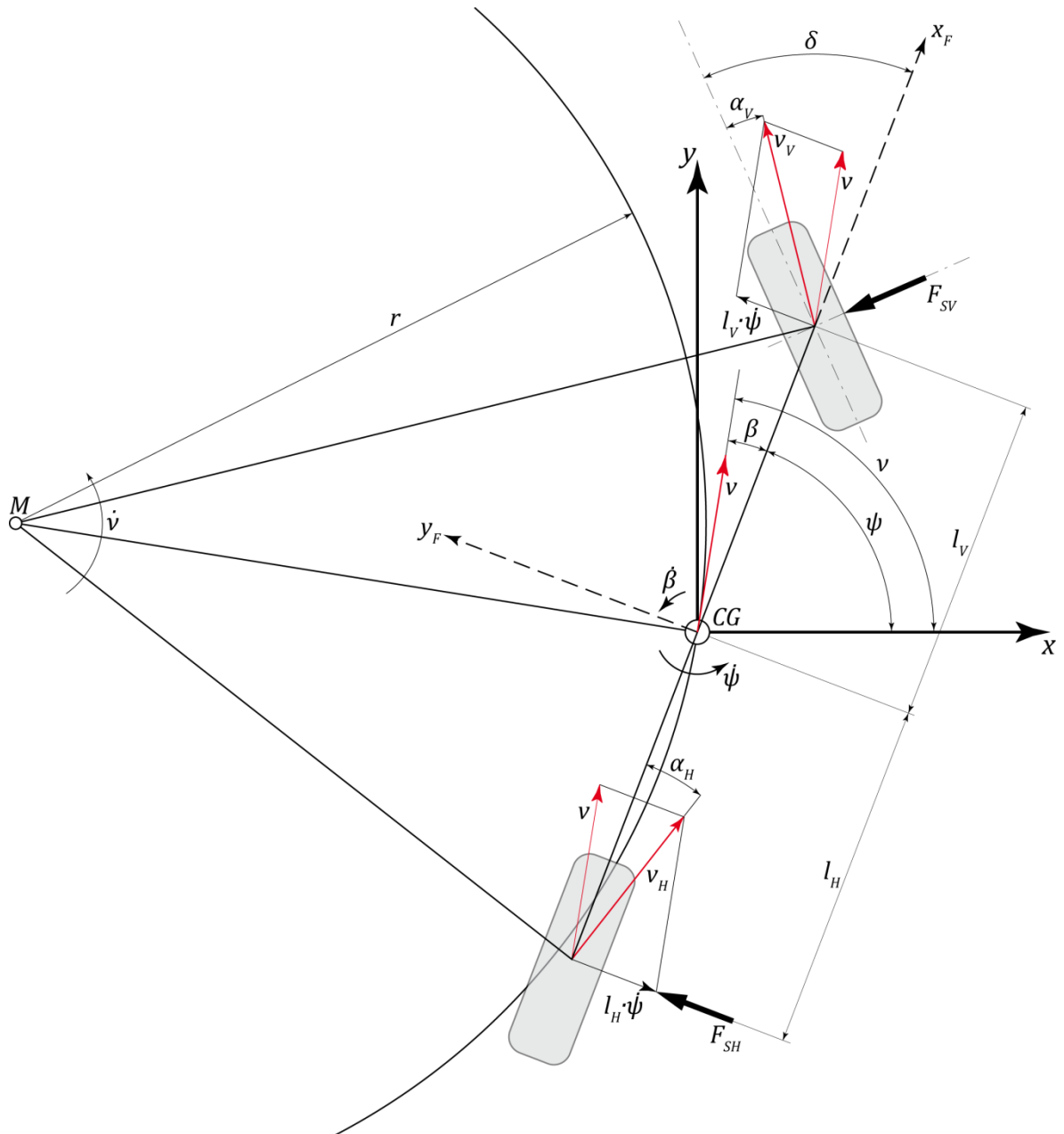


Abbildung 3-2: Einspurmodell

### 3.1.2 Charakteristische Kennwerte für das Einspurmodell

- $x, y$  Globales Koordinatensystem, hier in den Fahrzeugschwerpunkt geschoben,
- $x_F, y_F$  Fahrzeugfestes Koordinatensystem,
- $v$  Fahrzeuggeschwindigkeit im Schwerpunkt,
- $v_V$  Geschwindigkeit im vorderen Radaufstandspunkt,
- $v_H$  Geschwindigkeit im hinteren Radaufstandspunkt,
- $r$  Bahnradius,

$\alpha$	Schräglaufwinkel, Winkel zwischen dem Geschwindigkeitsvektor des betrachteten Reifens sowie der Längsachse des Reifens,
$\beta$	Schwimmwinkel, Winkel zwischen Fahrzeuglängsachse und dem Geschwindigkeitsvektor im Schwerpunkt,
$\dot{\beta}$	Schwimmwinkelgeschwindigkeit, Änderung des Schwimmwinkels mit der Zeit,
$\psi$	Gierwinkel, Winkel zwischen Fahrzeuglängsachse und der globalen x-Achse,
$\dot{\psi}$	Giergeschwindigkeit, Winkelgeschwindigkeit des Fahrzeuges um die z-Achse,
$\nu$	Bahnwinkel, Differenz zwischen Gierwinkel und Schwimmwinkel,
$\dot{\nu}$	Bahnwinkelgeschwindigkeit, Winkelgeschwindigkeit vom Fahrzeugschwerpunkt um den Momentanpol,
$\delta$	Lenkwinkel an der Vorderachse, Winkel zwischen Längsachse des Fahrzeugs und Längsachse des Reifens,
$\delta_A$	Ackermannwinkel, auch Grundbedarfswinkel, setzt sich aus dem geometrischen Zusammenhang zwischen Achsabstand und Kurvenradius zusammen,
$CG$	Fahrzeugschwerpunkt (Center of Gravity),
$M$	Aktueller Momentanpol der Fahrzeugbewegung,
$l_{V,H}$	Abstand vom Schwerpunkt zum vorderen bzw. hinteren Radaufstandspunkt
$l$	Achsabstand

Die Schräglaufwinkel können an der Vorderachse mit

$$\alpha_V = \delta + \beta - \frac{l_V \cdot \dot{\psi}}{v} \quad (3.1)$$

und an der Hinterachse mit

$$\alpha_H = \beta + \frac{l_H \cdot \dot{\psi}}{v} \quad (3.2)$$

definiert werden.

Durch das Momentengleichgewicht um den vorderen und hinteren Radaufstandspunkt ergeben sich mit der Definition der Reifenseitenkräfte

$$F_{SV,SH} = c_{SV,SH} \cdot \alpha_{V,H} \quad (3.3)$$

die Gleichungen

$$c_{SV} \cdot \alpha_V = m \cdot a_y \cdot \frac{l_H}{l} \quad (3.4)$$

und

$$c_{SH} \cdot \alpha_H = m \cdot a_y \cdot \frac{l_V}{l}. \quad (3.5)$$

Mit der Vereinfachung, dass die Schwimmwinkelgeschwindigkeit bei stationärer Kreisfahrt Null ist und somit die Giergeschwindigkeit der Bahngeschwindigkeit entspricht, ergibt das

$$\dot{\psi} = \dot{\nu} = \frac{v}{r}. \quad (3.6)$$

Durch Gleichsetzen der Gleichungen (3.4) und (3.5) mit eingesetztem  $\alpha_H$  und  $\alpha_V$  ergibt das durch Umformen

$$\delta = \frac{\dot{\psi}}{v} \cdot (l_V + l_H) + \frac{m}{l} \cdot \left( \frac{l_H}{c_{SV}} - \frac{l_V}{c_{SH}} \right) \cdot a_y \quad (3.7)$$

Mit der Gleichung (3.6) ergibt sich daraus die Bedingung für den Lenkwinkelbedarf bei einem bestimmten Fahrzustand bei der stationären Kreisfahrt [5]. Daraus ergibt sich die Gleichung (3.8) die eine wesentliche Aussage über den Lenkwinkelbedarf zum Befahren einer Kurve trifft:

$$\delta = \frac{l}{r} + \frac{m}{l} \cdot \left( \frac{l_H}{c_{SV}} - \frac{l_V}{c_{SH}} \right) \cdot a_y \quad (3.8)$$

Der Anteil  $l/r$  stellt dabei den Grundbedarfswinkel, auch Ackermannwinkel, dar. Der zweite Term zeigt den Lenkwinkelanteil, der linear von der Quereschleunigung abhängt. Dieser Anteil kann positiv oder negativ sein und hat bei der Betrachtung der Fahrdynamik einen wesentlichen Einfluss auf den vom Fahrer einzustellenden Lenkwinkel.

Durch Zusammenführen der Gleichungen (3.1) und (3.2) für die Differenz der Schräglaufwinkel  $\alpha_H$  und  $\alpha_V$  erhält man

$$\Delta\alpha = \delta - \frac{l}{r} \quad (3.9)$$

und somit gilt für den Lenkwinkelbedarf bei Kurvenfahrt

$$\delta = \frac{l}{r} + \Delta\alpha. \quad (3.10)$$

Diese Gleichung zeigt, dass bei Kurvenfahrt zusätzlich zum geometrischen Ackermannwinkel ein Lenkwinkel aufzuprägen ist der die Schräglaufwinkeldifferenz kompensiert. Diese Differenz kann herangezogen werden um das Lenkverhalten eines Fahrzeuges zu charakterisieren.

**Eigenlenkgradient, Übersteuern/Untersteuern:**

Nach Olley [4] benötigt der Fahrer zum Befahren eines Kreises bei einem untersteuernden Fahrzeug einen größeren Lenkwinkel als bei einem neutralen Fahrzeug. Das führt zu folgender Definition:

Übersteuern:  $\Delta\alpha = \alpha_V - \alpha_H < 0$

Neutral:  $\Delta\alpha = \alpha_V - \alpha_H = 0$

Untersteuern:  $\Delta\alpha = \alpha_V - \alpha_H > 0$

Diese Bewertung ist nur begrenzt sinnvoll und vor allem nur bei kleinen Quereschleunigungen aussagekräftig. Bei hohen Seitenkräften ist der lineare Zusammenhang zwischen Schräglaufwinkeldifferenz und Quereschleunigung aufgrund der veränderten Schräglaufsteifigkeiten nicht mehr zulässig. Grund dafür ist, dass Olley für sein Modell eine lineares Reifenkennfeld voraussetzt, was mit steigender Querkraft aber nicht mehr zutrifft. Bei höheren Quereschleunigungen ändern sich insbesondere die in den jeweiligen Betriebspunkten der Reifen wirksame Schräglaufsteifigkeiten. Durchgesetzt hat sich die Definition nach Bergmann [4]. Er beurteilt das Eigenlenkverhalten durch den augenblicklichen Wert des Gradienten  $\partial\delta/\partial a_y$  beim Befahren einer Kurve. Das Vorzeichen des Gradienten stimmt nicht zwingend mit dem Vorzeichen der Schräglauwinkeldifferenz überein. Somit kann es auch lokal, in nach Olley untersteuernden Bereichen, zu negativen Gradienten kommen (siehe Abbildung 3-3). Unter dem Einfluss der nicht linearen Reifeneigenschaften kann die Gleichung in differentieller Form wie folgt dargestellt werden

$$\frac{\partial\delta}{\partial a_y} = \frac{m}{l} \cdot \left( \frac{l_H}{c_{SV}(\alpha_V)} - \frac{l_V}{c_{SH}(\alpha_H)} \right). \quad (3.11)$$

Das führt zur Definition von Unter- und Übersteuern nach Bergman:

Übersteuern:  $c_{SH}(\alpha_H) \cdot l_H < c_{SV}(\alpha_V) \cdot l_V$

Neutral:  $c_{SH}(\alpha_H) \cdot l_H = c_{SV}(\alpha_V) \cdot l_V$

Untersteuern:  $c_{SH}(\alpha_H) \cdot l_H > c_{SV}(\alpha_V) \cdot l_V$

Bei stationärer Kreisfahrt mit konstantem Radius kann der dabei ermittelte Lenkwinkelverlauf über der Quereschleunigung wie in Abbildung 3-3 dargestellt, unterschiedlich definiert werden.

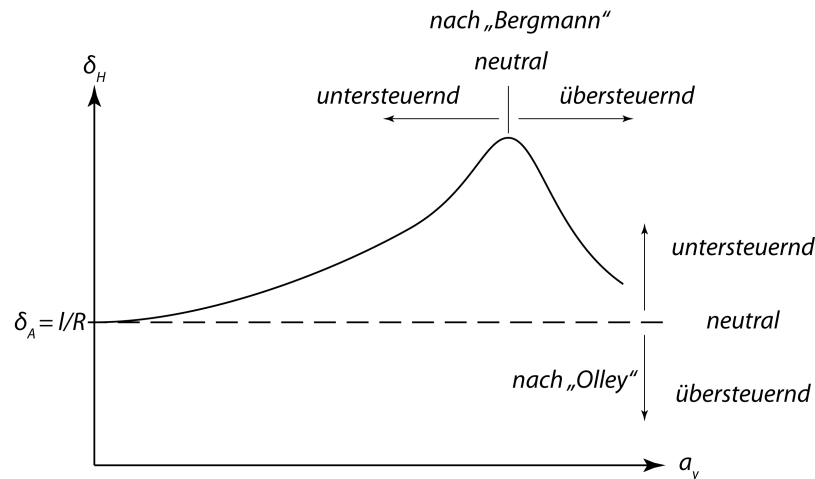


Abbildung 3-3: Eigenlenkverhalten nach „Olley“ und „Bergmann“ bei stationärer Kreisfahrt mit konstantem Radius.

Für die Definition bei stationärem Zustand wird der *Eigenlenkgradient EG* in der DIN 70000 [6] wie folgt beschrieben: „Der Eigenlenkgradient ist die Differenz zwischen dem Verhältnis des Lenkradwinkel-Querbeschleunigungsgradienten zu Gesamtlenkübersetzung und dem Ackermannwinkel-Querbeschleunigungs-Gradienten“ und wird mit

$$EG = \frac{1}{i_S} \cdot \frac{\partial \delta_H}{\partial a_y} - \frac{\partial \delta_A}{\partial a_y} \quad (3.12)$$

ermittelt. Dabei ist  $i_S$  die Lenkübersetzung,  $\delta_A$  der Ackermannwinkel und  $\delta_H$  der erforderliche Lenkwinkel. Der Eigenlenkgradient bestimmt den zusätzlich erforderlichen Lenkwinkel zum Ackermannwinkel und ist in einem Querbeschleunigungsbereich bis  $a_y \leq 4 \text{ m/s}^2$  linear.

### Gierverstärkungsfaktor:

Der Gierverstärkungsfaktor stellt das Verhältnis zwischen Giergeschwindigkeit  $\dot{\psi}$  und dem Lenkwinkel  $\delta$  im linearen Bereich dar. Ermittelt wird er durch einen sinusförmigen Lenkbefehl, wobei die Fahrgeschwindigkeit stufenweise bis zu  $v_{max}$  gesteigert wird. Von den Messergebnissen werden unter anderem die „charakteristische Geschwindigkeit“  $v_{char}$  als auch die „kritische Geschwindigkeit“  $v_{krit}$  abgeleitet. Das Diagramm stellt eine Kurve dar, die bei untersteuernden Fahrzeugen ein Maximum hat, welches die „charakteristische Geschwindigkeit“ darstellt. Bei übersteuernden Fahrzeugen strebt die Kurve, dargestellt in Abbildung 3-4, bei einer bestimmten Geschwindigkeit gegen Unendlich. Diese Geschwindigkeit wird „kritische Geschwindigkeit“  $v_{krit}$  genannt. Da heute kaum Personenkraftwagen mit Tendenz zum Übersteuern gebaut werden, ist die kritische Geschwindigkeit nur von geringer Bedeutung. Im Gegensatz dazu beschreibt die charakteristische Geschwindigkeit jenen Bereich, in dem das Fahrzeug am empfindlichsten

auf Lenkeingaben reagiert und liefert somit einen wichtigen Wert für die Abstimmung von Assistenzsystemen [4].

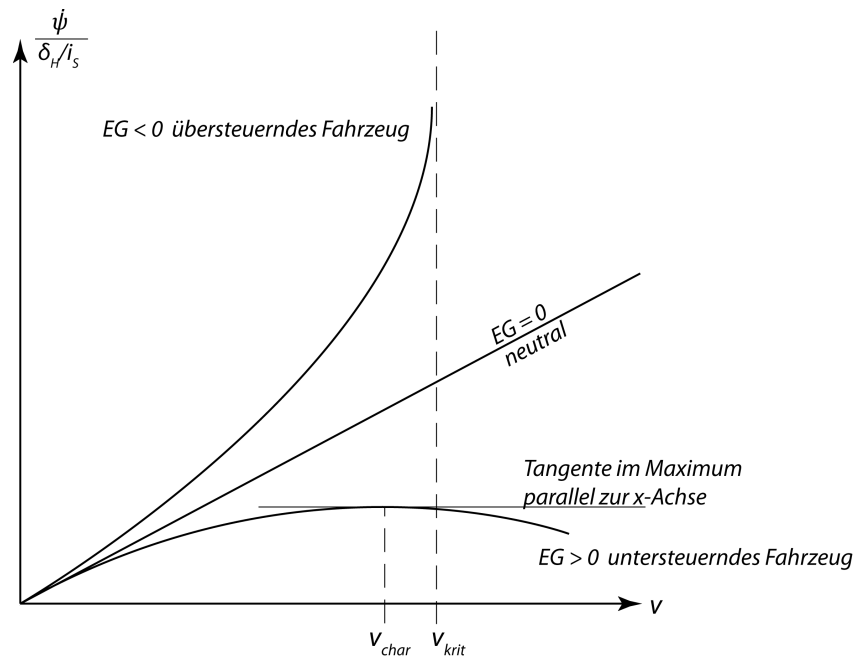


Abbildung 3-4: Gierverstärkung über der Fahrgeschwindigkeit

### Peak-Response-Time:

Bei der Untersuchung der Antwortfunktion des Fahrzeuges auf die Eingangsfunktion des Lenkwinkelsprungs (siehe Kapitel 3.3.7), stellt die *Peak-Response-Time*  $T_{\dot{\psi},max}$  [4] eine wichtige Größe zur Beurteilung der Fahrzeugreaktion dar. Dabei handelt es sich um die Zeitspanne zwischen dem Zeitpunkt der Hälfte des maximalen Lenkwinkels  $\delta_H$  und dem Zeitpunkt bei dem die Giergeschwindigkeit  $\dot{\psi}$  ihr Maximum erreicht. Die *Response-Time*  $T_{R,\dot{\psi}}$  ist die gemessene Ansprechdauer von der Hälfte des maximalen Lenkwinkels  $\delta_H$  bis zum Erreichen von 90% der stationären Giergeschwindigkeit  $\dot{\psi}_{stat}$ . Wird die *Peak-Response-Time* mit dem stationären Schwimmwinkel multipliziert, ergibt das den sogenannten *TB-Wert*.

$$TB = T_{\dot{\psi},max} \cdot \beta_{stat} \quad (3.13)$$

Die Abhängigkeiten zwischen der Eingangsfunktion des Lenkwinkels und den Antworten von Schwimmwinkel, Giergeschwindigkeit und Querbewegung werden in Abbildung 3-5 dargestellt.

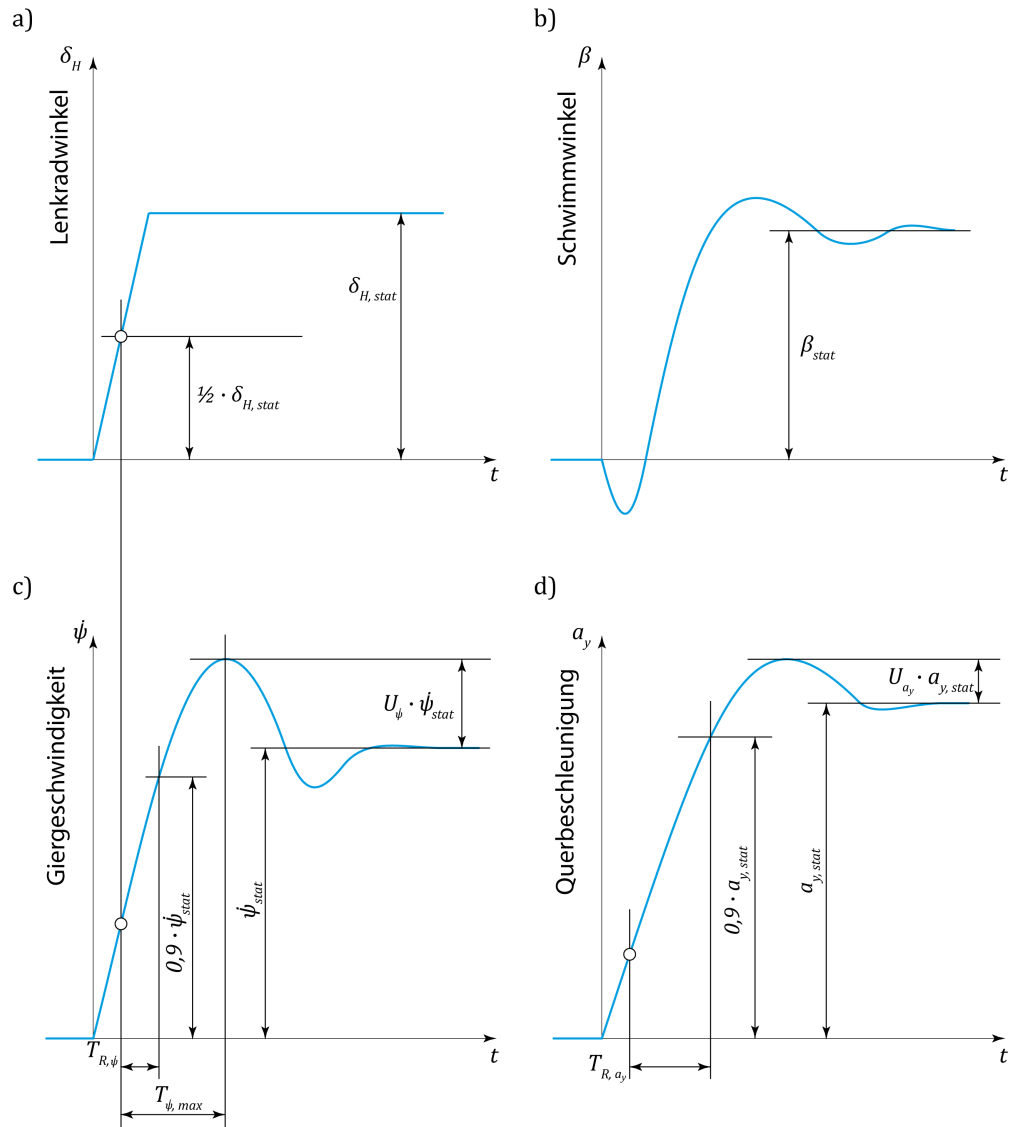


Abbildung 3-5: Untersuchung der Antwortfunktionen auf die Eingangsfunktion [4].

- a) Lenkwinkelsprung
- b) Schwimmwinkel
- c) Giergeschwindigkeit
- d) Querbeschleunigung

### 3.2 Grundlagen der subjektiven Bewertung

Das Abstimmen fahrdynamischer Eigenschaften am Fahrzeug ist ein wichtiger Teil des Entwicklungsprozesses und der Charakterisierung des Automobils und basiert heute nach wie vor zum Großteil auf subjektiven Eindrücken. Oft werden Eigenschaften wie „komfortabel“ oder „sportlich“ zugewiesen, es besteht aber die Aufgabe für die Testfahrer ihre Bewertungen so gut als möglich vergleichbar zu machen. Für die subjektive Bewertung von Fahrzeugen gibt es weder einheitliche Bedingungen noch standardisierte Fahrmanöver. Darum verwenden viele Hersteller eigene Definitionen für die Durchführung der Manöver. In wenigen Fällen, wie etwa dem Doppelten Spurwechsel, werden zumindest gleiche Rahmenbedingungen vereinbart. So helfen etwa Leitfäden, wie jener von Heißing [7], die für Fahrer eine durchgängige Nomenklatur einführen. Er definiert Rahmenbedingungen, schlägt Fahrzustände für die Manöver vor und legt Bezeichnungen für gefühlte physikalische Größen fest. Das menschliche Empfinden kann, entgegen allen objektiven Messungen, Vibrationen, Schwingungen und andere haptische Eigenschaften als angenehm aber als auch als störend empfinden. Es obliegt dem Fahrer, gefühlte Kenngrößen nachvollziehbar in Qualität, d.h. gefällt es oder gefällt es nicht, als auch in Quantität, ist die erwartete physikalische Größe verschwindend klein oder übermäßig stark ausgeprägt, zu verifizieren. Bei vielen OEM und Zulieferern wird die Bewertung von Fahrzeugeigenschaften auf eine Skala beschränkt. Diese reicht von eins bis zehn, wobei zehn die Bestnote darstellt. Hier wird nur die Akzeptanz der Testfahrer für eine Eigenschaft dargestellt, der Charakter des Fahrzeuges wie etwa „sportlich“ fließt schon als Zielwert in die Erprobungsfahrt mit ein.

Um ein System generell zu bewerten, spielt nicht nur die qualitative sondern auch die quantitative Größe eine wichtige Rolle. Da das Fahrzeug aus vielen einzelnen Baugruppen besteht und jede für sich die Möglichkeit gibt im mechanischen Verhalten optimiert zu werden, müssen die Systeme einzeln betrachtet werden. So haben Gruppen wie Regelsysteme, Reifen, Lenkung, Fahrzeugpackage, Gewichtsverteilung oder das Fahrwerk selbst, Einfluss auf das Fahrverhalten und den Fahrkomfort. Bei der Beurteilung der Lenkungseigenschaften ist es notwendig, eine Vielzahl an Einflüssen bei der Validierung bewusst zu ignorieren, um sich ausschließlich auf das Verhalten der Lenkung bei bestimmten Fahrmanövern konzentrieren zu können. Um die Aussagen über das gefühlte Niveau der Testfahrer zu bestätigen, können objektive Messungen herangezogen werden. Die gemessenen und errechneten Kennwerte sollen einen Zusammenhang zum subjektiv wahrgenommenen Niveau und Gefallen abbilden.



### 3.3 Grundlagen der objektiven Bewertung

Die Aufgabe von objektiven Testmanövern ist, eine reproduzierbare und vergleichbare Methode herzustellen, um Bewegungsabläufe eines fahrenden Autos zu beschreiben und zu analysieren [8]. Um das dynamische Verhalten des Fahrzeuges in den Hauptfahrsituationen zu beschreiben, lassen sich die Untersuchungen in Geradeausverhalten, Übergangverhalten, Kurvenverhalten und Wechselkurvenverhalten unterteilen. Um den Fahrereinfluss auf das Untersuchungsergebnis zu unterbinden, werden die Messungen im Open-Loop Modus gefahren. So wird bei den meisten Tests der Lenkwinkel beziehungsweise der Lenkwinkelverlauf idealer Weise vom Lenkroboter vorgegeben. Ist ein Tempomat für eine konstante Geschwindigkeitsregelung im Versuchsfahrzeug zur Verfügung, werden durch den Fahrer verursachte Geschwindigkeitsunregelmäßigkeiten vermieden und Messgrößen dadurch mit geringerer Streuung aufgezeichnet. Im Folgenden werden für die Lenkung charakteristische Tests aufgelistet die für diese Arbeit durchgeführt werden. Die meisten Manöver sind durch Normen in ihrem Ablauf vorgegeben, darin werden jedoch keine Zielbereiche definiert. Die Tests entsprechen meist klassischen Eingangsfunktionen aus der Regelungstechnik. Eingangsgröße ist hierbei der Lenkwinkel und darauf beziehen sich der Schwimmwinkel, die Giergeschwindigkeit oder die Querschleunigung als Ausgangsgröße und werden bei unterschiedlichen Eingangsfunktionen betrachtet [3].

Die folgenden Punkte unter Kapitel 3.3 beschreiben die standardisierten und teilweise genormten Abläufe der objektiven Manöver zur Messung der Fahrdynamikeigenschaften. Auf dem MSF-Testgelände können die geforderten Fahrzustände aus Platzgründen zum Teil nicht in vollem Umfang durchgeführt werden. Die Testbedingungen und mit welchen Einschränkungen die Manöver real durchgeführt werden ist in Kapitel 5.1.1 beschrieben. Zusammenfassend sind alle aufgezählten Manöver und ihre wichtigsten Kennwerte in Abbildung 3-6 aufgelistet.

#### 3.3.1 On Center Handling, ISO 13674-2

Das Manöver *On-Center-Handling* [9] wird bei hoher Fahrzeuggeschwindigkeit und kleinen Querschleunigungen durchgeführt und beschreibt das Fahrzeugverhalten bei Geradeausfahrt und verhältnismäßig großen Radien. Bei einer Geschwindigkeit von  $100 \text{ km/h}$  und bei Bedarf in inkrementellen Schritten von  $20 \text{ km/h}$  erhöhter oder reduzierter Geschwindigkeit, wird aus der Geradeausfahrt eine Lenkwinkelrampe gelenkt deren Winkelgeschwindigkeit  $5 \text{ }^\circ/\text{s}$  nicht überschreiten soll. Wichtig ist der Übergang von Null Grad zur konstanten Lenkgeschwindigkeit. Dieser soll, im Gegensatz zum Lenkungsziehen (siehe Kapitel 3.3.3), stetig und ohne Knick verlaufen (siehe Abbildung 3-6).

Gemessen wird:

- Lenkwinkel [ $\delta$ ]
- Lenkmoment [ $M_L$ ]
- Giergeschwindigkeit [ $\dot{\psi}$ ]
- Fahrzeuggeschwindigkeit [ $v$ ]
- Querbeschleunigung [ $a_y$ ]

### 3.3.2 Stationäre Kreisfahrt (Steady-State Cornering), ISO 4138

Dieses Manöver *stationäre Kreisfahrt* [10] kann auf drei verschiedene Arten durchgeführt werden. Bei Variante eins fährt das Fahrzeug entlang eines Kreises mit konstantem Radius, bei Variante zwei bleibt der Lenkwinkel konstant und bei Variante drei wird die Fahrzeuggeschwindigkeit konstant gehalten. Alle drei Varianten führen zum selben Ergebnis, lediglich der Flächenbedarf der befahrenen Strecke unterscheidet sich dabei. Durch die vorhandenen Platzverhältnisse wird in diesem Fall Variante eins durchgeführt. Dabei beschleunigt der Fahrer das Fahrzeug von Schrittgeschwindigkeit gleichmäßig bis zur maximal möglichen Geschwindigkeit. Der Beschleunigungsvorgang soll ohne Überschreitung einer Gierbeschleunigungsgrenze von  $1 \text{ }^\circ/\text{s}^2$  stattfinden.

Gemessen wird hierbei:

- Lenkwinkel [ $\delta$ ]
- Fahrzeuggeschwindigkeit [ $v$ ]
- Querbeschleunigung [ $a_y$ ]
- Giergeschwindigkeit [ $\dot{\psi}$ ]
- Schwimmwinkel [ $\beta$ ]
- Lenkmoment [ $M_L$ ]

Das Fahrzeug fährt entlang eines Kreises mit dem Radius von  $50 \text{ m}$ , dabei wird die Fahrzeuggeschwindigkeit stetig erhöht. Um den Ackermannwinkel zu erfassen, startet der Fahrer das Manöver mit der geringsten möglichen Geschwindigkeit bei konstantem Lenkwinkel. Während der gesamten Testphase werden Daten aufgenommen.

Da dieser Test erst vom Ackermannwinkel beginnend durchgeführt wird, bildet er nicht den Mittenbereich der Lenkung ab. Dafür kommt das Manöver *Lenkungszuziehen* zur Anwendung (siehe Kapitel 3.3.3).

### 3.3.3 Lenkungszuziehen

Beim *Lenkungszuziehen* wird aus der Geradeausfahrt mittels Lenkungsrampeninputs von der Mittenlage über den Übergangsbereich bis hin zum Grenzbereich mit maximaler Querb beschleunigung „gezogen“. Dadurch repräsentiert das Manöver eine Fahrt entlang einer Klothoide, ein im Straßenbau verwendeter Kurvenverlauf, der ohne Einlenksprung auskommt [11]. Das Manöver wird mit unterschiedlichen Geschwindigkeitsabstufungen von 30 bis 100 *km/h* gefahren. Ausgewertet wird das Lenkmoment im Bezug auf den Lenkwinkel und der Querb beschleunigung [3].

### 3.3.4 Sinus-Sweep (Frequenzgang), ISO 8726

Aus dem *Sinus-Sweep* [12] ergeben sich die Übertragungsfunktionen zwischen Lenkwinkleingabe und Gesamtfahrzeuggrößen. Die Eingabefunktion stellt den Frequenzbereich von 0,1 *Hz* bis 4 *Hz* dar. Die Frequenz wird bei konstanter Geschwindigkeit von 80 *km/h* vom minimalen bis zum maximalen Wert stetig gesteigert. Die Lenkwinkelamplitude wird so lange variiert bis die Querb beschleunigung bei 80 *km/h* bei 4 *m/s<sup>2</sup>* liegt.

Gemessen werden:

- Lenkwinkel [ $\delta$ ]
- Querb beschleunigung [ $a_y$ ]
- Giergeschwindigkeit [ $\dot{\psi}$ ]
- Fahrzeuggeschwindigkeit [ $v$ ]
- Lenkmoment [ $M_L$ ]
- Wankwinkel [ $\varphi$ ]

### 3.3.5 Weave-Test, ISO 13674-1

Der Lenkmittenbereich im Normalfahrbetrieb wird mittels *Weave-Test* [13] abgebildet. Dem Fahrzeug wird bei einer konstanten Geschwindigkeit von 100 *km/h* ein sinusförmiger Lenkwinkelbefehl mit konstanter Frequenz von 0,2 *Hz* aufgeprägt. Die maximale Lenkwinkelamplitude wird so lange variiert bis eine maximale Querb beschleunigung von 2 *m/s<sup>2</sup>* erreicht wird. Er definiert Kenngrößen über die entstehenden Hystereseschleifen aus den verschiedenen Ergebnisplots, wie Lenkmoment oder Giergeschwindigkeit über dem Lenkwinkel. Ähnlich dem Versuch der Gierverstärkung liegen die Hauptunterschiede bei diesem Test bei der Frequenz und der erreichten Querb beschleunigung.

Gemessen wird hierbei:

- Lenkwinkel [ $\delta$ ]

- Lenkmoment [ $M_L$ ]
- Giergeschwindigkeit [ $\dot{\psi}$ ]
- Fahrzeuggeschwindigkeit [ $v$ ]
- Querbefchleunigung [ $a_y$ ]
- Lenkwinkelgeschwindigkeit [ $\dot{\delta}$ ]

### 3.3.6 Gierverstärkung

Dieser Test beschreibt das Gierverhalten von Fahrzeugen. Innerhalb einer Spanne zwischen  $30 \text{ km/h}$  und  $v_{max}$  wird nach jeder Messung die Geschwindigkeit um  $10 \text{ km/h}$  erhöht. Bei konstanter Geschwindigkeit wird ein sinusförmiger Lenkwinkel vorgegeben. Bei einer Frequenz von  $0,15 \text{ Hz}$  wird die maximale Lenkwinkelamplitude variiert um eine Querbefchleunigung von  $4 \text{ m/s}^2$  zu erreichen. Auszuwerten ist das Verhältnis von Gierreaktion zum Lenkwinkel, der sogenannten Gierverstärkung [3]. Gemessen werden die Werte

- Lenkwinkel [ $\delta$ ]
- Giergeschwindigkeit [ $\dot{\psi}$ ]
- Querbefchleunigung [ $a_y$ ]
- Lenkwinkelgeschwindigkeit [ $\dot{\delta}$ ]
- Fahrzeuggeschwindigkeit [ $v$ ]

### 3.3.7 Lenkwinkelsprung, ISO 7401

Für den Lenkwinkelsprung [14] wird bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von  $80 \text{ km/h}$  sprungartig ein vordefinierter Lenkwinkel angesteuert und zirka  $3 \text{ s}$  lang gehalten. In eingeschwungenem Zustand soll das Fahrzeug Querbefchleunigungen von  $2$ ,  $4$  und  $6 \text{ m/s}^2$  erreichen. Man betrachtet die Sprungantwort des Fahrzeuges der Aufbaubewegung auf die Giergeschwindigkeit. Bei der Abstimmung sind eine möglichst geringe Verzögerung beim Aufbau der Giergeschwindigkeit, ein geringes Überschwingen und ein schnelles Abklingen der Giergeschwindigkeitsschwingung wünschenswert [4]. Dafür werden folgende Werte gemessen:

- Lenkwinkel [ $\delta$ ]
- Giergeschwindigkeit [ $\dot{\psi}$ ]
- Querbefchleunigung [ $a_y$ ]
- Fahrzeuggeschwindigkeit [ $v$ ]
- Schwimmwinkel [ $\beta$ ]

### 3.3.8 Parkiermoment

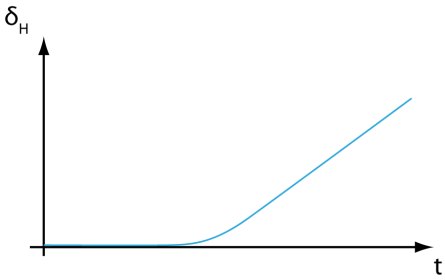
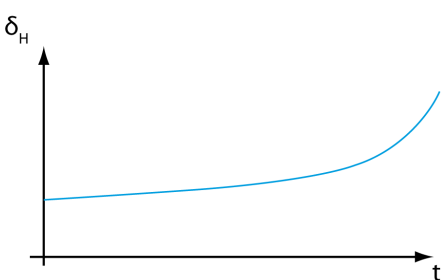
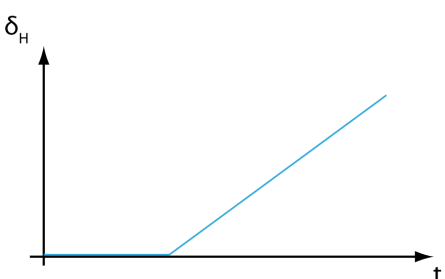
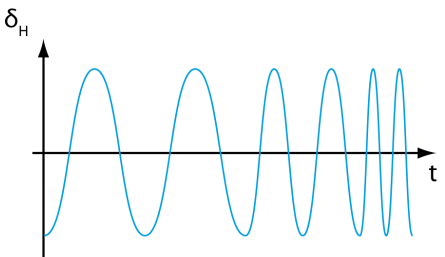
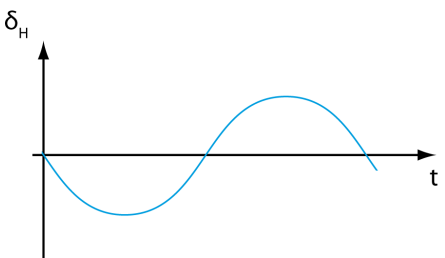
Das Messen des *Parkiermoments* stellt eine der einfachsten Methoden zur Lenkungsbewertung dar. Im Stillstand wird bei eingebremsten Fahrzeug das Lenkrad, mit einer Winkelgeschwindigkeit von  $40^\circ/s$ , von Anschlag zu Anschlag und wieder zurück gelenkt. Die dabei gemessenen Größen sind:

- Lenkwinkel [ $\delta$ ]
- Lenkmoment [ $M_L$ ]

### 3.3.9 Lenkungsrücklauf

Bei diesem Test wird bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten das Fahrzeug auf einem 7,5 m Kreis gefahren. Nach dem Loslassen des Lenkrades wird die Rückstellbewegung abgewartet. Relevant ist bei diesem Versuch die Gleichmäßigkeit der Rückstellung als auch der, nach einer bestimmten Zeit gemessene Restlenkwinkel. Gemessen werden bei diesem Manöver:

- Lenkwinkel [ $\delta$ ]
- Fahrzeuggeschwindigkeit [ $v$ ]
- Lenkmoment [ $M_L$ ]

<p><b>On Center Handling ISO 13674-2</b></p> 	<p><u>Rahmenbedingungen</u></p> <p><math>v</math> 100 km/h  <math>a_y</math> 0 - 1 m/s<sup>2</sup>  <math>\delta_{H,max}</math> 5 °/s</p> <p><u>objektive Kenngrößen</u>                  Verlauf des Lenkmoments über Lenkwinkel                  als auch über Querbeschleunigung,                  Lenkwinkelgradient speziell um die Nulllage,                  Verzögerung der Giergeschwindigkeit</p>
<p><b>Stationäre Kreisfahrt ISO 4138</b></p> 	<p><u>Rahmenbedingungen</u></p> <p><math>v</math> 0 bis max. km/h  <math>a_y</math> bis 9 m/s<sup>2</sup>  <math>\delta_{H,i}</math> ca. 1 °/s</p> <p><u>objektive Kenngrößen</u>                  Schwimmwinkel, Eigenlenkgradient,                  Schwimmwinkelgradient,                  Lenkmoment über Querbeschleunigung</p>
<p><b>Lenkungszuziehen</b></p> 	<p><u>Rahmenbedingungen</u></p> <p><math>v</math> 30/50/70/100/120 km/h  <math>a_y</math> 0 - 9 m/s<sup>2</sup>  <math>\delta_{H,max}</math> ≤ 20 °/s</p> <p><u>objektive Kenngrößen</u>                  Maximal dynamische Querbeschleunigung                  und max. dynamischer Wankwinkel,                  Lenkmoment-Kennfeld bei Durchfahren aller                  Geschwindigkeiten</p>
<p><b>Sinus-Sweep / Frequenzgang ISO 8726</b></p> 	<p><u>Rahmenbedingungen</u></p> <p><math>v</math> 80 km/h  <math>a_y</math> 4 m/s<sup>2</sup>  <math>f</math> 0,1 - 3 Hz</p> <p><u>objektive Kenngrößen</u>                  Giergeschwindigkeits-, Schwimmwinkel- und                  Wankwinkелеigenfrequenz, Überhöhung der                  Gierverst., Phasenlage der Fahrzeugreaktionen,                  station. Gierverstärkung</p>
<p><b>Weave-Test ISO 13674-1</b></p> 	<p><u>Rahmenbedingungen</u></p> <p><math>v</math> 100 km/h  <math>a_y</math> 2 m/s<sup>2</sup>  <math>f</math> 0,2 Hz</p> <p><u>objektive Kenngrößen</u>                  Reibungsmaß, Lenkmoment-Restmaß,                  Restquerbeschleunigung, Lenkungssteifigkeit,                  Lenkungsansprechen</p>

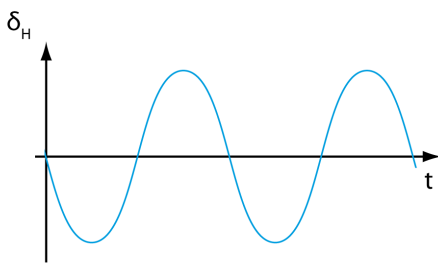
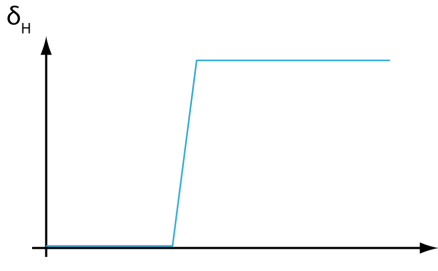
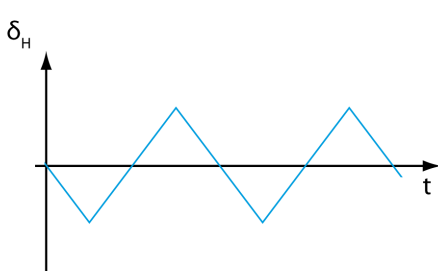
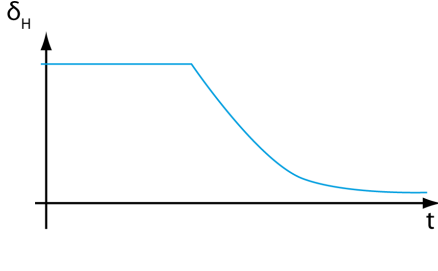
<p><b>Gierverstärkung</b></p> 	<p><u>Rahmenbedingungen</u></p> <p><math>v</math> 30 - max km/h  <math>a_y</math> 4 m/s<sup>2</sup>  <math>f</math> 0,15 Hz  <math>\delta_H</math> wird mit der Geschwindigkeit variiert um <math>a_y</math> zu erreichen</p> <p><u>objektive Kenngrößen</u>                  Verlauf der Gierverstärkung über <math>v_x</math>, charakteristische Geschwindigkeit <math>v_{char}</math></p>
<p><b>Lenkwinkelsprung ISO 7401</b></p> 	<p><u>Rahmenbedingungen</u></p> <p><math>v</math> 80 km/h  <math>a_y</math> 2/4/6 m/s<sup>2</sup>  <math>\delta_H</math> ca. 300 °/s</p> <p><u>objektive Kenngrößen</u>                  Peak-Response-Time, evtl. TB-Wert, stat. Schwimmwinkel, Giergeschwindigkeit, Giergeschwindigkeitsanstieg, Ansprechzeit der Giergeschwindigkeit, stat. Lenkmom.</p>
<p><b>Parkiermoment</b></p> 	<p><u>Rahmenbedingungen</u></p> <p><math>v</math> 0 km/h  <math>\delta_H</math> von Anschlag zu Anschlag</p> <p><u>objektive Kenngrößen</u>                  Momentenverlauf, mittleres Lenkmoment, Momentenwelligkeit</p>
<p><b>Lenkungsrücklauf</b></p> 	<p><u>Rahmenbedingungen</u></p> <p><math>v</math> 10 - 30 km/h  <math>R</math> 7,5 m</p> <p><u>objektive Kenngrößen</u>                  Restlenkradwinkel, Lenkdrücklaufgeschwindigkeit, Lenkdrücklaufgleichförmigkeit</p>

Abbildung 3-6: Darstellung der standardisierten objektiven Fahrmanöver, die erforderlichen Fahrzustände und die aus den Messungen extrahierten Kenngrößen

### 3.4 Grundlagen und Ansätze aus der Statistik

#### 3.4.1 Möglichkeiten subjektiver Bewertungsskalen

Das Layout der Bewertungsskala im Fragebogen spielt eine wichtige Rolle und hat bedeutenden Einfluss auf die Bewertung der Probanden und die resultierenden Ergebnisse [15]. Hier wird kurz auf die unterschiedlichen Skalen eingegangen, wie sie für diese Arbeit angewendet werden ist in einem späteren Abschnitt erläutert (siehe Kapitel 4.2.2). In der Statistik unterscheidet man grundsätzlich zwischen drei unterschiedlichen Skalen. Die *Nominalskala* stellt die gröbste Art der Sortierung dar. Sie wird als Gruppierungskriterium benutzt, so werden zum Beispiel die Staatszugehörigkeit oder das Geschlecht zugeordnet. Die *Ordinalskala* charakterisiert Kriterien nicht nur grob in Nominal-Informationen sondern auch in deren Reihung. So teilt man mittels Ordinalskala die Probanden ihrem Alter nach in Gruppen ein, zum Beispiel in Alter <30, 31-40, 41-50 und größer als 50 Jahre. Um genaueste Ergebnisse in der Reihung zu erzielen wird die *Intervallskala* zur Bewertung herangezogen. Rangunterschiede und Abstände zwischen den Werten können gemessen werden und die Ausprägung des Skalenniveaus lässt sich quantitativ in Zahlen darstellen. Beispiele dafür sind Temperaturskalen oder Altersskalen. Bei Intervallskalen kann grundsätzlich in zwei unterschiedliche Arten unterteilt werden: der *offenen* und der *geschlossenen* Skala.

Die *Intervallskala* stellt eine kontinuierliche Abstufung dar, wobei jeder Skalenpunkt einen möglichst engen aber noch wirklich wahrnehmbaren Unterschied in der Empfindung darstellen soll [8]. Zomotor referenziert auf die SAE-Handling-Skala (Norm J1441). Sie wird auch als *offene Skala* oder auch als *uni-polar* bezeichnet, da kein Vorzeichenwechsel in der Bewertung stattfindet. Oft werden diese Skalen in 11 Stufen von 0 bis 10 dargestellt, wobei 5 die mittlere Bewertung darstellt, gleichzeitig aber auch den Grenzwert für die im Fahrzeugbau verwendete Akzeptanzgrenze [8]. Um eine subjektive Assoziation herzustellen werden die Stufen oft mit einem verbalen Attribut versehen. Eine solche Skala ist in Abbildung 3-7 dargestellt.

*unipolare oder offene Skala:*

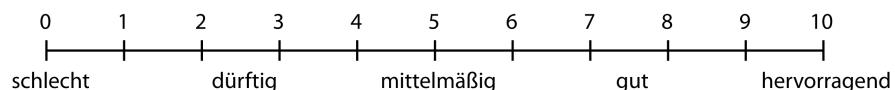


Abbildung 3-7: Offene oder unipolare Skala zur subjektiven Bewertung vom empfundenem Gefallen



Bei der offenen Skala ist unbedingt darauf zu achten, dass vom Probanden zusätzlich zum Gefallen angegeben werden muss, ob der gefühlte Wert zu groß, zu klein, zu hoch oder zu niedrig empfunden wird.

Wird mit der *geschlossenen* oder auch *bipolaren Skala* das *Gefallen* bewertet, stellt sie mit ihren zwei Extremwerten nach oben und unten hin die subjektiv gefühlten Schlechtwerte dar. Der mittlere Bereich der Skala beziehungsweise die Zahl Null beschreibt das *Gefallen* mit „gut“ oder auch „optimal“ (siehe Abbildung 3-8). Laut Zomotor [8] besteht auch hier, gleich wie bei der offenen Skala, die Gefahr, dass bei zu feiner Abstufung der Bewertungsschritte keine Differenzierung durch den Probanden getroffen werden kann.

*bipolare oder geschlossene Skala:*

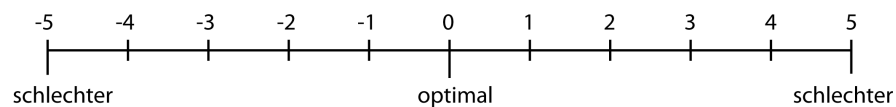


Abbildung 3-8: geschlossene oder bipolare Skala zur subjektiven Bewertung vom empfundenem Gefallen

Abbildung 3-9 zeigt, dass für die Bewertung eines gefühlten *Niveaus* relativ zu einer Referenz die *offene Skala* auch *bipolar* formuliert werden kann. Dabei entspricht der Wert 0 der Basis, dementsprechend stellen Werte unter und über 0 Verschlechterungen beziehungsweise Verbesserungen der Eigenschaften dar. Die untere Grenze beschreibt ein *niedrigeres*, die obere Grenze ein *höheres Niveau*. Somit ergibt sich eine *bipolar offene Skala*.

*bipolar offene Skala:*

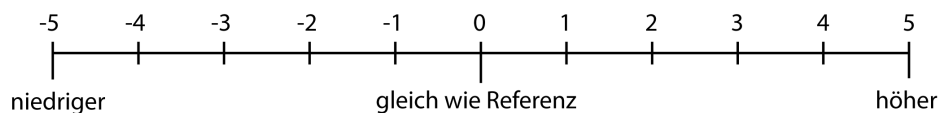


Abbildung 3-9: bipolar offene Skala zur subjektiven Bewertung vom empfundenem Niveau

Die *bipolar offene Skala* hat sich in der subjektiven Bewertung von Fahrzeugeigenschaften bewährt und wird häufig für die Evaluierung von gefühlten physikalischen Größen wie Kraftniveaus, unterschiedlichen Lenkmomenten oder Geschwindigkeiten angewendet.

### 3.4.2 Multivariate Analyseverfahren

Dieses Verfahren wird verwendet, um Abhängigkeiten zwischen zwei oder mehreren Variablen zu untersuchen und darzustellen. Beim multivariaten Verfahren wird versucht, aus den Datensätzen eine Struktur zu extrahieren (Strukturentdeckendes Verfahren), oder durch vorgegebene Strukturen überprüfen ob diese zusammenpassen (Strukturprüfende Verfahren) [16]. Dabei werden Korrelationsanalysen und Regressionsanalysen durchgeführt, die Aussagen über Art und Grad der Zusammenhänge geben. Bei geringer Anzahl an Probanden ist die grundlegende Annahme einer vorliegenden Normalverteilung nicht zulässig und eine Überprüfung auf die gegebene Verteilung notwendig. Die Verteilungsform ist Basis für den Korrelationsansatz, dafür werden die Tests von Kolmogorov-Smirnov oder Lilliefors als auch eine graphische Überprüfung des Boxplot herangezogen [3]. Ergibt die Untersuchung der Normalverteilung eine hohe Güte, ist eine weitere Betrachtung der Daten in einer Multivariaten Analyse zulässig.

Aufgabe der Analyse ist die Darstellung, ob objektiv unterschiedliche Charakteristika Auswirkungen auf die subjektive Beurteilung und Bewertung haben. Grundlage dafür sind real existierende Niveauunterschiede bei den Messungen der unterschiedlichen Objekte. So ist es die Aufgabe der Probanden, die unterschiedlich empfundenen Niveaustufen in korrekter Reihenfolge und bestenfalls mit korrektem Intervall einzuordnen. Beispielsweise liegen drei unterschiedliche Kraftniveaus vor, wobei der Intervallunterschied zwischen zweitem und dritten System das Zweifache vom Intervall zwischen erstem und zweitem System ist. Die Hypothese erwartet, dass die Probanden die richtige Reihung erkennen, im Idealfall auch den Intervall bestimmen können. Bei der Beurteilung des *Gefallens* verweisen Krüger und Neukum [17] auf ein Problem aus der Urteilspsychologie, wobei die Probanden nur einen gewissen Teil der Skala verwenden. Eine Testperson vergibt im Unterbewusstsein nie die Note „sehr gut“, die andere Testperson zum Beispiel nie die Note „sehr schlecht“. Da die bewerteten Objekte die gleichen sind verzerrt das Ergebnis die Korrelationen. Es besteht die Möglichkeit diese Verfälschung durch eine Standardisierung der Benotungen zu korrigieren. Durch die Lineartransformation in der Form

$$z_i = \frac{(x_i - m_x)}{s_x} \quad (3.14)$$

mit  $x_i$  als Messwerte,  $m_x$  deren Mittelwerte und ihre Standardabweichung als  $s_x$  erhält man standardisierte Messwerte mit dem neuen Mittelwert  $m' = 0$  und der neuen Standardabweichung  $s' = 1$ . Um Korrelationen in der Handlingforschung zu erhalten, wird zwischen zwei Variablen differenziert: das Fahrzeug F und der Fahrer V. Die verschiedenen Fahrer müssen verschiedene Fahraufgaben durchlaufen und das mit jeder Fahrzeugvariante.

Diese Fahraufgaben müssen weitestgehend konditioniert sein um den Fahrern gleiche Rahmenbedingungen zu verschaffen (z.B. Streckenabschnitt, Geschwindigkeit, Fahrbahnbeschaffenheit). Eine genaue Definition der Aufgabe und deren durchzuführende Parameter müssen jedem Fahrer vor dem Durchlauf vermittelt werden. Der Korrelationskoeffizient ist wie folgt beschrieben:

$$r_{xy} = \frac{1}{n-1} \sum \left[ \frac{(x_i - m_x)}{s_x} \cdot \frac{(y_i - m_y)}{s_y} \right]. \quad (3.15)$$

Diese Maßzahl gibt die Stärke und Richtung des linearen Zusammenhangs wieder und liegt zwischen  $-1$  und  $+1$ . Ist  $r_{xy} = 0$  bedeutet das, dass  $x$  und  $y$  voneinander unabhängig sind und kein Zusammenhang besteht. Je näher sich  $r_{xy}$  seiner oberen oder unteren Grenze nähert desto höher ist die Wahrscheinlichkeit einer linearen Abhängigkeit [17].

Oft wird auch das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  angegeben, dabei steigt die Wahrscheinlichkeit einer Abhängigkeit je näher es bei  $+1$  liegt und sinkt gegen Null.  $R^2$  stellt eine Maßzahl für die Güte der Anpassung dar.

Um von linearer Regression sprechen zu können muss zwischen der unabhängigen Variable  $x$  (Einflussgröße) und der abhängige Variable  $y$  (Zielgröße) ein linearer Zusammenhang bestehen. Mathematisch wird nach jener Geradengleichung gesucht, bei der die Summe der quadrierten Abweichungen der vorhergesagten Kriteriumswerte von den beobachteten  $y$ -Werten minimal wird. Formel (3.16) beschreibt jene Gleichung, bei der die quadratischen Summenfehler ein Minimum sind.

$$\hat{y}_i = b \cdot x_i + a. \quad (3.16)$$

Mit  $\hat{y}_i$  wird der Vektor der Schätzwerte, mit  $a$  der Schnittpunkt mit der  $y$ -Achse, mit  $x_i$  der Vektor der unabhängigen Variablen und mit  $b$  die Geradensteigung durch den Korrelationskoeffizient beschrieben.

Auch nicht-lineare Zusammenhänge sind möglich. Wird dabei eine quadratische Abhängigkeit untersucht, kann das bedeuten, dass sich das Verhalten der Eigenschaft bis zu einem gewissen Niveau verbessert, bei weiterem Niveaustieg jedoch wieder verschlechtert. Die dafür angewandte Gleichung lautet:

$$\hat{y}_i = b_1 \cdot x_i^2 + b_2 \cdot x_i + a. \quad (3.17)$$

Abbildung 3-10 zeigt nichtlineare Abhängigkeiten zweiter Ordnung, wobei das mittlere Niveau beim *Gefallen* einmal mit der Bestnote (siehe Abbildung 3-10a) und einmal mit der Schlechtestnote (Abbildung 3-10b) bewertet wird.

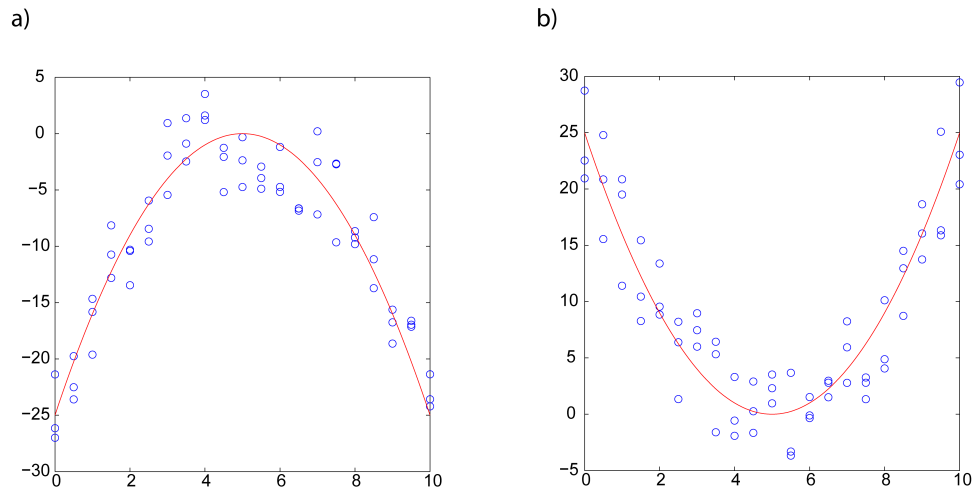


Abbildung 3-10: Beispiel für nicht-lineare Korrelationen

- a) Quadratischer Verlauf mit positiver Krümmung und Maximum bei ca.  $x = 5$   
 b) Quadratischer Verlauf mit negativer Krümmung und Minimum bei ca.  $x = 5$

Der Koeffizient kann nur dann berechnet werden, wenn die Variablen mindestens ordinalskaliert und linear voneinander abhängig sind. Bei der Untersuchung von nicht linearen Zusammenhängen verliert der Korrelationskoeffizient seine Aussagekraft und ist nicht weiter von Bedeutung.

Für lineare Zusammenhänge ergibt sich folgende Aussage: je größer die eine Variable, desto größer (positive Korrelation) beziehungsweise kleiner (negative Korrelation) ist die andere [3]. Zöfel unterscheidet folgende Korrelationsbereiche:

- $R \leq 0,2$  sehr geringe Korrelation,
- $0,2 < R \leq 0,5$  geringe Korrelation,
- $0,5 < R \leq 0,7$  mittlere Korrelation,
- $0,7 < R \leq 0,9$  hohe Korrelation,
- $0,9 < R \leq 1$  sehr hohe Korrelation.

Mit den, in zwei Gruppen kategorisierbaren, Kenngrößen, den Lagemaßen (Median, Mittelwert, Modalwert, Quantile) und den Streuungsmaßen (Varianz, Standardabweichungen, Interquartilbreite), kann eine Stichprobe überprüft und bewertet werden. So besagt die Nullhypothese, dass *kein* systematischer Zusammenhang zwischen unabhängiger und abhängiger Variable besteht. Sind die Korrelationen also nicht zufällig, kann die Nullhypothese zurückgewiesen und die Alternativhypothese akzeptiert werden [18]. Anhand eines Beispiels soll die Nullhypothese kurz erläutert werden: es wird vermutet, dass die Verletzungsgefahr bei Extremsportlern größer ist als bei Personen die Sport im

herkömmlichen Maß betreiben. Um welchen Betrag dieses Risiko verschieden ist, kann jedoch mangels Vorwissen nicht festgehalten und dadurch auch nicht spezifiziert werden. Im Gegensatz dazu kann aber eine Gegenaussage genau spezifiziert werden, und zwar, dass die Unfallgefahr bei Extrem- und Durchschnittssportler gleich hoch ist. Das wäre in diesem Fall die zu widerlegende Nullhypothese.

In der deskriptiven Statistik spielt die Signifikanz ein zentrales Thema um Schlüsse aus den korrelierenden Ergebnissen ziehen zu können. Wird ein statistisches Ergebnis als signifikant bezeichnet, so kann davon ausgegangen werden, dass der gemessene Zusammenhang zwischen abhängiger und unabhängiger Variable nicht nur zufällig besteht sondern auf die Grundgesamtheit zutrifft [19]. In dieser Arbeit soll die Signifikanz Angaben über die Wertigkeit der geführten Korrelationsuntersuchungen geben. Zuerst unter den Bewertungen der Fahrer und weiterführend zwischen den subjektiven Bewertungen, die unabhängigen Variablen, und den objektiv gemessenen Größen, den abhängigen Variablen. So definiert der Wert  $p$  die Irrtumswahrscheinlichkeit einer Stichprobe, mit  $p \leq 0,05$  als signifikant, mit  $p \leq 0,01$  sehr signifikant und mit  $p \leq 0,001$  höchst signifikant. Je kleiner der  $p$ -Wert ausfällt, desto eher spricht das Ergebnis dafür, die Nullhypothese (Annahme, dass ein bestimmter Zusammenhang *nicht* besteht) abzulehnen. In Abbildung 3-11 ist eine Korrelations-Untersuchung dargestellt. Die blauen Kreise stellen die Messwerte dar und die rote Gerade die, in diesem Beispiel lineare, Regression. Durch die hier dargestellten Werte wird eine sehr hohe Korrelation, ausgedrückt durch den Korrelationskoeffizienten  $R$ , erreicht. Auch  $p$  stellt durch den sehr kleinen Wert höchste Signifikanz dar.

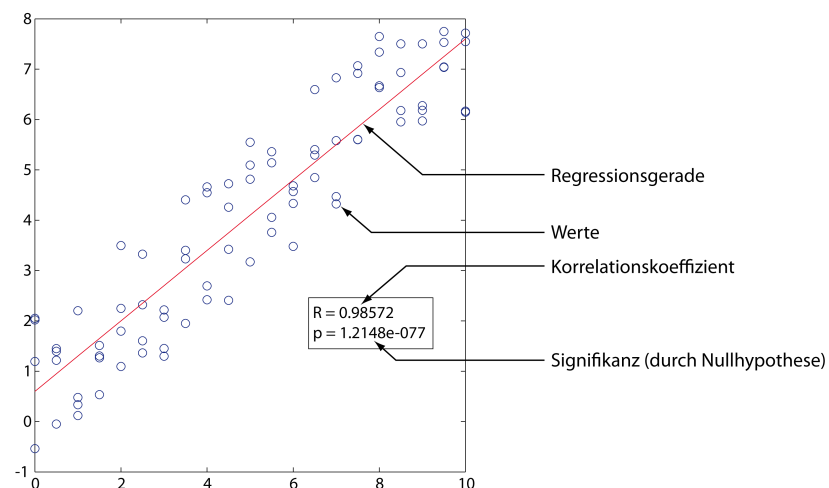


Abbildung 3-11: Beispiel einer Korrelations-Untersuchung

### 3.4.3 Der Boxplot

Für die graphische Darstellung der Lage- und Streuungsmaßen von statistischen Daten werden häufig Boxplots verwendet (siehe Abbildung 3-12). Der Bereich in dem sich die Daten befinden wird sehr übersichtlich und kompakt abgebildet.

Zentrales Element auf dem die Darstellung aufbaut ist ein Rechteck, die sogenannte „Box“. Verlängert wird diese durch zwei Linien, in jede Richtung eine. Sie stellen die „Whisker“ dar. Sie bilden alle Daten ab, die sich außerhalb der Box befinden. Im Gegensatz zur Box ist deren Definition nicht einheitlich. Alle Punkte die außerhalb der oberen und unteren Whisker liegen werden als „Ausreißer“ bezeichnet. Der auftretende Querstrich, der die Box teilt, markiert den „Median“. Die Boxenden begrenzen das obere und untere „Quartil“. Als Zusatzinformation kann noch der Mittelwert eingetragen werden, welcher jedoch keinen Einfluss auf die Ausprägungen im Boxplot hat. Je näher der Median und der Mittelwert beieinander liegen, desto besser ist die Normalverteilung der Daten ausgeprägt.

In Kapitel 6.1.3 ist die spezifische Anwendung des Boxplot für die Auswertung der Fragebögen anschaulich dargestellt. In dieser Arbeit ist der Boxplot ein durchgehend eingesetztes Instrument um grafisch die Verteilung der Bewertungen aller Probanden im *Niveau* und *Gefallen* zu visualisieren.

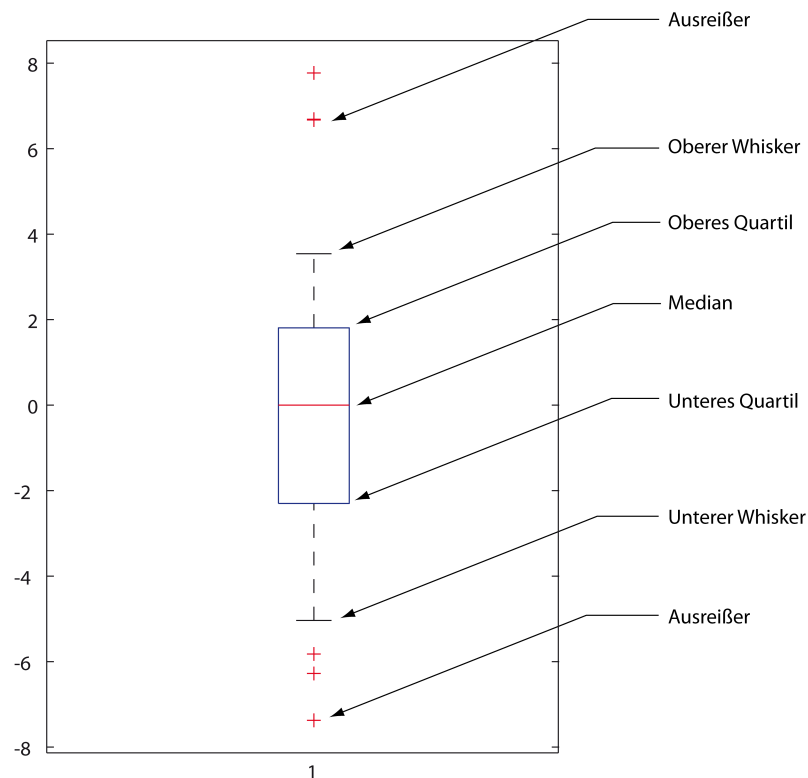


Abbildung 3-12: Merkmale eines Boxplots

*Unteres Quartil:* begrenzt die Box nach unten. Weniger als 25 % der Daten sind kleiner oder gleich diesem Wert.

*Oberes Quartil:* begrenzt die Box nach oben. Weniger als 75 % der Daten sind kleiner oder gleich diesem Wert.

*Box:* die Box beschreibt jenen Bereich, in dem mindestens 50 % der mittleren Daten liegen. Die Länge der Box wird auch als Interquartilsabstand (engl.: interquartile-range, IQR) bezeichnet.

*Whisker:* eine mögliche Definition nach John W. Tukey beschränkt die Länge der Whisker auf das 1,5-fache des Interquartilabstandes. Der Strich endet jedoch nicht genau bei dieser Grenze sondern stoppt bei dem letzten Wert der noch innerhalb dieser Grenze liegt. So kommt es, dass die Länge der Whiskers zu beiden Seiten nicht gleich lang sein müssen beziehungsweise auch gar nicht dargestellt werden.

*Ausreißer:* liegen Werte außerhalb der definierten Whisker-Grenze werden diese als Ausreißer bezeichnet. Hier kann noch unterschieden werden, ob es sich um sogenannte milde oder extreme Ausreißer handelt.

*Median:* der Median teilt die Box in zwei Hälften die jedoch nicht zwingend gleich groß sind. In jeder Hälfte liegen 50 % der Daten und so bekommt man einen Überblick über die sogenannte Schiefe der Verteilung.

## 4 Ablauf der subjektiven Bewertung

Die subjektive Bewertung der Lenkungseigenschaften findet ausschließlich mittels Fragebogen statt. Um ein gesamtheitliches Bild zu erlangen wird der Versuch mit sieben Durchschnitts- sowie acht Expertenfahrern durchgeführt. Unter „Experten“ werden hier Fahrer genannt, die beruflich in Aufgabenbereichen wie Fahrwerkabstimmung oder – Bewertung tätig sind. Jedem Fahrer wird vor Antritt der Bewertungsfahrten die Handhabung der Fragebögen genau erklärt. Um unterschiedliche Interpretationen der Kriteriumdefinition zu vermeiden wird unter Einbeziehen der Erfahrung von Expertenfahrern jedem Kriterium das zu bewertende Empfinden zugewiesen. Zudem werden auch der genaue Ablauf der Fahrzeugeinteilung und die zu befahrenden Streckenabschnitte definiert. Die für den genauen Ablauf der Bewertung erforderlichen Vorbereitungen werden im folgenden Kapitel genau beschrieben.

### 4.1 Vorbereitungen zur subjektiven Bewertung

Um Zusammenhänge zwischen objektiven und subjektiven Eigenschaften darstellen zu können müssen die Kriterien des Fragebogens direkt auf die Bereiche der durch die objektiven Messungen erhaltenen Fahrsituationen abzielen. Doch sollen die Kriterien nicht realitätsfremd sein sondern Manövern bei kundennaher Fahrzeugbewegung entsprechen. Durch die Kriterien soll ein möglichst breites Band der folgenden, für den Fahrer relevanten, Parameter abgedeckt werden:

- Unterschiedliche Lenkwinkelbereiche: Mittenlage, Übergangsbereich, Grenzbereich
- Unterschiedliche Lenkwinkelgeschwindigkeiten
- Unterschiedliche Fahrzeuggeschwindigkeiten.

Als grobe Vorlage eignen sich die von Zschocke herangezogenen Kriterien [3]. Die Kriterien sollen das Lenkgefühl so gut wie möglich in oben genannten Bereichen darstellen. Sie müssen für den Fahrer nachvollziehbar und praxisrelevant sein.

#### 4.1.1 Streckenabschnitte

Der zu befahrende Streckenabschnitt soll für alle Kandidaten gleiche Rahmenbedingungen schaffen und wird den Fahrern vorgegeben. Der Fragebogen unterteilt die Bewertung eines jeden Fahrzeuges in drei Fahrsituationen:

*Stadt:* Es werden sowohl Lenkmomente, Lenkungsrücklauf als auch Haltemomente bei Fahrzeuggeschwindigkeiten zwischen 0 km/h und 50 km/h bewertet. Es werden



Abbiegevorgänge, die Fahrt durch den Kreisverkehr als auch Parkiermanöver absolviert. Die vorgegebene Fahrtstrecke befindet sich in der verkehrsberuhigten Zone Thondorf im Süden von Graz. Zusätzlich können bei dieser Bewertungsfahrt die Fahrer auf die Teststrecke von Magna Steyr um unter „Laborbedingungen“ gewisse Fahrsituationen nachzustellen und Kriterien zu bewerten.

*Überland:* Auf dem vorgegebenen Streckenabschnitt für die Bewertung auf der Landstraße werden Lenk- und Haltemomente, Anlenkmomente, Aufbaubewegungen als auch Lenkungsansprechen bei Geschwindigkeiten zwischen 80 km/h und 100 km/h bewertet. Um Steuertendenzen festzustellen sind die Fahrzeuge von den Expertenfahrern bis in den Grenzbereich zu bewegen. Als Strecke dient die Bundesstraße B65 auf dem kurvenreichen Abschnitt zwischen Schrems und Tulwitz.

*Autobahn:* Bei dieser Strecke werden unter anderem der Geradeauslauf, das Lenkungsansprechen in der Mittenlage, das Lenkmoment bei Querbeschleunigungen bis  $3 \text{ m/s}^2$  und das Spurwechselverhalten bewertet. Die Richtgeschwindigkeit ist mit 130 km/h vorgegeben. Befahren wird dafür der selektive Autobahnabschnitt der S35 zwischen Peggau und Mixnitz.

Damit die erhöht aufzubringende Konzentration der Fahrer keine Auswirkungen auf die Bewertung hat, wird eine maximale Fahrzeit von 40 bis 50 Minuten pro Fahrzeug definiert. Jeder Streckenabschnitt wird an einem separaten Tag gefahren wobei dann alle Fahrzeuge von allen Fahrern in selber Reihenfolge benotet werden. Die Wetter- und Straßenkonditionen müssen bei ähnlichen Bedingungen durchgeführt werden, die Fahrten finden nur bei trockener Fahrbahn statt.

### 4.1.2 Fahrzeuge

Die Fahrzeuge spielen bei der subjektiven Bewertung eine maßgebliche Rolle. Das Lenkverhalten soll eine spürbar unterschiedliche Charakteristik darstellen um eine nachvollziehbare Differenzierung durch die Testfahrer zu ermöglichen. Eine präzisere Zuordnung der Eigenschaften durch die Fahrer führt bei der statistischen Analyse mit den gemessenen Größen zu klareren Abgrenzungen und dadurch zu konkreteren Ergebnissen. Da sich die wesentlichen charakteristischen Merkmale am ehesten bei Fahrzeugen aus unterschiedlichen Fahrzeugklassen unterscheiden, werden für diese Arbeit folgende fünf Fahrzeuge ausgewählt:

1. Mercedes Benz E320 CDI 4matic (Typ W211), Referenzfahrzeug,
2. Peugeot RCZ 2.0 HDi,

3. Mini ONE Countryman 1.6i (Typ R60),
4. Ford Focus 1.6i (Typ C170),
5. BMW Z4 M Coupé (Typ E86).

Die Charaktere der Lenkungen decken, abgesehen von der Momentencharakteristik, auch noch technisch ein breiteres Anwendungsband ab. Der *MB E320* ist mit der sogenannten „Parameterlenkung“ ausgestattet. Sie unterstützt den Fahrer bei unterschiedlichen Fahrzeuggeschwindigkeiten mit unterschiedlichen Hilfsmomenten. Zudem ist er das einzige Fahrzeug mit Allradantrieb. Der *Peugeot RCZ* sowie der *Mini Countryman* sind mit einer elektrischen Servolenkung (EPS) ausgestattet. Der *Ford Focus* als auch der *BMW Z4* ist ohne Zusatzfunktionen mit herkömmlichen hydraulischen Servolenkungen (HPS) versehen. Für die Bewertung ist das System irrelevant. Den Probanden wird, soweit möglich, keine genauen Informationen über die Fahrzeuge und deren technischen Details geliefert um Vorurteile bestmöglich auszuschließen. In Abbildung 5-1 werden die verwendeten Fahrzeuge dargestellt.

Referenzfahrzeug: MB E320 CDI



Peugeot RCZ

Mini Countryman

Ford Focus

BMW Z4 M Coupe

Abbildung 4-1: Benchmarkfahrzeuge für die Lenkungsbewertung

Voruntersuchungen ergeben, dass eine absolute Bewertung jedes einzelnen Fahrzeuges kaum möglich ist und jeder Fahrer seine Wertung gerne auf das zuvor gefahrene Fahrzeug bezieht. Somit wird der Mercedes bei den Testfahrten als Referenzfahrzeug definiert, diese Vorgehensweise beruht auf keinem technischen Hintergrund, einzig die ständige Verfügbarkeit des Fahrzeuges begründet diese Entscheidung. Die Fahrer müssen sich an einen genauen Zeitplan halten, da jeder Fahrer den Mercedes als Erstfahrzeug bewertet. Auch die Reihenfolge der restlichen Fahrzeuge soll für alle Probanden während der drei Fahrsituationen (Stadt, Land, Autobahn) immer erhalten bleiben, damit ist die Umstellung an die haptischen Eigenschaften und Bewegungsabläufe für die Fahrzeugbedienung nach jedem

Fahrzeug für alle Fahrer gleich. Alle Fahrzeuge werden vor dem Start der Versuchsreihe mit neuen Reifen ausgerüstet und am Achsmessprüfstand wird die korrekte Fahrwerksgeometrie eingestellt. Nach jedem Tag im Testbetrieb wird der Reifenfülldruck kontrolliert und die Fahrzeuge wieder vollgetankt.

## 4.2 Entwicklung des Fragebogen

Anhand der unter 4.1.1 groben Einteilung wird es bei genauer Betrachtung immer anspruchsvoller, mit präzise gestellten Fragen das komplexe Spektrum des Lenkgefühls zu erfassen. Die Auswahl der Kriterien folgt der Anforderung, die Eigenschaften der Lenkung über Lenkwinkel, Lenkgeschwindigkeit und Fahrgeschwindigkeit gut erfassbar und für eine sinngemäße Bewertung durch die Fahrer, abzubilden. Durch Expertengespräche und die Arbeiten von Zschocke [3] und Heißing [4] kann die Vielzahl an möglichen Definitionen für den Fragebogen auf die folgenden, unter Kapitel 4.2.1 gelisteten, reduziert werden.

### 4.2.1 Definition der zu bewertenden Kriterien

*Mittenzentrierung:* Bei hohen Geschwindigkeiten wird die Selbstzentrierung des Fahrzeugs beschrieben. Hierfür wird aus der Geradeausfahrt bei leichtem Anlenken und wieder Freigeben des Lenkrades beurteilt, ob ein vollständiger Rücklauf in die Nullstellung erfolgt oder dafür ein zusätzliches Handmoment erforderlich ist.

*Anlenkmoment:* Beurteilt wird das Lenkmomentniveau in Mittellage und bei sehr kleinem Lenkwinkel ( $\delta < 5^\circ$ ) aus der Geradeausfahrt. Es soll das Kraftniveau bei mittleren und hohen Geschwindigkeiten bewertet werden und dabei immer ein ausreichendes Gefühl der Zentrierung vermitteln.

*Momentenverlauf im Übergangsbereich zwischen Mitten- und Proportionalbereich:* Im niedrigen Querbeschleunigungsbereich wird bei einem Lenkwinkel von  $10^\circ$  bis  $20^\circ$  der Verlauf des Lenkmoments bewertet. Bei einem unharmonischen Verlauf lässt sich ein spürbarer Knick im Übergangsbereich erkennen, der bei harmonischem Momentenverlauf nicht erkennbar ist.

*Momentenverlauf im Proportionalbereich:* Hier soll der Lenkkraftanstieg bei Kurvenfahrt im mittleren und oberen Querbeschleunigungsbereich beurteilt werden. Der Anstieg kann flach oder steil ausgebildet sein wobei sich Lenk- und Haltemomente nicht wesentlich unterscheiden sollen. Zielführend ist ein proportionaler Anstieg des Momentes mit der Querbeschleunigung beziehungsweise mit der Geschwindigkeit.

*Lenkmomentrückgang vor Grenzbereich:* Bei der Annäherung an die Haftgrenze kurz vor dem Grenzbereich ist durch das Abnehmen der Haftreibung, hervorgerufen durch die Reifencharakteristik, auch ein Rückgang des Lenkmoments spürbar. Diese Eigenschaft ist in den mittleren bis oberen Geschwindigkeitsbereichen zu bewerten.

*Haltemoment:* Es soll das aufzubringende Haltemoment bei quasi stationärer Kreisfahrt bewertet werden. Dies wird über den gesamten Geschwindigkeitsbereich und dabei auch für mehrere Lenkwinkel durchgeführt (Stadt: 50° bis 180°; Autobahn/Landstraße: 5° bis 40°). Das Haltemoment soll ausreichend Feedback über die momentane Querbeschleunigung geben.

*Reibung:* Bewertet wird die Hystereseschleife des Handmomentes die sich mehr oder weniger spürbar um die Nullage ( $\delta < 10^\circ$ ) ausbildet. Sie wird in allen Fahrgeschwindigkeiten bewertet. Ob Reibung vorhanden sein soll hängt hier maßgeblich von den Präferenzen der Fahrer ab, sollte aber in keinem Fall so groß sein dass es das Lenkmoment verfälscht.

*Zielgenauigkeit/Lenkpräzision:* Diese Eigenschaft beschreibt das erforderliche Korrekturlenken bei gewähltem Soll-Kurs. Zwischen 80 und 130 km/h wird beobachtet ob das Fahrzeug dem gewünschten Kursverlauf folgt oder ob der Soll-Kurs nur durch viele kleine Kursberichtigungen eingehalten wird. Ziel ist ein störungsfreies Folgen des Kursverlaufes bei nur geringen Lenkkorrekturen.

*Lenkungsansprechen/Geradeausfahrt:* Es wird bewertet, wie das Fahrzeug auf minimale Lenkwinkleingaben ( $\delta < 10^\circ$ ) bei Geschwindigkeiten zwischen 80 und 130 km/h reagiert. Der Fahrer betrachtet, ab welchen Lenkwinkel das Fahrzeug zu Gieren beginnt und auf erfolgte Lenkbefehle reagiert. Die aufgebrachten Lenkwinkel dienen bei diesem Kriterium ausschließlich der Kurshaltung und nicht zur Richtungsänderung.

*Lenkungsrücklauf:* Darunter versteht man das Rückstellverhalten der Lenkung im unteren Geschwindigkeitsbereich. Betrachtet wird der Rücklauf bei Abbiegevorgängen, einerseits beim Beschleunigen aus dem Stillstand andererseits bei konstanten Fahrgeschwindigkeiten von 5 km/h bis 30 km/h. Dabei wird aus stationärer Kreisfahrt mit einem Radius von 7,5 m nach dem Freigeben des Lenkrades die Rückstellung beobachtet. Dabei ist zu beachten, dass ein negatives Rückstellen, also ein Eindrehen der Lenkung, nicht erwünscht ist. Ebenfalls wird das Überschwingen, ob das Lenkrad aus der Kurvenfahrt über die Mittellage zurückstellt, beurteilt. Zudem ist die Harmonie beziehungsweise Gleichmäßigkeit der Winkelgeschwindigkeit während des Lenkradrücklaufes zu bewerten.

*Lenkübersetzung:* Wie groß ist der Lenkwinkelbedarf für eine gewünschte Fahrtrichtungsänderung. Bewertet wird dieses Kriterium in allen Geschwindigkeitsbereichen, von langsam gefahrenen Abbiegevorgängen bis hin zu Spurwechsel im Hochgeschwindigkeitsbereich.

*Nachlenken nach Kurvenfahrt:* Es wird die Fahrzeugreaktion nach der Kurvenfahrt bis zum Erreichen der stabilen Geradeausfahrt bewertet. Es ist auch zu beobachten, ob das Fahrzeug an der Vorder- oder Hinterachse unerwartete Schwingungen erzeugt, die Lenkkorrekturen durch den Fahrer erfordern. Durchgeführt wird die Bewertung von Störungen und Schwankungen des Lenkmoments bei mittleren bis hohen Geschwindigkeiten.

*Kurvenwilligkeit/Gierreaktion:* Durch die eingeleitete Lenkbewegung werden Fahrzeugreaktionen hervorgerufen, wobei hier die Zeitverzögerung von Lenkbefehl zu Gierreaktion, also wie schnell das Fahrzeug auf Lenkeingaben reagiert, zu bewerten ist. Abhängig davon sind unter anderem Lenkwinkel und Lenkwinkelgeschwindigkeit, die während der Beurteilung im mittleren und oberen Fahrzeuggeschwindigkeitsbereich variiert werden.

*Eigenlenkverhalten:* Während des Einleitens einer Lenkbewegung geht jeder Fahrer von einer nachfolgenden, besonderen, Reaktion vom Fahrzeug aus. Die entstehende Erwartungshaltung des Fahrers ist die Folge von Erfahrungen mit physikalischen Zusammenhängen wie Trägheiten und Reibwerten oder auch durch bereits erlebte Ereignisse. Die dabeiensierte Fahrzeugreaktion ist das Gierverhalten, wobei der Fahrer zwischen einem erwarteten und einem tatsächlichen Gieren unterscheidet. Diese Differenz wird als Eigenlenkverhalten bezeichnet. So kann bei vorgegebener Lenkwinkelzugabe vereinfacht definiert werden, dass eine zu geringe Reaktion als „Untersteuern“, eine Überreaktion des Fahrzeuges als „Übersteuern“ gilt. Im zweiten Fall muss der Fahrer bei einer größeren Fahrzeugreaktion als angenommen folglich einen geringeren Lenkwinkel vorgeben um den gewünschten Kurs zu erhalten. Bei dieser Empfindung spielen der Lenkwinkel als auch die Differenz der Lenkwinkelzugabe sowie Querb beschleunigung, Fahrgeschwindigkeit und Kurvenradius eine Rolle. Objektiv wird das Verhalten bei der *stationären Kreisfahrt* ermittelt (siehe Kapitel 3.3.2). Subjektiv ist die Erfassung dieser Eigenschaft etwas aufwändiger. Durch die oben angeführten Eindrücke kann primär das stationäre Verhalten wiedergegeben werden. So sollte bei der Beurteilung ein möglichst breites Spektrum an Kurvenradien, Fahrzeuggeschwindigkeiten und Querb beschleunigungen befahren werden. Zudem führt ein verzögerter Aufbau der Gierrate zu anfänglich

großen Lenkwinkel. Der nach dem Einschwingen wieder zu reduzierende Lenkwinkel kann hier fälschlicherweise ebenfalls als Übersteuern empfunden werden.

*Fahrbahnkontakt:* Es soll die Rückmeldung der Fahrbahnstruktur als auch den Fahrzustand der dem Fahrer vermittelt wird bewertet werden. Strukturunterschiede wie Fahrbahnschäden, Streusplit, nasse oder verunreinigte Streckenabschnitte sowie Reserven zur Haftgrenze sollen als Feedback an den Fahrer weitergeleitet werden.

*Parkiermoment:* Bei diesem Kriterium wird während unterschiedlicher Parkiermanöver das Lenkmoment bewertet. Dabei gibt es eigene Kriterien für das stillstehende, eingebremste Fahrzeug, als auch für das rollende Fahrzeug mit Lenkwinkelgeschwindigkeiten von ca. 200 °/s.

*Lenkungsverhärten:* Vom Stillstand bis in den mittleren Geschwindigkeitsbereich wird mit größtmöglicher Geschwindigkeit (mind. 800 °/s) das Lenkrad sprunghaft wechselseitig per Hand angeregt, ähnlich der Reaktion bei einem Panikspurwechsel. Dabei ist die Motordrehzahl (und damit die Durchflussmenge der Hydraulikpumpe, falls vorhanden) zu variieren. Der Anstieg des Lenkmoments wird beobachtet und sein Verlauf bewertet.

### **4.2.2 Gewählte Skalen für „Gefallen“ und „Niveau“**

Der Fragebogen gibt die Meinung des Probanden wieder und muss entsprechende Möglichkeiten geben die erfolgte Beurteilung sinnvoll und nachvollziehbar festzuhalten. Aus den unter Kapitel 3.4.1 angeführten Skalen wird nun für jede Anwendung ein Skalentyp mit dem zugehörigen Wertebereich definiert.

Das Ziel dieser Arbeit ist, das Gefallen unterschiedlicher Lenkcharakteristika festzulegen. Dafür ist es wichtig, eine quantitative Aussage der Fahrer über gefühlte physikalische Eigenschaften zu erhalten. Aus der Erfahrung, dass sich die Fahrer bei der Bewertung eines physikalischen Niveaus auf ein vorangegangenes Niveau beziehen, wird für das gefühlte *Niveau* eine bipolare Skala mit einem Wertebereich von -3 bis +3 verwendet (siehe Abbildung 4-2). Die Null in der Mitte stellt den Wert des Referenzfahrzeuges dar. Ist das Gefühlte Niveau (zum Beispiel einer Kraft) höher als die Referenz, wird ein Wert auf der positiven Seite der Skala eingetragen. Ist das Niveau geringer wird dementsprechend ein Wert auf der negativen Seite eingetragen. Entspricht das Niveau dem der Referenz wird die Null markiert.

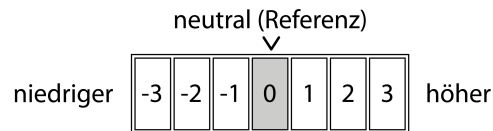


Abbildung 4-2: bipolare Skala für das Niveau

Diese Skala soll so gehandhabt werden, dass mindestens ein Maximalwert, entweder  $-3$  oder  $+3$ , unter allen Fahrzeugen pro Kriterium einmal vorkommen soll. Die Extremwerte decken somit nur den vorhandenen Niveaubereich unter den fünf vorgegebenen Fahrzeugen ab und lassen mögliche höhere oder niedrigere Niveaus bei nicht bewerteten Fahrzeugen außer Acht. Für gewisse Kriterien am Fragebogen wird der Proband angehalten, mit dieser Skala das Absolute Niveau zu bewerten und die Mitte mit dem Wert Null als persönliches Optimum zu definieren. In diesem Fall werden auf der Negativen Seite als „zu gering“ empfundene, auf der positiven Seite als „zu hoch“ empfundene Werte eingetragen.

Um bedeutsame Aussagen über die Vorlieben zu den gefühlten *Niveaus* der Probanden zu erhalten, ist bei jedem Kriterium zusätzlich zur *Niveau*-Skala eine zweite Skala angewendet. Damit halten die Probanden das qualitative *Gefallen* des gefühlten *Niveaus* fest. Diese Skala stellt eine unipolar offene Skala dar. Der Wertebereich von  $+1$  bis  $+10$  wird in Einserschritten unterteilt und mit verbalen Anker für den Probanden unterstützt (siehe Abbildung 4-3). Dabei wird der Wert 1 mit „hervorragend“ oder der Wert 5 mit „durchschnittlich“ verknüpft.

Bei dieser Bewertung soll der Proband so genau wie möglich sein absolutes Empfinden im Gefallen wiedergeben. Es ist möglich, dass einem Probanden weder ein Fahrzeug „hervorragend“ noch eines „sehr schlecht“ gefällt, darum ist ein zwingendes Verwenden der vollständigen Bandbreite der Skala in diesem Falle nicht zielführend.

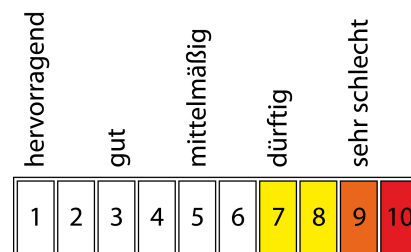


Abbildung 4-3: unipolare Skala für das Gefallen

Der Fahrer muss bei der Bewertung seine Aufmerksamkeit auf die Sensierung der Lenkeigenschaften konzentrieren, darum wird er bei der Durchführung der Beurteilung durch einen Beifahrer unterstützt. Dieser soll dem Fahrer während der Fahrt die Kriterien vorlesen und bei Bedarf wiederholen. Hat der Proband eine Entscheidung getroffen,

überträgt der Beifahrer diese in den Fragebogen. Somit ist ein ständiges Anhalten und Notieren beziehungsweise Durchlesen der Kriterien und deren Definitionen für den Fahrer selbst nicht erforderlich. Der Copilot soll im Idealfall für alle Fahrsituationen immer bei seinem Stammfahrer mitfahren da sich eine gewisse Routine einspielt und dadurch die Aussagen des Fahrers zuverlässiger werden. Sollte der Fahrer durch den Einfluss neuer Eindrücke, die durch das aktuell zu bewertende Fahrzeug entstehen, Unstimmigkeiten mit vorhergehenden Bewertungen bemerken, ist eine Korrektur erwünscht. Auf der nächsten Seite ist als Beispiel der Fragebogen für den Streckenabschnitt „Stadt/MSF-Testgelände“ abgebildet. Die Fragebögen für die Bewertungsfahrten „Landstraße“ und „Autobahn“ sind im Anhang abgebildet.



# Ablauf der subjektiven Bewertung

**Stadtverkehr - MSF Testgelände**  
 Richtgeschwindigkeit 30 - 50 km/h

**Fahrzeug:**

**Fahrer:**

**Geschlecht:**

**Startzeit:**

		Bewertung (nicht fahrzeugklassenspezifisch)																					
		Niveau					Gefallen																
		neutral (Referenz)																					
		herausragend	gut	mittelmäßig	dürftig	sehr schlecht	herausragend	gut	mittelmäßig	dürftig	sehr schlecht												
Kriterium  Lenkmoment  MSF Teststrecke  Rücklauf  Parkieren	Beschreibung Kraft, die am Lenkrad im ersten Moment des Anlenkens in einer Kurve beim Abbiegevorgang hinein spürbar ist	niedriger																					
	Reibung Die Lenkung vermittelt den Eindruck "verklebt" zu sein	weniger eckig, weniger harmonisch																					
	Momentenverlauf Im Übergang zwischen Mitten- und Proportionalbereich	niedriger																					
	Haltemoment im Weiterlenkbereich Lenkkräftbetrag beim Abbiegen oder im Kreisverkehr	kleiner																					
	Lenkwinkelbedarf / Lenkübersetzung Bei einem Abbiegevorgang	langsamer																					
	Lenkungsrücklauf bei 15 km/h Nach dem Abbiegevorgang bei losgelassenem Lenkrad in die Geradeausstellung	langsamer																					
	Lenkungsrücklauf bei 30 km/h Nach dem Abbiegevorgang bei losgelassenem Lenkrad in die Geradeausstellung	ungleichmäßiger																					
	Lenkungsrücklauf beschleunigt Nach dem Abbiegevorgang bei losgelassenem Lenkrad in die Geradeausstellung	absolut: zu niedrig																					
	Gleichförmigkeit des Lenkradrücklaufs nach Abbiegevorgang Dreht sich das Lenkrad nach dem Loslassen gleichförmig in seine Mittellage zurück	absolut: zu langsam																					
	Lenkradrückstellmoment falls vorhanden: Nach dem Abbiegevorgang aufzubringende Kraft, um die Geradeausstellung zu erreichen.	früher																					
	Lenkungsrücklauf bei beschleunigtem Abbiegen aus Stillstand (VOLLER LENKEINSCHLAG) Lenkungsrücklauf nach losgelassenem Lenkrad in die Geradeausstellung	höher																					
	Lenkmomentrückgang vor Grenzbereich Ist ein Rückgang der Lenkkräft im Grenzbereich spürbar	höher																					
	Parkiermoment im Stillstand Kraftaufwand bei Fahrzeugstillstand, eingebremst	höher																					
	Parkiermoment rollend Kraftaufwand beim Parkieren	weniger																					
Parkierumdrehungen Anzahl der Lenkradumdrehungen beim Parkieren	weniger																						

Abbildung 4-4: Fragebogen für den Streckenabschnitt „Stadt – MSF Testgelände“

### 4.3 Durchführung der Bewertung

Der Ablauf der Bewertung erfolgt nach genauer Einteilung:

1. *Vorbereitung und Instandsetzung der Fahrzeuge*
2. *Reihung der Fahrzeuge* (siehe Kapitel 4.1.2): Die Referenz (MB E320CDI) muss für alle Probanden das erste Fahrzeug sein. Auch die Reihenfolge der restlichen 4 Fahrzeuge muss von allen Fahrern eingehalten werden. Im Idealfall soll die Referenz zum Schluss der Bewertung aller Fahrzeuge noch einmal gefahren werden um einen Abgleich herzustellen.
3. *Einteilung der Fahrer*: Die 15 Fahrer werden in drei Gruppen zu je fünf Personen eingeteilt. Jede Gruppe braucht für eine der drei Fahrsituationen (Stadt/Land/Autobahn) einen Tag. Bei guten Wetterbedingungen hat eine Gruppe somit nach drei Tagen die Bewertung abgeschlossen. In Abbildung 4-5 ist die zeitliche Einteilung einer Fünfergruppe an drei Tagen und den zugehörigen Streckenabschnitten dargestellt. Mit dieser Reihenfolge wird für jeden Fahrer ein Minimum an Zeitaufwand benötigt um alle Fahrzeuge hintereinander zu bewerten. Zudem erfüllt das die Forderung, immer mit dem Referenzfahrzeug zu Beginn zu fahren und auch danach immer dieselbe Fahrzeugreihenfolge beizubehalten. Nach der Einteilung werden die Copiloten zugewiesen, die entstandenen Teams sollten für die nachfolgenden Fahrsituationen nicht untereinander wechseln.

Uhrzeit	TAG I - Autobahn					TAG II - Bundesstraße					TAG III - Stadtgebiet																													
	08:00	08:30	09:00	09:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	08:00	08:30	09:00	09:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	08:00	08:30	09:00	09:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30										
Fzg. 1	1	2	3	4	5						1	2	3	4	5											1	2	3	4	5										
Fzg. 2		1	2	3	4	5							1	2	3	4	5											1	2	3	4	5								
Fzg. 3			1	2	3	4	5								1	2	3	4	5								1	2	3	4	5									
Fzg. 4				1	2	3	4	5									1	2	3	4	5									1	2	3	4	5						
Fzg. 5					1	2	3	4	5										1	2	3	4	5										1	2	3	4	5			
Fzg. 1						1	2	3	4	5											1	2	3	4	5											1	2	3	4	5

1 Fahrer 1  
 2 Fahrer 2  
 3 Fahrer 3  
 4 Fahrer 4  
 5 Fahrer 5

Abbildung 4-5: Fahrereinteilung für eine Gruppe zu 5 Personen; an jedem der 3 Tage wird ein Streckenabschnitt bewertet

4. *Briefing der Fahrer*: Die Kriterien und deren Definition werden gemeinsam besprochen. Das hat den Zweck, unterschiedliche Auffassungen der Definitionen abzugleichen, damit alle Probanden dieselben Empfindungen den beschriebenen Kriterien zuordnen.
5. *Handout*: Jedem Team wird vor Antritt der Fahrt ein Handout übergeben. Darin befinden sich neben den fünf identen Fragebögen (für jedes Fahrzeug einer) unter

anderem auch die Fahrtstrecke für die Beurteilung, Abfahrtszeitpunkte und Treffpunkte für die Fahrzeugwechsel.

6. *Bewertungsfahrt:* Die Fahrer müssen während der Bewertung vier Mal das Fahrzeug wechseln. Damit während der Fahrpausen keine unnötigen Leerlaufzeiten und dadurch Möglichkeiten untereinander Informationen auszutauschen und die Fahrer sich somit gegenseitig nicht beeinflussen können, ist am Treffpunkt ein rascher Fahrerwechsel wichtig.
7. *Debrief:* Eine Nachbesprechung ist notwendig, um sich mit Unklarheiten, die während der Bewertungsfahrt entstanden sind, auseinanderzusetzen. Während der Fahrt festgehaltene Notizen am Fragebogen können später weder von der auswertenden Person noch von den Fahrern nachvollzogen werden und werden darum gleich nach der Fahrt besprochen. Nach dem Debrief ist der Fragebogen als gültig anzusehen und wird für die statistische Auswertung vorbereitet

## 5 Ablauf der objektiven Bewertung

Die Genauigkeit der subjektiven Aussagen im Bezug auf das gefühlte Niveau lässt sich nur durch objektive Messungen verifizieren. Dabei vergleicht man vordergründig, wie gut Probanden die, durch die Lenkung vermittelte physikalische Größe, bestimmen und zwischen den Fahrzeugen differenzieren können. Dabei müssen unterschiedliche Verhaltensgrößen vom Fahrzeug während wiederholbarer Fahrmanöver bestimmt werden. Die Reproduzierbarkeit der Manöver ist von großer Bedeutung, da nur so vergleichbare Kennwerte von allen Fahrzeugen erschlossen werden können. Ein bekanntes Hilfsmittel stellt hier der Lenkroboter (siehe Kapitel 5.1) dar. So lassen sich exakte Amplituden, Frequenzen, Lenkwinkel und Lenkwinkelgeschwindigkeiten vorgeben.

Auch im Falle der objektiven Erfassung der Fahrzeugeigenschaften ist das Abstrahieren wichtiger Größen aus der Vielzahl der objektiv messbaren Kennwerte für die hier geforderte Beschreibung des Lenkgefühls von großer Bedeutung. Diese Auswahl wird unter Hinzuziehen von Expertenmeinungen getroffen. Die Auswahl der objektiven Größen und deren Zuordnung zu den subjektiv zu bewertenden Kriterien beginnt im Zuge der Arbeit schon bei der Definition des Fragebogens, findet aber auch noch in einem späteren Arbeitsschritt in der Auswertung statt. Da das Abstimmen und Finden von Korrelationen ein Entwicklungsprozess ist, bei dem Zusammenhänge möglicherweise erst während laufender Korrelationsanalysen erkennbar werden. Direkt lässt sich etwa das gefühlte Lenkmoment mit der gemessenen Größe *Lenkradmoment* vergleichen. Indirekt kann zum Beispiel das gefühlte Verhalten von Über- und Untersteuern mit dem aus den Messgrößen errechneten Eigenlenkgradienten verglichen werden.

### 5.1 Messtechnik

Mit den Messgeräten werden alle relevanten Größen mit vorgegebener Genauigkeit und Abtastfrequenz gemessen und aufgezeichnet. Die gesamte Messtechnik ist über ein CAN-Bus-System Verbunden und sammelt alle Daten in einem Messrechner der direkt vom Fahrer bedient wird. Damit lassen sich sowohl Parameter für die Regeleingaben vorgeben als auch die Messungen starten und beenden. Um die erforderlichen Messwerte zu erhalten wird ein umfangreiches System an Messinstrumenten benötigt. Im folgenden Abschnitt werden alle verwendeten Sensoren, Aktuatoren und die messbaren Größen näher beschrieben.

*Messlenkrad*

Für die Erfassung vom Lenkwinkel, der Lenkgeschwindigkeit und dem Lenkmoment wird ein Messlenkrad vom Typ *CORRSYS Datron MSW/S* verwendet [20]. Die Winkelmessung erfolgt berührungslos über optische Sensoren mit einer Auflösung bis zu 7200 P/Umdrehung. Für die Momentenmessung wird ein DMS Messkörper verwendet wobei ein maximales Drehmoment von 50 Nm aufgezeichnet werden kann. Als Überlastschutz dienen mechanische Anschläge um auch bei Überschreitung der Messgrenzen und ein dadurch herbeigeführter Bruch ein sicheres Lenken zu gewährleisten. Die Elektronik zur Signalverstärkung ist im Lenkrad integriert. Die Signalausgabe erfolgt entweder über einen 14-Poligen Lemostecker oder einen 15-Poligen Sub-D-Stecker. Das Signal kann entweder analog ausgelesen werden oder, wie im vorliegenden Fall, digital über den zugehörigen MSW-Prozessor. Die Daten werden dann über ein CAN-Bus System an den Messrechner weitergeleitet. Der D/A-Konverter löst das Moment mit einer Abstufung bis zu 0,008 Nm auf. Der Winkel wird mit einer Genauigkeit von  $0,04^\circ$  und die Lenkgeschwindigkeit mit bis zu  $0,04^\circ/s$  gemessen wobei die maximal erfassbare Lenkgeschwindigkeit bei  $1000^\circ/s$  liegt. Die Abtastrate des Systems liegt bei maximal 250 Hz.

### *Sensor für Längs- und Quergeschwindigkeit*

Die genaue Messung der Fahrzeuggeschwindigkeit in x- und y-Richtung erfolgt durch den berührungslosen optischen Sensor von *CORRSYS Datron* vom Typ *Correvit S-400* [21]. Der Sensor löst den Weg mit 2,47 mm bei Geschwindigkeiten bis zu 250 km/h auf, wobei die Messgenauigkeit bei weniger als  $\pm 0,2\%$  des FSO (full-scale-offset) beträgt. Winkel werden mit einer Auflösung von  $\pm 0,1^\circ$  bis maximal  $40^\circ$  gemessen. Die Genauigkeit liegt hier bei  $\pm 0,2^\circ$ . Durch Anschluss eines Drehratensensors zur Erfassung der Gierrate kann direkt der Schwimmwinkel, bezogen auf den Fahrzeugschwerpunkt, berechnet werden. Auch bei diesem System liegt die Abtastfrequenz bei maximal 250 Hz und wird über den CAN-Bus beziehungsweise als analoges Signal an den Messrechner weitergeleitet.

### *Kreiselstabilisierte 3-Achs Messplattform*

Die Kreiselplattform iDIS-FMS der Firma *iMAR* dient zur Messung der sechs Bewegungsgrößen eines Fahrzeuges [22]. Möglich ist die Bestimmung der Wankrate um die x-Achse, der Nickrate um die y-Achse und der Gierrate um die z-Achse. Zusätzlich können in alle drei Richtungen die Beschleunigungen gemessen werden. Beim Einbau ist darauf zu achten, dass der Sensor horizontal steht und exakt in Fahrtrichtung zeigt. Der Einbau erfolgt anstelle des Beifahrersitzes. Die Signale werden von einem GPS-Empfänger gestützt der am Dach positioniert wird. Die Genauigkeit der Winkel beträgt  $0,05^\circ$  bei einer Auflösung von  $0,001^\circ$ , für die Drehraten  $0,001^\circ/s$  bei einem Messbereich von  $\pm 450^\circ/s$  und für die

Beschleunigungen  $0,001 g$  bei maximalen Stößen von  $60 g$ . Die Daten werden mit einer Abtastfrequenz bis maximal  $400 Hz$  über CAN an den Messrechner zur Aufzeichnung weitergeleitet.

### *Lenkroboter*

Für das exakte Lenken von reproduzierbaren Manövern wird der Lenkroboter *SR30* der Firma *ABDynamics* verwendet. Der Roboter besteht aus einem Gleichstrommotor der direkt anstelle des Lenkrads auf die Lenksäule montiert wird und einer autarken Energieversorgung die mit der Fahrzeugbatterie zwar verbunden ist, aber die während dem Betrieb des Elektromotors entstehenden Spannungsspitzen abfängt. Das bei der Aktuierung entstehende Stützmoment wird über ein Parallelogramm, welches mit zwei Druckmessdosen ausgestattet ist, in einen Träger geleitet, der zwischen Beifahrerfußraum und Windschutzscheibe geklemmt wird. Das maximale Moment das eingeleitet werden kann sind  $33 Nm$  bei einer Lenkwinkelgeschwindigkeit von  $850 \text{ }^\circ/s$ . Die maximale Lenkgeschwindigkeit liegt bei  $2350 \text{ }^\circ/s$ , dabei kann noch ein Drehmoment von  $7 Nm$  erreicht werden.

Der Vorteil bei der gesteuerten Lenkwinkleingabe ist die Möglichkeit, Amplituden und Frequenzen vorzugeben. So wird beispielweise beim Weave-Test eine Lenkfrequenz von  $0,2 Hz$  eingestellt. Dann wird während der Fahrt mit  $100 km/h$  die Amplitude genau auf jenen Wert gesetzt bei dem Querschleunigungen von  $2 m/s^2$  erreicht werden. Das führt zu erheblichen Vereinfachungen für den Testfahrer der sich dadurch nicht auf mehrere Parameter gleichzeitig konzentrieren muss. Die erhaltenen Messungen werden wesentlich genauer und führen dadurch zu besseren Ergebnissen.



Abbildung 5-1: Messaufbau für Fahrdynamikmessungen

1. Lenkroboter, Mast im Beifahrerraum fängt das Stützmoment ab
2. Steuereinheit für den Lenkroboter, Joystick für Eingriffe im aktuierten Betrieb
3. Kreiselplattform
4. Elektronik für Signalaufbereitung des optischen Sensors
5. Messrechner mit zusätzlichem externem Display, von hier werden Lenkrobotermanöver und Datenaufzeichnungen gestartet

Alle angeführten Messinstrumente sind über ein CAN-Bus-System mit einem Messrechner im Fahrzeug verbunden. Damit lassen sich die Aufzeichnungen aller Instrumente zeitgleich starten und beenden. Das dafür erforderliche Programm *DIADEM* dient sowohl zur Messung als auch Auswertung aller Messdaten. Der Lenkroboter wird vor der Messung mit den erforderlichen Werten parametrisiert. Werte die eine Nullsetzung erfordern, wie etwa die x-Richtung für den Kreisel oder die Geradeausstellung für den Lenkroboter lassen sich direkt im Fahrzeug über den Rechner kalibrieren.

### 5.1.1 Testbedingungen

Wie bei den subjektiven Bewertungen müssen auch die Vorgaben für die objektiven Tests eingehalten werden. Die Fahrbahn muss trocken und die Oberfläche soll gleichmäßig in ihrer Struktur sein. Werden Fahrzeuge verglichen, müssen die Manöver auf der gleichen Prüfstrecke beziehungsweise Streckenabschnitt stattfinden [23]. Die Fahrzeuge sind vor Beginn der Messreihe mit neuen beziehungsweise neuwertigen Reifen auszustatten wobei der Reifendruck den Herstellerangaben entsprechen muss. Auch bei der objektiven Messung ist, wie bei der subjektiven Bewertung, mittels Fahrwerksvermessung zu kontrollieren, ob die

Spur- und Sturzwerte korrekt eingestellt sind. Ist eine Korrektur erforderlich, ist diese auf dem Achsmessprüfstand durchzuführen.

Die Platzverhältnisse auf dem MSF-Testgelände erfordern Einschränkungen hinsichtlich der Durchführung der vorgeschriebenen Fahrzustände. Das Manöver *On-Center-Handling* ist nicht bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h sondern nur bei 50 km/h realisierbar. Das *Lenkungsziehen* wird für die vorliegende Arbeit nur mit 40 km/h und mit einer Lenkwinkelgeschwindigkeit von 20 m/s<sup>2</sup> durchgeführt. Die maximal erreichbare Querschleunigung liegt dabei bei etwa 7 m/s<sup>2</sup>. Beim *Sinus-Sweep* wird vorgeschrieben, die Lenkfrequenz während einer Messung kontinuierlich zu steigern. Für diese Arbeit wird von 0,1 Hz bis 4 Hz die Frequenz um 0,2 Hz schrittweise erhöht und jedesmal in einer eigenen Messung gespeichert. Für die Auswertung im Frequenz- und Phasendiagramm werden die Punkte einzeln aufgetragen und mit einem Spline verbunden.

### 5.1.2 Signalverarbeitung während der objektiven Messung

Die aufgenommenen Signale aller Messeinrichtungen werden im Fall dieser Arbeit digital über ein CAN-Bus System an den Messrechner weitergegeben. Mit einer Steckkarte der Firma *Vector* werden alle Daten an den Laptop über eine PCMCIA Schnittstelle gesendet. Die Visualisierung und gesamte Datenaufzeichnung während der Messung erfolgt über die Software *DIADEM*.



## 6 Auswertung

### 6.1 Auswertung der Fragebögen

Nach der Durchführung der Bewertung (beschrieben unter Kapitel 4.3) werden alle Fragebögen in eine elektronische Tabelle übertragen. Die Werte müssen dafür verlässlich der Meinung der Fahrer entsprechen und sollten keine Korrektur erfordern. Jeder Fahrer steht in einer eigenen Tabelle mit allen Kriterien und Fahrzeugen. *Niveau* und *Gefallen* werden nun jeweils in zwei getrennten Tabellen zusammengefasst welche die Basis für die gesamte folgende Auswertung darstellen. Bevor die Werte gegenübergestellt und analysiert werden müssen die Daten der Bewertung des *Gefallens* zuerst standardisiert werden.

#### 6.1.1 Standardisierung der subjektiven *Gefallen* Werte

Da die Probanden bei der Bewertung des *Niveaus* auf ein Fahrzeug referenzieren ist eine Transformation der Werte nicht erforderlich. Bei der Benotung des *Gefallens* gehen die Probanden absolut nach ihren Vorzügen vor, dadurch kann es dazu führen, dass eine Person vorzugsweise nur im „schlechteren“ Bereich (zum Beispiel Noten 4 bis 10) eine andere hingegen nur im „besseren“ Bereich (zum Beispiel Noten von 1 bis 7) Noten vergibt. Darum ist die Bewertung des *Gefallens* unbedingt zu Standardisieren. Durch die Transformation wird der Mittelwert der Messreihe auf Null gesetzt und die Standardabweichung wird eins. Um die Zielsetzung dieser Arbeit zu erreichen gilt es vorerst, bei der subjektiven Bewertung zwei Kongruenzen aufzuzeigen: erstens ist eine übereinstimmende Meinung der Fahrer für das vermittelte Niveau der physikalischen Größe notwendig, zweitens ist die Deckung der Meinung unter den Fahrern im *Gefallen* des sensierten Niveaus erforderlich. Erkennen bei einem Kriterium zum Beispiel alle Fahrer dasselbe auftretende Momentenniveau, sind sich jedoch nicht im *Gefallen* zu diesem Niveau einig, entfällt für dieses Kriterium eine weiterführende Analyse, da die Definition einer Kennlinie für die Lenkmomentunterstützung das Wissen über bevorzugte Niveaus erfordert.

Die Auswirkungen der Transformation sind in Abbildung 6-1 dargestellt. Dabei werden die Bewertungen von *Niveau* und *Gefallen* aller Fahrer und aller Fahrzeuge kriterienweise einer Korrelationsanalyse unterzogen. Die rot dargestellten Korrelationen ergeben sich aus der Untersuchung mit den originalen *Gefallen* Werten. Die blau dargestellten Kreise zeigen die Ergebnisse der Untersuchung mit den transformierten *Gefallen* Werten und fallen in den meisten Fällen durch eine Verbesserung der Korrelation auf.

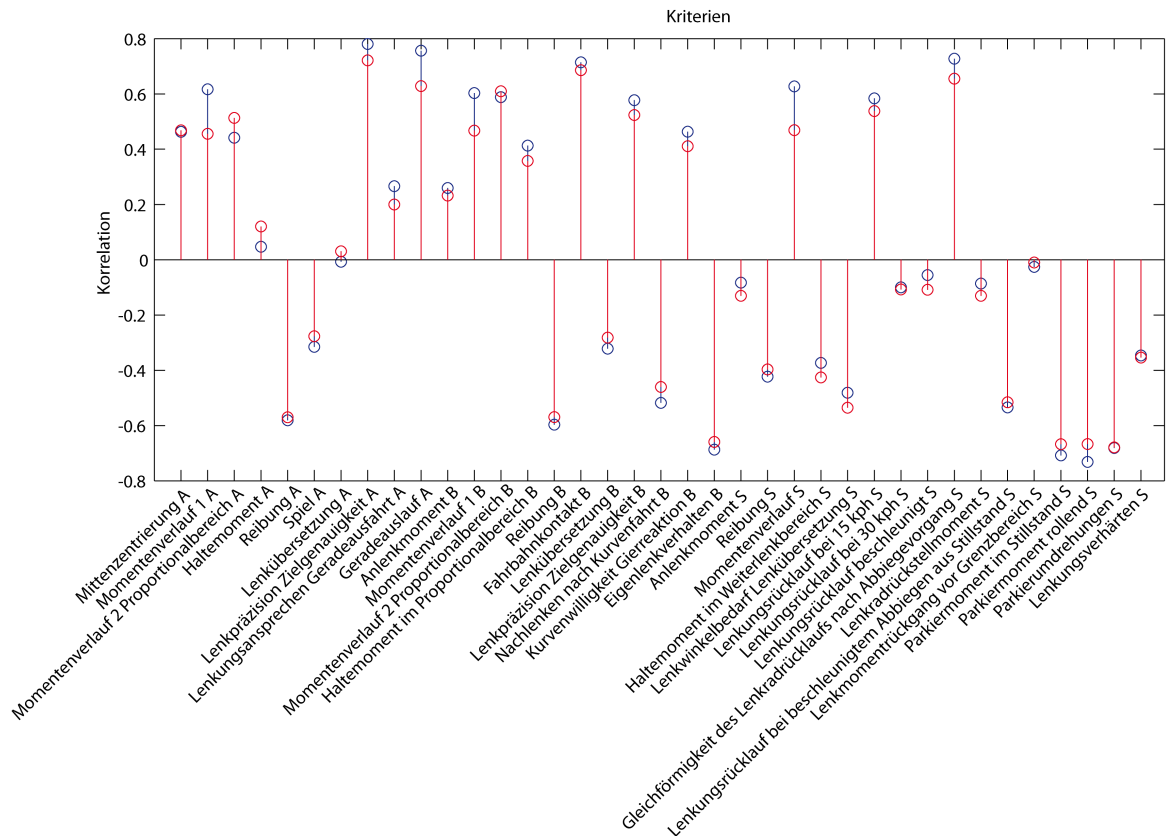


Abbildung 6-1: Korrelationen zwischen Niveau und Gefallen; mit originalen (rot) und standardisierten (blau) Gefallen Werten

Durch die Transformation werden die Urteile als Differenz zum individuellen Urteilsittelwert (Mittelwert ist nach der Transformation gleich null) ausgedrückt [17]. Für die Visualisierung der *Gefallen*-Werte ist eine Umcodierung sinnvoll. Im Unterschied zur verwendeten Bewertungsskala wird der Bestwert von 1 auf 10 gelegt. Damit wird ein „gutes“ Gefallen bei der graphischen Darstellung weiter „oben“ platziert. Am Fragebogen stellte der Wert eins den Bestwert dar, gleich dem Österreichischen Schulnotensystem. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird für die Verwendung der Daten des *Gefallens* immer von den standardisierten und umcodierten Werten ausgegangen.

### 6.1.2 Fahrerbezogene Korrelationsanalyse der subjektiven Bewertung

Die aufbereiteten Daten sind nun für die Korrelationsanalyse der Fahrer untereinander einsetzbar. Die Auswertung erfolgt mit dem Programm *MATLAB*. Die vorbereiteten Stichproben werden dafür in das Programmformat übertragen.

Der erste Schritt ist die Untersuchung, ob die Aussagen der Fahrer miteinander übereinstimmen. Die Fahrer werden mit D1 bis D15 anonymisiert und die Bewertung des *Niveaus* mittels multivariater Korrelationsanalyse gegenübergestellt (siehe Abbildung 6-2).

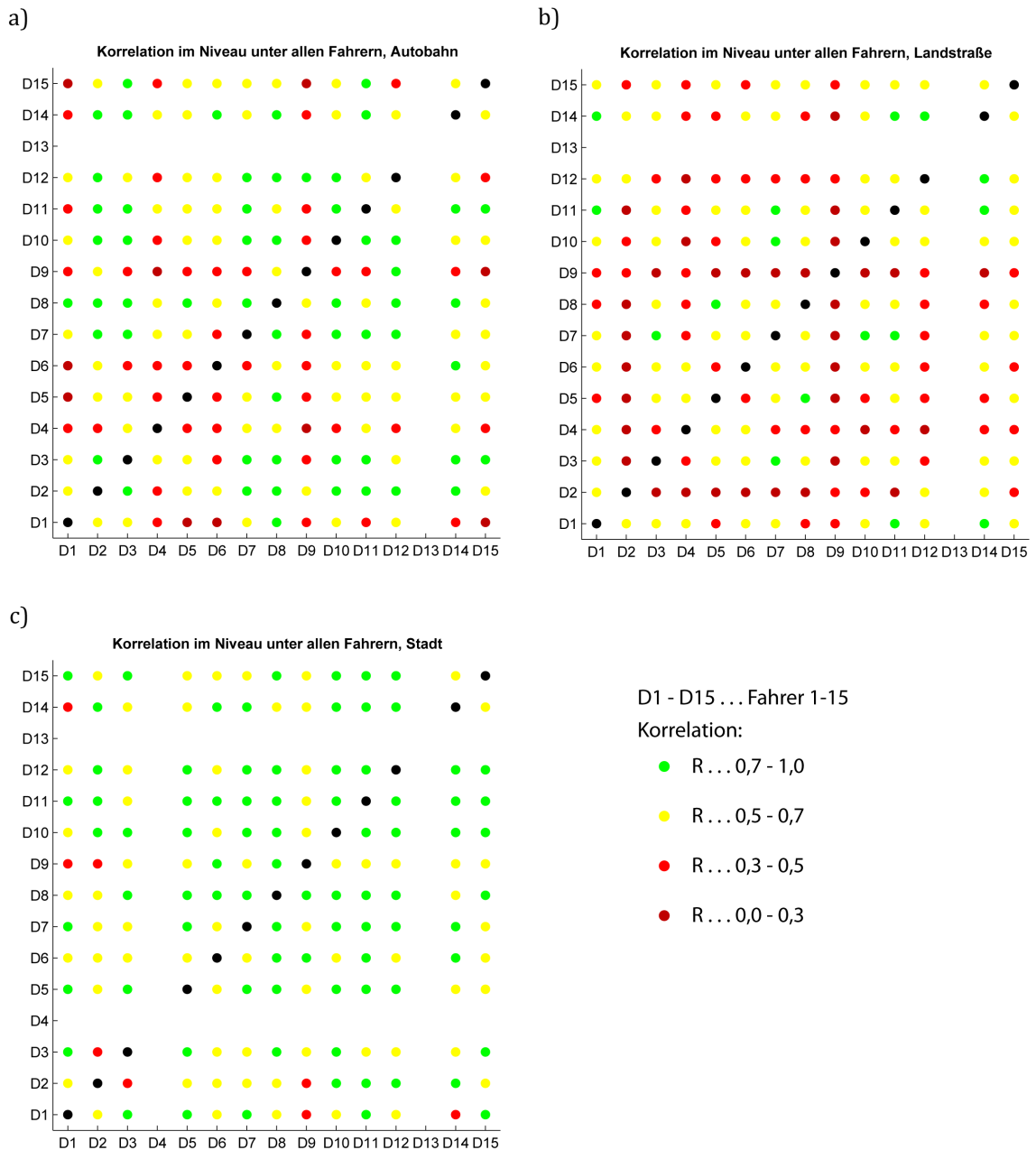


Abbildung 6-2: Korrelationsanalyse aller Fahrer untereinander in der Bewertung des Niveaus, getrennt nach den unterschiedlichen Streckenabschnitten a) Autobahn, b) Landstraße, c) Stadtgebiet

Bei dieser Untersuchung fällt auf, dass die Fahrer auf der Autobahn deutlich unterschiedlicheren Meinungen sind als auf dem Landstrassenabschnitt. Am besten korrelieren die Aussagen im Stadtgebiet. Die Fahrer können zusätzlich zum vorgegebenen Stadtkurs auf der MSF-Teststrecke das Kriterium beurteilen. Unter diesen „Laborbedingungen“ können sich die Probanden sehr gut auf die Kriterien konzentrieren und die physikalischen Charaktere genauer beurteilen. Fahrer D13, der sehr geringe Übereinstimmungen mit sämtlichen anderen Fahrern zeigt, wird aus der weiterführenden Analyse gestrichen um eine Verfälschung der Ergebnisse zu vermeiden.

### 6.1.3 Korrelationsanalyse zwischen Gefallen und Niveau

Bei einer Gegenüberstellung der Werte von *Niveau* und *Gefallen* können unterschiedliche Erwartungen erfüllt werden. Bei der Hypothese einer linearen Abhängigkeit erwartet man, dass, wie das Beispiel in Abbildung 6-3 zeigt, mit steigendem subjektivem *Niveau* (im Beispiel Lenkmoment) das persönliche *Gefallen* proportional abnimmt (negative Korrelation). Zeigt die Analyse eine hinreichend hohe Korrelation und zudem eine hohe Signifikanz, ist eine weitere Auswertung sinnvoll. Anderenfalls können die Fahrer entweder das *Niveau* nicht im selben Maß differenzieren oder auch das zugehörige *Gefallen* stimmt unter den Fahrern nicht überein, was eine Aussage über das jeweilige Kriterium schlussendlich unmöglich macht. Bis zu diesem Schritt in der Analyse ist noch keine Zuordnung von den subjektiven Bewertungen zu den objektiv gemessenen Niveaus durchgeführt worden. Die Sicherheit, dass die subjektive Niveau-Bewertung mit den tatsächlichen Werten übereinstimmt ist bei dieser Prüfung noch nicht gewährleistet.

Für die beispielhafte Abwicklung der gesamten Analyse wird von hier bis einschließlich Kapitel 6.3, das plakative Kriterium Nr. 34, Parkiermoment im Stillstand, herangezogen. Für den Abgleich mit objektiv gemessenen Daten dient das standardisierte, mit dem Lenkroboter durchgeführte Manöver *Lenkmoment im eingebremsten Fahrzeugstillstand*.

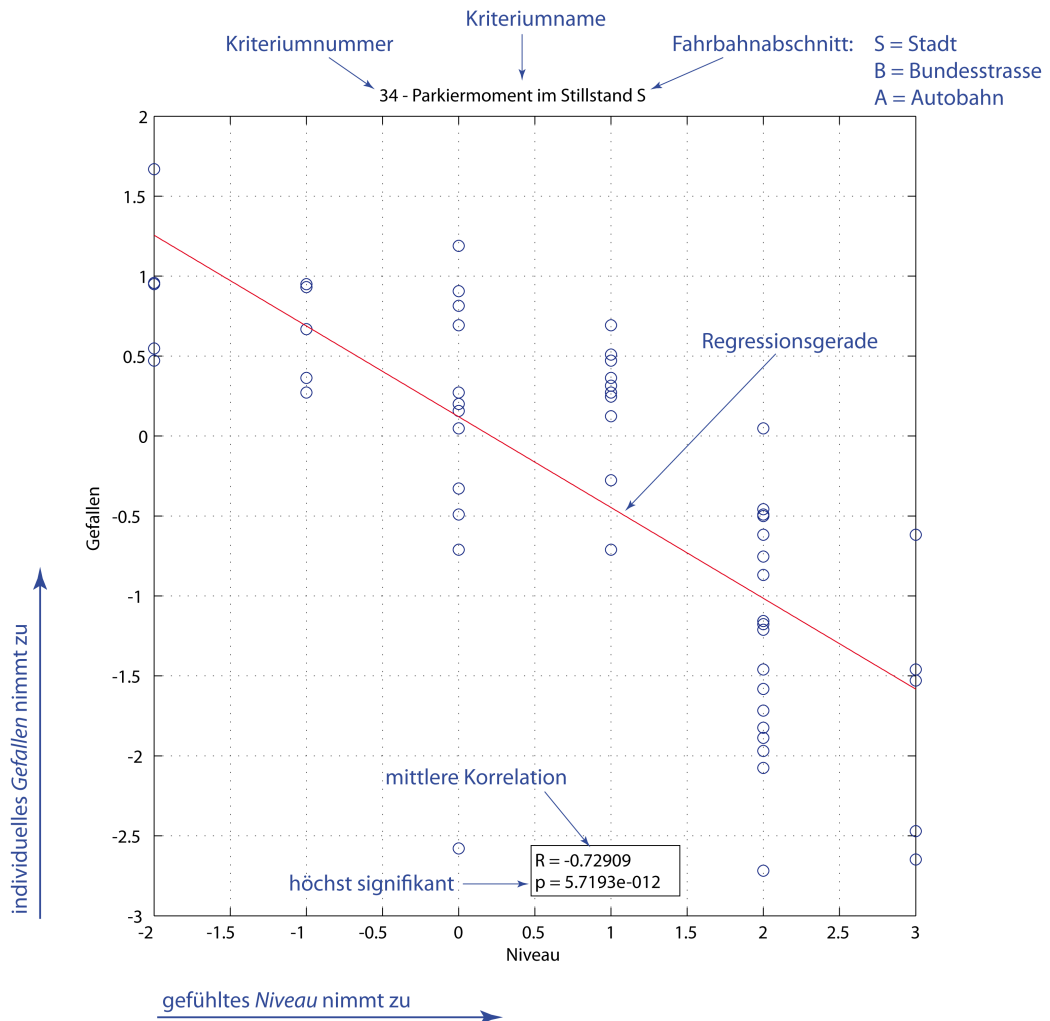


Abbildung 6-3: Korrelationsanalyse zwischen Niveau und Gefallen; dargestellt am Kriterium Nr. 34 – Parkiermoment im Stillstand

### 6.1.4 Verteilung, Streuung und Mittelwerte der Datensätze

Alle im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen Untersuchungen werden unter Vernachlässigung der bewerteten Fahrzeuge gemacht. Das bedeutet, dass sich die Fahrer einig sind, ein empfundenes „niedriges Niveau“ mit einem „guten Gefallen“ zu bewerten. Wobei diese Meinung von zwei unterschiedlichen Fahrern für zwei unterschiedliche Fahrzeuge getroffen werden kann. Ob bei der korrelierenden Meinung der Fahrer von *Niveau* und *Gefallen* die Probanden auch auf dasselbe Fahrzeug Bezug nehmen wird unter anderem in diesem Abschnitt anhand der Streuung in Abbildung 6-4 dargestellt.

Um solch statistisch relevante Kennwerte eines Datensatzes, wie beispielsweise die Streuung, visuell und übersichtlich wiederzugeben, eignet sich der Boxplot (Aufbau siehe Abbildung 6-4). Zur Darstellung wird wieder das Kriterium Nr. 34, Parkiermoment im Stillstand,

herangezogen. Abbildung 6-4 enthält, ausgehend von einem einzelnen Kriterium, folgende Informationen:

- Boxplots für das Niveau,
- den zugehörigen Mittelwert für das Niveau bei jedem Fahrzeug,
- Boxplots für das Gefallen,
- den zugehörigen Mittelwert für das Gefallen,
- alle Fahrzeuge nach den Mittelwerten der Niveaus ansteigend sortiert,
- die Kriteriumnummer und -bezeichnung und
- Bewertungsmerkmale für *Niveau* und *Gefallen* laut Fragebogen

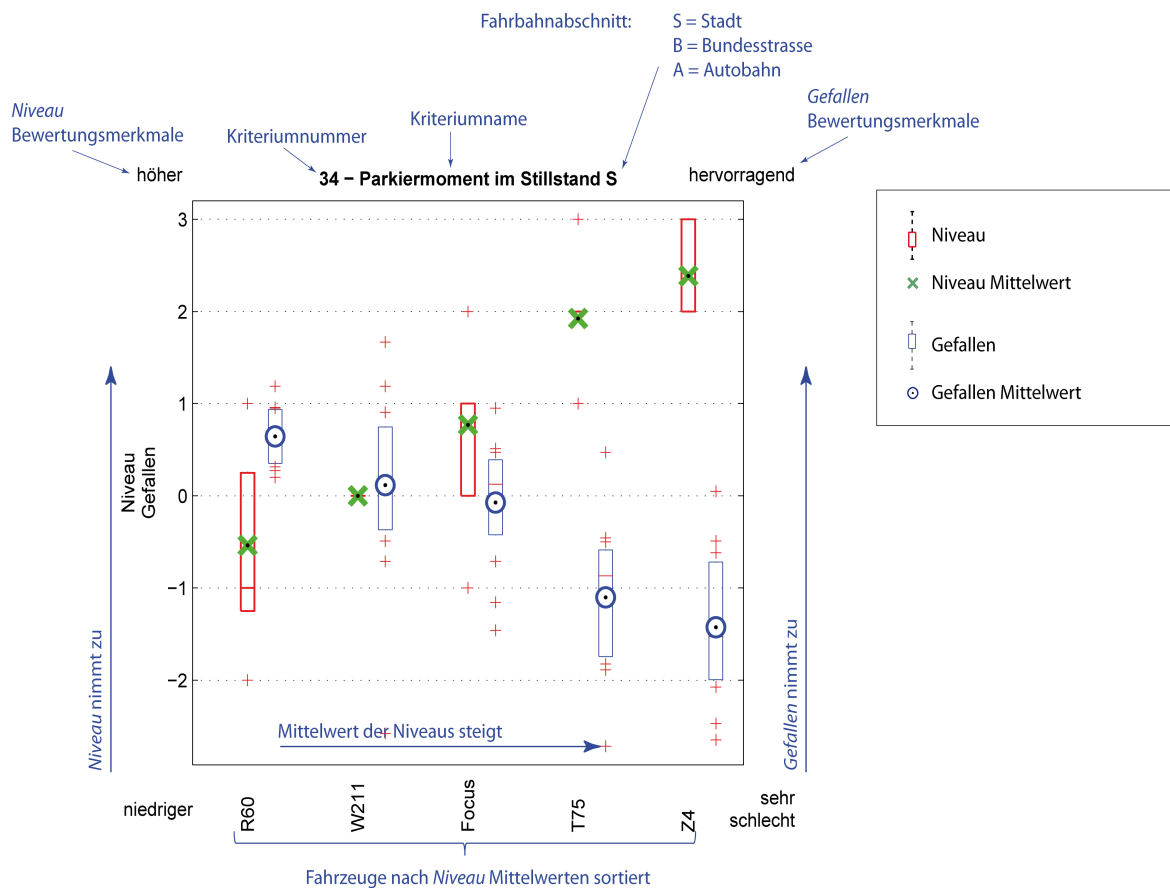


Abbildung 6-4: Boxplot für Niveau und Gefallen, dargestellt am Kriterium Nr. 34 – Parkiermoment im Stillstand

Abbildung 6-4 zeigt, dass zwar eine Streuung der Daten vorliegt, sich aber eine deutliche Tendenz ausbildet, sowohl im gefühlten *Niveau* als auch im *Gefallen* der Fahrer. Das Fahrzeug R60 (Mini) hat im Mittel das niedrigste Moment und vermittelt zugleich im Mittel das beste

*Gefallen* bei den Probanden, der Z4 (BMW) hingegen hat mit dem höchsten gefühlten Momentenniveau auch am schlechtesten gefallen.

Diese Varianzkorrelation ist die Vorbedingung für eine weitere Verfolgung eines Kriteriums. Dafür ist im nächsten Schritt eine Auswertung der objektiven Messdaten erforderlich.

## **6.2 Auswertung der objektiven Messfahrten**

Die Daten der objektiven Messungen stehen nach Durchführung der, unter Kapitel 3.3 aufgelisteten, standardisierten Manöver meist nur in ungefilterter, unbearbeiteter Rohfassung zur Verfügung. Bei der umfangreichen Vorbereitung der Daten mit der Software *DIADEM* (National Instruments) steht die Mittelung der Messwerte im Vordergrund. Diese ist erforderlich, da jedes einzelne Manöver bei den Versuchsfahrten mehrmals wiederholt werden muss um unerwartet auftretende Unregelmäßigkeiten während der Messung ausschließen zu können. So stehen für jedes einzelne Manöver mehrere Messreihen zur Mittelung zur Verfügung. Die gespeicherten Daten müssen dafür beschnitten und überlagert werden. Im aufbereiteten Zustand ist es nun möglich, Fahrzeug- beziehungsweise Lenkgrößen übersichtlich darzustellen. Dabei ist eine Gegenüberstellung der einzelnen Fahrzeuge in einem Diagramm hilfreich, um objektive Varianzen der Niveaus schnell abzulesen.

Es lässt sich als Beispiel das subjektiv bewertete Kriterium Nr. 34, Parkiermoment im Stillstand, und das objektive Manöver „*Parkiermoment im eingebremsten Fahrzeugstillstand*“ zum Vergleich heranziehen. In Abbildung 6-5 werden die Rohdaten der Messungen aller fünf Fahrzeuge dargestellt. Dabei erkennt man die Momentenspitzen bei ca.  $\pm 500^\circ$  Lenkwinkel wenn das Lenkrad gegen den mechanischen Anschlag fährt. Nach dem Filtern und dem Beschneiden der Daten im Bereich von  $\pm 300^\circ$  Lenkwinkel, lassen sich die Mittelwerte errechnen (siehe Abbildung 6-6). Die auftretende Welligkeit entsteht aus dem kardanischen Fehler der Kreuzgelenke in der Lenksäule.

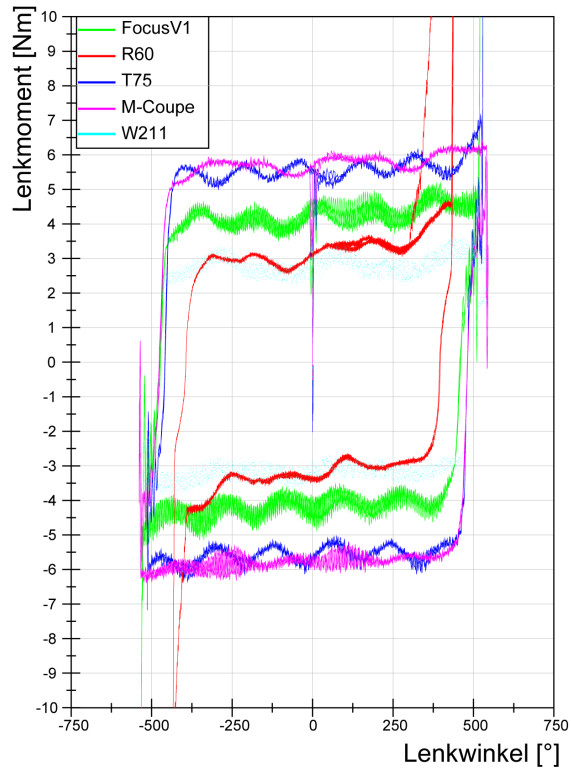


Abbildung 6-5: Messergebnis „Parkiermoment eingebremst“, Lenkmomente aufgetragen über dem Lenkradwinkel, Rohdaten

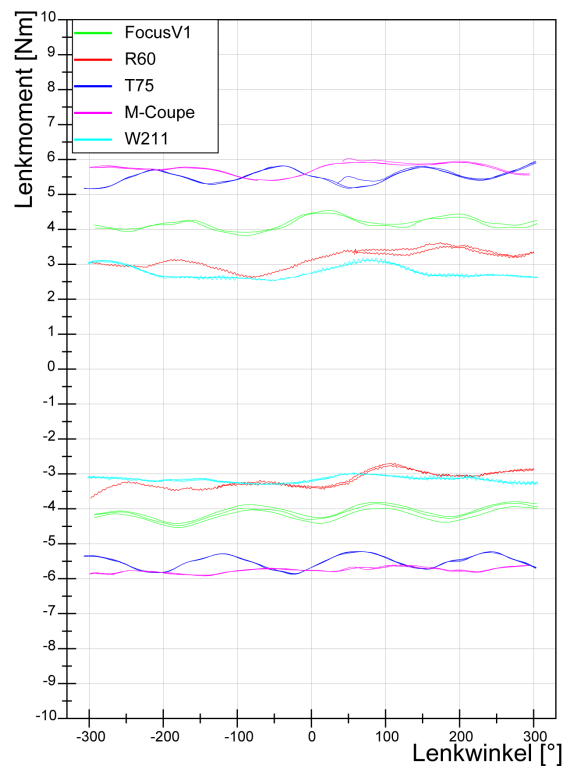


Abbildung 6-6: Messergebnis „Parkiermoment eingebremst“, Lenkmoment aufgetragen über dem Lenkradwinkel, Daten gefiltert und zugeschnitten



Die gefilterten und geglätteten Messwerte lassen eine Mittelwertbildung zu. Erst diese Werte lassen eine vergleichende Aussage zu und führen, abgeleitet aus Abbildung 6-5, zu folgendem Ergebnis:

- W211: 2,75 Nm
- T75: 5,55 Nm
- R60: 3,05 Nm
- Focus: 4,30 Nm
- Z4: 5,70 Nm

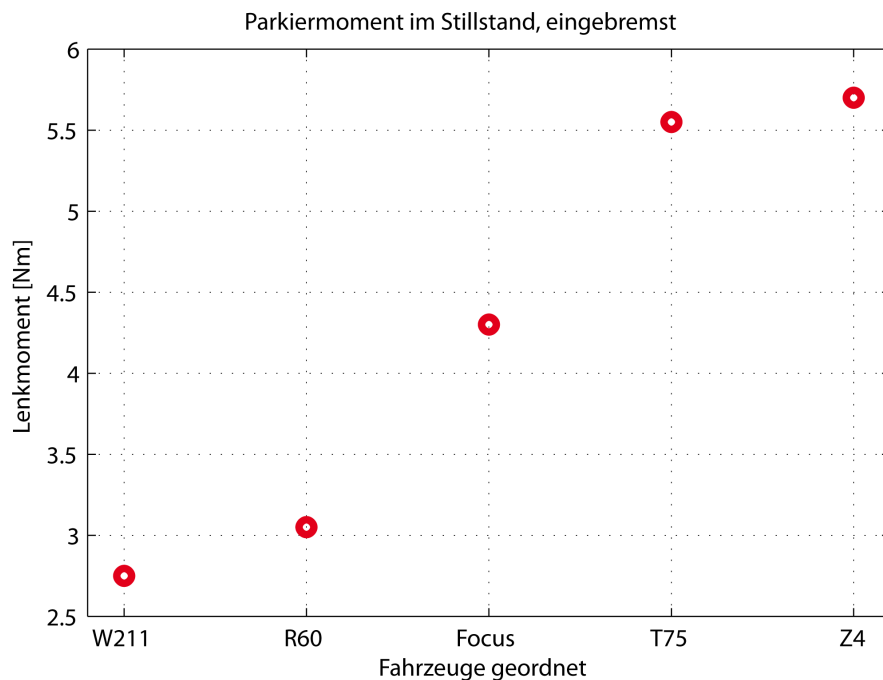


Abbildung 6-7: Objektive Messung „Parkiermoment im Stillstand, eingebremst“, geordnet nach ansteigendem Lenkmoment

In Abbildung 6-7 ist das gemessene mittlere Momentenniveau in ansteigender Reihenfolge sortiert und kann so direkt mit dem subjektiven Ergebnis verglichen werden.

### 6.3 Korrelation zwischen subjektiven und objektiven Daten

In Abbildung 6-8 sind die Ergebnisse von objektiver Messung und subjektiver Bewertung direkt gegenübergestellt, und man erkennt die vorliegende Übereinstimmung in der Reihung nach dem Niveau.

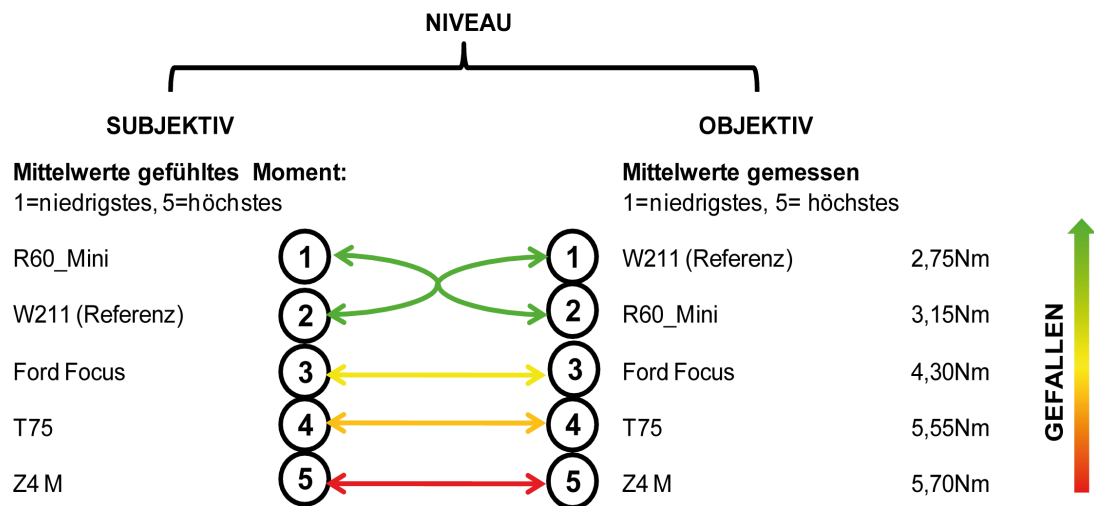


Abbildung 6-8: Ergebnis aus der Gegenüberstellung objektiv-subjektiv, Beispiel am Parkiermoment im Stillstand

Nur die Fahrzeuge R60 und W211 werden von den Probanden nicht exakt unterschieden. Das kann unter anderem an der Eigenschaft liegen, dass der R60 bei genauer Betrachtung des gemessenen Lenkmomentes einen leichten Anstieg von einem Anschlag zum Anderen aufweist. Stimmt die subjektive Differenzierung mit den gemessenen Niveaus überein, kann man bei der Auswertung einen weiteren Schritt gehen und das Gefallen der Probanden betrachten. Im oben gezeigten Beispiel empfindet der Fahrer ein zunehmend besseres Gefallen an einer Lenkung mit geringem Lenkmomentbedarf beim Einparken.

Für das Beispiel *Parkiermoment im Stillstand* lässt sich als Ergebnis zusammenfassen: der Fahrer bevorzugt beim Einparken eine Lenkung mit möglichst geringem Bedarf an Lenkmoment.

## 7 Ergebnisse

Folgender Abschnitt dient der Analyse der Zusammenhänge zwischen den subjektiven Bewertungen und den Ergebnissen aus der objektiven Messung. Nach eingehender Untersuchung und Absprache mit Experten sind jedem Kriterium ein oder mehrere Kennwerte aus der objektiven Messung zugewiesen, diese lassen sich in der Aufbereitung unter Kapitel 7.1 nachlesen. Die Untersuchung soll ergeben, ob sich Abhängigkeiten zwischen dem subjektiv Gefühlten und den objektiven Messungen darstellen lassen. Ist ein Kriterium nach Kapitel 6.1 in seinen statistischen Kennwerten als wertbar zu betrachten, sind unterschiedliche Vorgehen zur Korrelationsuntersuchung möglich. Harrer [15] verfolgt die Methode der Varianzanalyse (ANOVA), dabei werden alle Kriterien mit allen objektiv gemessenen Kennwerten verglichen. In dieser Arbeit erfolgt die Untersuchung nach ähnlichem Prinzip, wobei im Fall dieser Arbeit nicht jedes Kriterium jedem gemessenen Kennwert gegenübergestellt wird. Aus zeitsparenden Maßnahmen werden durch Expertenmeinung objektiv-subjektiv-Paare definiert die logisch nachvollziehbar sind und der umfassenden Analyse unterzogen werden.

Bei der Untersuchung ergeben sich sowohl bei den Messwerten als auch den subjektiven Ergebnissen Multikollinearitäten. Das bedeutet, dass mehrere erklärende Variablen stark miteinander korrelieren und dadurch zusammengefasst werden können. Am Beispiel des Haltemoments bedeutet das, dass beim Lenkwinkelsprung bei  $4 \text{ m/s}^2$  und  $6 \text{ m/s}^2$  das Lenkmoment in eingeschwungenem Zustand für beide objektiven Messungen, den sogenannten erklärenden Variablen, die Niveau-Abstufung durch die gleiche Fahrzeugreihenfolge beschrieben wird und somit auf ein objektives Bewertungsmaß reduziert werden kann.

### 7.1 Analyse und Schlussfolgerungen der Korrelationen

Auf Basis der bisher gestellten Überlegungen lassen sich zur besseren Übersicht drei Begriffe definieren, denen alle Kriterien in ihren repräsentativen physikalischen Eigenschaften untergeordnet werden können:

1. Lenkmoment
2. Lenkwinkleingabe und Fahrzeugreaktion
3. Verhalten im Stadtverkehr.

Der Gruppe *Lenkmoment* wird durch die Kriterien

- Mittenzentrierung,
- Momentenverlauf,
- Haltemoment,
- Haltemoment im Proportionalbereich,
- Anlenkmoment,
- Reibung,
- mechanisches Spiel,
- Fahrbahnkontakt und
- Lenkmomentrückgang vor dem Grenzbereich

gebildet.

Die Gruppe der *Lenkwinkleingabe und Fahrzeugreaktion* setzt sich aus den Kriterien

- Lenkübersetzung,
- Lenkpräzision und Zielgenauigkeit,
- Lenkungsansprechen,
- Geradeauslauf,
- Nachlenken nach Kurvenfahrt,
- Kurvenwilligkeit und
- Eigenlenkverhalten

zusammen.

Die Gruppe *Verhalten im Stadtverkehr* bildet sich aus den Kriterien

- Lenkungsrücklauf,
- Parkiermoment,
- Lenkradrückstellmoment und
- Lenkungsverhärten.

Im folgenden Kapitel sind die gefundenen Zusammenhänge in diesen Eigenschaftsgruppen angeführt. Bei der Suche nach Zusammenhängen, wo objektiv Gemessenes das subjektiv Erfasste abbilden soll, ist zu berücksichtigen, dass während der Bewertungsfahrten ständig haptische und emotionale Immissionen auf die Probanden wirken. Dadurch ist dem Autor ein gewisser Interpretationsspielraum für die nachfolgende Ergebnissuche gegeben.

### **7.1.1 Lenkmoment**

Unter dem Begriff „Lenkmoment“ lassen sich jene Kriterien zusammenfassen, welche die Lenkung in ihrem benötigten Kraftaufwand beschreiben. Hierzu zählen sowohl

Momentenverläufe als auch punktuell betrachtete Momente bei bestimmten Geschwindigkeiten und Querbeschleunigungen.

Die subjektive Bewertung der **Mittenzentrierung** auf der Autobahn kann durch die objektiven Eigenschaften des *On-Center-Handling-Tests* bei 100 km/h erfasst werden. Dafür wird der Kurvenverlauf vom Lenkmoment über dem Lenkwinkel betrachtet. Die Analyse befasst sich dabei mit dem Lenkmomentgradienten im Bereich von 0° bis 3° Lenkwinkel und dem Momentenniveau bei dem der Gradient bei zirka 3° Lenkwinkel abfällt. Je niedriger das Niveau beim Knick und flacher der Gradient, desto geringer ist die Lenksteifigkeit um die Mittenlage der Lenkung (siehe Abbildung 7-1). Betrachtet man parallel die Fahrerbewertung ist eine gute Korrelation (Abbildung 7-3a) und, abgesehen des R60, eine geringe Streuung der Daten erkennbar (siehe Abbildung 7-3b). Bei diesem Fahrzeug sind sich die Fahrer nicht einig wie stark die Mittenzentrierung in ihrem *Niveau* ausgebildet ist. Das gute Abschneiden des Charakters des T75 muss auch aus dem Diagramm Lenkmoment über Querbeschleunigung interpretiert werden. Zu dem steilen Momentenanstieg aus der Nulllage kommt zusätzlich das schon in sehr geringen Querbeschleunigungen anliegende hohe Lenkmoment. Dafür wird das Lenkmoment aufgetragen über der Querbeschleunigung analysiert (siehe Abbildung 7-2).

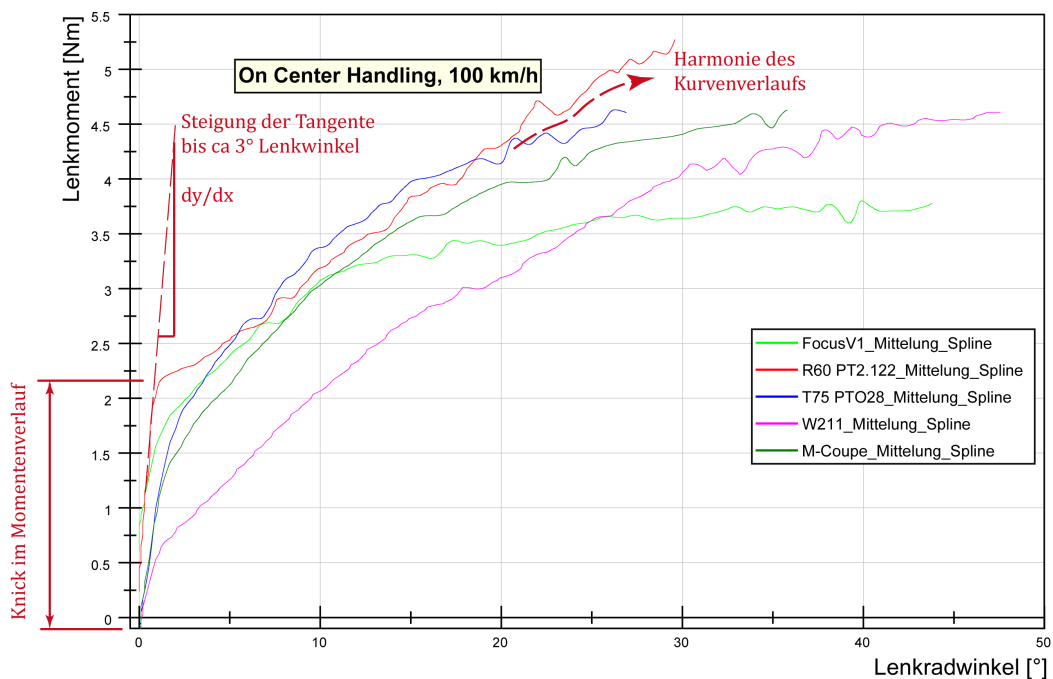


Abbildung 7-1: Betrachtete Bereiche aus dem Manöver *On-Center-Handling*; Lenkmoment aufgetragen über dem Lenkradwinkel

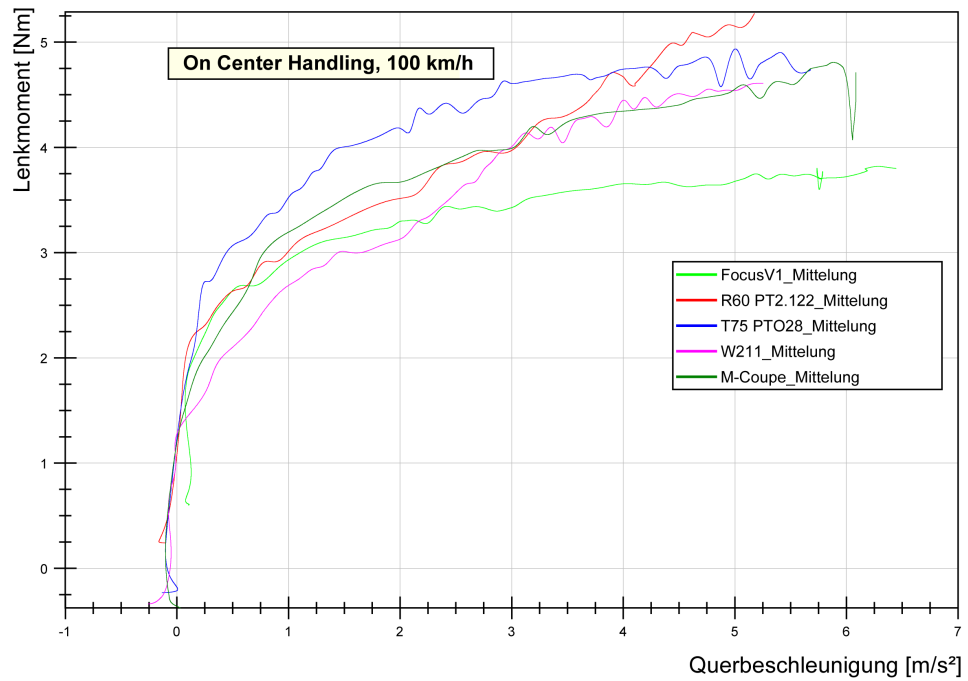


Abbildung 7-3: On-Center-Handling; Lenkmoment aufgetragen über der Querbeschleunigung

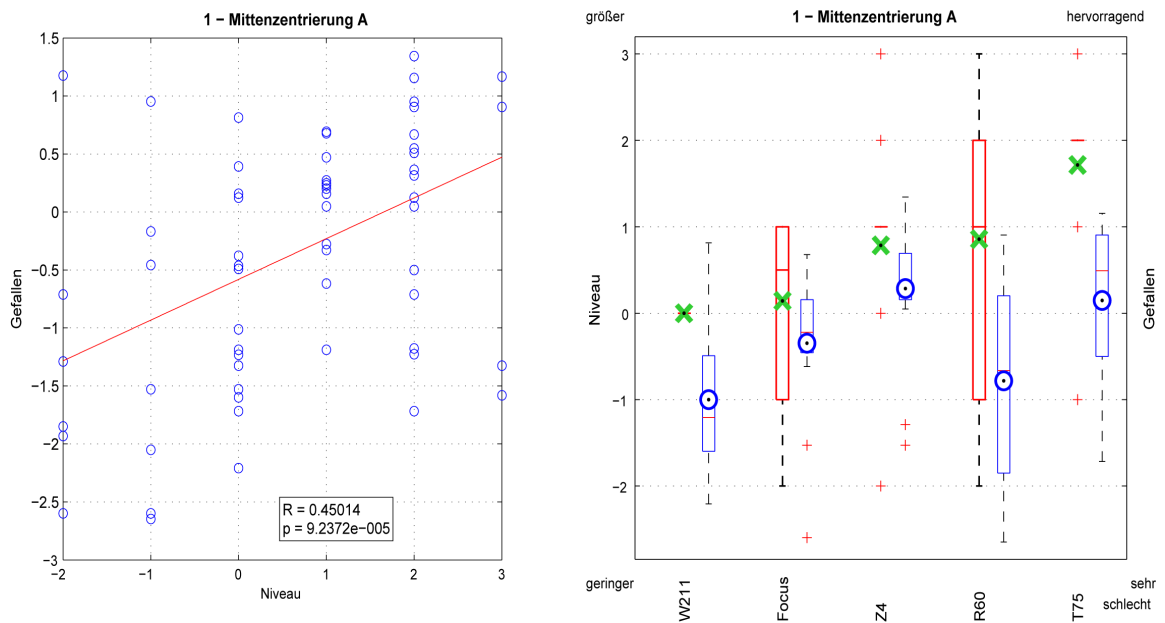


Abbildung 7-2: Statistische Auswertung von Kriterium Nr. 1, Mittenzentrierung

- a) Korrelationsanalyse zwischen Niveau und Gefallen.
- b) Statistische Verteilung und Mittelwerte von Niveau(rot/grün) und Gefallen(blau/blau), geordnet nach ansteigendem Niveaumittelwert.

Die Kriterien 2 und 3 auf dem Autobahnabschnitt, 12 und 13 auf der Landstraße und 24 in der Stadt beschreiben den **Momentenverlauf** ab dem Mittenbereich bis hin zum Proportionalbereich. Subjektiv herrscht nur auf der Autobahn deutliche Korrelation unter den Fahrern für diese Kriterien mit einem Korrelationskoeffizient von 0,5. Um Zusammenhänge zu den Messungen herzustellen eignet sich erneut die Auswertung des *On-Center-Handling* Manövers. Hier lässt sich der Lenkmomentenverlauf über dem Lenkwinkel als auch über der Querbeschleunigung ab der Mittellage wie bei der vorhergehenden Untersuchung darstellen (siehe Abbildung 7-1 und Abbildung 7-2). Eine direkte Korrelation zwischen subjektiven und objektiven Daten lässt sich jedoch nicht so einfach finden, da die Bewertung, ob der gemessene Momentenverlauf harmonisch oder unharmonisch verläuft, dem Betrachter obliegt und wieder mit einem subjektiven Einfluss behaftet ist. Auch hat eine Auswertung der ersten Ableitung des gemessenen Momentenverlaufs keine genaueren Rückschlüsse zugelassen.

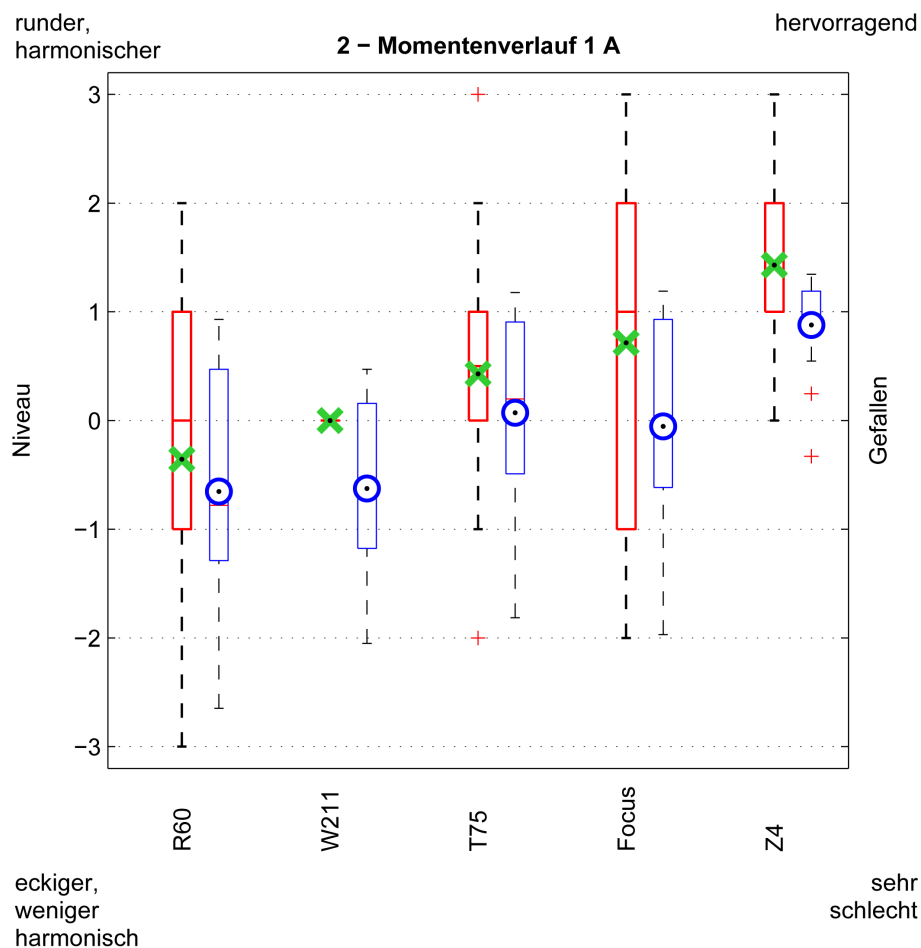


Abbildung 7-4: Statistische Auswertung von Kriterium Nr. 2, Momentenverlauf - Autobahn, Verteilung und Mittelwerte von Niveau und Gefallen, geordnet nach ansteigendem Niveaumittelwert.

Bei der Bewertung des **Haltemoments** streuen die Probanden stark in ihrer Bewertung, nur der Focus mit dem niedrigsten und der T75 mit dem höchsten gemessenen Moment werden

differenziert. Interessant ist, dass die drei Fahrzeuge dazwischen alle ein sehr ähnliches Moment aufweisen. Ob die subjektive Streuung durch unterschiedliche Positionen zum Lenkrad oder etwa unterschiedliche Fahrergrößen hervorgerufen wird ist schwer abzuschätzen, kann aber durchaus Einfluss auf das Ergebnis haben. Verglichen werden die subjektiven Ergebnisse mit dem Lenkmoment aus dem Lenkwinkelsprung, wobei der stationäre, eingeschwungene Zustand eine Sekunde nach  $t_0$  ( $t_0 = 50\%$  vom maximalen Lenkwinkel) betrachtet wird.

Im Gegensatz dazu wird das **Haltemoment im Proportionalbereich** bei der Landstraßenfahrt sehr gut detektiert. Der Vergleich mit dem Lenkwinkelsprung und dem folgenden eingeschwungenem Haltemoment bei Querschleunigungen von  $4\text{ m/s}^2$  zeigt eine sehr gute Korrelation mit dem gefühlten Niveau der Probanden. Der Focus wird mit seinem am niedrigsten gemessenen Lenkmoment von  $3,4\text{ Nm}$  auch von den Probanden als das Fahrzeug mit dem geringsten Momentenniveau empfunden. Der Z4 liegt mit gemessenen  $3,6\text{ Nm}$  in der Mitte des Fahrzeugfeldes und wird von den Probanden eventuell wegen der sehr niedrigen Sitzposition und dem verbauten Schalensitz als Fahrzeug mit dem höchsten Niveau bewertet. Der hohe Lenkwinkelbedarf bei der selektiven Strecke kombiniert mit der beschränkten Bewegungsfreiheit kann bei den Fahrern durchaus zu dem vermittelten hohen Niveau führen.

Die Kraft, die beim Anlenken einer Kurve im ersten Moment spürbar ist, wird mit dem **Anlenkmoment** bewertet. Das Kriterium wird vor allem bei der Landstraßenfahrt übereinstimmend bewertet. Die Regression verläuft schwach steigend und korreliert sehr gut mit dem gemessenen Lenkmomentanstieg, ermittelt aus dem *Weave-Test*. Der hohe Lenkmomentanstieg von  $0,43\text{ Nm/}^\circ$  beim T75 gefällt den Fahrern am besten. Der noch höhere gemessene Wert von  $0,51\text{ Nm/}^\circ$  beim R60 ist zurückzuführen auf die geringe Lenkübersetzung die bei diesem Kennwert direkt proportional einfließt und dadurch bei den Probanden ein geringeres Gefallen bewirkt.

Eine Eigenschaft, die über den gesamten Lenkeinschlag Einfluss hat, ist die mechanische **Reibung** im Lenksystem. Als Blackbox betrachtet, fließen hier gleichermaßen Lagerreibungen in der Lenksäule, Reibung im Lenkgetriebe und Reibung im Latsch zwischen Reifen und Fahrbahn in die Beurteilung ein. Die Fahrer untereinander weisen sowohl gute Korrelationen als auch eine hohe Signifikanz in der Bewertung auf. Die Probanden sprechen beim Feedback durchwegs von der Schwierigkeit, die physikalische Eigenschaft an sich zu detektieren. Die Lenkung des Z4 vermittelt den Fahrern die geringste Reibung die dabei am besten gefällt. Bei Betrachtung der OCH Auswertung zeigt sich, dass der Momentenknicke bei  $3^\circ$  Lenkwinkel schon bei sehr niedrigem Niveau anliegt (siehe Abbildung 7-1).



Das Kriterium **mechanisches Spiel** zeigt unter den Fahrern Korrelationen auf, die jedoch mit keinem objektiven Parameter vergleichbar sind. Die Erfassung der Eigenschaften um die Mittellage der Lenkung erfordert eine weitere genau abgestimmte Messung im definierten Bereich um die Nulllage, der mit den bisherigen Messergebnissen nicht abgedeckt ist. Durch die Aktualität der verwendeten Fahrzeuge ist ein mechanisches Spiel nicht zu erwarten, jedoch kann ein Bereich, in dem keine Kraft spürbar ist, in diesem Fall durch Elastizitäten, wie beispielsweise das Verdrehen des Torsionsstabes im Lenkmomentsensor für die Lenkunterstützung, verursacht werden.

Das Kriterium **Fahrbahnkontakt** beschreibt auf der Landstraße bei Geschwindigkeiten bis 100 km/h den vermittelten Eindruck von Fahrbahn und Fahrzustand. Dabei spielen insbesondere unterschiedliche Fahrbahnoberflächen wie deren Struktur, Unebenheiten, Nässe oder Schotter eine Rolle. Die Einflussgrößen von Achskinematik, Lenkungscharakteristik, Elastokinematik oder Antriebskonzept sind bei der Bewertung durch die Probanden ausser Acht zu lassen. Dieses Kriterium erweist sich in der Benotung als schwierig. In der Feedbackrunde stellt sich heraus, dass die Definition unterschiedlich verstanden wurde und daraus resultiert auch die große Streuung der Werte. Auch die Suche nach plausiblen objektiven Vergleichswerten bringt keine ausreichenden Ergebnisse um dieses Kriterium weiter zu verfolgen.

Einen ähnlichen Fall stellt das Kriterium Nummer 33, **Lenkmomentrückgang vor dem Grenzbereich**, dar. Dabei sollen die Probanden den Rückgang der Lenkkraft kurz vor dem Grenzbereich erfahren. Den Fahrern steht dafür eine Kreisfahrbahn mit 50 m Radius auf der MSF Teststrecke zur Verfügung. Objektiv aus der *stationären Kreisfahrt* ermittelt, weist der T75 den geringsten und der R60 den meisten Rückgang auf. Die Probanden streuen sowohl im Bewerten des *Gefallens* als auch des *Niveaus*. Erst bei der Auswertung stellt sich heraus, dass die Definition des Kriteriums sehr komplex formuliert ist und dadurch zu dieser ambivalenten Antwort führt.

### 7.1.2 Lenkwinkleingabe und Fahrzeugreaktion

Dienen die oben angeführten Kriterien zur Abbildung des Lenkmoments sind die im Folgenden beschriebenen Kriterien zur Erfassung des Gesamtfahrzeugverhaltens dienlich. Die Probanden bewerten dafür die Beziehung zwischen Lenkwinkleingabe und der daraus resultierenden Gesamtfahrzeugreaktion. Dabei haben physikalische Größen wie Gewicht und Federsteifigkeiten maßgeblichen Einfluss auf trägheitsbedingte Bewegungsabläufe. Auch geometrische Verhältnisse wie Radstand, Lenkübersetzungsverhältnis oder Schwerpunktlage wirken sich unterschiedlich auf die Aufbaureaktion aus. Jeder Hersteller prägt seine individuellen Fahrzeugklassen und -typen mit einem Charakter. Es liegt an der Präferenz

eines Autofahrers welche Art, ob sportlich oder komfortabel, von Fahrzeug er bevorzugt. Diese Voreingenommenheit muss jeder Proband vollständig ablegen und das Fahrzeug als Blackbox betrachten, nur dann lässt die Bewertung des *Gefallens* und des *Niveaus* Rückschlüsse auf gemessene objektive Größen zu.

Auf allen Streckenabschnitten wird von den Probanden die **Lenkübersetzung** der Fahrzeuge bewertet (Kriterien 7, 17, 26). Dabei soll das vermittelte Gefühl für die Fahrtrichtungsänderung betrachtet werden. Subjektiv ergibt die Gegenüberstellung von *Niveau* und *Gefallen* eine Regression mit dem Verlauf eines Polynoms 2. Ordnung mit negativem Tangentenanstieg. Die Fahrer detektieren die Abstufungen der Übersetzungen richtig (siehe Abbildung 7-5a, Streckenabschnitt Autobahn und Abbildung 7-5b, Streckenabschnitt Landstraße). Der R60 wird mit der kleinsten Übersetzung von  $i = 14$  als unangenehm eingestuft, auch der W211 mit der größten Übersetzung von  $i = 19$  findet bei den Fahrern keine Zustimmung. Alle anderen Fahrzeuge liegen mit einer Übersetzung von  $i = 16$  dazwischen und werden in dieser Fahrzeugauswahl am besten bewertet. Dieses Ergebnis spiegelt sich sowohl auf der Autobahn als auch auf der Landstraße wieder. In der Stadt hingegen bevorzugen die Fahrer die niedrige Übersetzung des R60 (siehe Abbildung 7-5c). Beim Abbiegen und Einparken ist ein geringer Lenkwinkelbedarf erwünscht und verbessert das Handling bei Geschwindigkeiten bis  $50 \text{ km/h}$ .

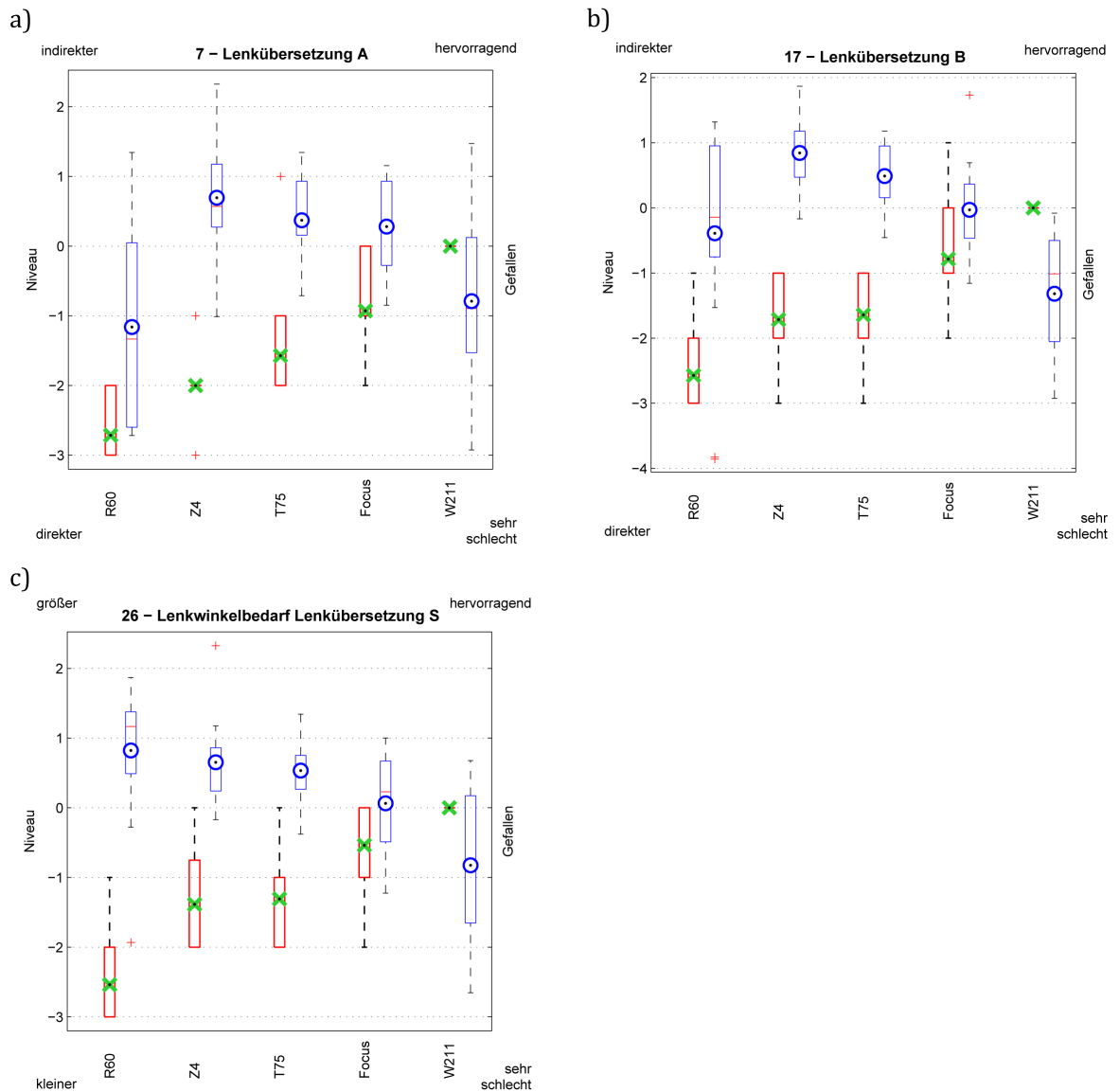


Abbildung 7-5: Darstellung der statistischen Verteilung für die Bewertung der Lenkübersetzung von Niveau und Gefallen.

- a) Autobahn.
- b) Landstraße.
- c) Stadt.

Die **Lenkpräzision und Zielgenauigkeit** (Kriterien 8 und 18) sind für den Autobahn- und den Landstraßenabschnitt ähnlich definiert. Auf beiden Strecken ist zu bewerten, ob das Fahrzeug aus der Geradeausfahrt in die gewünschte Kursvorgabe „trifft“ oder ob unerwünschte Korrekturlenkungen vorgenommen werden müssen. Die subjektive Auswertung zeigt für den Autobahnabschnitt eine sehr gute Korrelation mit  $R=0,793$ . Die Fahrer sind sich bei allen Fahrzeugen einig, nur der R60 weist eine hohe Streuung in *Gefallen* und *Niveau* auf (siehe Abbildung 7-6b).

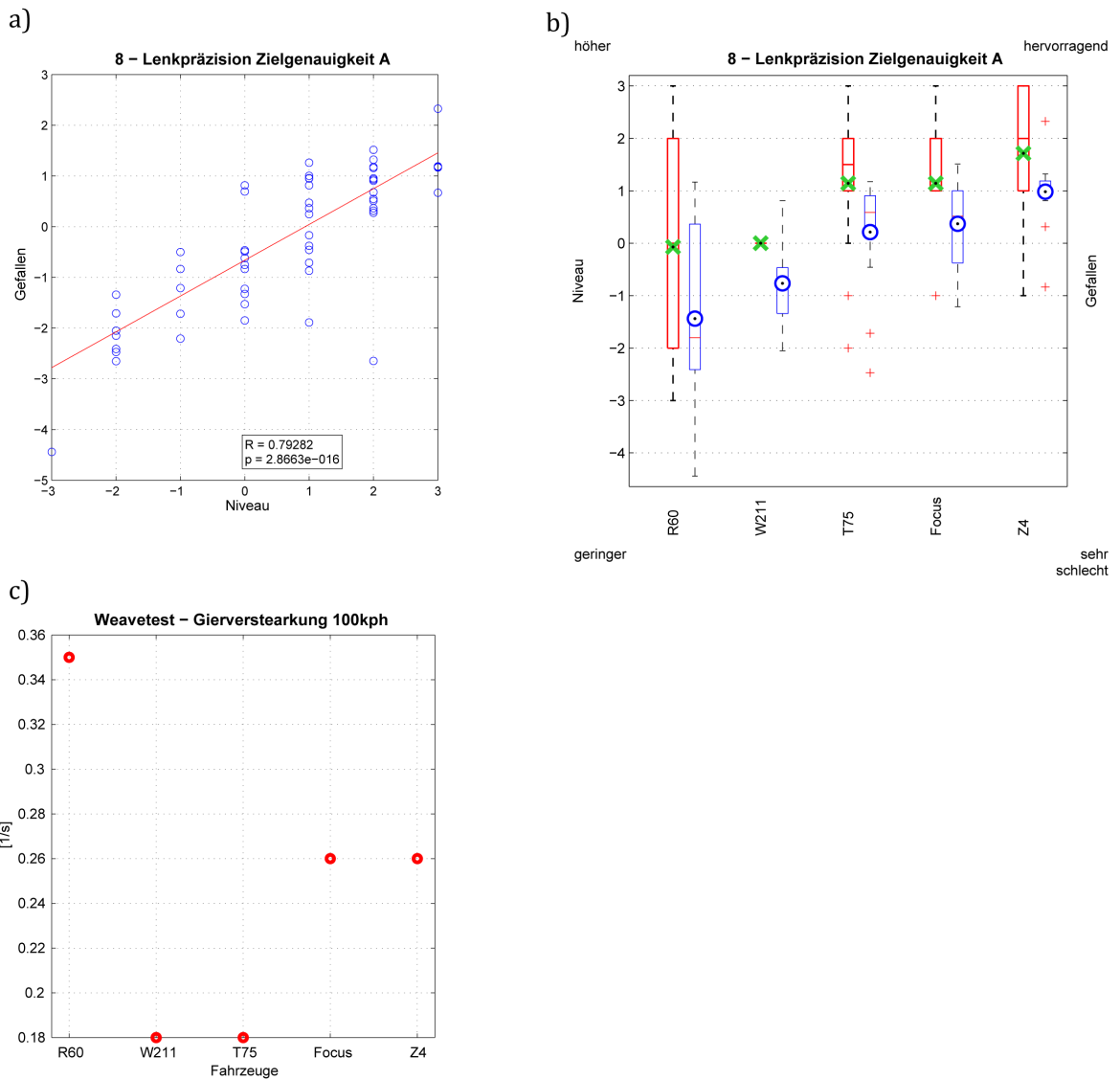


Abbildung 7-6: Statistische Auswertung von Kriterium Nr. 8, Lenkpräzision - Zielgenauigkeit

- a) Korrelationsanalyse zwischen Niveau und Gefallen.
- b) Statistische Verteilung und Mittelwerte von Niveau und Gefallen, geordnet nach ansteigendem Niveaumittelwert.
- c) Stationäre Gierverstärkung aus dem Manöver Weave-Test, geordnet nach den Ergebnissen aus b).

Eventuell ist darauf zurückzuschließen, dass durch die geringe Lenkübersetzung das Fahrzeug für eine gewünschte Kursänderung weniger Lenkwinkel benötigt als dem Fahrer vertraut ist und es dadurch zu einer unerwarteten Überreaktion des Fahrzeugs kommt. Bei der Untersuchung mit den objektiven Daten ist eine Korrelation mit der Gierverstärkung bei 100 km/h aus dem Weave-Test erkennbar (siehe Abbildung 7-6c). Bei Vernachlässigung des R60 ist die Aussage zulässig, dass unter den betrachteten Fahrzeugen bei einer Geschwindigkeit von zirka 130 km/h eine Gierverstärkung von ca. 0,25 °/s/° erwünscht ist. Auf der Landstraße besteht durchaus eine Korrelation unter den Probanden,

Fahrzeugspezifisch herrscht jedoch eine große Streuung und somit ist dieses Kriterium nicht weiter zu analysieren.

Fahrzeuge sprechen bei hohen Geschwindigkeiten schon auf sehr kleine Lenkradeinschläge an. Diese Charakteristik ist wichtig für die Spurhaltung bei der Geradeausfahrt und wird von den Probanden durch das Kriterium **Lenkungsansprechen** bei der Autobahnfahrt evaluiert. Die Regression des *Gefallens* dargestellt über dem *Niveau* lässt sich durch ein Polynom 2. Ordnung beschreiben (siehe Abbildung 7-7). Die Probanden erkennen den W211 als das Fahrzeug mit dem geringsten Lenkungsansprechen, das heißt mit der größten Verzögerung nach der Lenkwinkleingabe. Dieses Verhalten findet dabei auch die geringste Zustimmung im Gefallen. Je kürzer die Verzögerung der Fahrzeugreaktion auf die Probanden wirkt, desto besser ist auch die Bewertung im Gefallen, bis zu einem Maximum. Der R60 nimmt im Gefallen trotz steigendem Niveau wieder ab, die Probanden empfinden seine Fahrzeugreaktion als zu schnell. Bei der Gegenüberstellung mit objektiven Messwerten kristallisiert sich eine hohe Korrelation mit der Peak-Response-Time aus dem *Lenkwinkelsprung* bei  $2 \text{ m/s}^2$  Querbewegung heraus. Nur die gemessene Reaktionszeit des R60 widerspricht der Beurteilung der Fahrer, was sich aber wieder aus der geringen Lenkübersetzung ableiten lässt. Zusammenfassend lässt sich für diese Charakteristik sagen, dass bei einer Lenkübersetzung von  $i = 16$  eine PRT von  $0,2 \text{ s}$  (für LWS bei  $2 \text{ m/s}^2$ ) erstrebenswert ist.

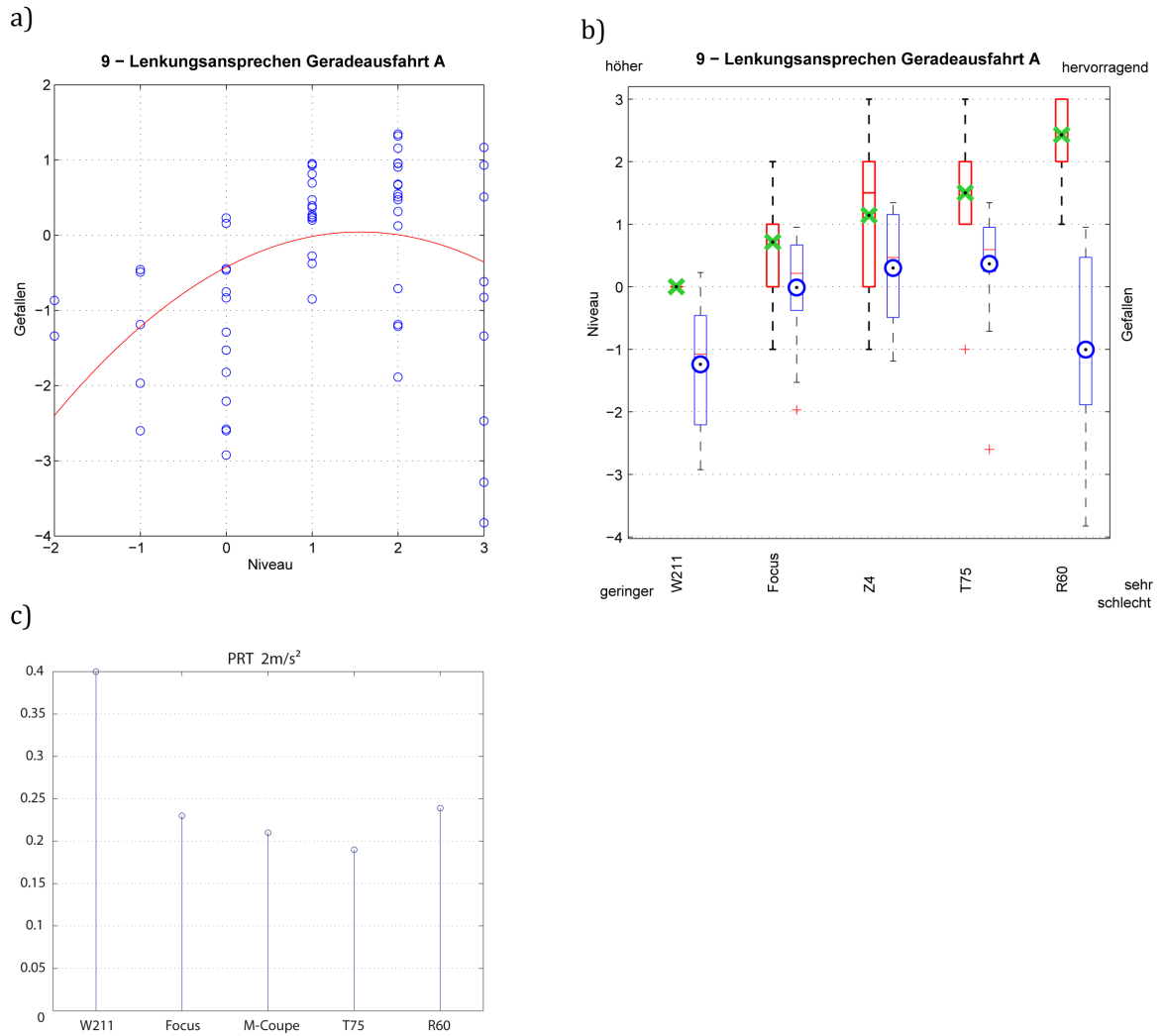


Abbildung 7-7: Auswertung von Kriterium Nr. 9, Lenkungsansprechen – Geradeausfahrt  
 a) Korrelation zwischen Niveau und Gefallen, Regression mit Polynom 2. Ordnung  
 b) Statistische Verteilung und Mittelwerte von Niveau und Gefallen, geordnet nach ansteigendem Niveaumittelwert.  
 c) Peak-Response-Time aus Lenkwinkelsprung bei 2 m/s<sup>2</sup>, geordnet nach den Ergebnissen aus b)

Ob das Fahrzeug bei hohen Geschwindigkeiten ohne Lenkwinkelmodifikation seiner Sollkursgeraden folgt, wird durch das Kriterium 10, **Geradeauslauf**, beurteilt. Bei der statistischen Auswertung kann keine Korrelation ermittelt werden. Da die Bewertung der Probanden stark streut ist keine Varianz erkennbar.

Auf der Landstraße wird bei Geschwindigkeiten bis 100 km/h durch drei weitere Kriterien das Gieren der Fahrzeuge Betrachtet. Der Einschwingvorgang bei Kurvenausgang in die Geradeausfahrt wird mit dem Kriterium **Nachlenken nach Kurvenfahrt** beschrieben. Die Probanden berücksichtigen dabei den Korrekturbedarf der für das Erreichen der Geradeausfahrt erforderlich ist, der erforderliche Eingriff ist dabei maßgeblich von der Elastokinematik der Vorder- und Hinterachse abhängig. Die Korrelationsanalyse lässt hier keine Folgerungen zu, da die Fahrer das *Niveau* nicht differenzieren, nur das *Gefallen* weißt

eine deutliche Varianz auf. Z4 und T75 gefallen am besten, der R60 am schlechtesten. Um das Gierverhalten auch bei Kurveneingang zu bewerten wird bei Kriterium 20 die **Kurvenwilligkeit und Gierreaktion** beobachtet. Zu bewerten ist die Zeit, in der das Fahrzeug bei verschiedenen Geschwindigkeiten von der Geradeausfahrt in die Kurvenfahrt übergeht. Die Benotung zeigt ein Maximum im *Gefallen* bei mittlerem *Niveau*. Gute Korrelation ergibt die Analyse mit dem objektiv gemessenen TB-Wert (siehe Abbildung 7-8). Dieser ergibt sich aus dem Produkt von Schwimmwinkel und PRT, ermittelt aus der Messreihe *Lenkwinkelsprung*, und lässt als Zielwert einen TB-Wert von ca. 0,02 s ansetzen.

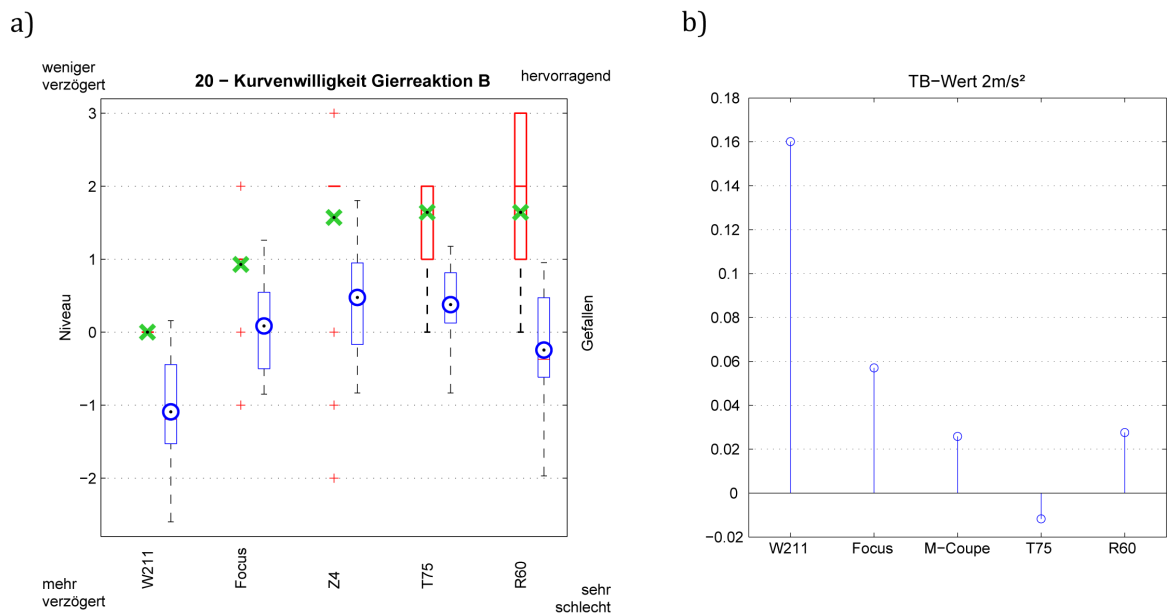


Abbildung 7-8: Auswertung von Kriterium Nr. 20, Kurvenwilligkeit-Gierreaktion

- a) Statistische Analyse mit erkennbarem bestem Gefallen bei Z4 und T75
- b) TB-Wert aus Lenkwinkelsprung bei 2 m/s<sup>2</sup>, geordnet nach den Ergebnissen aus b)

Auf jeden Lenkbefehl erwartet der Fahrer eine Gierreaktion. Der Zusammenhang zwischen dem Erwartungswert und der tatsächlichen Antwort des Fahrzeugs wird mit dem **Eigenlenken** bewertet. Die Probanden benoten die Ausprägung des Untersteuerns der Fahrzeuge über die Definition, ob sich bei Kurvenfahrt ein mehr oder weniger ausgeprägtes „Schieben über die Vorderachse“ feststellen lässt. Die statistische Analyse zeigt, dass die Probanden in ihren Auffassungen so stark wie bei keinem anderen Kriterium streuen (siehe Abbildung 7-9). Auch die Untersuchung der Einzelkorrelationen unter den Probanden, wobei zusätzlich die Expertenfahrer und die Normalfahrer getrennt betrachtet werden, bringt keine weiteren Resultate. Eine Begründung für diese Nichtübereinstimmung bedarf einer etwas ausschweifenderen Betrachtung des Steuerverhaltens eines Fahrzeuges. Bewertet wurde dieses Kriterium auf dem Landstraßenabschnitt über den Rechberg. Für diese Beurteilung ist es teilweise notwendig, das Fahrzeug im Grenzbereich zu bewegen. Das erfordert eine sehr

gute Fahrzeugbeherrschung die Normalfahrer überfordern kann. Verschiebt sich die Konzentration der Fahrer vom subjektiven Bewerten auf die erhöhte Fahrzeugkontrolle ist die Aussage der Fahrer möglicherweise verfälscht. Zudem spielt der Zeitpunkt der Bewertung des Eigenlenkverhaltens eine maßgebliche Rolle: dabei ist entscheidend ob der Proband die Fahrzeugreaktion beim Einlenken am Kurveneingang, in der stationären Phase der Kurvenfahrt oder am Kurvenausgang betrachtet. Auch der längsdynamische Zustand trägt zur Steuertendenz bei. Diese hängt davon ab ob der Fahrer das Fahrzeug in den genannten Kurvenphasen bremst, beschleunigt oder lastfrei durch die Kurve rollen lässt. Zusätzlich relevant sind Antriebskonzepte wie der Allradantrieb des W211 oder die Differentialsperre im heckgetriebenen Z4. Diesem Kriterium steht direkt der objektiv ermittelte Eigenlenkgradient aus der *quasistationären Kreisfahrt* zur Korrelationsanalyse gegenüber. Wegen der breiten Verteilung der Umfragewerte kann kein Zusammenhang zwischen dem objektiven Verhalten und der subjektiven Bewertung dargestellt werden.

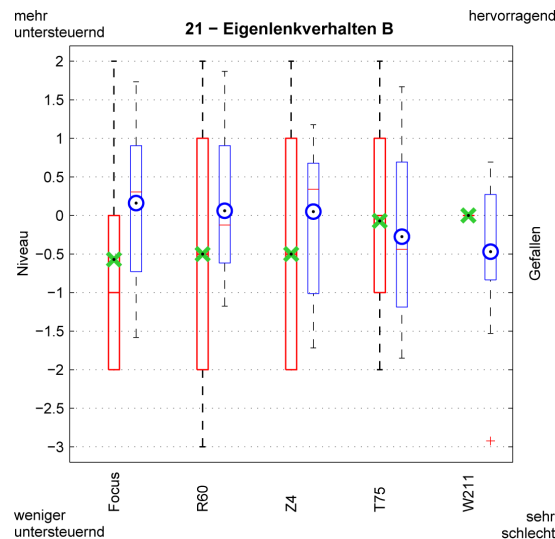


Abbildung 7-9: Statistische Auswertung von Kriterium Nr. 21, Eigenlenkverhalten

Das Fazit aus der Verknüpfung von Lenkwinkelengangsgröße, der dadurch entstandenen Erwartungshaltung und dem wirklichen Ablauf der Fahrzeugreaktion lässt auf folgende Aussage schließen: die Probanden stellen in den meisten Kriterien einen Zusammenhang mit der Lenkübersetzung und der Peak-Response-Time der Giergeschwindigkeit aus den Messungen des Lenkwinkelsprunges her. Bemerkenswert ist, dass die Fahrer bei der Bewertung durchwegs die Fahrzeugreaktionen mit der Verzögerungszeit der Giergeschwindigkeit assoziieren.



### 7.1.3 Verhalten im Stadtverkehr

Das Bewegen der Fahrzeuge im Stadtgebiet soll, aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen an den Fahrer zu den bisherigen Kriterien, gesondert betrachtet werden. Im Geschwindigkeitsbereich vom Stillstand bis etwa 50 km/h werden wesentlich größere Lenkwinkelbeträge eingeleitet als auf Landstraßen oder Autobahnstrecken. Dieser Vorgang erfordert einen erhöhten Arbeitsaufwand der am Lenkrad geleistet werden muss. Dabei spielt der Rücklauf des Lenkrades in die Nullstellung eine Rolle.

Ein dafür definiertes Kriterium ist der **Lenkungsrücklauf**, wobei unterschiedliche Fahrzeuggeschwindigkeiten separat bewertet werden. Von den Fahrern ist der Restlenkradwinkel nach dem Rücklauf des losgelassenen Lenkrads in die Geradausstellung nach dem Abbiegevorgang zu beurteilen. Die Fahrzeuge werden mit dem vorderen inneren Rad auf einem Kreis mit einem Durchmesser von 7,5 m bewegt. Die Fahrzeuggeschwindigkeit wird durch das Kriterium definiert. Bei Kriterium 27 wird mit 15 km/h gefahren, die Probanden korrelieren hier gut sowohl untereinander als auch bei den Fahrzeugen. Steigt die Rücklaufgeschwindigkeit und nimmt damit der Restlenkradwinkel nach einer betrachteten Zeit ab, steigt auch das *Gefallen*. Bei der Auswertung von Kriterium 28, bei dem die Bewertungsgeschwindigkeit bei 30 km/h liegt, stellt sich heraus, dass die Probanden weder zu schnellen noch zu langsamen Lenkungsrücklauf als günstig empfinden (siehe Abbildung 7-10a). Sowohl bei dem gemessenen Restlenkradwinkel nach 1 s als auch nach 2,5 s ist eine sehr gute Korrelation nachzuweisen (siehe Abbildung 7-11). Dasselbe Ergebnis liefert auch die Untersuchung von Kriterium 29, wo der Kreis in Schrittgeschwindigkeit befahren wird und gleichzeitig mit Loslassen des Lenkrades das Fahrzeug beschleunigt wird. Noch deutlicher fällt dieses Urteil bei Kriterium 32 aus, bei dem aus dem Stillstand und vollem Lenkeinschlag losgefahren wird (siehe Abbildung 7-10b). Die letzten beiden genannten Kriterien haben kein direktes Vergleichsmanöver aus den objektiven Messungen, stellen aber den Abbiegevorgang sehr praxisnahe dar und unterstützen das Argument, dass eine Lenkungsrücklaufcharakteristik ähnlich dem Z4 und Focus erwünscht ist.

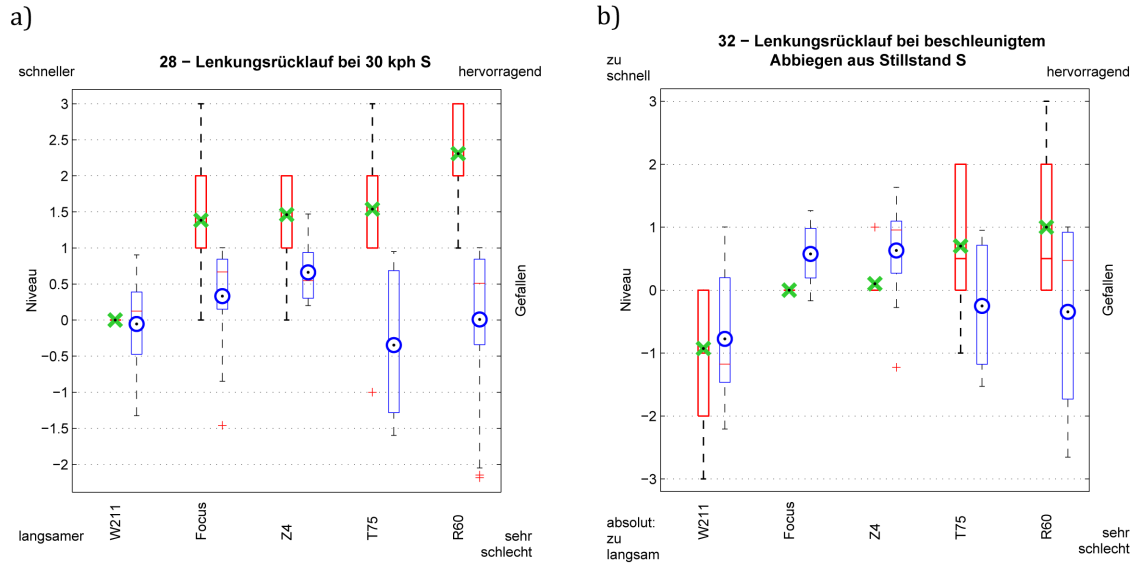


Abbildung 7-10: Auswertung der Kriterien 28 und 32, beide geben die Beurteilung des Lenkungsrücklaufs wieder; auf beiden Abbildungen ist erkennbar, dass den Probanden weder ein zu schneller noch ein zu langsamer Lenkungsrücklauf gefällt.

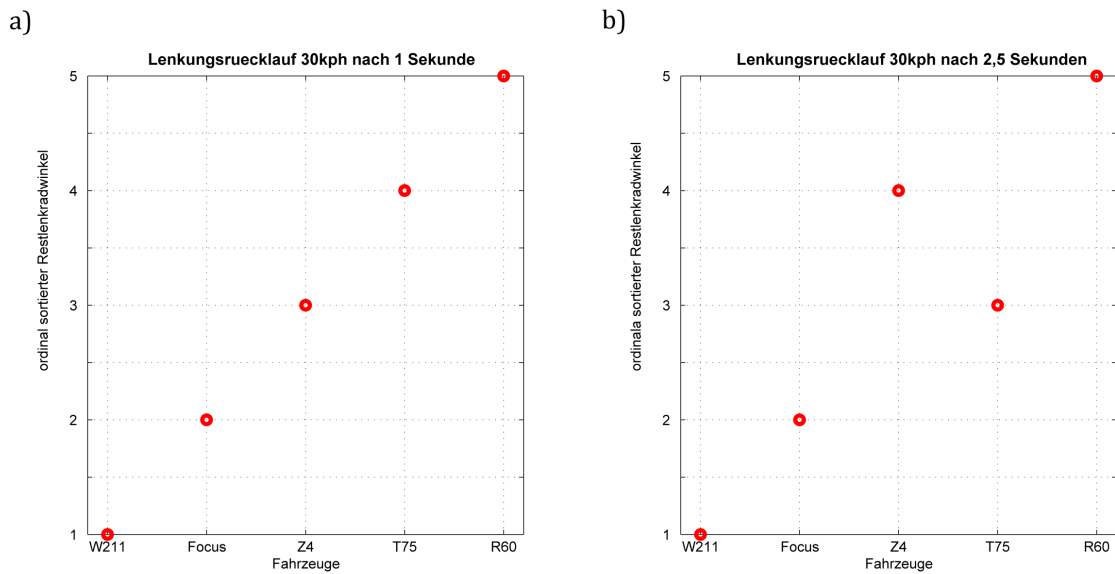


Abbildung 7-11: Gemessener Restlenkdrückwinkel, geordnet nach der Reihung in Abbildung 7-10a und Abbildung 7-10b; (ordinal skaliert, d.h. W211 = 1 = langsamster Lenkdrücklauf, R60 = 5 = schnellster Lenkdrücklauf)

Die Probanden bewerten zusätzlich zum Restlenkdrückwinkel die **Gleichförmigkeit des Lenkungsrücklaufes**, wobei der Verlauf der sich einstellenden Lenkdrückgeschwindigkeit beobachtet wird mit der sich das Lenkrad in seine Mittenlage zurück dreht. Die Korrelation zeigt mit steigender Gleichmäßigkeit ein besseres *Gefallen*. Um die Gleichmäßigkeit aus den Messungen zu erfassen wird die Kurve Lenkwinkel vs. Zeit abgeleitet, die Welligkeit der Ableitung gibt die Gleichmäßigkeit der Winkelgeschwindigkeit wieder. Die Probanden detektieren den W211 als Fahrzeug mit dem harmonischsten und den T75 mit dem

unharmonischsten Rücklauf. Die Aussagen im Vergleich zwischen Messungen und der Beurteilung des *Niveaus* sind analog. Interessant sind die offensichtlich gleichförmigeren Verläufe der Fahrzeuge mit HPS. T75 und R60 zeigen, beide ausgestattet mit einer EPS, die größten Unregelmäßigkeiten. Die Probanden weisen im Feedbackgespräch darauf hin, dass die Rückstellkraft am Lenkrad bei den mit EPS ausgestatteten Fahrzeugen zu gering ist und das Lenkrad nicht kontrolliert „in der Hand“ zurückläuft, sondern mit zu wenig Kraft schon angehalten werden kann. Als Ergebnis lässt sich formulieren, dass ein gleichmäßiger Rücklauf, der mit verhältnismäßig hohem Rückstellmoment am Lenkrad von statten geht, erwünscht ist.

Aufgrund der geringen Übereinstimmungen unter den Fahrern bei Kriterium 31, **Lenkradrückstellmoment**, bei dem die aufzubringende Kraft zu bewerten war, um das Lenkrad wieder in die Geradeausstellung zu lenken, und bei Kriterium 37, dem **Lenkungsverhärten**, werden keine weiteren Analysen dazu angestellt.

Eine wichtige Lenkungseigenschaft ist das **Parkiermoment**, bewertet durch die Kriterien 34 und 35. Die Probanden sind angehalten, sowohl das Moment bei eingebremstem Fahrzeugstillstand, als auch bei rollendem Fahrzeug, zu evaluieren. Die Aussagen decken sich in beiden Fällen, es besteht eine hohe Korrelation unter den Fahrern und sie sind sich auch einig, dass das *Gefallen* mit sinkendem Momentenniveau steigt (siehe Abbildung 7-12a und Abbildung 7-12b). Das Parkiermoment wird objektiv mit dem Lenkroboter ermittelt und gibt nach der Auswertung Mittelwerte (siehe Abbildung 7-12c), die mit den subjektiven Noten sehr gut korrelieren. Die Untersuchung führt zu dem Ergebnis, dass ein niedriges Lenkmoment wie das des R60 und W211 bei langsamer Fahrt erwünscht ist. Die Momente des Z4 und T75 sind den Probanden hingegen zu hoch.

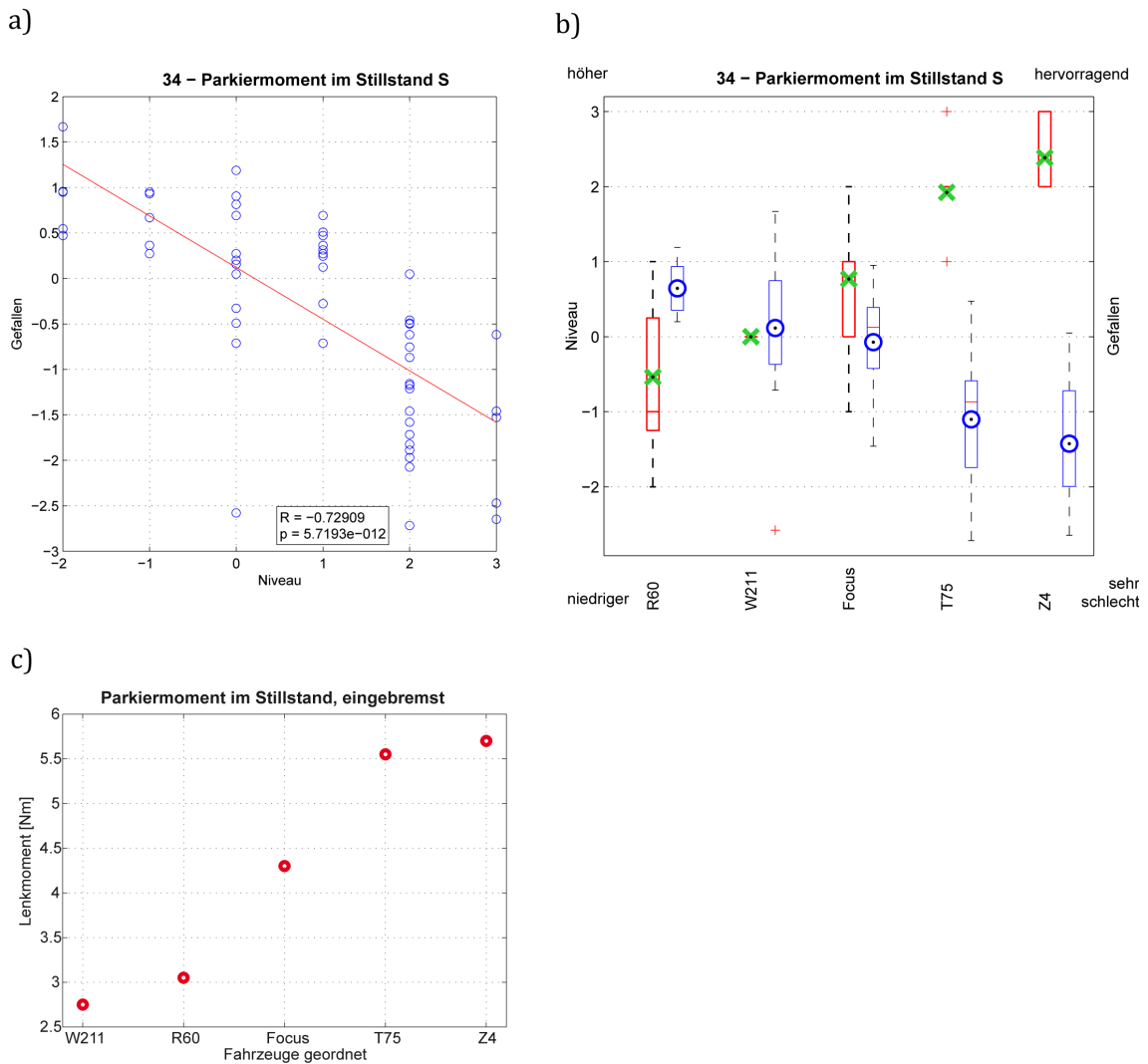


Abbildung 7-12: Auswertung von Kriterium Nr. 34, Parkiermoment im Stillstand

- a) Korrelation zwischen Niveau und Gefallen, Regression mit Polynom 2. Ordnung
- b) Statistische Verteilung und Mittelwerte von Niveau und Gefallen, geordnet nach ansteigendem Niveaumittelwert.
- c) Objektive Messung des Parkiermoments im Stillstand, Fahrzeug eingebremst; geordnet nach den Ergebnissen aus b)

Zusammenführend können folgende Aussagen in diesem Untersuchungsfeld *Stadtgebiet* festgehalten werden: die Fahrer bevorzugen Lenkungen mit hoher Gleichmäßigkeit der Rücklaufgeschwindigkeit und im Rückstellmoment. Für einen großen Lenkwinkelaufwand bei Parkier- oder Abbiegemanöver sollte das erforderliche Lenkmoment sehr gering sein, aus den vorgegebenen Fahrzeugen wird ein Momentenniveau von ca. 2,8 Nm präferiert.

## 7.2 Mögliche Weiterführung und Optimierungsvorschläge

Die vorliegenden Ergebnisse aus der Korrelationsanalyse unter Kapitel 7.1 sind Grundlage für unterschiedliche weitere Vorgehensweisen. Spannt man den Fahrbetriebsraum durch

Fahrgeschwindigkeit (x-Achse) und Querbearschleunigung (y-Achse) auf kann auf der z-Achse ,das durch die Korrelationsanalyse erhaltene, bevorzugte Lenkmoment aufgetragen werden. Bei einer vollständigen Abdeckung der x-y Ebene durch zugehörige erforderliche oder erwartete Lenkmomente kann ein sogenannter „Lookup-Table“ generiert werden. Bei ausreichenden Stützstellen ist ein Interpolieren dazwischenliegender Werte durchaus erlaubt. Das erhaltene Feld dient als Hilfswerkzeug bei der Abstimmung der Lenkunterstützung. Für ein bekanntes mechanisches und dynamisches Verhalten eines vorgegebenen Lenksystems lässt sich durch das erwünschte Lenkradmoment ein erforderliches Unterstützungsmoment durch den hydraulischen oder elektromotorischen Bauteil ermitteln.

Hinsichtlich der Möglichkeiten einer EPS lassen sich diese Anforderungen ohne zwingende Konflikte erfüllen. Im Idealfall kann das Unterstützungsmoment des Elektromotors durch einen Look-up-Table in jeder Geschwindigkeit, bei unterschiedlichen Querbearschleunigungen und unterschiedlichen Lenkwinkeln definiert werden. Um dieses Modell zu realisieren sind weitere Stützstellen im gesamten Kennfeld erforderlich. Diese lassen sich nur durch weitere Kriterien im Fragebogen festlegen.

### **Optimierung der Kriterien:**

Im Verlauf der Auswertung kristallisieren sich Ursachen heraus, die das Bewerten einzelner Kriterien unter Umständen erschweren und für die großen Streuungen der Benotung verantwortlich sind. Grob lassen sich die Gründe erfassen:

- Formulierung der Kriterien
- Fokussieren der Kriterien
- Fahrzeugauswahl.

Da nicht jeder Proband die Definitionen der Kriterien in derselben Art interpretiert, kommt es zu Bewertungen unterschiedlicher physikalischer Größen. So erfährt man im Feedbackgespräch, dass das Kriterium *Reibung* von gewissen Probanden mit dem Losbrechmoment des Lenkrades, von anderen aber mit der Hysterese des vermittelten Momentenverlaufs bewertet wird. Um solche Abweichungen zu unterbinden ist eine genaue Definition der zu evaluierenden Größe notwendig. Es geht dabei darum, die Probanden in einem Briefing im Vorfeld auf die charakteristischen Größen zu sensibilisieren und miteinander zu synchronisieren. Expertenfahrer achten bei dem Kriterium *Nachlenken nach Kurvenfahrt* bei der beruflichen Abstimmung von Fahrwerken auf andere Fahrzeugreaktionen als bei der Definition in dieser Arbeit verlangt wird, dadurch wird das

Kriterium im Unterbewusstsein anders beurteilt als von den Normalfahrern. Um die Gleichheit während der Bewertung sicherzustellen, sind die Rahmenbedingungen für Fahrzeug, Fahrbahn und Mensch zu unifizieren. Das ist möglich durch eine exakte Vorgabe der Fahrzeuggeschwindigkeit und einem zugewiesenen Streckenabschnitt in dem der Fahrer seine Beurteilung durchführen muss. Im besten Fall wird in jedem Fahrzeug ein Lenkrad mit gleichem Durchmesser verbaut. Die Probanden sollen so die Möglichkeit erhalten, das Testprozedere quasi unter Laborbedingungen durchführen zu können.

Um eine ausreichende Anzahl von Stützstellen für das Kennfeld zu erhalten ist nicht nur die Definition der Kriterien, sondern auch die Auswahl und der Schwerpunkt der Kriterien von Bedeutung. Einige der in dieser Untersuchung formulierten Kriterien zielen bewusst nur auf das gefühlte Moment am Lenkrad ab. Für den gesamten Fragebogen sollte für die Aufgabe, ein Unterstützungskennfeld erstellen zu wollen, der Fokus weniger auf Gesamtfahrzeugreaktionen sondern mehr auf den Momentenverlauf, Haltemomente und Anlenkmomente gelegt werden. Gerade von diesen speziellen Kriterien (siehe Kapitel 7.1.1) bedarf es noch weiterer, die das Lenkmoment in unterschiedlichen Fahrsituationen bezüglich Fahrzeuggeschwindigkeit, Querbefleunigung und Lenkwinkelbetrag wiedergeben.

Die getroffene Fahrzeugwahl (siehe Kapitel 4.1.2) deckt die Bandbreite von komfortabel bis sportlich sehr gut ab. Da die Charaktere der Fahrzeuge nicht bei Fahrwerk und Lenkung enden, ist jedes Fahrzeug auch am Interieur, an der Sitzposition, Design oder der Motorleistung in seiner Orientierung an den Kunden zu erkennen. Dieser Umstand löst beim Abnehmer gewollte Emotionen aus, bei den Probanden entstehen dadurch eventuell Vorurteile, die bei einer subjektive Beurteilung, die so objektiv als möglich erfolgen soll, zu einer Verzerrung der Ergebnisse führt. Um den Testpersonen eine Bewertung frei von diesen Einflüssen zu ermöglichen, wäre es ideal, die Anzahl der unterschiedlichen Fahrzeuge auf ein einzelnes zu reduzieren, wodurch sich die Fahrer nicht an unterschiedliche Bedienungselemente wie Blinkerstockposition oder Komfortausstattungen wie Automatikgetriebe in den abwechselnden Fahrzeugen gewöhnen müssen. Ist dieses Fahrzeug, mit einem EPS System ausgestattet, können dem Elektromotor unterschiedliche Kennfelder mit differierenden Charakteristika hinterlegt werden, die per Knopfdruck voreingestellt werden können. Jedes Kennfeld ist dann extra per Fragebogen zu bewerten. Zschocke [3] beschreibt in seiner Arbeit dieselbe Erfahrung. Er geht einen Schritt weiter und montiert zwischen Lenzapfenverzahnung und Lenkrad einen Drehmomentsteller, mit dem er dem Fahrer unterschiedliche Lenkmomente vortäuschen kann.

## 8 Zusammenfassung

Diese Arbeit befasst sich mit dem Thema der objektiven Abbildung vom subjektiv vermittelten Lenkgefühl und ist in Zusammenarbeit mit dem Institut für Fahrzeugtechnik der TU Graz und der Firma Magna Steyr Fahrzeugtechnik entstanden. Aus der Motivation, für den Prozess der Produktentwicklung von elektromechanischen Servolenkungen Kennwerte aus dem bevorzugten Lenkcharakter abzuleiten, werden in der vorliegenden Arbeit die subjektiv erfasste Rückmeldung des Lenkrades an den Fahrer objektiv gemessenen Werten gegenübergestellt. Ziel der Arbeit ist es, die im gesamten Betätigungsfeld eines Fahrzeuges erwarteten Lenkradmomente abzubilden um daraus Unterstützungskennlinien für EPS Systeme zu generieren.

Aufbauend auf die Erhebung vom Stand der Technik und einem kurzen Überblick der zielführenden Methodik dieser Arbeit in Kapitel eins und zwei werden in Kapitel drei die erforderlichen wissenschaftlichen Grundlagen der Fahrdynamik und Statistik für die Durchführung erläutert.

Kapitel vier beschreibt den Ablauf der statistischen Erhebung des subjektiven Lenkgefühls anhand einer Meinungsforschung. Dabei beurteilen 15 Probanden an fünf Fahrzeugen die Rückmeldungen am Lenkrad im auftretenden Niveau und außerdem im persönlichen Gefallen. Um Aussagen im gesamten Betätigungsfeld des Lenkrades zu erhalten, decken die zu bewertenden Kriterien typisch bediente Fahrzeuggeschwindigkeiten, Lenkwinkel und Lenkwinkelgeschwindigkeiten ab. Für einen weiterführenden Vergleich der Daten sind von den Probanden Aussagen mit einem hohen Maß an Bestimmtheit erforderlich. Dafür werden die Umwelteinflüsse auf die Probanden bestmöglich konditioniert und Streckenführung und Fahrzeugreihenfolge vorgegeben. Die Daten werden statistisch aufbereitet und schlussendlich zwei Analysen unterzogen. Einerseits, ob sich die Probanden beim Differenzieren der Niveaus innerhalb der Fahrzeuge einig sind und zweitens, ob dieselben Niveaus bevorzugt werden. Ist nur eine der zwei Bedingungen nicht erfüllt, bringt eine weiterführende Analyse des Kriteriums mit den objektiven Größen kein Ergebnis.

Um die erhaltenen bevorzugten Rückmeldungen in Zahlen auszudrücken ist eine, in Kapitel fünf beschriebene, objektive Messung der oben verwendeten Fahrzeuge notwendig. Jedes Auto wird dafür mit Sensoren ausgerüstet die alle erforderlichen Fahrzeugbewegungen erfassen und aufzeichnen. Damit die Reproduzierbarkeit der Messfahrten gewährleistet ist, werden die standardisierten Manöver von einem Lenkroboter durchgeführt. Für den Vergleich mit den subjektiven Eindrücken der Probanden ist eine umfangreiche Vorbereitung

der großen Datenmengen notwendig. Im Vordergrund steht nach dem Filtern und Mitteln der Werte vor allem das Ermitteln von Kennwerten, die für den folgenden Vergleich nötig sind.

Kapitel 6 beschreibt den letzten Schritt der Untersuchung, die Korrelationsanalyse zwischen den subjektiven Meinungen und den objektiven Messgrößen. Dabei befasst sich der Autor mit der grundlegenden Frage, ob, und wenn ja, mit welchen Manövern und deren Kenngrößen die für den Fahrer ausschlaggebende Lenkcharakteristik abgebildet werden kann.

Ansatz dafür ist die Hypothese, dass es messbare Fahrzeugeigenschaften gibt, bei denen ein Zusammenhang zu den vermittelten Fahrereindrücken besteht. Dabei liegt der Fokus dieser Arbeit besonders darin, das Lenkmoment, durch Lenkwinkelvorgaben herbeigerufene Fahrzeugreaktionen und das Lenkverhalten im Stadtgebiet zu erfassen.

Das Ergebnis der Analyse ist sehr umfangreich. Es stellt sich heraus, dass der Bereich um die Nulllage der Lenkung von den Fahrern gut und übereinstimmend beschrieben werden kann. Außerhalb der Nulllage sind Haltemomente bei Geschwindigkeiten bis  $30 \text{ km/h}$  wünschenswert niedrig und sollen etwa  $3 \text{ Nm}$  betragen. Mit zunehmender Geschwindigkeit bevorzugen die Probanden ein gleichmäßig ansteigendes Haltemoment, das bei  $100 \text{ km/h}$  den Wert von etwa  $4,5 \text{ Nm}$  erreichen soll. Bei Kurvenfahrten mit Geschwindigkeiten ab  $50 \text{ km/h}$  befürworten die Probanden ein spätes Abfallen der Haltemomente. So soll die Degression erst bei zirka  $7,5 \text{ m/s}^2$  Querbeschleunigung einsetzen. Betrachtet man die Fahrzeugreaktion auf unterschiedliche Lenkbefehle, so zieht sich durch die gesamte Analyse der Tenor, dass Lenkübersetzungen von  $i = 16$  erwünscht sind. Alles darunter oder darüber empfinden die Fahrer als zu direkt oder zu indirekt. Weiters lassen sich Zusammenhänge zwischen mehreren Kriterien und dem Gierverhalten beziehungsweise dessen zeitlicher Verzögerung herstellen. Andere Hypothesen wie die des Eigenlenkverhaltens müssen hingegen verworfen werden. Die Fahrer sind sich in diesem Fall in ihrer Bewertung nicht einig. Im Stadtverkehr stellen sich die eindeutigsten Korrelationen heraus. Die Probanden erwarten bei einem Parkiermanöver sehr niedrige Lenkmomente um  $2,75 \text{ Nm}$ . Der Lenkungsrücklauf soll sich nach dem Abbiegevorgang möglichst harmonisch verhalten, wobei auch bei der Geschwindigkeit des Lenkungsrücklaufes sehr gute Korrelationen mit den objektiven Daten bestehen. Hier kristallisiert sich eine optimale Geschwindigkeit heraus. Zu schnelles oder zu langsames Rückstellen in die Nulllage ist nicht erwünscht.

Als erweiterte Erkenntnisse lassen sich gewonnene Erfahrungen über den Ablauf und die Methodik festhalten. Das Formulieren der Kriterien erweist sich als äußerst komplex. Sie müssen die Eigenschaft unmissverständlich, nachvollziehbar und schnell begreifbar beschreiben. Zusätzlich ist ein Briefing der Probanden zu deren Synchronisation unerlässlich. Um die Lenkcharakteristik in Bezug auf das vermittelte Lenkmoment noch besser darstellen



zu können ist eine exaktere Beschreibung der Fahrzustände und der zu bedienenden Lenkwinkelbereiche bei den Kriterien notwendig.

Das gesetzte Ziel dieser Arbeit, ein vollständiges Kennfeld zu generieren, wurde eingeschränkt erreicht. Jedoch zeigt diese Arbeit, dass die Vorgehensweise funktioniert und relevante Bereiche des Betätigungsfeldes der Lenkung ausreichend abgebildet werden können um den Entwicklungsprozess von EPS Systemen zu optimieren. Eine Objektivierung der Lenkcharakteristik besitzt Potential und es ist zu erwarten, dass mit entsprechendem zusätzlichem Aufwand wie etwa der Anhebung der Probandenzahl oder der noch besseren Konditionierung der Fahrsituationen zu guten Ergebnissen führen.

## Literaturverzeichnis

- [1] **Gaedke, Alexander, Heger, Markus und Vähning, Alexander.** Electric power steering in all vehicle classes - state of the art. *1st International Munich Chassis Symposium*. München : Vieweg und Teubner, ATZlive, 2010.
- [2] **Harrer, Manfred, Schmitt, Thomas und Fleck, Reidar.** 15. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 2006. *Elektromechanische Lenksysteme - Herausforderungen und Entwicklungsstatus*. Aachen : s.n., 2006.
- [3] **Zschocke, Alexander.** Ein Beitrag zur objektiven und subjektiven Evaluierung des Lenkkomforts von Kraftfahrzeugen. 2009. Bd. 34.
- [4] **Heißing, Bernd.** *Fahrwerkhandbuch*. [Hrsg.] Esroy Metin. s.l. : Vieweg, 2007.
- [5] **Wallentowitz, H.** *Vertikal- und Querdynamik von Kraftfahrzeugen*. 4. Aachen : Schriftenreihe Automobiltechnik, 2000.
- [6] DIN 70000, Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten, Begriffe. 1991.
- [7] **Heißing, Bernd und Brandl, Hans Jürgen.** *Subjektive Beurteilung des Fahrverhaltens*. Würzburg : Vogel, 2002.
- [8] **Zomotor, Adam.** *Fahrwerktechnik: Fahrverhalten*. [Hrsg.] Jörnßen Reimpel. s.l. : Vogel, 1991.
- [9] ISO 13674-2: Road vehicles, Test method for the quantification of on-centre handling, Part 2: Transition test. Ausgabe 2006.
- [10] ISO 4138: Passenger cars, Steady-state circular driving behaviour, Open-loop test methods. Ausgabe 2004.
- [11] **Mitschke, Manfred und Wallentowitz, Henning.** *Dynamik der Kraftfahrzeuge*. s.l. : Springer, 2004.
- [12] ISO 8726: Road vehicles, Transient open-loop response test method with pseudo-random steering input. Ausgabe 1988.
- [13] ISO 13674-1: Road vehicles, Test method for the quantification of on-center handling, Part 1: Weave-Test. Ausgabe 2003.
- [14] ISO 7401: Road vehicles, Lateral transient response test methods, Open-loop test methods. Ausgabe 2003.
- [15] **Harrer, Manfred.** Characterisation of Steering Feel. University of Bath: s.n., 2007.

- [16] <http://www.quantitative-methoden.de/Dateien/Auflage2/leseprobe.pdf>. [Online]  
[Zitat vom: 21. Dezember 2010.]
- [17] **Krüger, Hans-Peter und Neukum, Alexandra.** Bewertung von Handlungseigenschaften - zur methodischen und inhaltlichen Kritik des korrelativen Forschungsansatzes. [Buchverf.] T. Jürgensohn und K. Timpe. *Kraftfahrzeugführung*. s.l. : Springer, 2001.
- [18] **Hillig, A.** Schüler Duden – die Psychologie. Mannheim; Leipzig; Wien; Zürich : Dudenverlag, 1996.
- [19] Statista-Lexikon. [Online] 2011. [Zitat vom: 08. Mai 2011.]  
<http://de.statista.com/statistik/lexikon/definition/122/signifikanz/>.
- [20] [http://www.corrsys-datron.com/Support/Data\\_Sheets/CMSW\\_000-810d.pdf](http://www.corrsys-datron.com/Support/Data_Sheets/CMSW_000-810d.pdf).  
[Online] [Zitat vom: 10. Jänner 2011.]
- [21] [http://www.corrsys-datron.com/Support/Data\\_Sheets/CS350A\\_000-807d.pdf](http://www.corrsys-datron.com/Support/Data_Sheets/CS350A_000-807d.pdf).  
[Online] [Zitat vom: 10. Jänner 2011.]
- [22] [http://www.imar-navigation.de/downloads/DIS\\_FMS\\_de.pdf](http://www.imar-navigation.de/downloads/DIS_FMS_de.pdf). [Online] [Zitat vom: 10. Jänner 2011.]
- [23] **Ecker, Joachim.** *Objektive Testverfahren zur Analyse der Fahreigenschaften von zweispurigen PKW's*. Institut für Thermodyn. und VKM, TU-Graz. 1999.
- [24] **Zöfel, Peter.** *Statistik für Psychologen im Klartext*. München : s.n., 2003.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Schematischer Ablauf der Arbeit.....	14
Abbildung 3-1:	Geschlossener Fahrer-Fahrzeug Regelkreis.....	16
Abbildung 3-2:	Einspurmodell.....	17
Abbildung 3-3:	Eigenlenkverhalten nach „Olley“ und „Bergmann“ bei stationärer Kreisfahrt mit konstantem Radius.....	21
Abbildung 3-4:	Gierverstärkung über der Fahrgeschwindigkeit.....	22
Abbildung 3-5:	Untersuchung der Antwortfunktionen auf die Eingangsfunktion [4].....	23
Abbildung 3-6:	Darstellung der standardisierten objektiven Fahrmanöver, die erforderlichen Fahrzustände und die aus den Messungen extrahierten Kenngrößen.....	31
Abbildung 3-7:	Offene oder unipolare Skala zur subjektiven Bewertung vom empfundenem Gefallen.....	32
Abbildung 3-8:	geschlossene oder bipolare Skala zur subjektiven Bewertung vom empfundenem Gefallen.....	33
Abbildung 3-9:	bipolar offene Skala zur subjektiven Bewertung vom empfundenem Niveau.....	33
Abbildung 3-10:	Beispiel für nicht-lineare Korrelationen.....	36
Abbildung 3-11:	Beispiel einer Korrelations-Untersuchung.....	37
Abbildung 3-12:	Merkmale eines Boxplots.....	38
Abbildung 4-1:	Benchmarkfahrzeuge für die Lenkungsbewertung.....	42
Abbildung 4-2:	bipolare Skala für das Niveau.....	47
Abbildung 4-3:	unipolare Skala für das Gefallen.....	47
Abbildung 4-4:	Fragebogen für den Streckenabschnitt „Stadt – MSF Testgelände“.....	49
Abbildung 4-5:	Fahrereinteilung für eine Gruppe zu 5 Personen; an jedem der 3 Tage wird ein Streckenabschnitt bewertet.....	50
Abbildung 5-1:	Messaufbau für Fahrdynamikmessungen.....	55
Abbildung 6-1:	Korrelationen zwischen Niveau und Gefallen; mit originalen (rot) und standardisierten (blau) Gefallen Werten.....	58
Abbildung 6-2:	Korrelationsanalyse aller Fahrer untereinander in der Bewertung des Niveaus, getrennt nach den unterschiedlichen Streckenabschnitten a) Autobahn, b) Landstraße, c) Stadtgebiet.....	59
Abbildung 6-3:	Korrelationsanalyse zwischen Niveau und Gefallen; dargestellt am Kriterium Nr. 34 – Parkiermoment im Stillstand.....	61
Abbildung 6-4:	Boxplot für Niveau und Gefallen, dargestellt am Kriterium Nr. 34 – Parkiermoment im Stillstand.....	62
Abbildung 6-5:	Messergebnis „Parkiermoment eingebremst“, Lenkmomente aufgetragen über dem Lenkradwinkel, Rohdaten.....	64
Abbildung 6-6:	Messergebnis „Parkiermoment eingebremst“, Lenkmoment aufgetragen über dem Lenkradwinkel, Daten gefiltert und zugeschnitten.....	64
Abbildung 6-7:	Objektive Messung „Parkiermoment im Stillstand, eingebremst“, geordnet nach ansteigendem Lenkmoment.....	65
Abbildung 6-8:	Ergebnis aus der Gegenüberstellung objektiv-subjektiv, Beispiel am Parkiermoment im Stillstand.....	66
Abbildung 7-1:	Betrachtete Bereiche aus dem Manöver On-Center-Handling; Lenkmoment aufgetragen über dem Lenkradwinkel.....	69

## Abbildungsverzeichnis

---

<i>Abbildung 7-2:</i>	<i>On-Center-Handling; Lenkmoment aufgetragen über der Querbeschleunigung.....</i>	<i>70</i>
<i>Abbildung 7-3:</i>	<i>Statistische Auswertung von Kriterium Nr. 1, Mittenzentrierung.....</i>	<i>70</i>
<i>Abbildung 7-4:</i>	<i>Statistische Auswertung von Kriterium Nr. 2, Momentenverlauf - Autobahn, Verteilung und Mittelwerte von Niveau und Gefallen, geordnet nach ansteigendem Niveaumittelwert.....</i>	<i>71</i>
<i>Abbildung 7-5:</i>	<i>Darstellung der statistischen Verteilung für die Bewertung der Lenkübersetzung von Niveau und Gefallen.....</i>	<i>74</i>
<i>Abbildung 7-6:</i>	<i>Statistische Auswertung von Kriterium Nr. 8, Lenkpräzision - Zielgenauigkeit.....</i>	<i>75</i>
<i>Abbildung 7-7:</i>	<i>Auswertung von Kriterium Nr. 9, Lenkungsansprechen – Geradeausfahrt.....</i>	<i>77</i>
<i>Abbildung 7-8:</i>	<i>Auswertung von Kriterium Nr. 20, Kurvenwilligkeit-Gierreaktion.....</i>	<i>78</i>
<i>Abbildung 7-9:</i>	<i>Statistische Auswertung von Kriterium Nr. 21, Eigenlenkverhalten.....</i>	<i>79</i>
<i>Abbildung 7-10:</i>	<i>Auswertung der Kriterien 28 und 32, beide geben die Beurteilung des Lenkungsrücklaufs wieder; auf beiden Abbildungen ist erkennbar, dass den Probanden weder ein zu schneller noch ein zu langsamer Lenkungsrücklauf gefällt.....</i>	<i>81</i>
<i>Abbildung 7-11:</i>	<i>Gemessener Restlenkwinkel, geordnet nach der Reihung in Abbildung 7-10a und Abbildung 7-10b; (ordinal skaliert, d.h. W211 = 1 = langsamster Lenkradrücklauf, R60 = 5 = schnellster Lenkradrücklauf).....</i>	<i>81</i>
<i>Abbildung 7-12:</i>	<i>Auswertung von Kriterium Nr. 34, Parkiermoment im Stillstand.....</i>	<i>83</i>
<i>Anhang 1:</i>	<i>Fragebogen zur subjektiven Bewertung des Landstraßenprofils.....</i>	<i>93</i>
<i>Anhang 2:</i>	<i>Fragebogen zur subjektiven Bewertung des Autobahnprofils.....</i>	<i>94</i>
<i>Anhang 3:</i>	<i>Lenkradrücklauf nach dem Freigeben des Lenkrades aus der Kreisfahrt (r = 7,5 m) bei 25km/h.....</i>	<i>94</i>
<i>Anhang 5:</i>	<i>Untersuchung des On-Center-Handling-Manövers und die erhobenen Kennwerte aus den untersuchten Bereichen.....</i>	<i>94</i>
<i>Anhang 7:</i>	<i>Auswertung des Lenkmoments aus quasistationärer Kreisfahrt; Eigenlenkgradient aus quasistationärer Kreisfahrt.....</i>	<i>94</i>
<i>Anhang 6:</i>	<i>Zusammenhänge zwischen subjektiven Kriterien und objektiven Kennwerten, ermittelt aus Expertengesprächen.....</i>	<i>94</i>

# Anhang

		Bewertung (nicht fahrzeugklassenspezifisch)									
		Niveau					Gefallen				
		neutral (Referenz)									
		sehr schlecht	schlecht	neutral	gut	sehr gut	sehr schlecht	schlecht	neutral	gut	sehr gut
<b>Landstraßenprofil</b> Richtgeschwindigkeit 100 km/h Fahrer:											
Fahrzeugnummer:											
Geschlecht:											
Startzeit:											
<b>Kilometerleistung:</b> Kraft, die am Lenkrad im ersten Moment des Anlenkens in eine Kurve spürbar ist		niedriger					höher				
<b>Momentenverlauf 1</b> im Übergang zwischen Mitten- zu Proportionalbereich		weniger harmonisch (eckig)					harmonischer (rund)				
<b>Momentenverlauf 2</b> Lenkkräftenstieg im Proportionalbereich		flacher					steiler				
<b>Haltemoment im Proportionalbereich</b> Lenkkräftbeitrag in Kurven mit konstantem Radius		niedriger					höher				
<b>Reibung</b> Die Lenkung vermittelt den Eindruck verklebt zu sein		geringer					höher				
<b>Fahrbahnkontakt</b> Die Lenkung vermittelt einen Eindruck von der Fahrbahn		schlecht					gut				
<b>Lenkübersetzung</b> Vermitteltes Gefühl für die Fahrtrichtungsänderung		direkter					indirekt				
<b>Lenkpräzision, Zielgenauigkeit</b> Lenkkorrekturbedarf bei schneller Kurvenfahrt		geringer					höher				
<b>Nachlenken nach Kurvenfahrt</b> Korrekturbedarf bis aus Kurven- wieder Geradeausfahrt erreicht ist?		kleiner					größer				
<b>Kurvenwilligkeit / Gierreaktion</b> Wie schnell geht das Fahrzeug bei verschiedenen Lenkgeschwindigkeiten von der Geradeausfahrt- in die Kurvenfahrt über?		mehr verzögert					weniger verzögert				
<b>Eigenlenkverhalten</b> Hat das Fahrzeug die Tendenz bei Kurvenfahrt zu "schieben"?		weniger untersteuernd					mehr untersteuernd				

Anhang 1: Fragebogen zur subjektiven Bewertung des Landstraßenprofils

**Autobahnprofil**  
Richtgeschwindigkeit 130 km/h

**Fahrzeug:** Fahrtnummer:

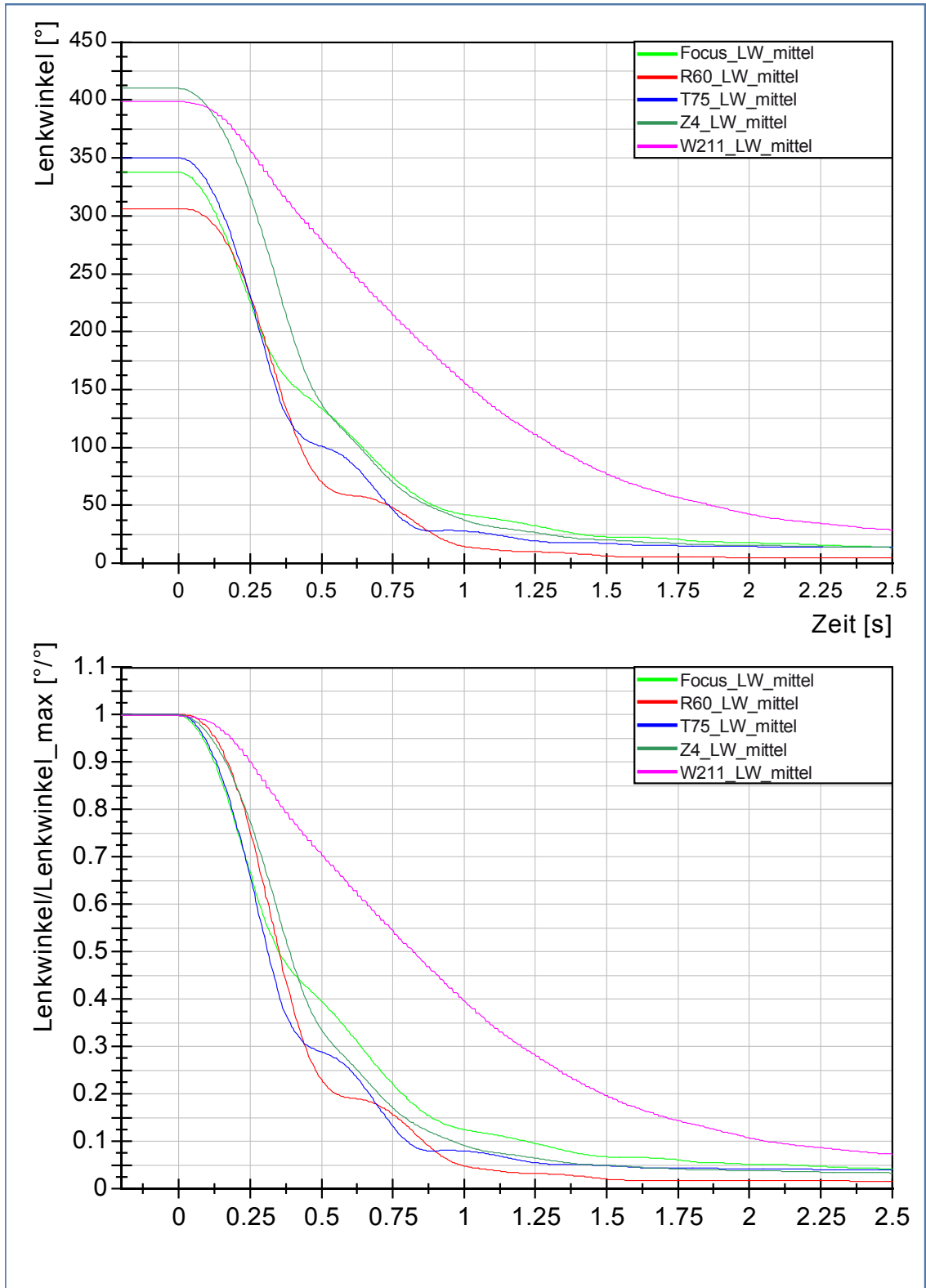
**Fahrer:** Alter:

Geschlecht: Kilometerleistung:

**Startzeit:**

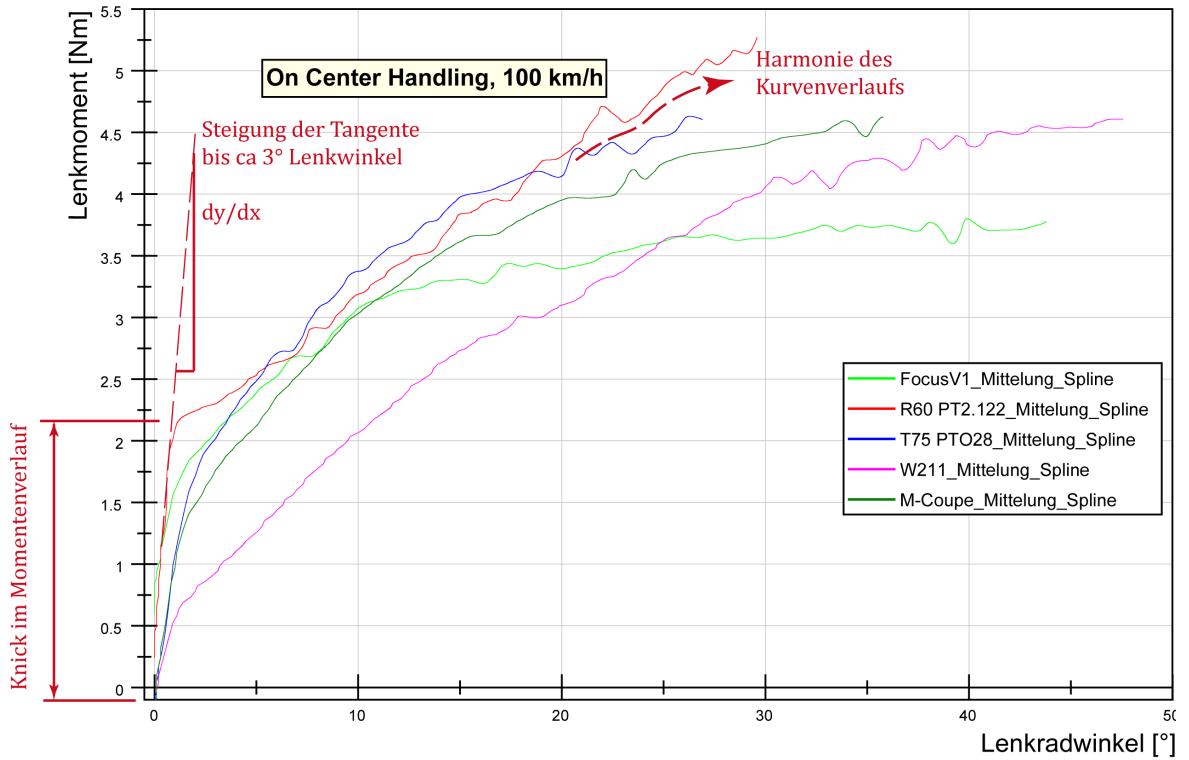
		Bewertung (nicht fahrzeugklassenspezifisch)					Gefallen											
		Niveau																
		neutral (Referenz)																
Kriterium	Beschreibung						geringer	eckiger, weniger harmonisch	flacher	niedriger	geringer	höher	höher	größer	indirekter	höher	höher	treuer
Lenkmoment	<b>Mittenzentrierung</b>	Kraftanstieg bis max. 10° Lenkwinkel und die Rücklenkwilligkeit in die Geradeausstellung																
	<b>Momentenverlauf 1</b>	im Übergang Mitten- zu Weiterlenkbereich bei Spurwechsel, ab ca. 10°																
	<b>Momentenverlauf 2</b>																	
	<b>Proportionalbereich</b>	Lenkkräftanstieg im Proportionalbereich																
	<b>Haltemoment</b>	Lenkkräftbetrag in Kurven																
<b>Reibung</b>	Die Lenkung vermittelt den Eindruck "verklebt" zu sein																	
Fahrzeug & Lenkwinkel	<b>Spiel</b>	Lenkwinkel-Mittbereich, in dem keine Kraft spürbar ist																
	<b>Lenkübersetzung</b>	vermitteltes Gefühl für die Fahrtrichtungsänderung																
	<b>Lenkpräzision, Zielgenauigkeit</b>	um aus der Geradeausfahrt die gewünschte Kursänderung zu "treffen"																
	<b>Lenkungsansprechen Geradeausfahrt</b>	Fahrzeugreaktion auf kleine Lenkeinschläge bei Spurhaltung während der Geradeausfahrt, <10°																
	<b>Geradeauslauf</b>	Fahrzeug folgt seiner Sollkursgeraden																

Anhang 2: Fragebogen zur subjektiven Bewertung des Autobahnprofils



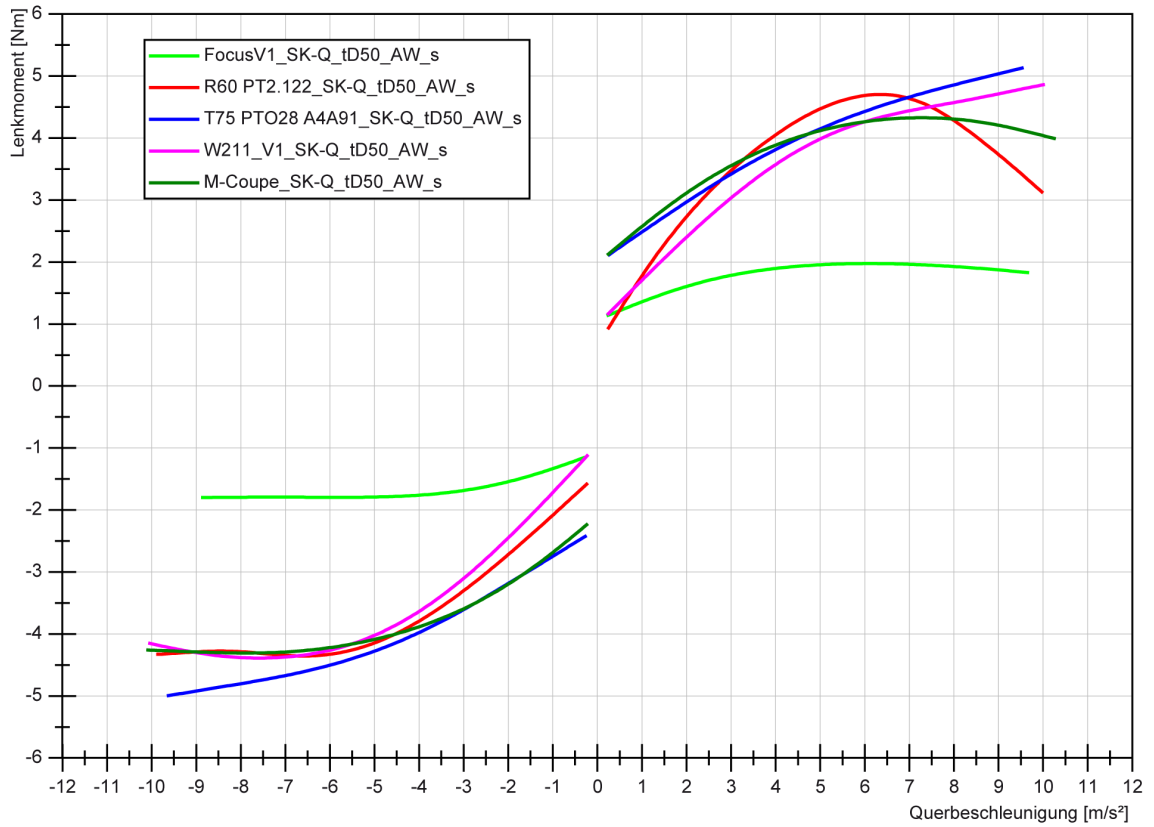
Anhang 3: Lenkradrücklauf nach dem Freigeben des Lenkrades aus der Kreisfahrt ( $r = 7,5 \text{ m}$ ) bei  $25 \text{ km/h}$





Betrachteter Kurvenabschnitt	Wertebereich	Dim.	Geschwindigkeit	Fahrzeug				
				Focus	R60	T75	W211	Z4
Steigung (im Bereich von 0° bis ca. 2°)	flach, steil	dy/dx	100 km/h	0,811	2,07	1,02	0,639	0,874
Niveau vom Knick 100km/h	niedrig, hoch	Nm	100 km/h	1,72	2,13	1,75	0,69	1,27
Harmonie von Knick bis ca. 30°	1 = harmonisch, 5 = unharmonisch		100 km/h	4	5	1	3	2
Steigung (im Bereich von 0° bis ca. 2°)	flach, steil	dy/dx	50 km/h	1,22	1,75	1,3	0,459	0,724
Niveau vom Knick 50km/h	niedrig, hoch	Nm	50 km/h	1,68	1,79	1,29	0,915	1,82
Harmonie von Knick bis ca. 30°	1 = harmonisch, 5 = unharmonisch		50 km/h	2	5	4	1	3
Steigung (im Bereich von 0° bis ca. 2°)	flach, steil	dy/dx	30 km/h	0,928	1,28	0,843	0,816	1,22
Niveau vom Knick 30km/h	niedrig, hoch	Nm	30 km/h	1,87	1,74	1,55	1,12	1,82
Harmonie von Knick bis ca. 30°	1 = harmonisch, 5 = unharmonisch		30 km/h	2	4	3	5	1

Anhang 4: Untersuchung des On-Center-Handling-Manövers und die erhobenen Kennwerte aus den untersuchten Bereichen



	Focus				R60				T75		W211				Z4				
	von	bis	von	bis	von	bis	von	bis	von	bis	von	bis	von	bis	von	bis	von	bis	
v [km/h]	25,17	47,9	57,89	75,37	26,82	51,08	53,66	72,5	25,85	76,59	26	59,2	64,35	72,28	26,4	58,75	61,92	74,44	
ay [m/s²]	2	5,39	6,9	9,5	2	6,15	6,6	9,5	2	kein Maximum	9,5	2	7,26	8,13	9,5	2	7,01	7,52	9,5
Lenkmoment [Nm]	1,6	1,97	1,84		2,76	4,7	3,34		2,97	5,13	2,47	4,38	4,23		3,12	4,33	4,13		
Eigenlenkgradient [°/(m/s²)]; linearer Anteil bis 4 m/s²	0,222				0,21				0,278		0,219				0,196				

Anhang 5: Auswertung des Lenkmoments aus quasistationärer Kreisfahrt; Eigenlenkgradient aus quasistationärer Kreisfahrt

Manöver objektiv	x-Achse	Diagramm y-Achse	Auswertebereich	Kriterium subjektiv	Kriteriendefinition
Lenkwinkelprung	Zeit	Giergeschw., Lenkmoment	ab eingeschwingenem Zustand, für alle Querbesch. (2, 4, 6m/s <sup>2</sup> )	Haltemoment	Lenkkräftbetrag in Kurven
Lenkwinkelsprung	Zeit	Giergeschwindigkeit	stationärer Bereich, Giergeschwindigkeit/LW-stat. Gierverstärkungsf., bei 2, 4, 6m/s <sup>2</sup>	Lenkübersetzung	Vermitteltes Gefühl für die Fahrtrichtungsänderung
Lenkwinkelsprung	Zeit	Giergeschwindigkeit	Gradient aus Giergeschwindigkeit -> evtl. Ansprechverhalten (Ableitung)	Lenkübersetzung	Vermitteltes Gefühl für die Fahrtrichtungsänderung
Lenkwinkelsprung	Zeit	Giergeschwindigkeit, Lenkmoment	Peakresonanz PRT	Lenkübersetzung	Vermitteltes Gefühl für die Fahrtrichtungsänderung
Lenkwinkelsprung	Zeit	Giergeschwindigkeit	stationärer Bereich, Giergeschwindigkeit/LW-stat. Gierverstärkungsf., bei 2, 4, 6m/s <sup>2</sup> ; 6m/s <sup>2</sup>	Lenkungsansprechen/ Geradeausfahrt	Fahrzeugreaktion auf kleine Lenkradeinschläge bei Spurhaltung während der Geradeausfahrt
Lenkwinkelsprung	Zeit	Giergeschwindigkeit	Gradient aus Giergeschwindigkeit -> evtl. Ansprechverhalten (Ableitung)	Lenkungsansprechen/ Geradeausfahrt	Fahrzeugreaktion auf kleine Lenkradeinschläge bei Spurhaltung während der Geradeausfahrt
Lenkwinkelsprung	Zeit	Giergeschwindigkeit	untersucht bei 40km/h und unterschiedlichen Querbeschleunigungen	Haltemoment im Weiterlenkbereich	Lenkkräftbetrag beim Abbiegen oder im Kreisverkehr
Lenkwinkelsprung	Zeit	Giergeschw., Lenkmoment	stationärer Bereich, Giergeschwindigkeit/LW-stat. Gierverstärkungsf., bei 2, 4, 6m/s <sup>2</sup>	Lenkübersetzung	Vermitteltes Gefühl für die Fahrtrichtungsänderung
Lenkwinkelsprung	Zeit	Giergeschwindigkeit	Gradient aus Giergeschwindigkeit -> evtl. Ansprechverhalten (Ableitung)	Lenkübersetzung	Vermitteltes Gefühl für die Fahrtrichtungsänderung
Lenkwinkelsprung	Zeit	Giergeschwindigkeit	Peakresonanz PRT	Lenkübersetzung	Vermitteltes Gefühl für die Fahrtrichtungsänderung
Lenkwinkelsprung	Zeit	Giergeschwindigkeit, Schwimmwinkel	Überschwingen von Gierreaktion auf Plot auswerten	Lenkpräzision/Zielfolgenauigkeit	Lenkreaktorbedarf bei schneller Kurvenfahrt
Lenkwinkelsprung	Zeit	Giergeschwindigkeit	TB-Wert	Kurvenwelligkeit/Gierreaktion	Wie schnell geht das Fahrzeug bei verschiedenen Fahrbahnoberflächen
Lenkwinkelsprung	Zeit	Giergeschwindigkeit	Peakresonanz PRT	Kurvenwelligkeit/Gierreaktion	Wie schnell geht das Fahrzeug bei verschiedenen Fahrbahnoberflächen
Lenkwinkelsprung	Zeit	Giergeschwindigkeit	Steigung von Null bis Knick, 100km/h	Erkennbarkeit	Vermitteltes GE
OnCenter-Handling	Lenkwinkel/gen_lab	Lenkmoment_lab_5	Niveau bei Knick, 100km/h	Mittrezentrierung	Übergang zwischen Mitten- und Weiterlenkbereich bei Spurwechsel, ab ca. 10° LW
OnCenter-Handling	Querbesch., mittel_lab	Lenkmoment_lab_5	Bereich unter ca. 0,5Nm unbedingt ausklammern	Mittrezentrierung	Übergang zwischen Mitten- und Weiterlenkbereich bei Spurwechsel, ab ca. 10° LW
OnCenter-Handling	Lenkwinkel/gen_lab	Lenkmoment_lab_5	gesamte Kurve betrachten, Harmonie bis ca. 20° oder 30°, mit subjektiver Bewertung abgleichen!	Momentenverlauf 1	Lenkkräftanstieg im Proportionalbereich (flacher, steiler)
OnCenter-Handling	Lenkwinkel/gen_lab	Lenkmoment_lab_5	Gradient über gesamten Kurvenverlauf (ableiten) -> bringt hohe Schwankungen -> evtl. Spine!	Momentenverlauf 2	Kraft die am Lenkrad im ersten Mom. des Anlenkens bei einem Abbiegung, in einer Kurve spürbar ist
OnCenter-Handling	Lenkwinkel/gen_lab	Lenkmoment_lab_5	Steigung von Null bis Knick, 50km/h und 100km/h	Anlenkmoment	Kraft die am Lenkrad im ersten Mom. des Anlenkens bei einem Abbiegung, in einer Kurve spürbar ist
OnCenter-Handling	Lenkwinkel/gen_lab	Lenkmoment_lab_5	Harmonie der Kurve betrachten	Anlenkmoment	Kraft die am Lenkrad im ersten Moment des Anlenkens in eine Kurve spürbar ist
OnCenter-Handling	Lenkwinkel/gen_lab	Lenkmoment_lab_5	Steigung von Null bis Knick, 50km/h und 100km/h	Anlenkmoment	Kraft die am Lenkrad im ersten Moment des Anlenkens in eine Kurve spürbar ist
OnCenter-Handling	Lenkwinkel/gen_lab	Lenkmoment_lab_5	gesamte Kurve betrachten, Harmonie bis ca. 20° oder 30°	Momentenverlauf 1	Lenkkräftanstieg im Proportionalbereich
OnCenter-Handling	Lenkwinkel/gen_lab	Lenkmoment_lab_5	Gradient über gesamten Kurvenverlauf (ableiten)	Momentenverlauf 2	Lenkkräftanstieg im Proportionalbereich (flacher, steiler)
Weave-Test / Mittelnlage Lenkung	Zeit	Lenkdradmoment, Querbeschleunigung	alles über z.B. 1,8m/s <sup>2</sup> Querbesch. aus den Messungen	Haltemoment	Lenkkräftbetrag in Kurven
Weave-Test / Mittelnlage Lenkung	Querbeschleunigung	Lenkdradmoment	Hysteresis: breite, hohe, breite x hohe, gesamte Fläche	Reibung	Lenkung vermittelt den Eindruck verklebt zu sein
Weave-Test / Mittelnlage Lenkung	Lenkwinkel	Lenkdradmoment	aus Ausgewerteter Hysteresis: ay bei Lenkmoment=0 -> Steilquerbeschleunigung	Lenkpräzision/Zielfolgenauigkeit	um aus der Geradeausfahrt in die gewünschte Kursänderung zu treffen
Weave-Test / Mittelnlage Lenkung	Lenkwinkel	Giergeschwindigkeit	laut Zehndode (6.1.35): Gradient	Lenkpräzision/Zielfolgenauigkeit	um aus der Geradeausfahrt in die gewünschte Kursänderung zu treffen
Weave-Test / Mittelnlage Lenkung	Querbeschleunigung	Lenkdradmoment	aus ausgewerteter Hysteresis: ay bei Lenkmoment=0 -> Steilquerbeschleunigung	Geradausfahrt	Fahrzeug folgt seiner Sollkurve
Weave-Test / Mittelnlage Lenkung	Querbeschleunigung	Lenkdradmoment	Hysteresis: breite, hohe, breite x hohe, gesamte Fläche, bei niedrigen Geschwindigkeiten	Reibung	Lenkung vermittelt den Eindruck verklebt zu sein
Weave-Test / Mittelnlage Lenkung	Querbeschleunigung	Lenkdradmoment	nur für geringe Geschwindigkeit (bis 75km/h) was passiert, wenn Tabellen ausfallen?	Reibung	Lenkung vermittelt den Eindruck verklebt zu sein
stationäre Kreisfahrt	Querbesch.	Lenkdradmoment	Ausgewertete Daten qualitativ bewerten: DIADEM + Fadenkreuz	Haltemoment	Lenkkräftbetrag in Kurven
stationäre Kreisfahrt	Lenkwinkel	Lenkdradmoment	Lenkkräftanstieg im Proportionalbereich bei ca. 4m/s <sup>2</sup>	Lenkpräzision/ Zielfolgenauigkeit vor Grenzbereich	Lenkkräftanstieg im Proportionalbereich (flacher, steiler)
Sinuslenken	Frequenz	ay/Lenkdradmoment	Querbeschleunigung Verstärkungsfaktor, bei 0,2 und 0,4Hz	Momentenverlauf 2	Fahrzeug folgt seiner Sollkurve
Lenkungsrücklauf	Zeit	Lenkwinkel	Restlenkwinkel	Reibung	Lenkung vermittelt den Eindruck verklebt zu sein
Lenkungsrücklauf	Zeit	Lenkwinkel	Betrachtung bei 15% bei Mini evtl. 20%, 50%, wieviel % nach %; zumindest bei 15 und 20 kmh	Gleichformigkeit des Lenkungsrücklaufs	nach dem Abbiegungsvorgang bei losgelassenem Lenkrad in die Geradeausstellung
Lenkungsabweichern / Steering Ramp	Lenkmoment	Lenkwinkel	qualitative Bewertung des Kurvenverlaufs	Haltemoment im Weiterlenkbereich	dreht sich das Lenkrad nach dem Loslassen gleichförmig in seine
Lenkungsabweichern / Steering Ramp	Lenkmoment	Lenkwinkel	bei ca. 4m/s <sup>2</sup>	Haltemoment im Weiterlenkbereich	Lenkkräftbetrag beim Abbiegen oder im Kreisverkehr
Parkiermoment	Lenkwinkel	Lenkmoment	mit stationärer Kreisfahrt vergleichen -> 2, 4m/s <sup>2</sup> ; 6m/s <sup>2</sup> zusätzlich	Haltemoment im Stillstand	Lenkkräftbetrag beim Abbiegen oder im Kreisverkehr
Parkiermoment	Lenkwinkel	Lenkmoment	qualitative Bewertung der Diagramme	Parkiermoment rollend	Kraftaufwand bei Fahrzeugstillstand eingebremst
Parkiermoment	Lenkwinkel	Lenkmoment	qualitative Bewertung der Diagramme; wird Parkierumdrehung anders bewertet als Lenkübersetzung	Parkiermoment rollend	Kraftaufwand beim Parkieren
Parkiermoment	Lenkwinkel	Lenkmoment	qualitative Bewertung der Diagramme; wird Parkierumdrehung anders bewertet als Lenkübersetzung	Parkiermoment rollend	Anzahl der Lenkumdrehungen beim Parkieren

Anhang 6: Zusammenhänge zwischen subjektiven Kriterien und objektiven Kennwerten, ermittelt aus Expertengesprächen