

Vorwort

Vorab möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. W. Hugemann und Herrn Dipl.-Ing. J. Morawski dafür bedanken, dass ich die vorliegende Arbeit in ihrem Büro durchführen konnte und sie mir darüber hinaus mit ihrer freundlichen und kooperativen Unterstützung während der vergangenen vier Monate zur Seite standen.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. D. Abel, der für die Umsetzung der elektronischen Komponenten zuständig war und stets mit Rat und Tat zur Seite stand.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Wallrich bedanke ich mich für die unkomplizierte Genehmigung dieser Arbeit.

Ich versichere, dass ich die Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

.....

Markus Nickel

1	Einleitung	2
2	Befunde aus der Literatur	3
2.1	QUERBESCHLEUNIGUNG	3
2.1.1	Untersuchungen.....	3
2.1.2	Straßenbauvorschriften.....	8
2.2	BREMSVERZÖGERUNGEN.....	11
2.2.1	Untersuchungen.....	11
2.2.2	Straßenbauvorschriften.....	13
2.3	ANFAHRBESCHLEUNIGUNGEN	14
2.3.1	Untersuchungen.....	14
2.4	TECHNISCHE GRENZEN	15
3	Messtechnik.....	16
3.1	AUFBAU VERSCHIEDENER BESCHLEUNIGUNGSSENSOREN	16
3.2	DIE FUNKTIONSWEISE DES BESCHLEUNIGUNGS-AUFNEHMERS ADXL 202	17
3.3	DIE FUNKTIONSWEISE DES SENSORS IM DETAIL	19
3.3.1	Das amplitudenmodulierte Signal	19
3.3.2	Das pulsbreitenmodulierte Signal	21
3.4	RÜCKFALTUNG (ALIASING).....	22
3.5	DIE DIGITALE NACHBEARBEITUNG	25
3.6	DIE POSITIONIERUNG DER MESSEINHEIT	30
3.6.1	Die Positionierung nach Ackermann.....	32
3.6.2	Die Positionierung unter Berücksichtigung der Schräglaufwinkel.....	35
3.7	DIE QUASISTATISCHE KOMPENSATION.....	39
3.7.1	Die Bestimmung des Wankwinkels	39
3.7.2	Die Bestimmung des Nickwinkels	46
4	Versuchsparameter	49
4.1	DIE PROBANDEN	49
4.2	DIE VERSUCHSFAHRZEUGE	49
4.3	DIE VERSUCHSSTRECKEN.....	50
4.4	ALLGEMEINE VERSUCHSPARAMETER	52

5	Auswertung der Messdaten	53
5.1	DIE LUFTBILDAUSWERTUNG	53
5.2	DIE AUSWERTUNG DER ROHDATEN MIT DADISP.....	53
5.3	DIE AUSWERTUNG IN EXCEL.....	56
5.3.1	Auswertung der Abbiegevorgänge	59
5.3.2	Vergleich einzelner Probanden bei Abbiegevorgängen	61
5.3.3	Auswertung verschiedener Kurvenkategorien	62
5.3.4	Querbesehleunigung beim Durchfahren eines Autobahnkreuzes	67
5.3.5	Vergleich einzelner Testpersonen beim Durchfahren eines Autobahnkreuzes.....	68
5.3.6	Vergleich der Fahrradien mit den Kurvenradien.....	69
5.3.7	Gemessenen Querbesehleunigungen in Abhängigkeit des Fahrradius'	70
5.3.8	Auswertung der Besehleunigungsvorgänge	71
5.3.9	Auswertung der Verzögerungsvorgänge	72
5.3.10	Vergleich der Besehleunigungswerte einzelner Testpersonen.....	73
5.3.11	Vergleich der Verzögerungswerte einzelner Testpersonen.....	73
6	Die Zusammenfassung der Versuchsergebnisse	74
6.1	DER UNTERSCHIED ZWISCHEN RECHTS- UND LINKSKURVEN	74
6.2	INTRA- UND INTERPERSONELLE UNTERSCHIEDE	75
6.3	DIE VERTEILUNG DER MESSWERTE.....	78
6.4	DIE ABWEICHUNGEN ZWISCHEN FAHRRADIUS UND KURVENRADIUS.....	78
6.5	DIE 10%-, 50%- UND 90%-PERZENTILE ALLER MESSUNGEN.....	79
7	Vergleich der eigenen Versuchsergebnisse mit der Literatur	80
7.1	QUERBESCHLEUNIGUNGEN	80
7.1.1	Vergleich mit den Straßenbauvorschriften.....	82
7.2	BREMSVERZÖGERUNGEN.....	83
7.2.1	Vergleich mit den Straßenbauvorschriften.....	83
7.3	ANFAHRBESCHLEUNIGUNGEN	83
8	Zusammenfassung	85
9	Abbildungsverzeichnis	87

10 Tabellenverzeichnis	92
11 Literaturverzeichnis	93
12 Anhang	A 1
12.1 LUFTBILDAUSWERTUNG	A 1
12.2 BEISPIEL PLOTS	A 8
12.3 BESTIMMUNG DES WANKWINKELS	A 13
12.4 REFERENZ DIAGRAMM	A 24

1 Einleitung

Für die Rekonstruktion von Straßenverkehrsunfällen ist es von besonderer Relevanz, die Bewegungen der am Unfallgeschehen beteiligten Verkehrsteilnehmer mit möglichst großer Genauigkeit zu bestimmen. Dazu werden oft Anhaltswerte für Quer- und Längsbeschleunigungen im normalen Straßenverkehr benötigt. Häufig ist einer der Beteiligten vor dem Unfall völlig ahnungslos, so dass seine Handlungen durch das eingeschliffene Verhalten im Straßenverkehr bestimmt sind und nicht durch die sich anbahnende Ausnahmesituation.

Mit dieser Arbeit wird der Erfahrungsbereich des Normalfahrers in alltäglichen Verkehrssituationen untersucht. Besonderes Augenmerk gilt der vom Fahrer akzeptierten Querbesehleunigung bei Kurvenfahrten und Abbiegevorgängen. Ergänzend werden Längsbeschleunigungsmessungen ausgewertet, die Aufschluss über das Bremsverhalten bei normalen Anhaltvorgängen sowie der vom Fahrer gewählten Beschleunigung z. B. nach Abbiegevorgängen geben. Dazu wird das Fahrverhalten eines Fahrerkollektivs mit digitaler Messtechnik erfasst und mittels Signalanalysesoftware ausgewertet.

Um den Bezug zwischen der Ausgestaltung der Örtlichkeit (großräumig oder eng, übersichtlich oder verwirrend) und den fahrdynamischen Daten herstellen zu können, sind die Probanden eine im Voraus festgelegte Strecke abgefahren.

Das Aufzeichnen und Auswerten der Messungen ist so organisiert, dass es für den Leser möglichst transparent bleibt. So ist z. B. jeder ausgewertete Streckenabschnitt durch Luftbildaufnahmen dokumentiert. Darüber hinaus werden alle Messungen statistisch ausgewertet und in Summenhäufigkeitsdiagrammen dargestellt. In jedem dieser Diagramme sind das 10%-, 50%- und 90%-Perzentil eingetragen, sodass direkt die repräsentative Bandbreite der Beschleunigung abgelesen werden kann. Ein weiterer Schritt zur Transparenz der Auswertung sind die Diagramme mit den Intra- und interpersonellen Unterschieden der einzelnen Fahrer.

Im Anschluss an die Auswertung der Messergebnisse, werden diese mit den Befunden aus der Literatur verglichen und diskutiert.

2 Befunde aus der Literatur

In der Literatur gibt es erst wenig publizierte Daten zur Längs- und Querschleunigung bei normalen Fahrmanövern. Die Veröffentlichungen, die den Bereich der Querschleunigung abdecken, sind dazu meist älteren Datums. Sie zielen zudem eher auf die Sicherheitsgrenze des Normalfahrers und geben somit nur bedingt Auskunft über das Fahrverhalten des Normalfahrers.

2.1 Querschleunigung

2.1.1 Untersuchungen

In [1] werden Versuche zur Beurteilung des Fahr- und Bremsverhaltens durchgeführt. Als Erstes ermitteln die Verfasser in stationären Testreihen (Kreisbahn) das Kurvenverhalten von drei Fahrzeuggruppen (Sportwagen-, Kleinwagen- und gehobene Mittelklasse). Im zweiten Schritt werden in instationären Tests die Fahreigenschaften der Fahrzeuge untersucht. Diese Versuche erfolgen nach der Methode des pseudozufälligen Lenkimpulses, dessen gewünschte Charakteristik zwar vorgegeben, dessen präzise Zeitabfolge aber frei ist.

Die so gewonnen Messdaten werden mit verschiedenen Beladungszuständen der Fahrzeuge vervollständigt und mit den subjektiven Beurteilungen der Testfahrer verglichen. Obwohl sich die Mittelwerte der maximalen Querschleunigung von 0,67 g ($6,57 \text{ m/s}^2$) im unbeladenen Zustand auf nur 0,61 g ($5,98 \text{ m/s}^2$) im vollbeladenen Zustand reduzieren, erreicht das schlechteste Fahrzeug im beladenen Zustand weniger als 0,5 g ($< 4,91 \text{ m/s}^2$) während die besten Fahrzeuge sogar noch 0,8 g ($7,85 \text{ m/s}^2$) erreichen.

Der Vergleich der subjektiven Beurteilung durch die Testfahrer mit den stationär ermittelten Messdaten der einzelnen Fahrzeuge zeigt auf, dass selbst erfahrene Testfahrer Schwierigkeiten haben, zwischen Beschleunigungen von 0,45 g und 0,8 g zu unterscheiden. Somit besteht keine Korrelation zwischen der wahrgenommenen Grenze der Fahrspurhaltung und der gemessenen Grenze der Querschleunigung.

Ein weiteres Ergebnis dieser Studie ist, dass die Beurteilung eines Versuchsfahrzeuges oder eines Fahrzeugparameters auch durch das Gefühl des Fahrers im Bezug zu seinem gewohnten Privatfahrzeug stark beeinflusst wird und damit das Gewöhnungs- bzw. Anpassungsverhalten eines Normalfahrers an das eigene Fahrzeug unterstrichen wird. Der Autor [1] sieht in der Zusammenfassung der Versuchsergebnisse die Bestätigung bisheriger Erkenntnisse der Unfallforschung, dass im normalen Fahrbetrieb die auftretenden Querbeschleunigungen wesentlich unterhalb der theoretisch möglichen Beschleunigungen liegen und die Fahrer diese Sicherheitsreserve nur schwer abschätzen können.

Die Untersuchungen in [2] ergeben, dass sich die bis dato in der Verkehrsunfallanalyse verwendete Querbeschleunigung nicht mit Hilfe der Stabilitätsgrenze des Fahrzeugs einstufen lässt. Die Bereitschaft des Fahrers zu bestimmten Querbeschleunigungen sei im wesentlichen von zwei Faktoren abhängig:

- erstens von der Frage, ob eine Kurve oder ein Spurwechsel durchfahren wird
- zweitens von der gefahrenen Geschwindigkeit

Für beide Fälle wurden die in Abbildung 1 und 2 dargestellten Diagramme aufgezeigt.

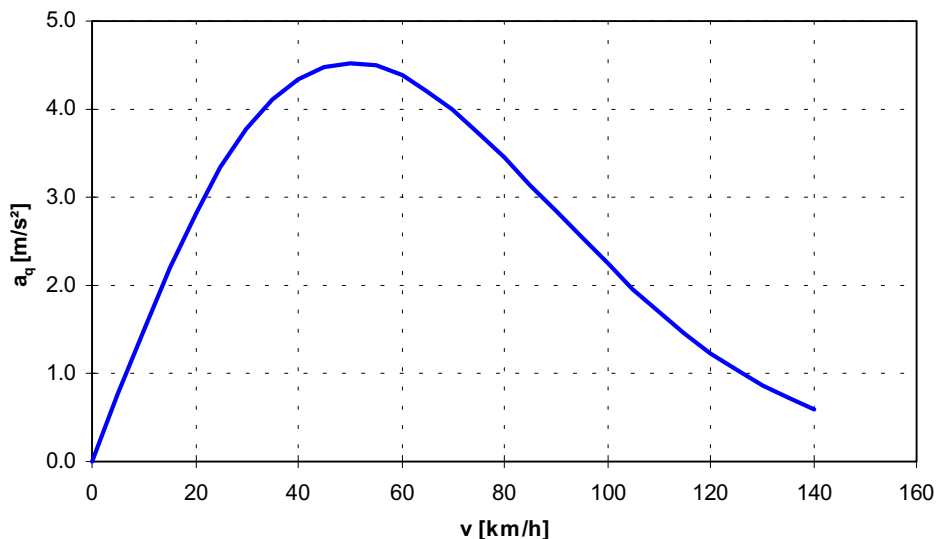


Abb. 1: Sicherheitsgrenze des Normalfahrers bei Kurvenfahrt

Als ein wichtiges Ergebnis wird festgehalten, dass die Bereitschaft eines Fahrers zu hohen Querschleunigungen abnimmt, je höher die gefahrene Geschwindigkeit ist. Die in [6] beschriebene Sicherheitsgrenze des Normalfahres bei Kurvenfahrten erreicht bei einem Geschwindigkeitsniveau von 50 km/h ein Maximum von ca. 4,5 m/s².

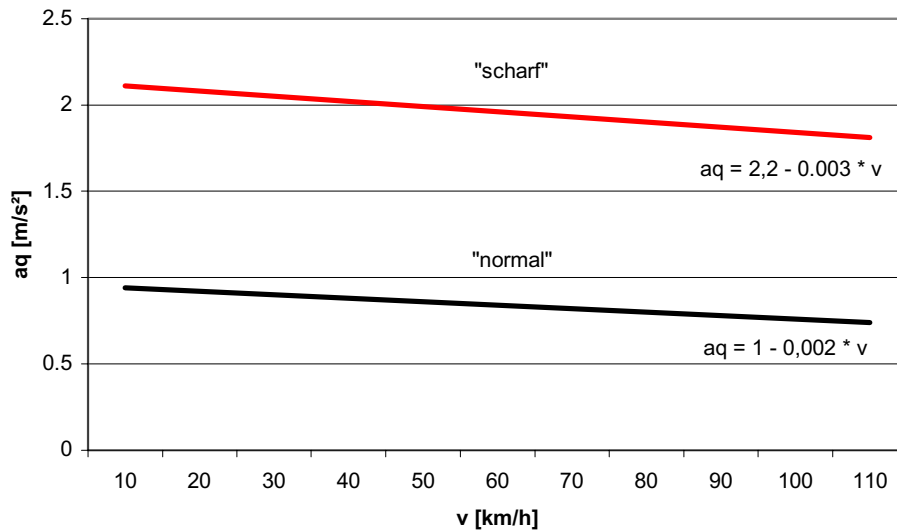


Abb. 2: Querschleunigung bei Spurwechselvorgängen

Die Spurwechselvorgänge werden in „scharf“ und „normal“ eingeteilt. Während die Obergrenze bei scharfen Spurwechselvorgängen bei 2,5 m/s² (bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h) von den Insassen bereits als unangenehm empfunden wird, liegen die normalen Spurwechselvorgänge im gesamten Geschwindigkeitsbereich unterhalb von 1 m/s².

Die Audi AG [3] hat Untersuchungen über den Erfahrungsbereich des Normalfahrers angestellt und die Ergebnisse zu Abbildung 3 abstrahiert. In ihr wird gezeigt, dass deutliche Sicherheitsreserven zwischen dem Erfahrungsbereich des Normalfahrers und dem Grenzbereich des Fahrzeugs bestehen.

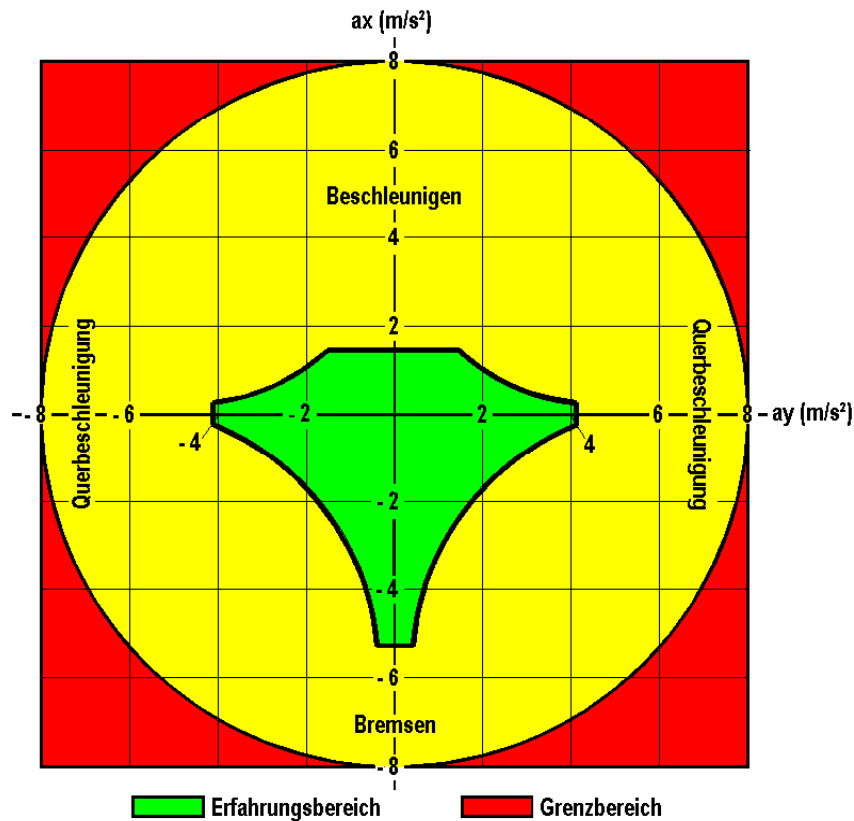


Abb. 3: Erfahrungsbereich des Normalfahrers

In [4] werden Untersuchungen zum Regelkreis Fahrer-Fahrzeug-Fahrbahn angestellt. Hierbei wird speziell auf den Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn und dessen Inanspruchnahme durch den Fahrer eingegangen. Die Autoren stellen den Unterschied zwischen den Fahrer-Charakteren („normal“ und „sportlich“) in Punkt-Wolken-Diagrammen dar (Abbildung 3a). Bei dem Sportlichen Fahrer fallen insbesondere die hohen Querbeschleunigungen bis 8 m/s^2 auf.

In Abbildung 3b wird das Fahrverhalten als Funktion der Querbeschleunigung über der Fahrgeschwindigkeit für beide Fahrer-Charaktere dargestellt. Während beim normalen Fahrer die Querbeschleunigung mit steigender Geschwindigkeit deutlich abnimmt, so bleibt sie beim sportlichen Fahrer über den gesamten Geschwindigkeitsbereich bis 130 km/h nahezu konstant.

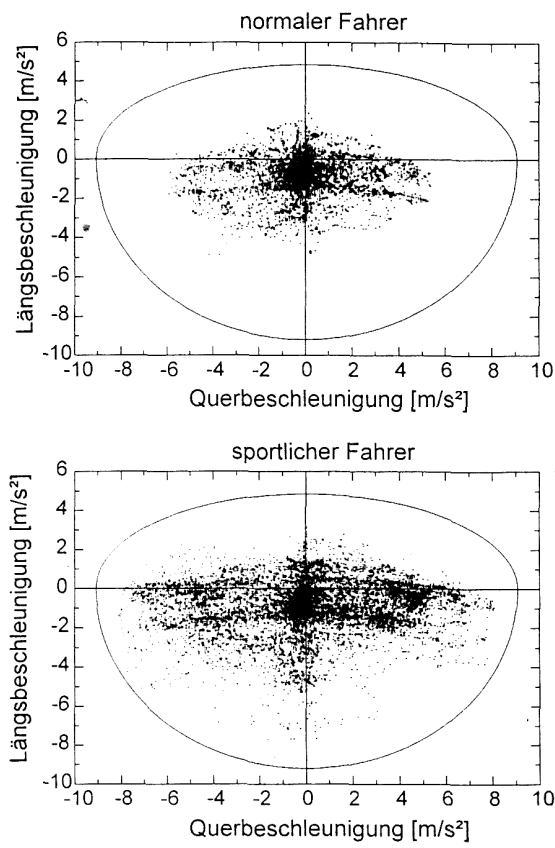


Abb. 3a: Punkt-Wolken-Diagramm für den Vergleich der Beschleunigungsausnutzung zweier Fahrer

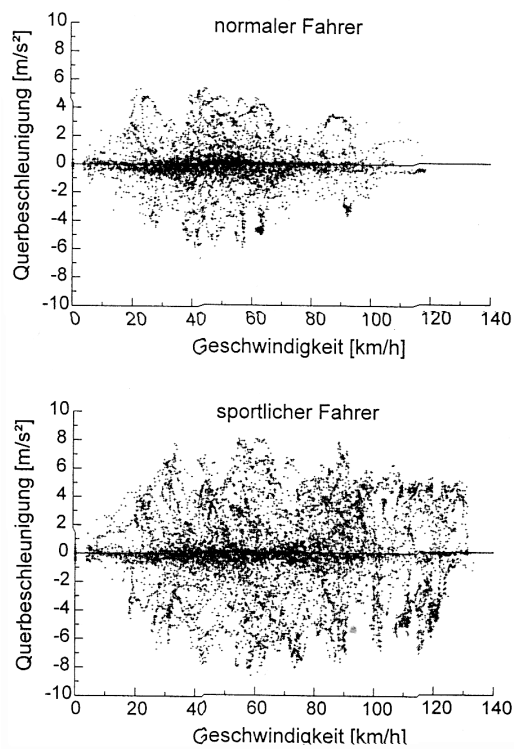


Abb. 3b: Fahrverhalten als Funktion der Querbeschleunigung über der Fahrgeschwindigkeit für den normalen und den sportlichen Fahrer

Die größten Querschleunigungen von gut 5 m/s^2 erreicht der normal Fahrer bei einem Geschwindigkeitsniveau von 40 – 60 km/h. In der Abbildung 3c werden die Auswirkungen der Strecke auf die Inanspruchnahme des Querschleunigungspotentials dargestellt. Die Autoren stellen in diesem Zusammenhang eine starke Streckenabhängigkeit fest.

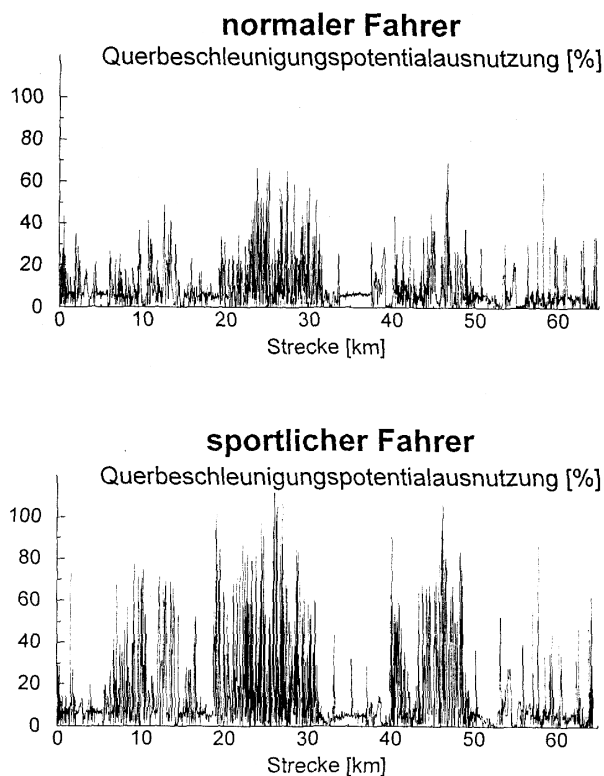


Abb. 3c:
Auswirkungen der Strecke auf die Querbeschleunigungspotentialausnutzung

2.1.2 Straßenbauvorschriften

In [5] werden die Vorschriften, die der straßenplanende Bauingenieur zu berücksichtigen hat, dargelegt. Es wird zwischen zwei Arten der Trassierungsregeln unterschieden:

Art A gibt Antworten auf rein physikalische Phänomene des Kraftverkehrs auf der Straße, wie z. B. der Fahrdynamik, Reibung zwischen Fahrzeug und Fahrbahn.

Art B gibt Antworten der gleichen Art wie oben, jedoch unter zusätzlicher Einbeziehung von physiologischen und/oder psychologischen Kraftfahrerphänomenen wie der Leistung des menschlichen Sehapparates oder des menschlichem Reaktionsvermögens.

Der für die vorliegende Ausarbeitung interessante Aspekt ist die detaillierte Gesamtübersicht über die Entwicklung der konkreten Grenzwerte im Kurvenbau. Auf die einzelnen Richtlinien und Vorschläge zum Kurvenbau soll wegen ihres Umfangs nicht eingegangen werden und es wird an dieser Stelle auf die Richtlinien für die Anlage von Straßen (RAS) [6] und Richtlinien für die Anlage von Landstraßen (RAL) [7] verwiesen.

In Abbildung 4 werden die Richtlinienausgaben von 1937 bis 1995 bezüglich der Mindestradien bei Maximalquerneigung für ausgewählte Geschwindigkeiten im Kurvenbau aufge-

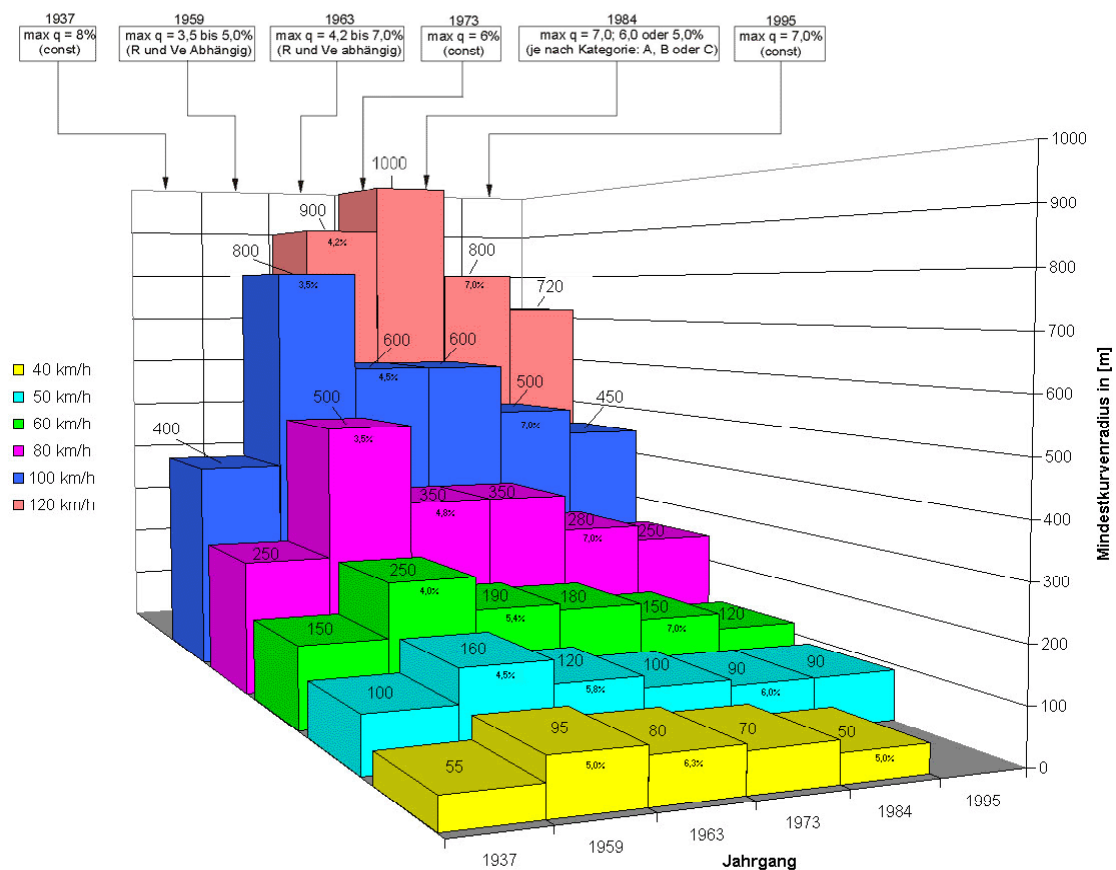


Abb. 4: Mindestkurvenradien für ausgewählte Geschwindigkeiten

schlüsselt. In den Kästchen über dem Diagramm ist jeweils angegeben, welche Querneigungsvoraussetzungen der Mindestradienberechnung je Regelwerk zugrunde liegen. Der relativ hohe Wert von 8% im Regelwerk von 1937 lässt sich dadurch erklären, dass damals stärkere Längsneigungen üblich waren. Während die Mindestradien von 1937 im wesentli-

chen Erfahrungswerte sind, wird ab 1959 die bekannte auf physikalischen Modellvorstellungen beruhende Beziehung zwischen Kurvenradius, Querneigung und Tangentialgeschwindigkeit mit Berücksichtigung des Kraftschlusses und Ausnutzungsgrades zugrunde gelegt.

Die 120-km/h-Balken gelten ausschließlich für zweibahnige Straßen. Im Regelwerk von 1984 steigt die zulässige Maximalquerneigung mit zunehmender Geschwindigkeit, während sie 1959 und 1963 mit zunehmender Geschwindigkeit fällt. Die zugrundeliegende sicherheitstechnische Modellvorstellung wurde also zwischen 1963 und 1984 auf den Kopf gestellt. Es fällt auf, dass in der fast 60-jährigen Zeitspanne der Mindestradius bei 100 km/h im Jahr 1995 nahezu wieder an der gleichen Stelle wie 1937 angelangt ist.

In Tabelle 1 wird das Quadrat der Geschwindigkeit mit dem zugehörigen kleinsten Mindestradius, des chronologischen Regelwerkes, ins Verhältnis gesetzt. Da Änderungen der baulichen Vorschriften nur bei Neu- oder Umbau von Straßen berücksichtigt werden und bei bereits bestehenden Straßen nicht greifen, erhält man auf diese Weise konkrete Zahlenwerte für die maximalen Querbeschleunigungen in Kurven, die dem Kraftfahrer zugemutet werden (bei Einhaltung der Höchstgeschwindigkeit und maximaler Querneigung).

Geschwindigkeit [km/h]	40	50	60	80	100	100	120
Mindestradius [m]	50	90	120	250	400	450	720
Querbeschleunigung [m/s^2]	2,47	2,14	2,31	1,97	1,92	1,71	1,54
Jahrgang	1984	1984	1995	1995	1937	1995	1995

Tabelle 1: Maximal abverlangte Querbeschleunigungen

In Abbildung 5 sind diese Querbeschleunigungen über den zugehörigen Geschwindigkeiten aufgetragen. Der kleinste Radius bei 100 km/h stammt aus dem ältesten Regelwerk von 1937 und wurde deshalb mit dem nächstgrößeren Radius von 1995 ergänzt.

Die lineare Trendlinie zeigt, dass der Kurvenradius überproportional mit der Geschwindigkeit ansteigt. Dem Kraftfahrer werden bei höheren Geschwindigkeiten also kleinere Beschleunigungen abverlangt.

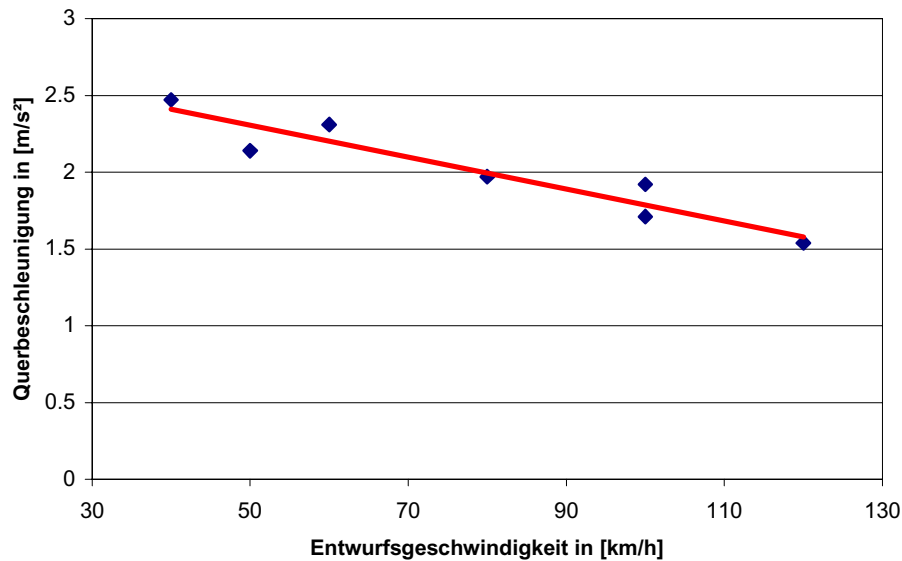


Abb. 5: Querbeschleunigung nach RAL

2.2 Bremsverzögerungen

2.2.1 Untersuchungen

Bei einer Veröffentlichung des VDI aus dem Jahr 1993 [8] geht es um die Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen. Die Autoren vergleichen Daten aus ihren eigenen experimentellen Untersuchungen zum Bremsverhalten des Normalfahrers mit denen von [9] aus dem Jahr 1976.

Die Verfasser kommen zu dem Schluss, dass die als „normal“ empfundene Bremsverzögerung mit zunehmender Annäherungsgeschwindigkeit ansteigt. Der Bericht liefert außerdem konkrete Zahlenwerte über Bremsverzögerungen des Normalfahrers beim Abbremsen aus verschiedenen Anfangsgeschwindigkeiten. Für das Abbremsen bis zum Stillstand werden z. B. bei Annäherungsgeschwindigkeiten von 25 – 30 km/h mittlere Bremsverzögerungen von 1,5 – 2,7 m/s² gemessen. Bei 35 – 40 km/h liegen die Beschleunigungen bei 1,7 – 3,2 m/s².

In [10] wird das Fahrverhalten einzelner Fahrer im normalen Verkehrsablauf untersucht. Hauptaugenmerk bei den Beschreibungen liegt auf dem Beschleunigungsverhalten in Ab-

hängigkeit von Abstand und Geschwindigkeitsdifferenz zum vorausfahrenden Fahrzeug. Leider werden keine konkreten Beschleunigungswerte angegeben. Die Autoren stellen ein für alle Fahrercharaktere typisches Verhaltensmuster fest: Der Fahrer passt in der Regel sein Verhalten in den jeweiligen Situationen zusätzlich dem Verkehrszustand an. So wird z. B. im dichten Verkehr weniger gedrängt als im teilgebundenen Verkehr.

Dies könnte dann in der Übertragung der Ergebnisse bedeuten, dass eine „normale Bremsung“ auf freier Strecke anders verlaufen wird, als bei einer Kolonnenfahrt mit geringem Abstand zum Vordermann. In [11] wird das Thema „Wirksamkeit der dynamischen Bremsen-Kontrolle“ (DBC dynamic break control) behandelt. In dieser Studie ist das in Abbildung 6 dargelegte Bremsdiagramm aufgeführt. Interessant ist der Graph der typischen Normalbremsung.

Aus welchem Geschwindigkeitsniveau die Bremsungen stattfinden, geht aus den Aufzeichnungen leider nicht hervor, bezeichnend ist jedoch, dass sich für normale Abbremsungen ein Maximalwert von $0,25\text{ g}$ ($2,45\text{ m/s}^2$) abzeichnet.

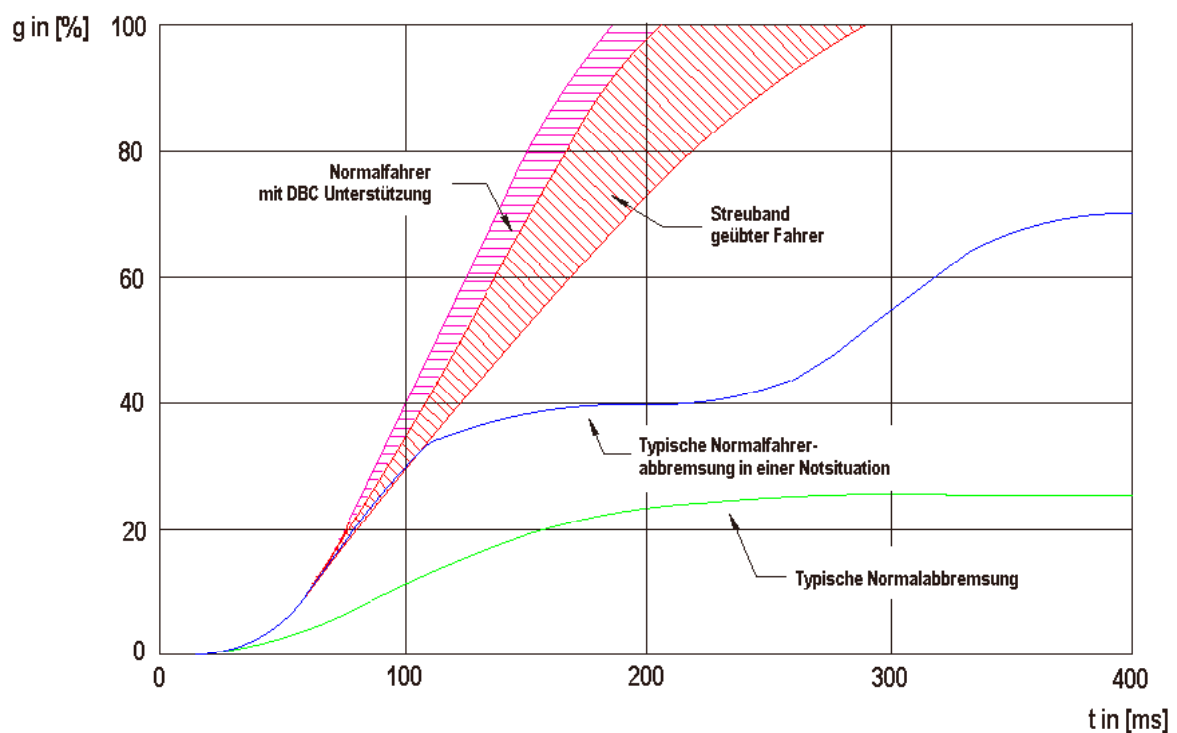


Abb. 6: Abbremsungen mit und ohne DBC

2.2.2 Straßenbauvorschriften

Auch die Länge der Gelbphase an Ampelanlagen impliziert zumutbare Bremsverzögerungen. In der Richtlinie für Lichtsignalanlagen (RiLSA) [12] sind unter anderem die Vorschriften für die Auslegung von Ampelphasen (speziell deren Dauer in Abhängigkeit von der Höchstgeschwindigkeit) festgelegt. Nach [13] wird die Annäherung an eine solche Lichtsignalanlage folgendermaßen beschrieben:

„Die ungünstigste Situation für den Kraftfahrer ergibt sich, wenn die Ampel so auf Gelb springt, dass sich das Fahrzeug am Ende der Gelbphase genau an der Haltelinie befinden würde. Diese Situation stellt sich dann ein, wenn die Entfernung von der Ampel genau derjenigen entspricht, die während der Gelbphase durchfahren wird. Ist das Fahrzeug beim Umspringen auf Gelb näher an der Ampel, so kann der Fahrer mit konstanter Geschwindigkeit weiterfahren. Ist er weiter von der Ampel entfernt und fährt dennoch mit zulässiger Höchstgeschwindigkeit weiter, passiert das Fahrzeug die Ampel bei Rot. Ist das Fahrzeug geringfügig weiter von der Ampel entfernt als dieser Grenzabstand, so fordert dies vom Fahrer die stärkste Abbremsung (wenn man von der gängigen Praxis, das Fahrzeug in solcher Situation zu beschleunigen, einmal absieht).“

Die in Tabelle 2 aufgeführten „geforderten Bremsungen“ geben Aufschluss darüber, welche Bremsverzögerungen dem Autofahrer bei der oben geschilderten Situation zugemutet werden. Die Berechnungen legen eine Reaktionszeit von 1,2 s zugrunde, da bei der Konzeption von Straßen i. d. R. längere Reaktionszeiten veranschlagt werden als bei Straßenverkehrsunfällen.

Zulässige Geschwindigkeit	Gelbphase gemäß RiLSA	Abstand von der Ampel	Nach Verstreichen der Reaktionszeit bleiben	Geforderte Verzögerung
50 km/h	3 s	42 m	1,8 s	3,9 m/s²
60 km/h	4 s	67 m	2,8 s	3,0 m/s²
70 km/h	5 s	97 m	3,8 s	2,6 m/s²

Tabelle 2: Verzögerungswerte bei signalbedingten Anhaltevorgängen

2.3 Anfahrbeschleunigungen

2.3.1 Untersuchungen

In [14] werden Schaltvorgänge und Anfahrbeschleunigungen des Normalfahres im Innerortsverkehr untersucht. Die Autoren stellen für einen durchschnittlichen Anfahrvorgang, den sie aus insgesamt 200 Messungen ermitteln, eine mittlere Beschleunigung von $1,3 \text{ m/s}^2$ nach 6 s Beschleunigungszeit fest (der Mittelwert wurde über dem Fahrerkollektiv und der Zeit gebildet). Um den Einfluss der Streckenführung und der Übersichtlichkeit der Verkehrssituation auf die gewählte Anfahrbeschleunigung eines Fahrzeuges messtechnisch belegen zu können, wurden die Fahrversuche entsprechend der Fahrsituationen in „Geradausfahren“, „Links-“ und „Rechtsabbiegen“ mit unterschiedlichen Kurvenradien differenziert. In der Zusammenfassung werden die Verläufe der realitätsnahen, nichtlinearen Zeit-Geschwindigkeits- und Weg-Zeit-Kurven mit den Verläufen der in der Unfallrekonstruktion üblicherweise verwendeten konstanten Anfahrbeschleunigung ($\approx 1,5 \text{ m/s}^2$) verglichen. Dabei ergaben sich z. T. erheblich, sich zeitlich verändernde, personen-, fahrzeug- und situationsabhängige Abweichungen.

In [15] wird neben dem Anfahrvorgang bei maximaler Beschleunigung, auch das Anfahrverhalten des Normalfahrers an Kreuzungen untersucht. Die Autoren kommen in der Auswertung ihrer Versuche zu folgendem Ergebnis:

Die vom Fahrer gewählte Anfahrbeschleunigung ist nahezu unabhängig von der Fahrzeugkategorie (Klein-, Mittel- oder Sportwagen).

Die vom Fahrer angestrebte Endgeschwindigkeit hat keinen Einfluss auf die Wahl der Anfahrbeschleunigung.

Die Ausgestaltung der Örtlichkeit (groß und übersichtlich oder klein und unübersichtlich) hat einen größeren Einfluss auf die vom Fahrer gewählte Anfahrbeschleunigung als sämtliche fahrzeugspezifischen Faktoren.

So werden beim Überqueren großer, übersichtlicher Ampelkreuzungen höhere Anfahrbeschleunigungen ermittelt als beim Überqueren einer schlecht einsehbaren, vorfahrtsberechtigten Straße. Die Autoren halten die Beschreibung des Anfahrverhaltens für Beschleunigungszeiten ≤ 4 Sekunden mit konstanter Beschleunigung, für hinreichend genau. Die ermittelten Beschleunigungswerte liegen im Bereich $1,7 - 2,3 \text{ m/s}^2$.

2.4 Technische Grenzen

Der Vollständigkeit halber seien nun noch Referenzwerte für das z. Zt. technisch Mögliche, (für den öffentlichen Straßenverkehr zugelassene Serienfahrzeuge) nach [16] aufgeführt. Die maximale negative Beschleunigung beim Bremsen beträgt bei einem Porsche Boxter S $11,2 \text{ m/s}^2$. Die maximale Beschleunigung ist für einen 911 Turbo mit $5,8 \text{ m/s}^2$ angegeben. Verblüffend ist auch die mit diesem Fahrzeug erzielte Querschleunigung von $11,28 \text{ m/s}^2$. Dass dieser Wert noch geringfügig über der maximalen Verzögerung liegt, wird mit aerodynamischen und reifentechnischen Einflüssen erklärt. Die Regelgrenze von Elektronischen Stabilitätsprogrammen (ESP) liegt bei solchen Fahrzeugen bei $8,8 - 9,8 \text{ m/s}^2$.

3 Messtechnik

3.1 Aufbau verschiedener Beschleunigungssensoren

Die älteste klassische Art der Beschleunigungsmessung verwendet einen piezoelektrischen Kristall mit einer darauf sitzenden trägen Masse. Bei Beschleunigung des Sensors treten Trägheitskräfte auf. Diese drücken die Masse gegen die Kristalloberfläche und verursachen so eine elektrische Ladungsdifferenz, welche nach der Beziehung $U = \frac{dQ}{ds}$ (Die Spannung U ist gleich dem Quotient aus elektrischer Ladung Q und dem Abstand der Platten s) in eine proportionale Spannung umgerechnet werden kann. Dieses Prinzip funktioniert allerdings nur dynamisch, nicht statisch, denn die Ladung bleibt nicht beliebig lange erhalten, sondern fließt mit der Zeit ab. Für langsam ablaufende Beschleunigungsvorgänge oder Neigungsmessungen sind solche Sensoren deshalb ungeeignet. Ihr Haupteinsatzgebiet ist vielmehr die industrielle Vibrationsmessung. Sie arbeiten sehr zuverlässig, für Massenanwendungen in Kraftfahrzeugen und Konsumgütern sind sie allerdings zu teuer.

Bei statischen Beschleunigungssensoren ist die träge Masse an einer Feder mechanisch beweglich aufgehängt. Bei Beschleunigung ändert sie ihre Position gegenüber dem feststehenden Substrat. Zur Umwandlung in ein elektrisches Signal werden die Kapazitätsänderungen zwischen der Masse und dem Substrat ausgewertet. Eine andere Möglichkeit der Auswertung besteht darin, die Widerstandsänderungen aufgrund Verformungen der auf der Feder sitzen piezoresistive Elemente auszuwerten. Diese Sensoren können im Gegensatz zu den piezoelektrischen Sensoren die Erdbeschleunigung ohne zeitliche Einschränkungen erfassen. Daher lassen sie sich zur kontaktlosen Neigungsmessung und auch für langsam ablaufende Beschleunigungsmessungen einsetzen.

In ihren modernsten Versionen sind derartige Sensoren in Silizium-Mikromechanik ausgeführt. Man unterscheidet auch hier zwischen piezoelektrischer und piezoresistiver Bauweise. Bei der piezoelektrischen Bauweise (kapazitiv) greifen kammartige Strukturen von feststehenden und bewegten Teilen ineinander, die sich bei Beschleunigung gegeneinander verschieben. Das bewegte Element besteht aus einkristallinem Silizium und hängt an nur wenigen Mikrometer dünnen Stegen. Die elektronische Signalauswertung registriert die

proportional zur Beschleunigung auftretenden Kapazitätsänderungen. Ein solcher Sensorbaustein kam für die nachfolgenden Messungen zum Einsatz. Wegen der relativ aufwendigen Fertigung ist dieser Sensortyp bei Massenanwendungen noch nicht sehr verbreitet.

Der Vollständigkeit halber sei noch ein weiterer Sensor zur Beschleunigungsmessung genannt. Er funktioniert nach dem Prinzip der Thermischen Konvektion. Den Kern eines solchen Sensors bildet ein Heizelement, neben dem auf jeder Seite in gewissem Abstand ein Temperatursensor sitzt. Die drei Elemente sind in einem hermetisch dichten Gehäuse verkapselt. Wird der Heizer von Strom durchflossen, erhöht sich seine Temperatur und damit auch die der Luft in der näheren Umgebung. Die durch Beschleunigung auftretenden Trägheitskräfte verursachen Verschiebungen in den erwärmten Luftschichten. Die Temperaturverteilung wird unsymmetrisch und kann somit in Beschleunigung oder Neigungswinkel umgerechnet werden.

3.2 Die Funktionsweise des Beschleunigungsaufnehmers ADXL 202

Der ADXL 202 ist ein kostengünstiger, mit geringer Energie auskommender, vollständiger Zwei-Achsen-Beschleunigungsaufnehmer für Messungen in einem Bereich von $\pm 2 \text{ g}$ ($\pm 19,62 \text{ m/s}^2$). Er ist in der Lage, dynamische Beschleunigung wie z. B. Vibrationen oder auch statische Beschleunigung wie z. B. Gravitation zu messen.

Die Hauptkomponente dieses Messsystems, bestehend aus einem monolithischen IC, beinhaltet einen mikromechanischen Sensor, der auf einer Polysiliziumoberfläche aufgebracht ist. Das Polysilizium ermöglicht eine elastische Aufhängung der Struktur über der Oberfläche des Wafers und verleiht Stabilität gegenüber den auftretenden Beschleunigungskräften.

Wie schon zuvor beschrieben, lenkt die Trägheitskraft aufgrund externer Beschleunigung eine seismische Masse im Inneren des Sensors aus. Diese Auslenkung verursacht eine Änderung des Abstandes zwischen den Elektroden eines Differentialkondensators, was wiederum zu einer Kapazitätsänderung führt und einen Schwingkreis verstimmt. Nachgeschaltet ist für jeden Kanal ein Demodulator, der in Abhängigkeit der Auslenkung ein wechselndes Ausgangssignal erzeugt. Für jede Achse wandelt eine Schaltstufe das Analog-

signal in ein pulsbreitenmoduliertes digitales Signal um, welches mit dem Counter- / Timerport eines Mikroprozessors direkt dekodiert werden kann. Im Mikroprozessor

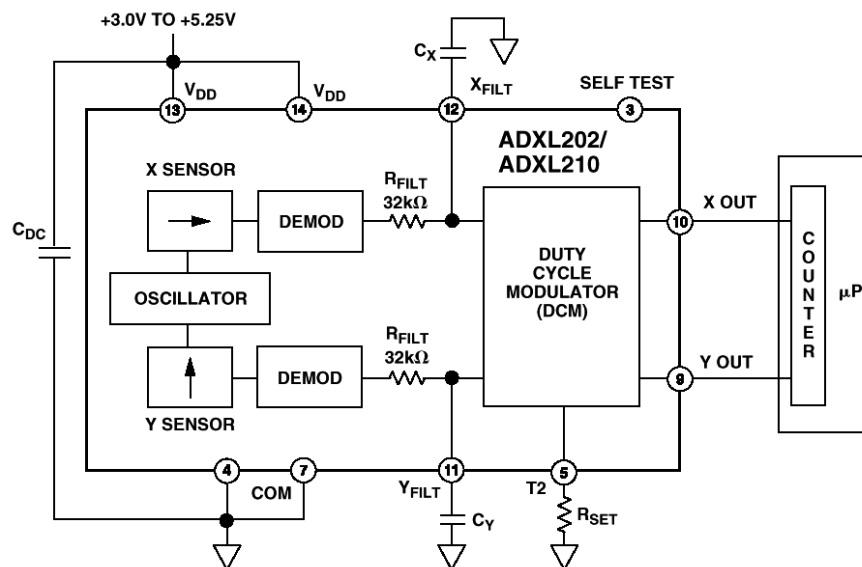


Abb. 7: Blockschaltbild ADXL 202

angelangt, wird das Pulsbreitensignal so verarbeitet, dass das Tastverhältnis als digitaler Wert zur Verfügung steht. Dieser Wert wird über eine serielle Schnittstelle (RS 232) zum PC übertragen.

Ursprünglich kam der ADXL 202 auf einem Evaluationboard¹ zum Einsatz. Für eine schnelle und unkomplizierte Auswertung ist es aber sinnvoll, zusätzliche Signale wie z. B. die Geschwindigkeit oder die Betätigung des Bremspedals gleichzeitig während der Beschleunigungsmessung zu erfassen. Um diesen zusätzlichen Aufgaben gerecht zu werden, wird der Ausgang des Sensors nicht mit dem vorhandenen Mikroprozessor des Evaluationboards, sondern mit einem anderen leistungsfähigeren Mikroprozessor ausgewertet.

¹ Das Evaluationboard (Entwicklungsplatine) ist vom Hersteller speziell dafür entworfen, dem Konstrukteur die Wirkungsweise des Bausteins in einer Applikation demonstrieren zu können, ohne dass dieser dafür die nötige Hard- bzw. Software entwickeln muß.

3.3 Die Funktionsweise des Sensors im Detail

3.3.1 Das amplitudenmodulierte Signal

Wie bereits oben beschrieben, bildet die mikromechanische Stufe einen variablen Kondensator nach. Über diesen wird ein von einem auf dem IC integrierten Hochfrequenz-Generator erzeugtes Signal geleitet. Durch das Hochpassverhalten des Kondensators, der noch dazu variabel ist, entsteht am Ausgang ein Signal mit variabler Amplitude. Ist der Abstand der beweglichen mikromechanischen Komponente zur feststehenden Komponente gering, so ist die Kapazität des Kondensators hoch. Damit ist die Kopplung für das Hochfrequenzsignal ebenfalls hoch, und dadurch dessen Ausgangsamplitude. Ein größerer Abstand der Mikromechanik erzeugt entsprechend geringe Ausgangsamplituden.

Bevor dieses Signal jedoch ausgewertet werden kann, wird es gleichgerichtet und tiefpassgefiltert. So „verschwindet“ die Hochfrequenz und es entsteht ein analoges Signal, dessen Amplitude proportional zur Amplitude des Hochfrequenzsignals ist. Das so erzeugte Signal steht über einem internen $32\text{ k}\Omega$ Widerstand an einem Kontakt des ICs zur Verfügung. Hier kann es abgegriffen und weiterverarbeitet werden. Die an diesem Kontakt anliegende Spannung ist proportional zur Beschleunigung.

Es besteht zusätzlich die Möglichkeit einen externen Kondensator anzuschließen, der mit dem internen Widerstand als Tiefpass wirkt. Je größer der Kondensator, desto „ruhiger“ (niederfrequent) ist das Signal. Es wird jedoch durch diesen Tiefpass auch träger. Hier gilt es, für die gewünschte Applikation einen Kompromiss aus maximal auszuwertender Frequenz des Beschleunigungssignals und der gewünschten Messgenauigkeit zu finden. Ein großer Kondensator erhöht die Auflösung und beugt somit dem *Aliasing*² vor.

Die Grenzfrequenz des anliegenden Analogsignals kann mit Hilfe dieses Kondensators zwischen 0,01 Hz und 5 kHz justiert werden. Gleichzeitig fällt mit dem Erhöhen der Auflösung die Grenzfrequenz des Sensors. Die Standardabweichung σ (RMS) kann nach Her-

² Aliasing = Rückfaltung (siehe Seite 22)

stellerangaben gemäß : $\sigma = \frac{0,005 \frac{m}{s^2}}{\sqrt{f}}$ berechnet werden.

Dabei bezeichnet f die über den äußeren Widerstand eingestellte Grenzfrequenz des Sensors (s. u.). Bei einer Bandbreite unter 60 Hz können so noch Signale unter 5 mg (0,049 m/s²) aufgelöst werden. Ein einzelner Widerstand setzt die Periodendauer für einen kompletten Zyklus (T_2 bzw. T_4). Dieser kann zwischen 0,5 ms und 10 ms gesetzt werden.

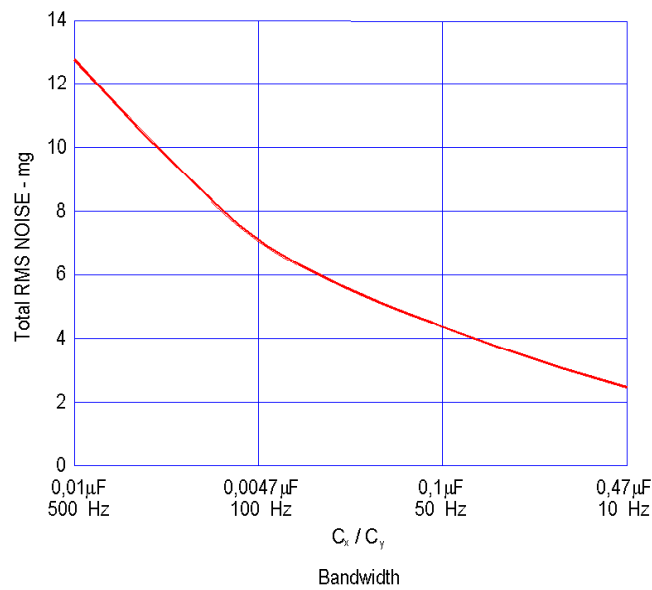


Abb. 8: RMS über Bandbreite

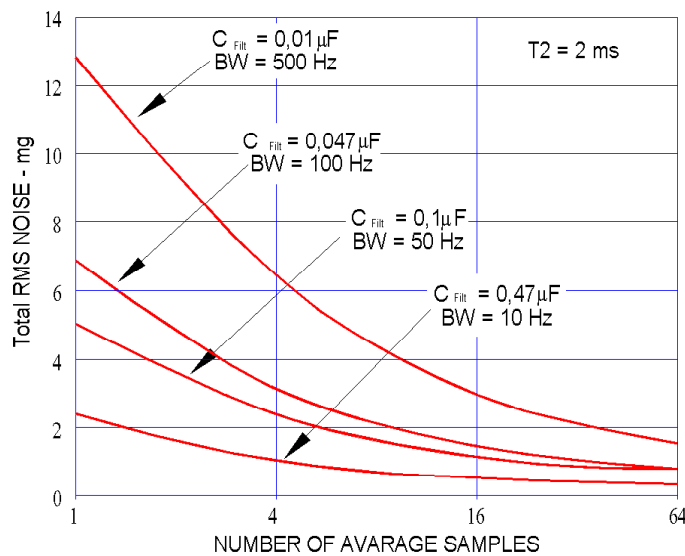


Abb. 9: RMS bei unterschiedlicher Abtastrate

3.3.2 Das pulsbreitenmodulierte Signal

Nach der Tiefpassfilterung wird das analoge Signal in ein pulsbreitenmoduliertes Signal konvertiert (PWM = pulse width modulated). Eine ebenfalls im IC integrierte Stufe erzeugt ein Rechtecksignal. Die Frequenz dieses Signals ist über einen extern zugänglichen Widerstand einstellbar. Dies ist sinnvoll, um die Ausgangsfrequenz optimal an die Möglichkeiten eines auswertenden Mikrocontrollers anzupassen. Diese haben oft feste Messzyklen und so kann der Messbereich optimal ausgenutzt werden.

Dieses Rechtecksignal wird nun von dem analogen Signal in seinem Tastverhältnis beeinflusst. Ein Beispiel: Die Frequenz ist durch den externen Widerstand auf 1 kHz eingestellt, somit 1000 Perioden pro Sekunde mit 1 ms Periodendauer. Das Rechtecksignal ist folglich 0,5 ms auf High-Pegel und 0,5 ms auf Low-Pegel. Dies gilt für den Sensor in Mittellage (0 g). Wird der Sensor ausgelenkt, so verändert sich das Tastverhältnis um 12,5 % pro g. Das bedeutet, wenn der Sensor mit 2 g ausgelenkt wird, so ändert sich das Verhältnis von 50 % (0,5 ms/0,5 ms) auf 25 %, also 0,25 ms High-Pegel zu 0,75 ms Low-Pegel. Dieses Verhältnis ist recht einfach und mit hinreichender Genauigkeit über einen Mikrocontroller auszuwerten, da Zeitmessungen – im Gegensatz zur Messung analoger Größen – von der Controller internen Hardware durchgeführt werden können.

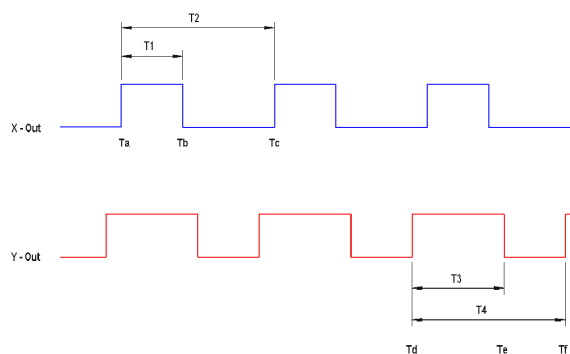


Abb. 10: Pulsbreitendekodierung

Die einfachste Art ein pulsbreitenmoduliertes Signal zu entschlüsseln ist in Abbildung 10 dargestellt. Bei einer steigenden Flanke des Rechtecksignals am X-Ausgang wird im Mikrocontroller ein Zähler gestartet ($T_a = 0$). An der darauffolgenden fallenden Flanke wird

der Zählerstand gespeichert (T_b) und an der nächsten steigenden Flanke wird der Zähler wieder gestoppt (T_c). Der gleiche Vorgang läuft parallel für den Y-Ausgang (T_d , T_e und T_f).

Die proportionale Beschleunigung berechnet sich nun aus dem Verhältnis T_1 / T_2 bzw. T_3 / T_4 . In der Ruhelage (0 g) beträgt das Pulsbreitenverhältnis 0,5. Eine Beschleunigung von 1 g verursacht eine Änderung von $\pm 0,125$. Um einen Pulsbreitenzyklus für den X-Ausgang in die SI-Einheit [m/s^2] umzurechnen, muss somit folgende Rechenoperation durchgeführt werden:

$$a = \frac{\left(\frac{T_1}{T_2} - 0,5\right)}{0,125} \times 9,81 \quad [m/s^2]$$

Dieses leicht nachzuvollziehende Verfahren hat allerdings den Nachteil, dass nur jedes zweite Signal ausgewertet werden kann, da je Kanal zwei aufeinanderfolgende Flanken für eine Messung ausgezählt werden und so auf die nächste steigende Flanke nach T_f gewartet werden muss.

Die nachfolgenden Messungen sind mit einer Signalauflösung von $\pm 0,1 m/s^2$ gefahren. Dabei ist ein festes Zeitraster von 10 Werten pro Sekunde und je Kanal (X, Y) eingestellt. Mit diesen Einstellungen wird dem nachfolgend beschriebenen Effekt vorgebeugt.

3.4 Rückfaltung (Aliasing)

Die digitale Filterung eines sich wiederholenden Signals kann unter bestimmten Umständen Probleme bereiten. Einer der wichtigsten Parameter unter Berücksichtigung der Frequenzcharakteristik ist, die geeignete Abtastrate für ein Signal herauszusuchen. Wird ein Signal öfter abgetastet als notwendig, so wird unnötig Speicherplatz und Prozessorleistung verbraucht. Wird ein Signal mit einer zu geringen Abtastfrequenz abgetastet und damit das Abtasttheorem von Shannon ($f_{abt} > 2 f_{max}$) verletzt, so entstehen bei der Rekonstruktion des Signals Aliasingeffekte [17]. Wie in Abbildung 13 zu sehen ist, führt eine zu niedrige Abtastfrequenz bei der Rekonstruktion zu einem Signal niedrigerer Frequenz, das im ursprünglichen Signal nicht vorhanden war.

Notation

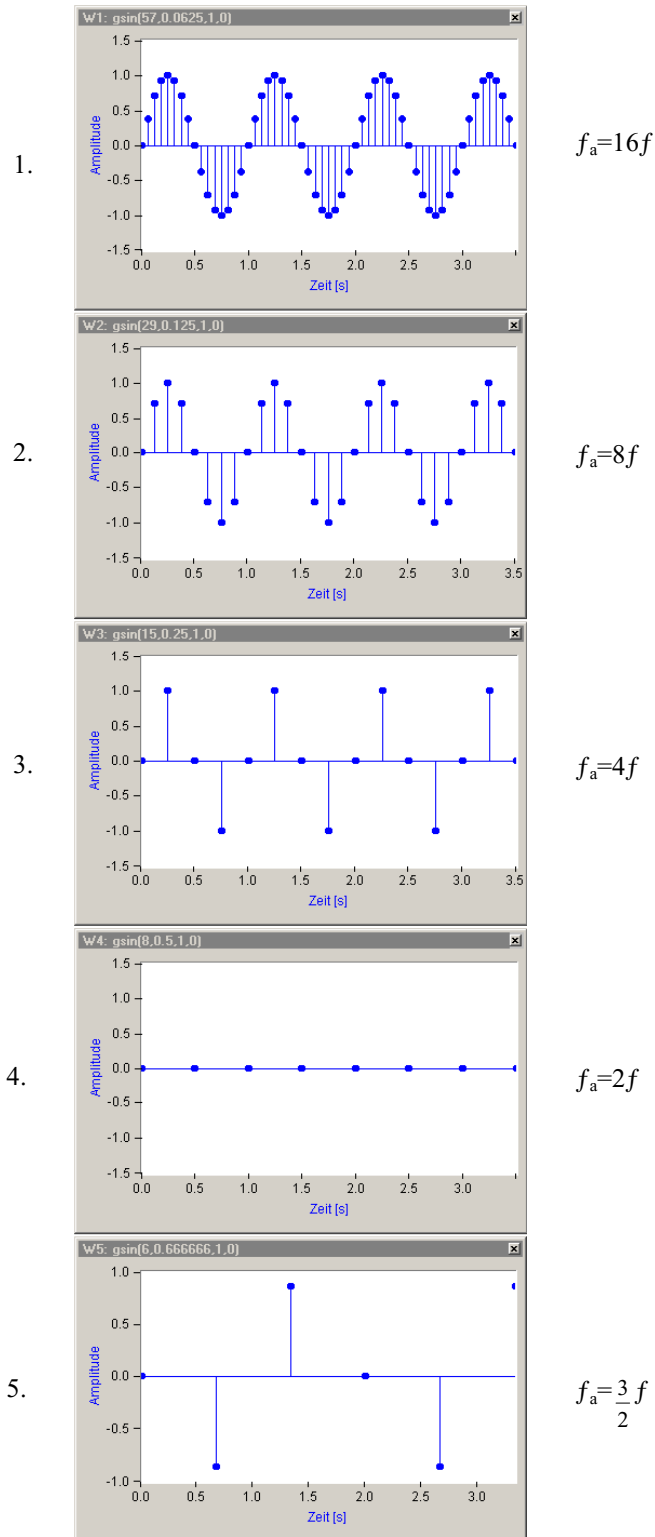


Abb. 11: Degeneration eines 1 Hz Sinussignals

Das Umseitige Beispiel sollen das Phänomen näher erläutern. Dazu zeigt die Abbildung 11 1. und 5. Fenster die Degeneration eines 1 Hz Sinussignals. Alle Abtastungen sind so gewählt, dass sie in der gleichen Phasenlage wie das Originalsignal liegen. Die Abtastfrequenz wird vom 1. bis Fenster 4. je um die Hälfte reduziert. Während man im 1. Fenster, bei einer 16-fachen Überabtastung des Ausgangssignals, den Sinuscharakter deutlich erkennt, so ist im 2. Fenster die Grenze der Erkennbarkeit bei einer 8-fachen Überabtastung erreicht. Im 3. Fenster wird das Ausgangssignal nur noch 4-fach überabgetastet. Beim Verbinden der einzelnen Messpunkte würde man ein Sägezahnsignal erhalten. Immerhin liefert diese Abtastung durch die günstige Phasenlage sämtliche Nulldurchgänge und spiegelt die korrekten Maxima und Minima wieder. Eine Rekonstruktion des Ausgangssignals ist also durchaus möglich.

Anders verhält es sich im 4. Fenster. Hier wird zum ersten Mal die oben erwähnte Shannon-Grenzfrequenz erreicht. Die in diesem Zusammenhang ungünstige Phasenlage führt zu einem scheinbar ruhenden Signal, da jedes Mal ein Nulldurchgang abgetastet wird. Eine Rekonstruktion des Signals ist somit nicht möglich. Bei noch geringeren Abtastfrequenzen, wie im 5. Fenster dargestellt ($f_a=1,5f$), werden zwar von Null verschiedenen Messwerte angezeigt, jedoch werden weder die korrekten Maxima und Minima noch sämtliche Nulldurchgänge des Sinussignals angezeigt. Führt man bei solch unterabgetasteten Signalen ($f_{abt} < 2 f_{max}$) eine Fouriertransformation durch, kommt es wie bereits erwähnt zu spektralen Überschneidungen.

Die nachfolgende Abbildung 12 zeigt die Auswirkungen dieser Überschneidungen bei einer Fourier-Analyse. In der linken Spalte ist hierzu ein 1 Hz Sinussignal (rotgestrichelte Linie) mit von oben nach unten abnehmender Abtastfrequenz (blaue Punkte) dargestellt. In der rechten Spalte befindet sich jeweils in gleicher Zeile die zugehörige Fourier-Analyse. Während die Analyse der ersten und zweiten Abtastung (20-fach bzw. 5-fach überabgetastet) die zu erwartende Frequenz des Ausgangssignals von 1 Hz anzeigt, wird in der Analyse des unterabgetasteten Signals (1,2-fache Abtastung) zuerst eine Frequenz von 0,2 Hz und dann die Ausgangsfrequenz im Faltungsprodukt wiedergegeben. Bei dem Vergleich der einzelnen Darstellungen ist die unterschiedliche Skalierung zu berücksichtigen.

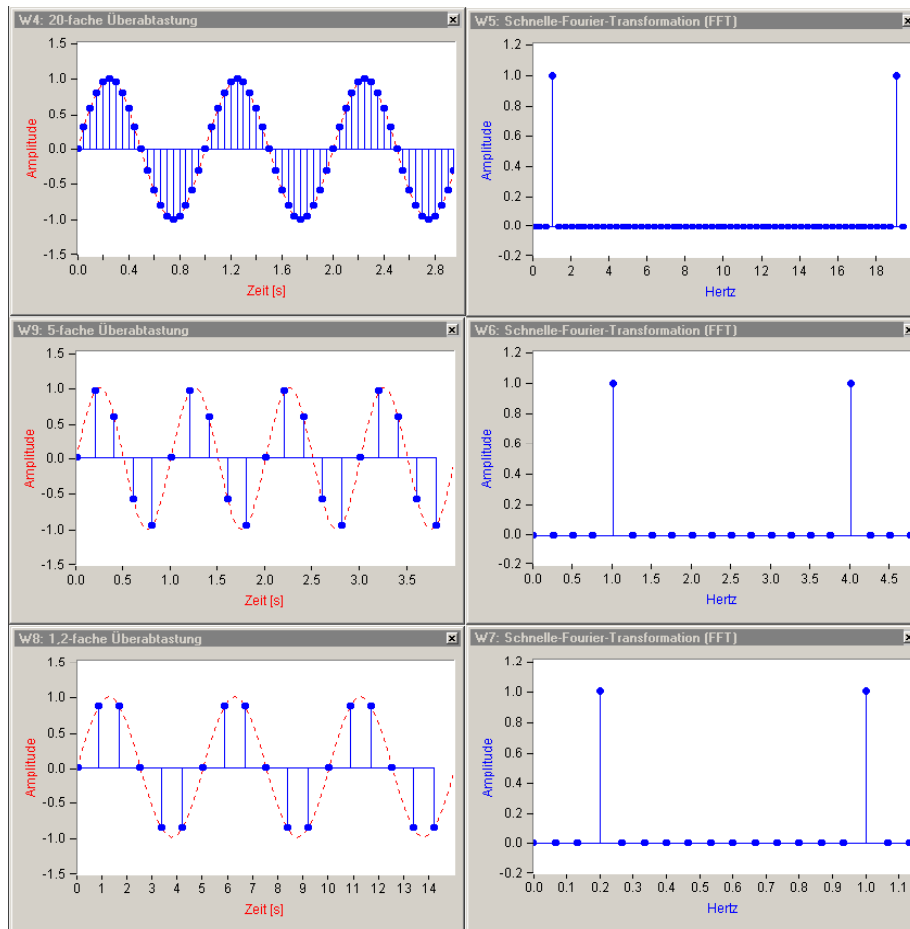


Abb. 12: Fourier-Transformation

Dieses Phänomen, bei dem hochfrequente Komponenten einer Wellenform als niederfrequente Komponenten erscheinen, nennt man Aliasing (dt. = Rückfaltung). In diesem Fall wird die unterabgetastete 1 Hz Sinuswelle „unter anderem Namen“ als 0,2 Hz Sinuswelle an der Grenzfrequenz gespiegelt.

3.5 Die digitale Nachbearbeitung

Die dynamischen Vibrationen des Motors und des Fahrwerks verursachen genau wie das Eigenrauschen des Sensors Signalspitzen. Diese Unschärfen werden mit der digitalen Nachbearbeitung eliminiert. Um eine möglichst genaue Methode für die digitale Nachbearbeitung zu finden, werden verschiedene Filter an einem Modell des zu erwartenden Signals ausprobiert. Ein solches Modell ist stark vereinfacht und auf das Wesentliche reduziert.

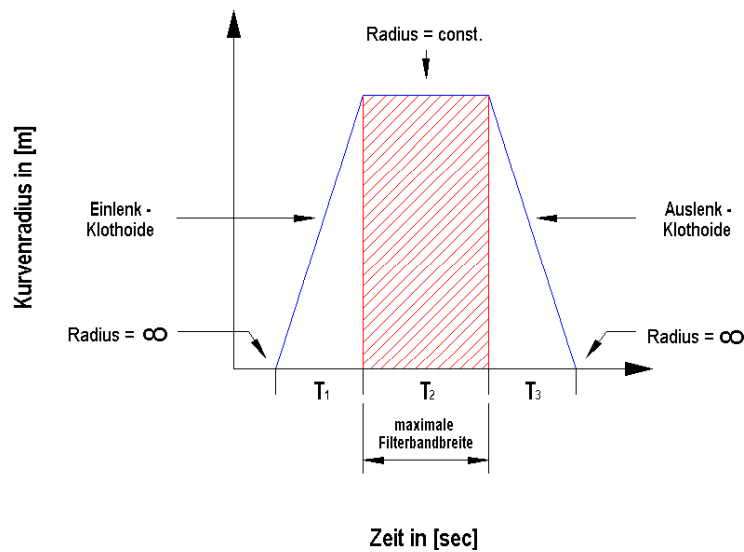
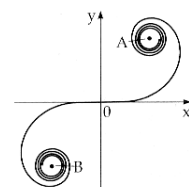


Abb. 13: Abstraktion eines Abbiegevorganges

In Abbildung 13 wird das Modell eines Lenkvorganges dargestellt. Das Hauptaugenmerk ist auf die maximal auftretenden Querbeschleunigungen bei normalen Fahrmanövern im öffentlichen Straßenverkehr gerichtet. Beim Durchfahren einer Kurve oder eines Einmündungstrichters folgt der Fahrer mit seinem Lenkeinschlag dem Straßenverlauf bzw. den Fahrbahnmarkierungen. Konstante Kurvenradien können aus lenktechnischen Gründen erst nach einer gewissen Einlenkphase erreicht werden. Daher sind Kurven und Einmündungen im modernen Straßenbau durch Klothoiden³ realisiert. Dabei handelt es sich um Übergangsbögen zwischen den Geraden und einer konstanten Krümmung. Das abstrahierte Signal lässt sich mit diesen Parametern in drei signifikante Abschnitte (T_1 bis T_3) einteilen.

Das Durchfahren der Übergangsbögen ist in der Abbildung 13 mit der Ein- bzw. Auslenkklothoide (T_1 bzw. T_3) gekennzeichnet. Im ersten Abschnitt der Einlenkphase (T_1) steigt die Querbeschleunigung kontinuierlich mit dem Kurvenradius an. Im zweiten Ab-

³ Die Klothoide ist eine Kurve, die sich aus der umgekehrten Proportionalität ihres Krümmungsradius r zur Länge des Bogens s ergibt: $r=a^2/s$ ($a>0$). Im Straßenbau wird der Übergang von einer Geraden in eine Kreiskurve durch einen Klothoide-nabschnitt angeglichen.



schnitt (T_2) wird kurzzeitig ein konstanter Radius gefahren indem die Beschleunigung ihr Maximum erreicht, um schließlich im dritten Abschnitt (T_3) wieder auf Null zu fallen.

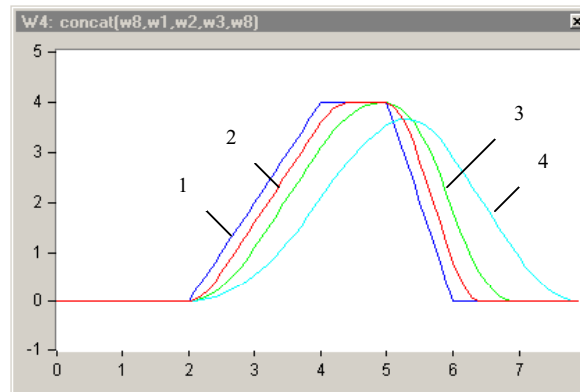


Abb. 14: Anwendung des Filters auf das Modell

Eine Möglichkeit, diese Signalcharakteristik auf einfache Weise maximal zu glätten, bietet die gleitende Mittelwertbildung. In Abbildung 14 ist dieser Filter 1. Ordnung zunächst auf das Modell angewendet. Das Ausgangssignal wird dabei proportional zur Intervallgröße geglättet. Um die maximale Querbeschleunigung nicht zu verfälschen, muss ein Kompromiss zwischen Mittelungszeit und Signaltreue gefunden werden. Die Abbildung 14 zeigt hierzu das modellierte Signal (blau {1}) und drei zugehörige gleitende Mittelwerte (rot {2}, grün {3} und cyan {4}), mit aufsteigend größer werdenden Intervalllängen. Solange das Mittelungsintervall nicht größer als der in Abbildung 13 mit T_2 gekennzeichnete Bereich gewählt wird, bleibt der Maximalwert des Ausgangssignals erhalten (Kurven {2} und {3}). Wird das Intervall jedoch größer gewählt als diese Bandbreite, dann kann das Maximum des Ausgangssignals nicht übereinstimmend wiedergegeben werden (Kurve {4}).

Um nun die Bestimmung der maximalen Intervalllänge besser darstellen zu können, zeigt Abbildung 15 die Querbeschleunigung bei drei kleinradigen Rechtsabbiegevorgängen. In dem Messschrieb ist die Querbeschleunigung a [m/s²] über der Zeit [s] aufgetragen. Das Querbeschleunigungssignal aus dem kleinsten ausgewerteten Abbiegeradius (11 Meter) dient als Referenz für das Auffinden der maximalen Filterbandbreite. Hierzu wird das 1. Signal in Abbildung 15 mit 5-facher Vergrößerung in Abbildung 16 extrahiert.

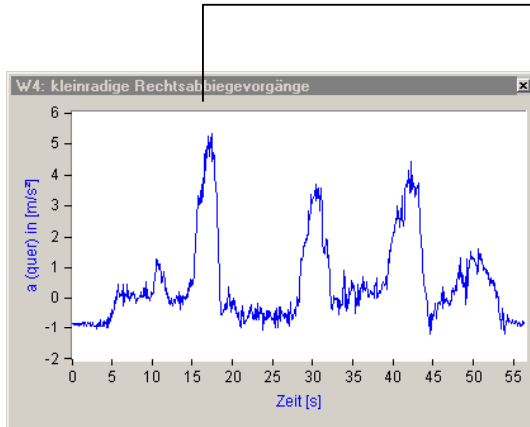


Abb. 15: Querbeschleunigungen von kleinradigen Rechtsabbiegevorgängen

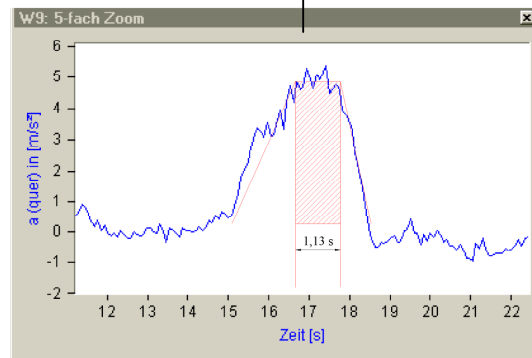


Abb. 16: Messschrieausschnitt in 5-facher Vergrößerung

Zusätzlich ist das zuvor beschriebene Modell einer Kurvenfahrt bzw. eines Abbiegevorgangs eingezeichnet. Der aus der Modellvorstellung als konstant anzunehmende Bereich der maximalen Beschleunigung ist gut 1,1 s lang. Mit zunehmendem Radius steigt die zeitliche Ausdehnung dieses Bereiches. Für die nachfolgenden Messungen wird deshalb eine gleitende Mittelwertbildung über 10 Werte, dies entspricht 1 s, durchgeführt. Diese Bandbreite glättet das Ausgangssignal ausreichend und der Maximalwert wird hinreichend genau wiedergegeben.

In Abbildung 17 sind die zuvor abgebildeten Abbiegevorgänge nochmals aufgeführt. Diesmal sind außer dem blauen Originalsignal drei weitere Mittelungen in den Farben Orange, Grün und Violett abgebildet. Die gleitende Mittelung erzeugt dabei eine Phasenverschiebung, die proportional zur Intervallbreite ist. Obwohl diese einfach zu kompensieren ist, wurde in Abbildung 17 auf die Kompensation verzichtet, um die Signalverläufe optisch besser unterscheiden zu können.

Bei der orangenen Kurve ist ein gleitender Mittelwert über zehn Werte (oder 1 s) gebildet. Die Mittelwertbildung bleibt innerhalb der zuvor beschriebenen maximalen Filterbandbreite (T_2) und gibt somit den Maximalwert der Originalmessung mit ausreichender Genauigkeit wieder. Das grüne und violette Signal hat jeweils eine Intervalllänge von 20 bzw. 30

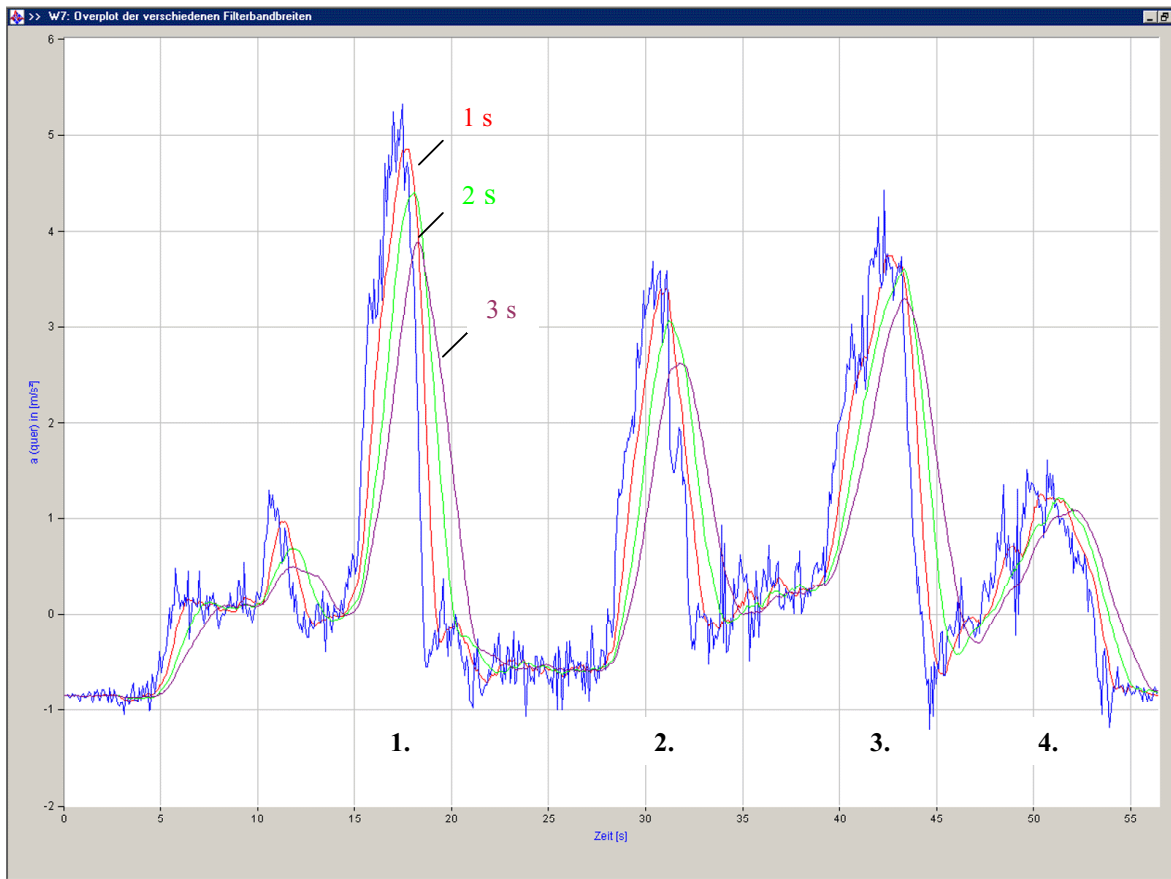


Abb. 17: Verschiedene Bandbreiten bei der gleitenden Mittelwertbildung

Werten (2 s bzw. 3 s). Das Ergebnis ist stärker geglättet und der Maximalwert weicht deutlich vom Original ab.

Bei dem 4. Anstieg der Messkurve ist dies jedoch nicht der Fall. Diese Messung entstand beim Durchfahren einer großradigen Kurve. Der maximale Querschleunigungsverlauf wird hierbei von allen drei Mittlungen relativ genau wiedergegeben. Dies liegt an der länger einwirkenden Querschleunigung. Denn je länger die zeitliche Ausdehnung der Beschleunigungseinwirkung ist, desto genauer gibt die Mittelung in Abhängigkeit ihrer Intervalllänge den Maximalwert wieder.

3.6 Die Positionierung der Messeinheit

Um die Eigenkreisfrequenz $\omega = \sqrt{\frac{c}{m}}$ der Messeinheit möglichst gering zu halten, ist der Beschleunigungsaufnehmer auf einer Stahlplatte mit einem Eigengewicht m von 10 kg angebracht. Die Grundplatte wird im Fußraum des vorderen Beifahrers positioniert. Die Federkonstante c ist somit von den Dämmmaterialien (Teppich, Fußmatte oder Schallschutzmatten) der einzelnen Fahrzeuge abhängig. Bei zu großer Elastizität müssen diese Materialien entfernt oder es muss ein anderer Standort für die Messeinheit⁴ gefunden werden.

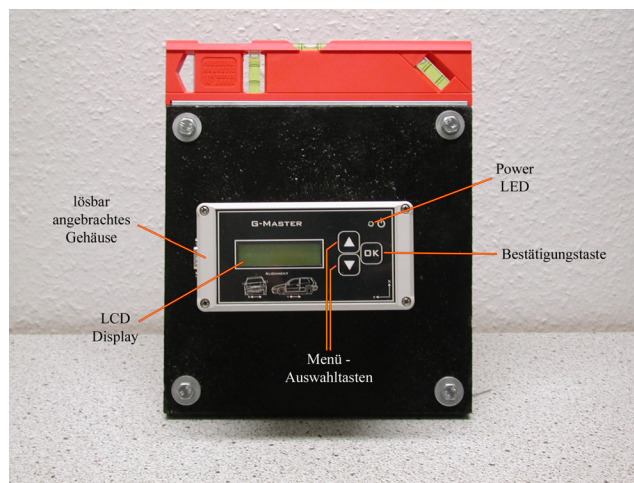


Abb. 18: Draufsicht der Messeinheit

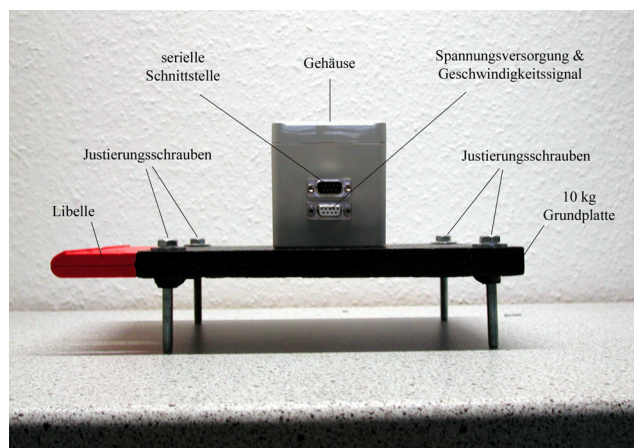


Abb. 19: Seitenansicht der Messeinheit

⁴ Messeinheit wird im weiteren Verlauf des Textes mit ME abgekürzt

Für den Abgleich der X- und Y-Achse der Messeinheit mit der X- und Y-Achse des Fahrzeuges sind zwei Schritte notwendig:

Wenn das Fahrzeug auf ebenem Untergrund steht, kann mit Hilfe der Justierschrauben und der Libellen für jede Achse die Grundplatte ebenenparallel zur Fahrbahn ausgerichtet werden. Diese Ausrichtung wird im Folgenden als „Niveau“-Anpassung bezeichnet. Die Niveaueinstellung ist z.B. dann notwendig, wenn der Fußraum uneben gestaltet oder aber das Fahrzeug ungleichmäßig beladen ist.

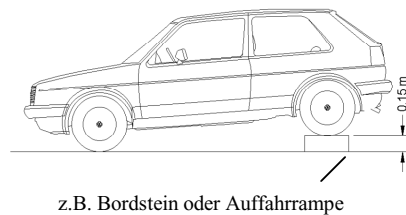


Abb. 20: Anheben des Fzg-Hecks

Um zusätzlich zum Niveau auch die Lage der X- und Y-Koordinate abzugleichen wird das Fahrzeug, wie in Abbildung 20 dargestellt, am Heck angehoben. Nun kann wiederum mit Hilfe der Libellen das lösbar angebrachte Gehäuse der Messeinheit orthogonal zur Fahrzeuglängsachse austariert werden.

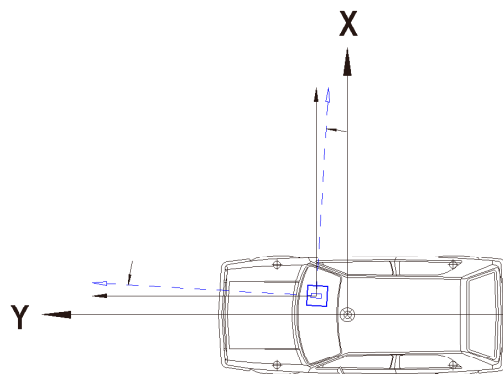


Abb. 21: Abgleich der Koordinatenlage

Wenn die X- und Y-Achse in Niveau und Lage ausbalanciert sind, kann der Nullabgleich innerhalb der Messeinheit erfolgen. Dazu muss das Fahrzeug wieder auf ebenem Unter-

grund stehen. Mit Hilfe der Auswahl-tasten kann das Menü „Kalibrierung“ angewählt werden. Nach dem Bestätigen dieses Menüs wird eine Offset-Messung ausgelöst. Dabei wird das arithmetische Mittel von 50 Werten für jede Achse gebildet. Der jeweilige Offset wird nun innerhalb der Messeinheit mit dem Signal addiert bzw. subtrahiert.

3.6.1 Die Positionierung nach Ackermann

In Abbildung 22 sind die sich einstellenden Lenkwinkel δ_a und δ_i an der Vorderachse eines zweispurigen Fahrzeugs bei einer Kreisfahrt nach Ackermann dargestellt. Die Ackermann-Bedingung ist dadurch gekennzeichnet, dass sich bei nichtmitlenkenden Hinterrädern die in den Mitten der Vorderräder errichteten Senkrechten, mit der Verlängerung der Hinterachsmittellinie in einem Punkt (M_A) schneiden. Auf diese Weise entstehen am kurveninneren und kurvenäußeren Vorderrad unterschiedliche Einschlagwinkel (δ_i bzw. δ_a). Für Querbeschleunigungsmessungen ist demnach die Messeinheit in der Mitte der Hinterachse am günstigsten platziert, da hier die reine Querbeschleunigung einwirkt, ohne dass die Längsbeschleunigung in das Signal einkoppelt.

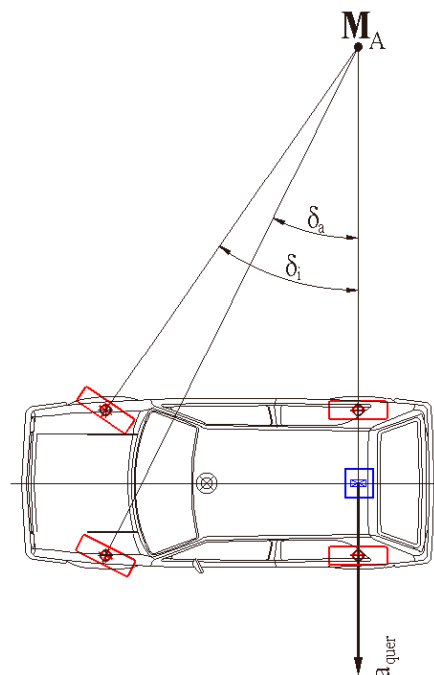
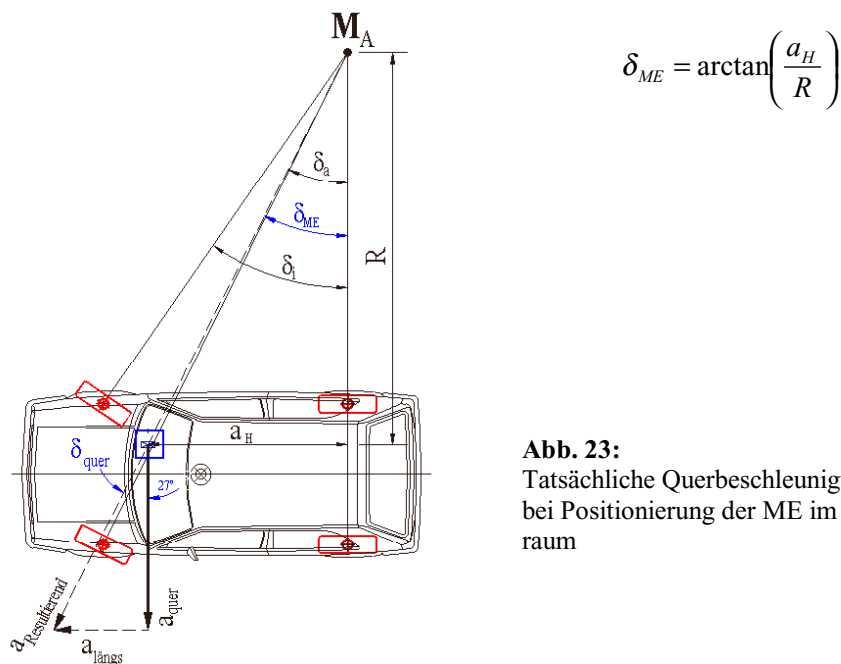


Abb. 22:
Günstigste Platzierung
der ME nach Ackermann

Bei einer Positionierung außerhalb der Hinterachsmittellinie wird, wie in Abbildung 23 dargestellt, eine kleinere Querbeschleunigung a_{quer} gemessen als die tatsächlich vorhandene Querbeschleunigung a_A . Die Richtung der tatsächlichen Querbeschleunigung wird

durch die Konstruktion einer Richtungsgeraden festgelegt. Diese Gerade wird durch den nach Ackermann bestimmten Momentanpol und dem Koordinatenursprung der ME gelegt. Mit Hilfe des bekannten Abstands der ME zur Hinterachse a_H und dem dazu rechtwinklig verlaufenden Kurvenradius R kann der Richtungswinkel δ_{ME} bestimmt werden:



$$\delta_{ME} = \arctan\left(\frac{a_H}{R}\right)$$

Abb. 23:
Tatsächliche Querbeschleunigung bei Positionierung der ME im Fußraum

Dieser Winkel δ_{ME} ist kongruent mit dem Winkel δ_{quer} zwischen der gemessenen Querbeschleunigung a_{quer} und der tatsächlichen Querbeschleunigung a_A . Für verschiedene Kurvenradien kann nun die relative Abweichung der gemessenen Querbeschleunigung zur tatsächlichen Querbeschleunigung in Prozent ermittelt werden:

$$\tan \delta = \frac{a_H}{R} = \frac{\sin \delta}{\cos \delta}$$

$$\cos \delta = \sqrt{\frac{1}{1 + \tan^2 \delta}} = \sqrt{\frac{\cos^2 \delta}{\sin^2 \delta + \cos^2 \delta}}$$

$$\Rightarrow \Delta [\%] = 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{a_H}{R}\right)^2}} \quad \Delta [\%] = (1 - \cos(\delta_{quer})) \cdot 100\%$$

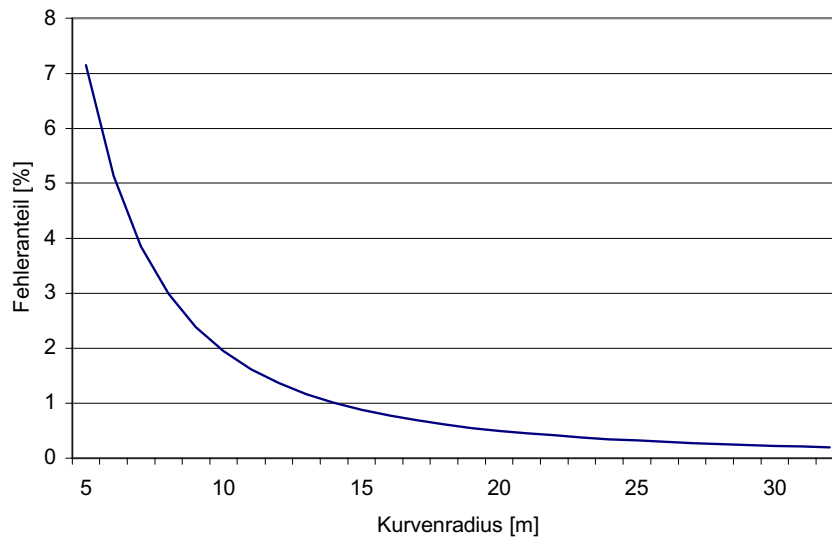


Abb. 24: Fehleranteil bei der Positionierung der ME im Fußraum

Das Ergebnis ist in Abbildung 24 als Diagramm dargestellt. Der Fehler, der bei einer Positionierung im Fußraum auftritt, ist antiproportional zum durchfahrenen Kurvenradius. Konkret bedeutet dies: Je kleiner der durchfahrene Kurvenradius ist, desto größer ist der Winkel zwischen gemessener und tatsächlicher Querbeschleunigung. Der ungünstigste Fall tritt also beim Durchfahren des kleinstmöglichen Kurvenradius' (Wendekreis des Fahrzeugs) auf. Für die Darstellung im Diagramm wurde ein kleinster Kurvenradius von 5 Metern festgelegt. Der Fehler beträgt bei diesem Radius 7,2%. Ab einem Kurvenradius von 15 m sinkt der Fehleranteil unter 1%. Bei den Versuchsfahrten ist der kleinste ausgewertete Fahrbahnmittenradius bei einem Rechtsabbiegemanöver jedoch bereits 11 Meter und ist demnach noch mit gut 1,6% fehlerbehaftet. Hierbei ist jedoch noch nicht berücksichtigt, dass mit den realen Lenkungen die Ackermann-Bedingung nur angenähert erfüllt werden kann.

3.6.2 Die Positionierung unter Berücksichtigung der Schräglaufwinkel

Die Abweichung von der Ackermann-Bedingung ist im Wesentlichen von zwei Faktoren abhängig:

Als Erstes sei der konstruktive Lenkfehler genannt. Die Lenkung eines Fahrzeugs wird durch Lenkvierecke realisiert. Mit diesen Lenkungsstrukturen kann die Ackermann-Bedingung nur angenähert erfüllt werden. Die Abweichungen vom idealen Einschlagwinkel sind dabei vom Lenkeinschlag abhängig. Je größer der Lenkeinschlag, desto größer ist auch die Differenz zum idealen Winkel. Je nach Ausführung der Lenkung und Stärke des Lenkeinschlags beträgt die Abweichung zum theoretischen Lenkeinschlag $2 - 3^\circ$. Dabei sind sowohl positive als auch negative Abweichungen möglich.

Als Zweites sei der Lenkfehler aufgrund Fliehkräfteinwirkung genannt. Bewegt sich eine Masse auf einer Kreisbahn, so tritt die Fliehkraft F_s auf. Diese Fliehkraft muss bei einem Fahrzeug von den Rädern an den Radaufstandspunkten aufgenommen werden. Dabei stellen sich die Schräglaufwinkel α_l und α_r für vorne und hinten ein (Abbildung 25). Fällt man nun wieder jeweils das Lot in der Radmitte, so wandert der Momentanpol von (M_A) nach (M). Dieses Eigenlenken verstärkt sich bei zunehmender Fahrzeuggeschwindigkeit und damit größer werdender Fliehkraft.

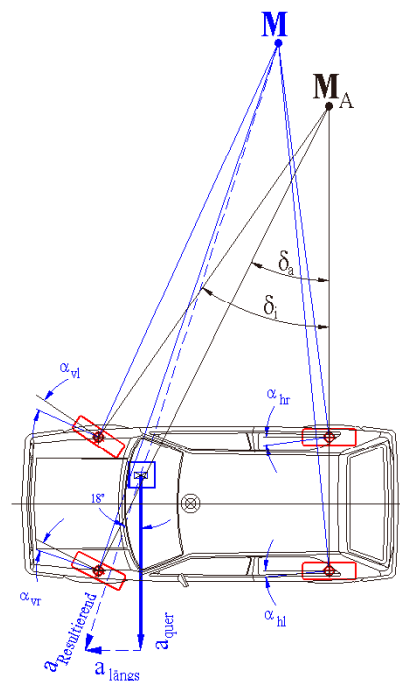


Abb. 25:
Durch Fliehkraft hervorgerufene Schräglaufwinkel

In [18] ist die Abbildung 26 aufgeführt. Das Diagramm zeigt die Abhängigkeit der Seitenkraft F_r vom Schräglaufwinkel α mit dem Parameter Radlast. Im Bereich von $0 - 10^\circ$ steigt der Seitenkraftaufbau nahezu linear an. Um den Verlauf des Schräglaufwinkels bei verschiedenen Querbeschleunigungen für unsere Betrachtungen besser eingrenzen zu können, wird ein Einspurmodell mit mittigem Schwerpunkt und einer Masse von 800 kg ($F_N = 8000$ N) betrachtet. Durchfährt dieses Einspurmodell eine Kurve mit einer Querbeschleunigung von 5 m/s^2 (entspricht einer Fliehkraft von 4000 N), so stellt sich eine Seitenkraft pro Rad von 2000 N ein. Diese Kraft wird durch einen Schräglaufwinkel von 6° aufgebaut. Bei einer Seitenkraft von ca. 2500 N pro Rad – dies entspricht einer Querbeschleunigung von ca. 7 m/s^2 – stellt sich ein Schräglaufwinkel von 10° ein. Diese Werte sind sicherlich nicht als absolut zu betrachten. Durch unterschiedliche Fahrwerksabstimmungen und verschiedener Reifentypen, sind sicherlich größere aber auch kleinere Schräglaufwinkel möglich. Für den hier betrachteten linearen Bereich der Schräglaufwinkeländerungen spielen diese Abweichungen jedoch keine Rolle.

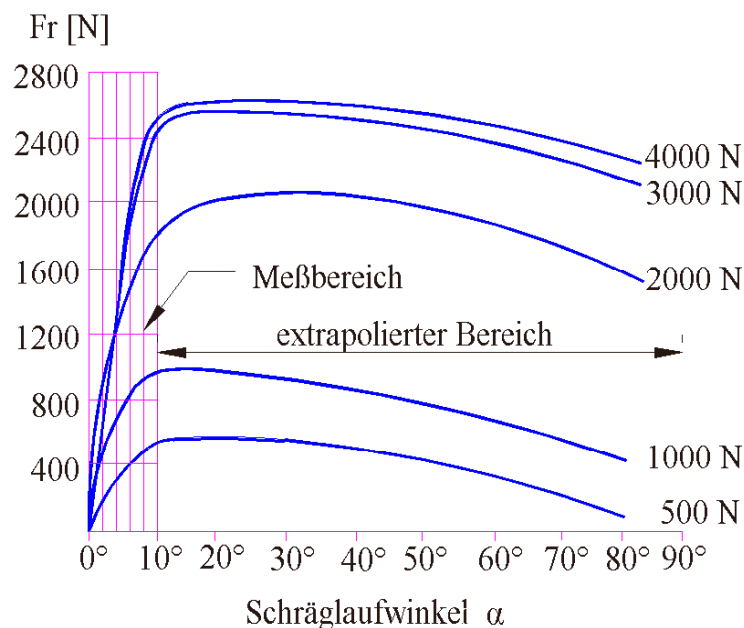


Abb. 26: Schräglaufwinkel bei verschiedenen Querbeschleunigungen

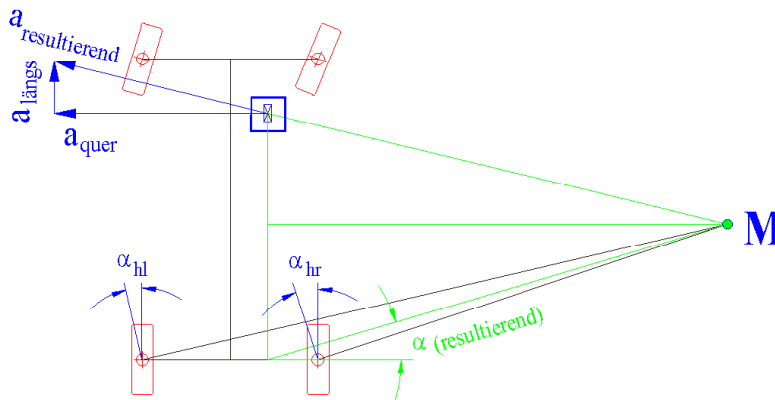


Abb. 27:
Resultierender
Schräglaufwinkel
an der Hinterachse

Um den Fehler bei der Positionierung der ME nun endgültig eingrenzen zu können, wird in Abbildung 27 zunächst vereinfachend der resultierende Schräglaufwinkel bezogen auf die einzelnen Schräglaufwinkel an der Hinterachse (α_{hl} und α_{hr}) konstruiert. In der Darstellung ist dieser Schräglaufwinkel mit α_{res} bezeichnet. Die außermittige Lage dieses Winkels bezogen auf die Hinterachsmittte, berücksichtigt die Position der ME im Beifahrerfußraum. In Abbildung 28 sind die geometrischen Zusammenhänge zwischen dem resultierenden Schräglaufwinkel und der dadurch entstehenden Messabweichung dargestellt. Durch die Teilung des grün eingezeichneten Dreiecks in zwei rechtwinklige Dreiecke entstehen die Winkel α und β . Gleich schraffierte Flächen kennzeichnen dabei gleiche Winkel. Mit dem Winkel β kann das Ausmaß der Messabweichung bestimmt werden. Der Winkel β kann wiederum mit dem bekannten Abstand a_H der ME zur spurgebenden Hinterachse, für verschiedene Schräglaufwinkel α und unterschiedlichen Kurvenradien R_0 , nach nebenstehenden Beziehungen errechnet werden:

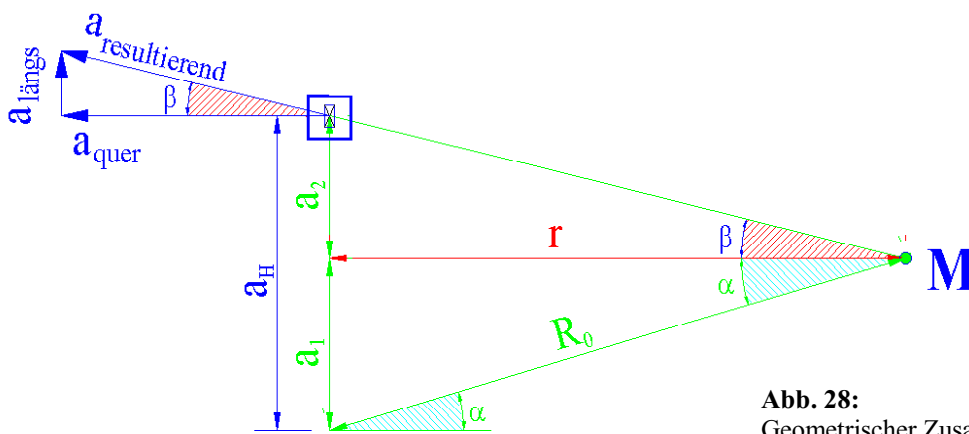


Abb. 28:
Geometrischer Zusammenhang
zwischen Schräglaufwinkel und
Querbeschleunigungsabweichung

$$\beta = \arctan \frac{a_2}{r}$$

$$r = \cos \alpha * R_0 \qquad a_H = a_1 + a_2$$

$$\qquad \qquad \qquad |$$

$$\qquad \qquad \qquad a_2 = a_H - a_1$$

$$\qquad \qquad \qquad |$$

$$\qquad \qquad \qquad a_1 = \sin \alpha * R_0$$

$$\Rightarrow \text{prozentuale Abweichung} = \cos \beta * 100\%$$

Das Diagramm in Abbildung 29 zeigt das Ergebnis dieser Berechnungen für verschiedene Schräglaufwinkel. Es wird deutlich, dass unter Berücksichtigung der Schräglaufwinkel der Fehler drastisch sinkt. Bereits bei dem Durchfahren eines 11-Meter-Radius mit einem angenommenen Schräglaufwinkel von 2°, beträgt der Fehler nicht einmal 1,1 %. Mit größer werdendem Schräglaufwinkel nimmt der Fehler weiter ab.

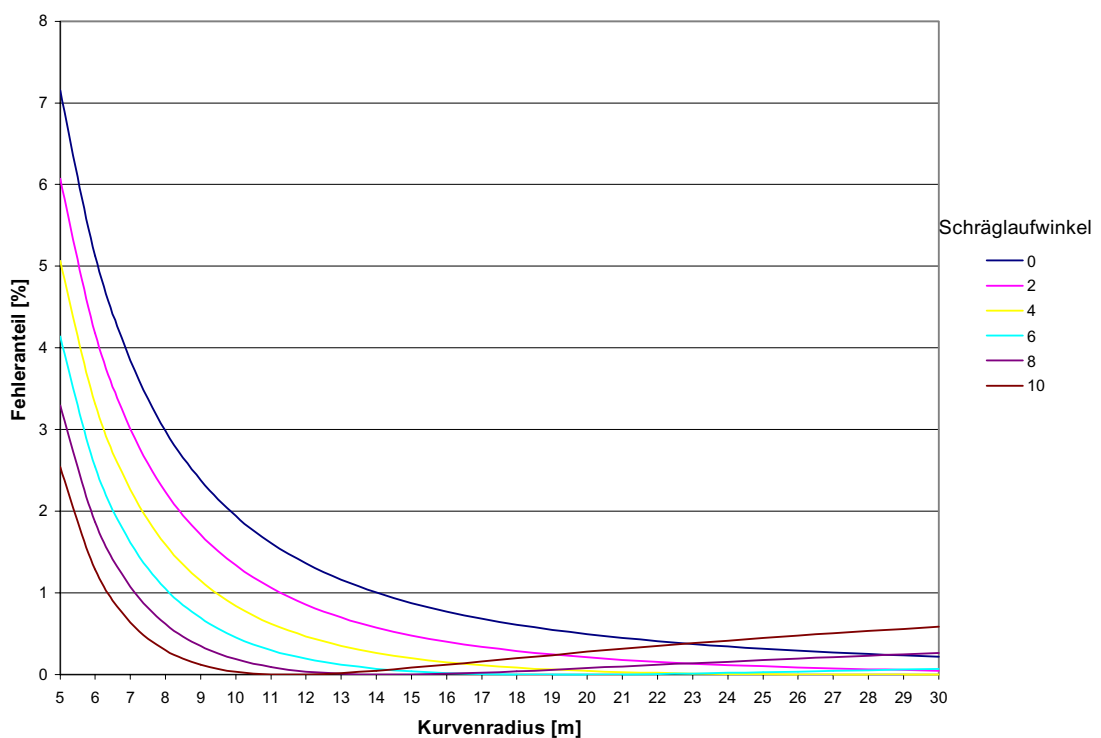


Abb. 29: Prozentuale Abweichung des Messwertes bei verschiedenen Schräglaufwinkeln

Für die nachfolgenden Betrachtungen hat der Fehler, der bei der Positionierung im Fußraum gemacht wird, also keine Bedeutung und kann deshalb unberücksichtigt bleiben.

3.7 Die quasistatische Kompensation

In dem vorherigen Kapitel wurden die Messabweichungen betrachtet, die bei der Positionierung der ME im Fahrzeug auftreten. Eine andere Form der Messabweichung, die bei Beschleunigungsmessungen im fahrzeugfesten Koordinatensystem entstehen, wird durch das Wanken bzw. Nicken des Fahrzeugaufbaus hervorgerufen.

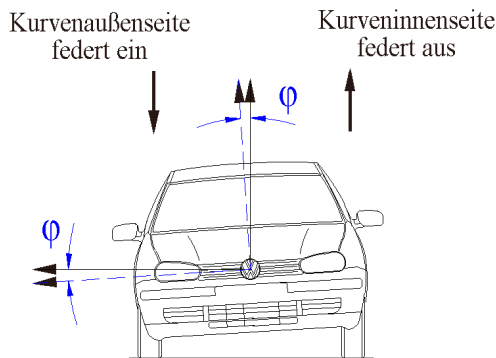


Abb. 30: Wankwinkel φ

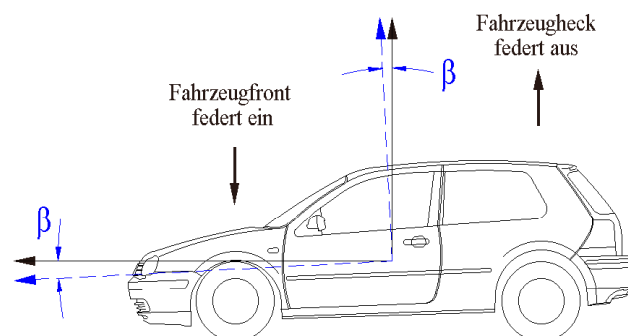


Abb. 31: Nickwinkel β

Unter Wanken versteht man die Relativbewegung des Fahrzeugaufbaus gegenüber der Fahrbahn in Querrichtung (Abbildung 30). Das Nicken bezeichnet hingegen die Relativbewegung des Aufbaus gegenüber der Fahrbahn in Längsrichtung (Abbildung 31). Wird bei Beschleunigungsmessungen die ME am Aufbau platziert, so wird das Messergebnis zum Einen durch Drehung der Koordinatenlage um den Wank- bzw. Nickwinkel und zum Anderen durch die anteilig einkoppelnde Erdanziehung verfälscht.

3.7.1 Die Bestimmung des Wankwinkels

Das Ausmaß der Relativbewegungen zwischen Aufbau und Fahrbahn ist von der Art der Radaufhängung und den Federungseigenschaften des Fahrzeugs abhängig. Für jedes Versuchsfahrzeug müssen deshalb die fahrzeugspezifischen Wankwinkel bei verschiedenen Querbeschleunigungen ermittelt werden. Diese Wankwinkel wurden mit Hilfe zwei verschiedener Versuche ermittelt. Der erste Versuchsaufbau ist in Abbildung 32 illustriert. Ziel dieses Versuchs war es, mit Hilfe der Wegdifferenzen beim Ein- und Ausfedern der Räder den Wankwinkel φ nach der unten aufgeführten Beziehung zu errechnen:

$$d\varphi = \frac{s_1 + s_2}{b_{v,h}} \quad d\varphi^\circ = \frac{180^\circ * d\varphi}{\pi}$$

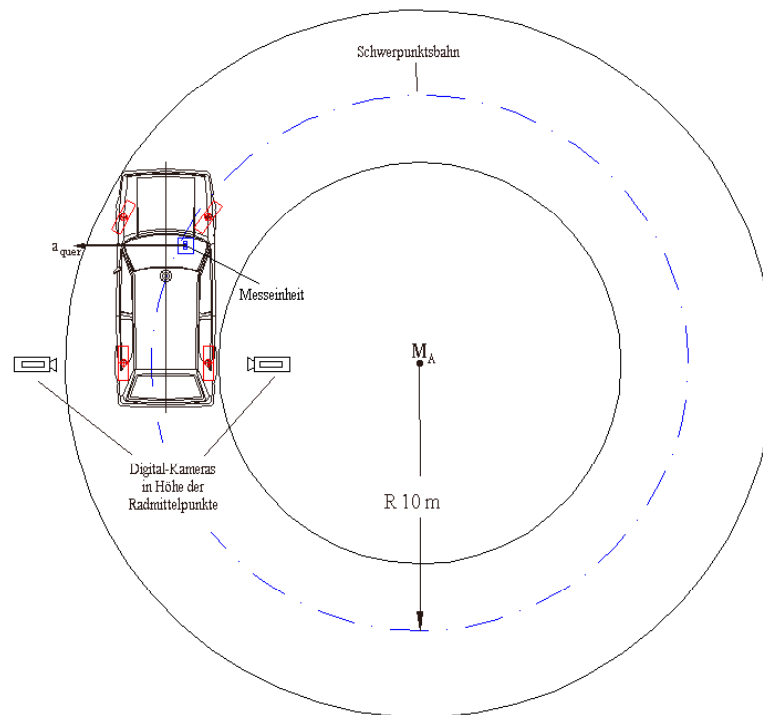


Abb. 32: 1. Versuchsaufbau

Die Indizes s_1 und s_2 bezeichnen dabei die Federwege der Räder einer Achse und b_v bzw. b_h ist die zugehörige Spurweite der Vorder- bzw. Hinterachse. Für den Versuch wurde das Fahrzeug mit acht gut sichtbaren Markierungspunkten versehen. Diese waren jeweils in der Radmitte und senkrecht darüber an der Karosserie angebracht. Der Höhenabstand dieser Punkte wurde zunächst für jedes Rad im Stand ermittelt. Danach wurde das Fahrzeug mit möglichst gleichbleibendem Lenkeinschlag und möglichst konstanter Geschwindigkeit in einer Kreisbahn durch die rechts und links postierten Kameras gefahren. Nach jeder Runde wurde dabei die Geschwindigkeit erhöht, sodass die Höhenänderungen zwischen Radmittelpunkt und Karosserie für verschiedene Querschleunigungsbereiche ermittelt werden konnten. Die Querschleunigung sowie die gefahrene Geschwindigkeit wurde dabei mit der Messeinheit erfasst. Die digitalen Kameras versehen intern jedes aufgezeichnete Bild mit einem Timecode. Mit Hilfe dieses Timecodes lassen sich die aufgezeichneten Bilder mit der Querschleunigungsaufzeichnung synchronisieren. Somit kann für jedes Standbild die zugehörige Querschleunigung sowie die momentane Geschwindigkeit aus dem Messschrieb zugeordnet werden. In den Abbildungen im Anhang (Seite A 13 ff.) sind

die Standbilder dieses Versuches aufgeführt. Mit Hilfe des bekannten Felgendurchmessers wurde jedes Einzelbild auf den gleichen Maßstab skaliert. Auf diese Weise kann die Höhenänderung direkt aus dem Bild entnommen werden. In Abbildung 33 ist das Ergebnis dieses Versuches in einem Diagramm dargestellt.

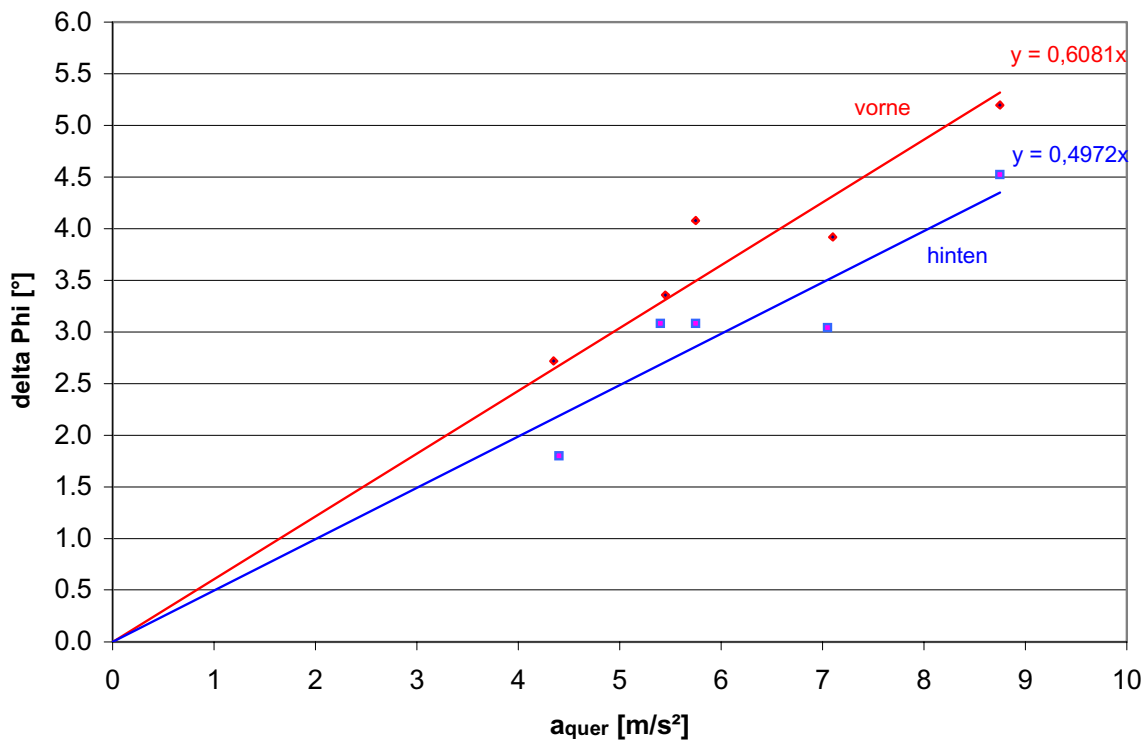


Abb. 33: Wankwinkel φ bei verschiedenen Querbeschleunigungen (VW Golf II)

Beim zweiten Versuch wird der Wankwinkel φ direkt aus den einzelnen Standbildern ermittelt. Dazu wurde das Fahrzeug mit einer horizontal ausgerichteten Messlatte versehen. Mit einer Digitalkamera auf einem Stativ wird zunächst die Fahrzeugfront im Stand aufgenommen (Abbildung 32). Der im Ruhezustand ermittelte Winkel zwischen der Bildhorizontalen und der Messlatte gilt als Ausgangswinkel. Danach wurde das Fahrzeug wiederum mit möglichst gleichbleibendem Lenkeinschlag und möglichst konstanter Geschwindigkeit in einer Kreisbahn an der frontal postierten Kamera vorbeigefahren. Nach jeder Runde wurde auch dabei die Geschwindigkeit erhöht, sodass die Winkeländerungen zwischen Messlatte und Bildhorizont für verschiedene Querbeschleunigungsbereiche ermittelt

werden konnten. Die Synchronisation der einzelnen Standbilder mit dem Messschrieb erfolgt genau wie bereits im ersten Versuch beschrieben. Die maßstabsgerecht aufbereiteten Einzelbilder sind im Anhang (Seite A 21 ff.) zu finden. Dieser Versuch hat den Vorteil, dass nur eine Kamera benötigt wird und damit auch nur die Hälfte an Bildmaterial ausgewertet werden muss.

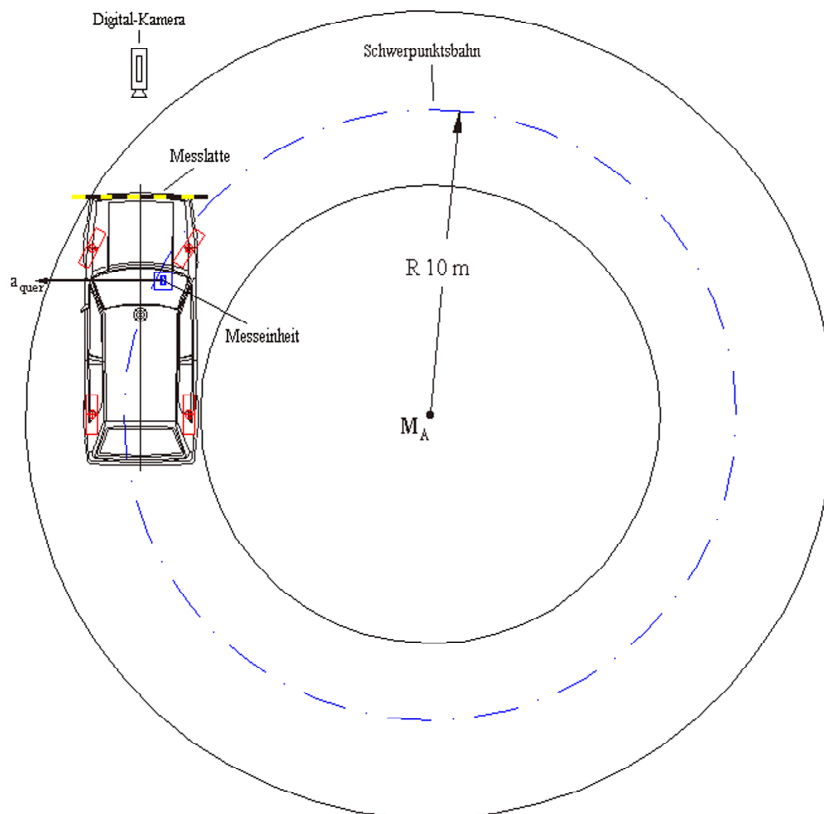


Abb. 34: 2.Versuchsaubau

Die gemessene Querschleunigung wird wie bereits erwähnt, durch die Drehung der Koordinatenlage um den Wankwinkel und durch die einkoppelnde Erdanziehung überlagert. Mit dem ermittelten fahrzeugspezifischen Wankwinkel φ können diese Komponenten berechnet werden, sodass ein prozentualer Faktor für die quasistatische Kompensation bestimmt werden kann. Dazu wird zunächst die einkoppelnde Erdanziehung von der gemessenen Querschleunigung abgezogen (1). Als nächstes wird die Drehung des Koordinatensystems berücksichtigt (2). Die tatsächliche Querschleunigung berechnet sich dann aus:

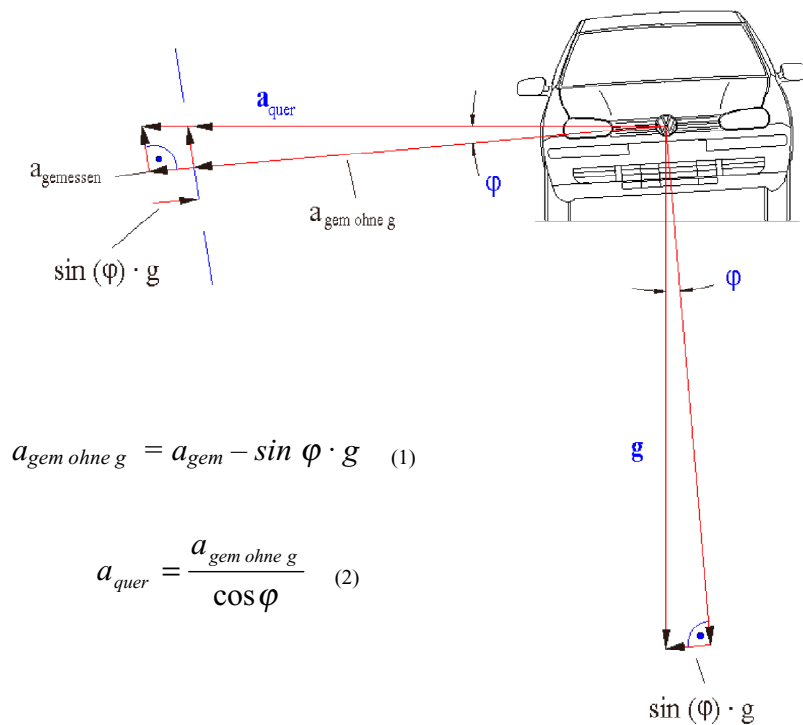


Abb. 35: Grafische Darstellung der Zusammenhänge

In dem Diagramm der Abbildung 36 ist die prozentuale Abweichung zwischen der gemessenen und der tatsächlichen Querbeschleunigung dargestellt. Die Abbildung 37 zeigt in erster Näherung den Bewegungsablauf des Aufbaus im Zusammenspiel mit der einwirkenden Querbeschleunigung. Man kann erkennen, dass der Wankwinkel φ der Querbeschleunigung naheilt. Unter der Prämisse, dass die Querbeschleunigung so lange andauert, dass sich ein quasistatischer Zustand zwischen Aufbauwanken und Querbeschleunigung einstellt, kann jeder gemessenen Querbeschleunigung einer quasistatisch kompensierten Querbeschleunigung zugeordnet werden. Das Diagramm in Abbildung 37 zeigt die quasistatische Kompensation für die einzelnen Versuchsfahrzeuge. Im Anhang ist eine Referenzmessung des Autoherstellers Fiat für einen Alfa 166 aufgeführt (A 24). Auch bei dem Referenzdiagramm ist zu erkennen, dass der Wankwinkel linear mit steigender Querbeschleunigung ansteigt. Die Darstellung des Wankwinkels unterscheidet sich dahingehend, dass sowohl für Links- und Rechtskurven der Wankwinkel aufgetragen ist.

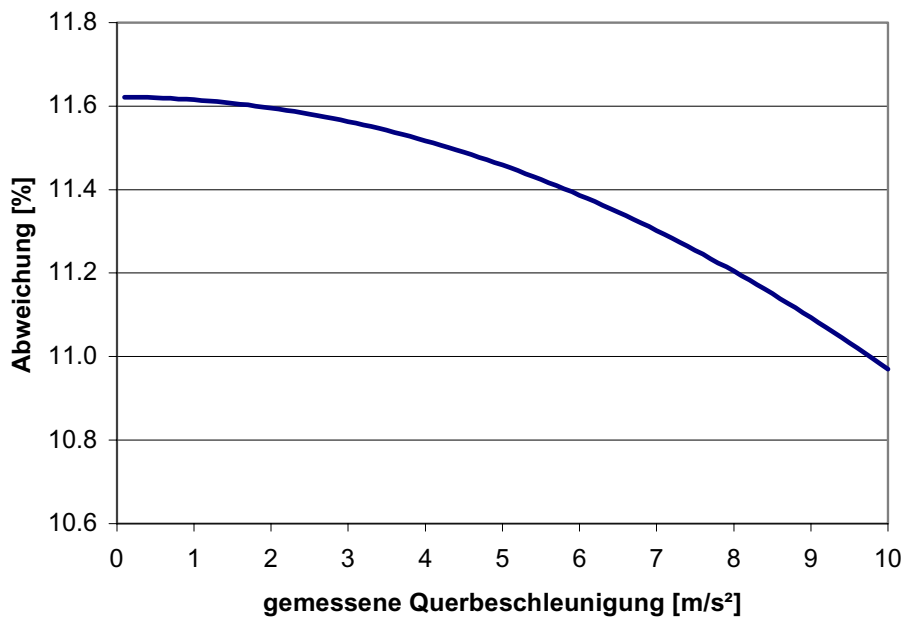


Abb. 36: Abweichung zw. gemessener und tatsächlicher Querbeschleunigung (VW Golf II)

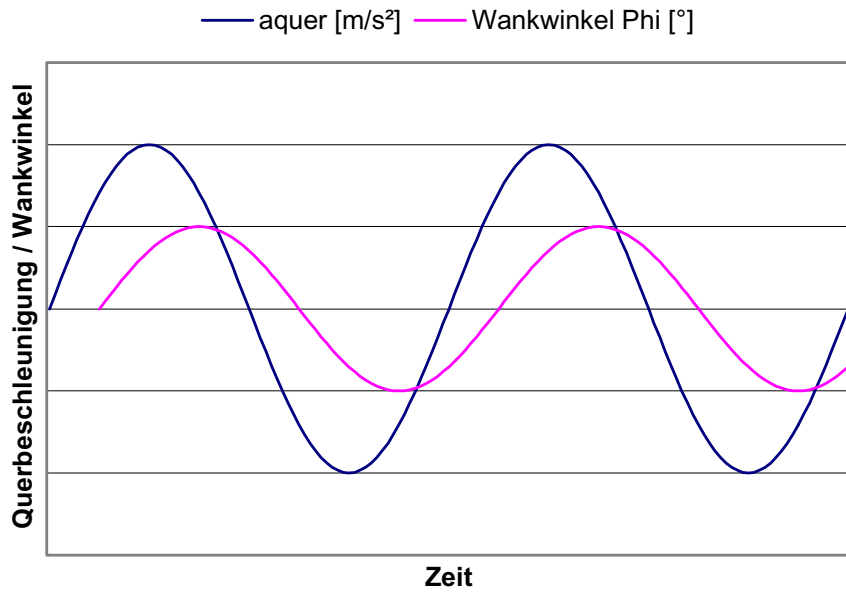


Abb. 37: Phasenverschiebung des Wankwinkels gegenüber der Querbeschleunigung

Bei einem Vergleich des Referenzdiagramms mit dem oben aufgeführten Wankwinkeldiagramm muss berücksichtigt werden, dass es sich bei der Beschleunigung im Referenzdiagramm um absolute Beschleunigungswerte handelt, während die Beschleunigungen unserer Messungen noch durch die einkoppelnde Querschleunigung fehlerbehaftet sind.

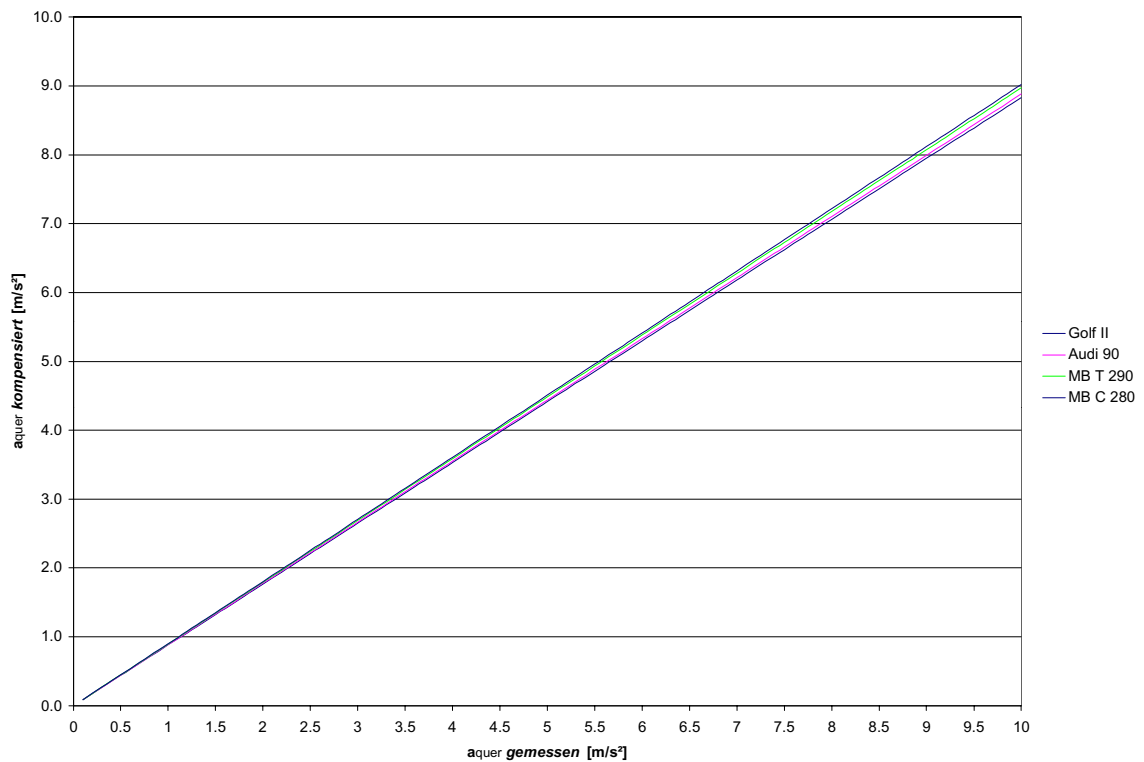


Abb. 38: Quasistatische Kompensation für verschiedene Fahrzeuge

3.7.2 Die Bestimmung des Nickwinkels

Das Brems- und Anfahrnicken der einzelnen Versuchsfahrzeuge kann analog zum Aufbauwanken durch die Höhenänderung des Aufbaus zwischen Vorderachse und Hinterachse bestimmt werden:

$$d\beta = \frac{s_V + s_H}{l} \qquad d\beta^\circ = \frac{180^\circ \cdot d\beta}{\pi}$$

Die Indizes s_V und s_H bezeichnen dabei die Federwege der Räder an der Vorder- bzw. Hinterachse. Der Buchstabe l kennzeichnet den Radstand des Fahrzeuges. Da dieser Radstand bei marktgängigen Fahrzeugen stets größer ist als die Spurweite, ist die dynamische Änderung der Radlast entsprechend kleiner. Wank- und Nicksteifigkeit sind jedoch annähernd identisch (was sich in etwa gleicher Wank- und Nickeigenkreisfrequenz niederschlägt). Deshalb ist – bei gleicher Trägheitskraft im Schwerpunkt – der Nickwinkel β kleiner als der Wankwinkel φ .

In [19] ist für verschiedene Pkw das Eintauchen der Fahrzeugfront bzw. das Ausfedern des Fahrzeughecks in Abhängigkeit von der Verzögerung in zwei Diagrammen (Abbildung 39) dargestellt. Da mit der vorliegenden Diplomarbeit aber nur das normale Brems- bzw. Anfahrverhalten wie es z. B. beim Abbremsen vor Ampeln oder beim Anfahren aus dem Stand auftritt untersucht wird, können maximale Verzögerungen sowie die maximalen Anfahrbeschleunigungen unberücksichtigt bleiben.

Die Auswertung meiner Versuche zeigt, dass 90 % aller Messungen beim normalen Verzögern unter $3,4 \text{ m/s}^2$ liegen. Die Beschleunigung erreicht bei 90 % der Messungen nur $2,6 \text{ m/s}^2$. Liest man mit diesen Werten z. B. den Einfederweg für einen Opel Kadett E aus dem in Abbildung 39 aufgeführten Diagramm ab, so kann man den Nickwinkel β für dieses Fahrzeug wie folgt bestimmen:

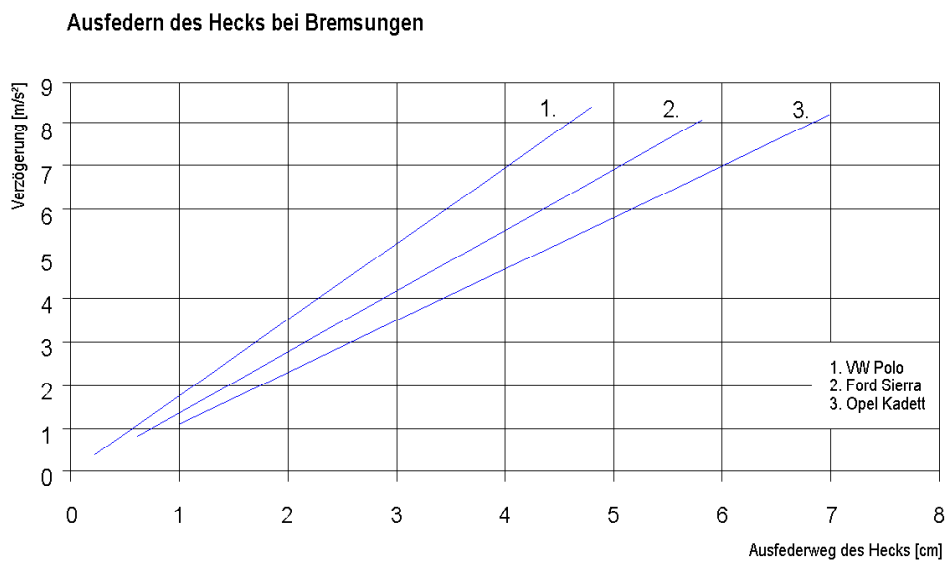
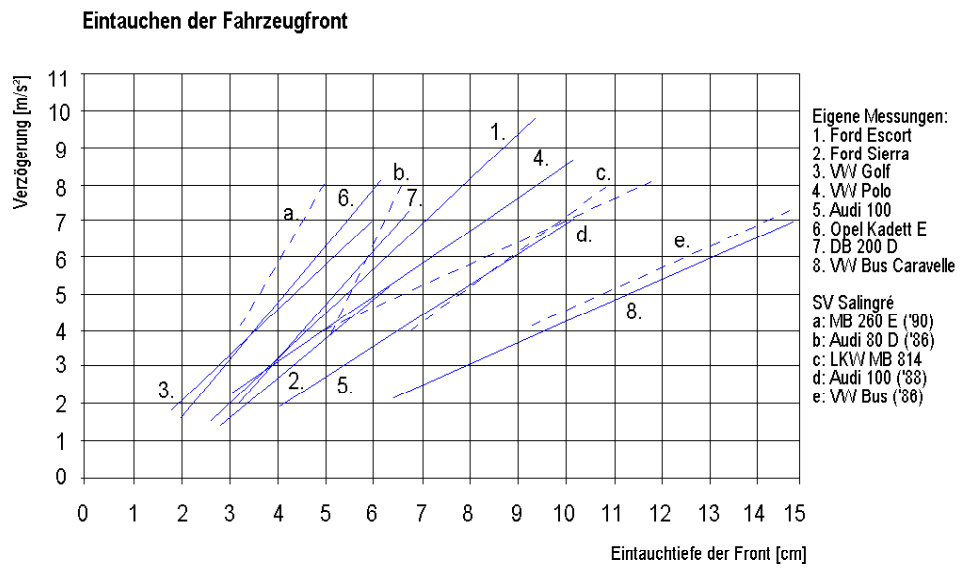


Abb. 39: Höhenänderung des Aufbaus gegenüber der Vorder- und Hinterachse in Abhängigkeit der Verzögerung a

Eintauchen der Fahrzeugfront bei $a = 3,5 \text{ m/s}^2$:	ca. 3 cm
Ausfedern des Hecks bei $a = 3,5 \text{ m/s}^2$:	ca. 3 cm
Radstand / Opel Kadett	:	252 cm

$$d\beta = \frac{3 \text{ cm} + 3 \text{ cm}}{252 \text{ cm}} = 0,0238$$

$$d\beta^\circ = \frac{180^\circ \cdot 0,0238}{\pi} = \underline{\underline{1,36^\circ}}$$

Mit größer werdendem Radstand und strafferer Federung, wie zumindest bei drei Versuchsfahrzeugen (MB T 290, MB C 280 und Audi 90) angenommen werden kann, ist der Nickwinkel noch geringer. Der Einfluss des Nickwinkels hat also keine bedeutenden Auswirkungen auf die Messergebnisse und kann deshalb für normale Bremsungen und Anfahrvorgänge vernachlässigt werden.

4 Versuchsparameter

4.1 Die Probanden

Für die Versuchsdurchführung stand ein Fahrerkollektiv von 11 Personen zur Verfügung. Die für die Auswertung relevante Einteilung der Probanden erfolgt in der unten aufgeführten Tabelle 3. Inwieweit die Versuchskandidaten bei den Versuchsstrecken ortskundig waren, geht aus den Beschreibungen der Strecken selbst hervor.

Testperson	Geschlecht	Alter
MeR	w	21
MaB	m	22
MeB	w	22
BrJ	w	24
AxB	m	25
MaN	m	28
DiA	m	29
ThK	m	37
WoH	m	41
ReB	w	47
EwM	m	65

Tabelle 3

4.2 Die Versuchsfahrzeuge

Die Versuchspersonen sollten möglichst mit ihren eigenen Fahrzeugen die einzelnen Teststrecken absolvieren. Dies konnte auf Grund technischer Gegebenheiten bei den Testpersonen BrJ und MeR nicht erfolgen. Alle anderen Personen führen oder fahren immer noch ein Fahrzeug gleichen Typs, sodass insgesamt vier verschiedene Fahrzeugtypen zum Einsatz kamen.

Fahrzeug	Golf II	Golf II	Golf II	Golf II	Golf II	Golf II	MBT290	MBT290	Audi 90	Audi 90	MBC280
Leistung	55	55	55	55	55	55	92	92	100	100	132
Testperson	BrJ	MaB	MaN	MeB	ThK	WoH	EwM	ReB	DiA	MeR	AxB

Tabelle 4

4.3 Die Versuchsstrecken

Die Versuchsfahrten wurden auf vier unterschiedlichen Messstrecken durchgeführt:

Die Abbildung A 1 zeigt in einem Luftbild den Verlauf der ersten Messstrecke. Dabei handelt es sich um einen Rundkurs in einem kleinen Industriegebiet in 58339 Breckerfeld. Die Gesamtlänge dieses Rundkurses beträgt 525 m. Beim Durchfahren dieser Messstrecke müssen insgesamt drei Abbiegevorgänge absolviert werden. Der Ausgangspunkt der Versuchsfahrt liegt in einer großradigen Kurve und ist in der Abbildung mit „Start“ gekennzeichnet. In Höhe des Ausgangspunktes wurde mit Kreidemarkierungen am Fahrbahnrand eine Parkbucht eingezeichnet. Die Probanden wurden angewiesen, nach jeder absolvierten Runde in dieser künstlich angelegten Parkbucht anzuhalten und aus dem Stand insgesamt dreimal den Rundkurs zu durchfahren. Zunächst wurde der Rundkurs von allen Probanden im Uhrzeigersinn mit einer frei wählbaren Geschwindigkeit durchfahren. Die Fahrbahnmittenradien bei den Rechtsabbiegevorgängen betragen dabei 11 – 14 m. Danach wurde der Rundkurs mit dem gleichen Schema gegen den Uhrzeigersinn durchfahren, sodass Linksabbiegevorgänge mit Fahrbahnmittenradien von 16 – 18 m absolviert wurden. Die Versuchsfahrten wurden in einem Industriegebiet außerhalb der regulären Arbeitszeit unternommen, sodass die Versuchspersonen kaum mit anderweitigem Verkehr zu rechnen hatten. Keinem der Probanden (außer MaN) war die Versuchsstrecke zuvor bekannt.

Die Abbildungen A 2 bis A 6 zeigen den Verlauf der zweiten Messstrecke. Bei den Luftbildern ist zu beachten, dass sie in der Abbildung A 5 und A 6 zur besseren Ausnutzung des Blattformates um 90° im Uhrzeigersinn gedreht wurden (siehe eingezeichneten Nordpfeil). Wie aus den Luftbildern ersichtlich, handelt es sich um eine sehr kurvenreiche Landstraße von Breckerfeld nach Hagen. Folgt man dem weiteren Verlauf dieser Strecke, wird die Bewaldung immer dichter, sodass nicht alle Kurvenradien der insgesamt gut 5600 m langen Strecke mit Hilfe von Luftbildern ausgewertet werden können. Die Auswertung erstreckt sich deshalb nur bis zur Kurve 28 in Abbildung A 6. Die Gesamtlänge der ausgewerteten Versuchsstrecke beträgt somit knapp 3000 m. Der Höhenunterschied vom Start bis Kurve 28 beträgt ca. 180 m. Bei der Auswertung wer-

den also insgesamt 28 Kurven mit Radien von 18 – 300 m berücksichtigt. Die Probanden wurden angewiesen, die Versuchsstrecke mit einer für sie normalen Geschwindigkeit zu absolvieren. Die Geschwindigkeitsbegrenzung liegt bei 70 km/h, wurde aber zumindest im unteren Teil der Strecke von einigen Probanden überschritten. Die Messstrecke wurde von den Probanden zunächst talwärts, später auch bergauf durchfahren. Soweit es möglich war, wurde auch bei diesen Messungen darauf geachtet, dass die Probanden nicht auf andere Verkehrsteilnehmer Rücksicht nehmen mussten. Zwei Probanden führten jeweils einen Überholvorgang durch, welcher im Messschrieb gut ersichtlich ist und somit für die Auswertung unberücksichtigt blieb. Diese Versuchsstrecke war allen Probanden außer AxB und WoH bekannt.

Die Abbildung A 7 zeigt wiederum in einem Luftbild den Verlauf der dritten Versuchsstrecke. Dabei handelt es sich um das Autobahnkreuz Hagen. Die Probanden waren angewiesen, das Autobahnkreuz von der A45 aus südlicher Richtung kommend einmal komplett zu durchfahren, um es dann in westlicher Richtung auf der A46 zu verlassen. Dies hat zur Folge, dass der erste durchfahrene Radius zweimal durchfahren wird. Der Fahrbahnmittenradius der einzelnen Abfahrten entspricht dabei dem bundesdeutschen Durchschnitt von ca. 50 – 55 m. Der Fahrbahnmittenradius des zweiten Abbiegeastes ist durch örtliche Gegebenheiten (felsiger Hügel) um gut 20 m größer. Bei der Auswertung wurde dieser abweichende Radius nicht berücksichtigt und mit den Werten des zweimal durchfahrenen ersten Radius' ergänzt. Beim Durchfahren des Autobahnkreuzes konnte der Einfluss anderer Verkehrsteilnehmer auf die Geschwindigkeit der Probanden nicht immer ausgeschlossen werden. Die Versuchsstrecke wurde vom Proband EwM nicht absolviert. Dafür fuhr Proband WoH die Strecke zweimal ab. Die Teststrecke war allen Probanden außer AxB und WoH bekannt, aber keiner der Probanden außer MaN hatte zuvor das Autobahnkreuz auf diese Weise befahren.

Die vierte Versuchsstrecke ist nicht durch Luftbilder dokumentiert. Das Fahrerkollektiv war hierbei angewiesen den zweispurigen Ring um die Stadt Hagen zu durchfahren. Bei dieser Fahrt lag das Hauptaugenmerk auf dem Brems- und Anfahrverhalten der einzelnen Probanden vor Lichtzeichenanlagen. Allen Probanden außer WoH und AxB war diese Teststrecke bekannt.

4.4 Allgemeine Versuchsparameter

Bei allen Versuchsfahrten waren die Versuchsfahrzeuge stets mit zwei Personen auf den vorderen Fahrgastplätzen besetzt. Der Verlauf der Messstrecke wurde den Probanden während der Fahrt mitgeteilt. Die Fahrbahnverhältnisse waren trocken außer bei der Versuchsperson WoH. Bei diesem war die Fahrbahn nass und im späteren Verlauf der Messung setzte Regen ein. Alle Messungen wurden bei Tageslicht durchgeführt und hatten den gleichen Start bzw. Endpunkt. Während der Messungen wurde sich normal unterhalten. Eine komplette Testfahrt dauerte ca. 70 Minuten. Dabei wurde eine Strecke von gut 50 km zurückgelegt.

5 Auswertung der Messdaten

5.1 Die Luftbildauswertung

Alle in dieser Arbeit aufgeführten Luftbilder stammen von [20]. Über dieses Geodatenportal im Internet können Luftbilder von ganz Nordrhein-Westfalen angeschaut werden. Mit Hilfe der Zwischenablage wurden diese Luftbilder in ein Bildbearbeitungsprogramm importiert und zusammengefügt. Nach dem Zusammenfügen der Luftbilder wurden diese in ein CAD-Programm importiert. Mit Hilfe des zugehörigen 100 m Maßstabes wurde hier das zusammengesetzte Luftbild maßstabsgerecht skaliert.

Die aus dem Luftbild ersichtlichen Kurvenradien wurden durch Kreisbögen approximiert, deren Radius dann mit CAD-Werkzeugen ausgemessen wurde. Die einzelnen Versuchstrecken wurden aufgrund der besseren Arbeitsblattausnutzung auf unterschiedliche Maßstäbe skaliert. Aus diesem Grund wurde in jeder Darstellung unter rechts der zugehörige 100 m Maßstab eingezeichnet.

Um die Genauigkeit beim Skalieren der zusammengesetzten Luftbilder zu überprüfen, wurde zunächst die Fahrbahnbreite an gut identifizierbaren Stellen aus dem Luftbild bestimmt. Danach wurden genau diese Stellen an der Versuchsstrecke aufgesucht und die Fahrbahnbreite nachgemessen. Die so gemessenen Fahrbahnbreiten wichen dabei um weniger als 20 cm von der aus dem Luftbild bestimmten Fahrbahnbreit ab. Mit dem Kurvenradius und der zugehörigen Fahrbahnbreite wurden die Fahrbahnmittenradien der einzelnen Kurven für die linke und rechte Fahrbahn bestimmt und tabellarisch unter bzw. neben den Luftbildern aufgeführt.

5.2 Die Auswertung der Rohdaten mit Dadisp

Alle Daten wurden während der Messung über die RS 232 Schnittstelle an einen Laptop übermittelt. Dieser speichert die Daten in durch Kommata getrennte Zahlenkolonnen in einer Textdatei. Die erste Zahl gibt dabei den Wert der Querschleunigung a_{quer} (X-Richtung) wieder. Die zweite Zahl steht für den Längsbeschleunigungswert $a_{längs}$ (Y-Richtung). Die dritte Zahl gibt Auskunft über die Geschwindigkeit v . Die vierte Zahl dient schließlich zur Kontrolle über das vollständig erhaltene Datenpaket. Wenn alle In-

formationen korrekt überliefert sind, steht hier eine „1“ zur Bestätigung. Nach diesen vier Werten erfolgt ein Zeilenumbruch, sodass alle zusammengehörenden Daten in Spalten untereinander geschrieben werden.

Für jede Messstrecke und jede Testperson wurde eine eigene Datei angelegt. Mit Hilfe des Signalanalyseprogramms Dadisp wurden diese Dateien weiterverarbeitet. Mit dieser Analyse-Software wurden dann die Beschleunigungsdaten der X- und Y-Achse und das zugehörige Geschwindigkeitssignal in separaten Bearbeitungsfenstern visualisiert. Danach wurden die Achsen dieser Graphen in SI-Einheiten skaliert. Gleichzeitig wurden die Signale gefiltert (die genaue Vorgehensweise wurde im Abschnitt „Messtechnik“ beschrieben). Zusätzlich wurde der Fahrradius und die zurückgelegte Strecke nach den unten angegebenen Beziehungen berechnet und in zwei weiteren Fenstern ausgegeben:

$$R_{Fahr} = \frac{v^2}{a_{quer}} [m] \qquad s = \int v dt$$

Die Graphen der Beschleunigung (blau), der Geschwindigkeit (grün), des Fahrradius' (cyan) und der zurückgelegten Strecke (pink) wurden dann in einem separaten Fenster überlagert, wobei auf Synchronität geachtet wurde. Mit Hilfe der errechneten Strecke kann nun jeder beliebige Streckenabschnitt im Messschrieb wieder gefunden werden. Somit kann die zugehörige Geschwindigkeit, die zugehörige Quer- bzw. Längsbeschleunigung sowie der Fahrradius für jeden Punkt der Versuchsstrecke genau bestimmt werden.

Die Grundauswertung jeder einzelnen Querbeschleunigungsmessung bestand nun darin, den Maximalwert der Querbeschleunigung a_{quer} mit den zugehörigen Werten (Geschwindigkeit, Fahrradius und Weg) für die in den Luftbildern durchnummerierten Kurven tabellarisch zu erfassen. Zu jeder durch Luftbild dokumentierten Strecke ist exemplarisch die Signalauswertung eines Probanden beigefügt.

Um die Verzögerung zu ermitteln, wurde der Maximalwert der Längsbeschleunigung betrachtet. Ausgangsgröße war hierbei das Geschwindigkeitssignal. Sobald die Geschwindigkeit eine Nullphase durchlief, wurde der zugehörige Maximalwert beim Verzögern bis in den Stand ermittelt und tabellarisch aufgezeichnet. Zur Ermittlung der Verzögerung vor

Abbiegevorgängen half wiederum das Streckensignal, die zugehörige Verzögerung herauszuziehen. Analog wurde dieses Verfahren für die Beschleunigungswerte durchgeführt.

Die Abbildung 40 zeigt einen Screenshot des Signalanalyse Programms Dadisp mit den beschriebenen Bearbeitungsfenstern.

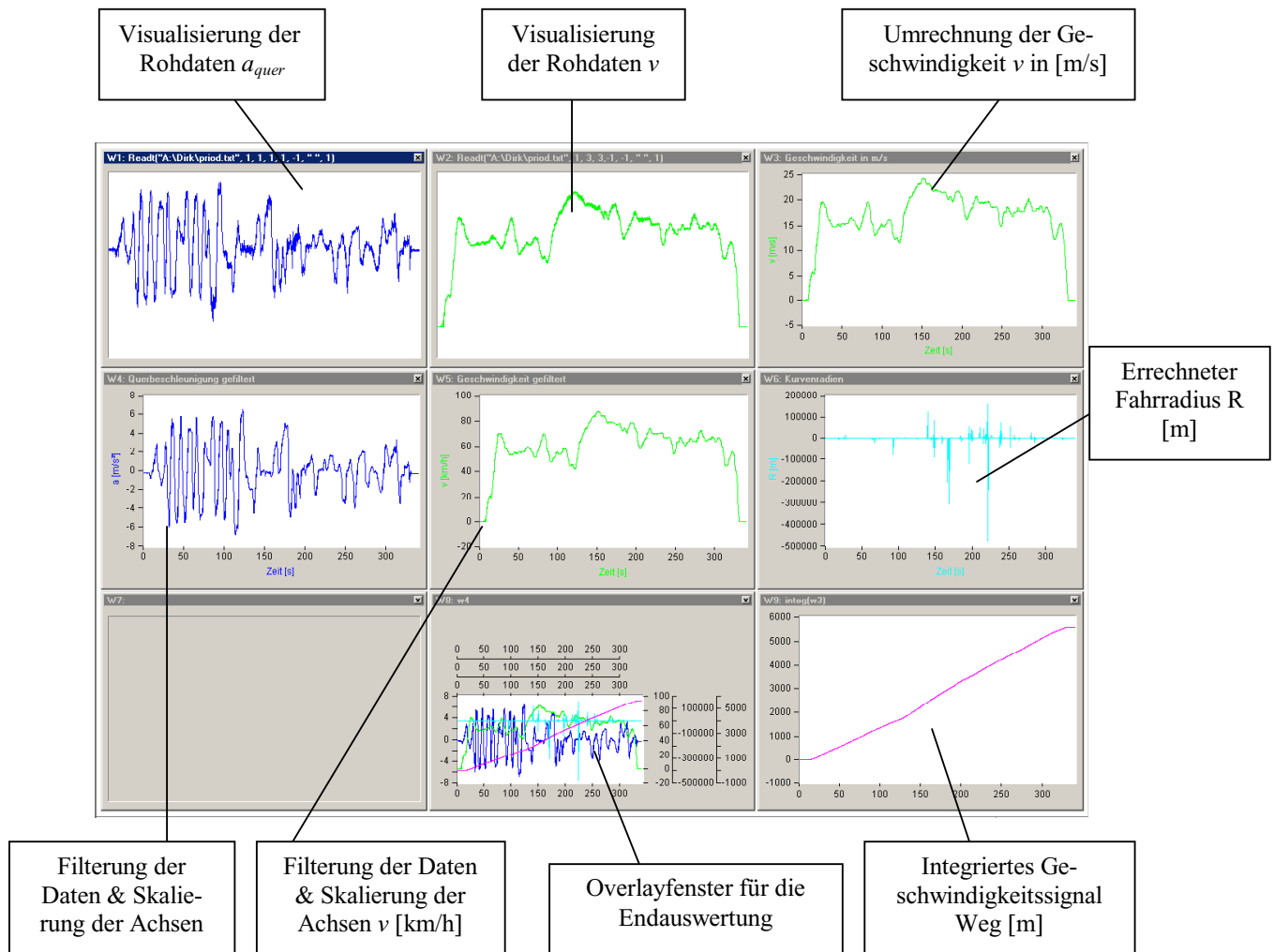


Abb. 40: Screenshot der Signalanalysesoftware Dadisp

5.3 Die Auswertung in Excel

In dem vorherigen Kapitel ist die Grundausswertung der Rohdaten beschrieben. Im Abschluss dieser Grundausswertung sind die Beschleunigungswerte ausgewählter Kurven tabellarisch für jeden Probanden herausgesucht und aufgezeichnet worden. Um diese Aufzeichnungen nun weiterverarbeiten zu können, sind zunächst die Beschleunigungswerte in Abhängigkeit des verwendeten Fahrzeugs, quasistatisch zu kompensieren. Die genaue Vorgehensweise bei dieser Kompensation wurde im Abschnitt „Die quasistatische Kompensation“ abgehandelt.

Wie in der Einleitung bereits erwähnt wurde, ist es für die Rekonstruktion von Straßenverkehrsunfällen von besonderer Relevanz, die Bewegungen der am Unfallgeschehen beteiligten Verkehrsteilnehmer mit möglichst großer Genauigkeit zu bestimmen. Durch die unterschiedlichen Verhaltensweisen verschiedener Fahrer können diese Bewegungsabläufe nicht durch einen einzigen, allgemeingültigen Wert wiedergegeben werden. Um nun ein möglichst großes Spektrum aller Fahrer abdecken zu können, werden die in Versuchen ermittelte Parameter, immer in Schwankungsbreiten mit einer oberen und unteren Grenze angegeben.

Die Abbildung 41 veranschaulicht die Bandbreite der Querschleunigung in einem Summenhäufigkeitsdiagramm (für den Rechtsabbiegevorgang eines Normalfahrers). Zur Schätzung der Summenhäufigkeit bestimmter Beschleunigungswerte wurden die Messwerte der Größe nach sortiert. Die Summenhäufigkeit eines Messwertes wurde dann aus der relativen Position des Wertes im sortierten Feld bestimmt (alle Werte = 100 %). Der Normalbereich wird üblicherweise dadurch abgesteckt, dass die Verteilung oben und unten an korrespondierenden Perzentilen beschnitten wird. Gängig ist die Verwendung der Paare 2%/98%, 5%/95% und 10%/90%, je nach Größe der Stichprobe. Die Größe der hier untersuchten Stichproben liegt bei etwa 100 – 270 Messwerten, je nach Fragestellung. Bei dieser Größe sind stabile Schätzungen nur für die Paarung 10%/90%-Perzentil zu erwarten. Zur Charakterisierung des zentralen Wertes der Verteilung wählen wir im Folgenden den Median anstelle des Mittelwertes, seiner größeren Stabilität wegen.

Zusätzlich zu dieser Darstellung ist eine angepasste Gammaverteilung eingezeichnet. Diese ist nach folgenden Beziehungen berechnet:

$$f(a) = \frac{1}{(n-1)! \cdot a_c} \left(\frac{a-a_0}{a_c} \right)^{n-1} e^{-\left(\frac{a-a_0}{a_c}\right)}$$

Darin bedeuten die Parameter:

$$a_c \quad \text{die charakteristische Querbeschleunigung} \quad a_c = 0,5 \cdot \sigma \cdot \chi$$

$$a_0 \quad \text{Lokationsparameter} \quad a_0 = \mu - 2 \cdot \frac{\sigma}{\chi}$$

$$r \quad \text{Formparameter} \quad r = \frac{4}{\chi^2}$$

Wie man sieht, stehen die Parameter der Verteilung in einfacher Beziehung zu den gängigsten Verteilungsmaßen Mittelwert μ , Standardabweichung σ und der Schiefe χ . Diese lassen sich aus der Stichprobe folgendermaßen schätzen:

$$\text{Mittelwert:} \quad \mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i$$

$$\text{Standartabweichung:} \quad \sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (a_i - \mu)^2$$

$$\text{Schiefe:} \quad \chi = \frac{n}{(n-1)(n-2) \cdot \sigma^3} \sum_{i=1}^n (a_i - \mu)^3$$

Prinzipiell ist es möglich, die Parameter der Gammaverteilung aus den ersten drei Momenten der Verteilung zu berechnen. Praktische Probleme entstehen, weil die Schätzwerte für die höheren Momente immer empfindlicher gegen Ausreißer werden. Dies beeinträchtigt dann auch die Schätzung der Parameter.

Man kann auch prinzipiell anders vorgehen und die Parameter der Verteilung ohne den Umweg der Momente direkt aus der Stichprobe schätzen. Dazu ist ein Gütefunktional zu definieren, das die Genauigkeit der Anpassung widerspiegelt. De fakto wird hier die in [21] vorgeschlagene Kombination beider Verfahren verwendet, bei der die Parameter zwar aus den Momenten errechnet werden, die Schiefe jedoch als anpassbarer Parameter interpretiert wird. Als Gütemaß wird dabei die Anpassung an die experimentell ermittelte Häufigkeitsverteilung verwendet. Als Klassenbreite wurde $0,5 \text{ m/s}^2$ verwendet.

Zum optimalen Anpassen des freien Parameters muss eine gerade Verlustfunktion definiert werden, die positive und negative Abweichungen gleich bewertet. Die einfachste Form einer solchen Verlustfunktion wird dadurch realisiert, dass die Differenz zwischen tatsächlicher und berechneter Häufigkeitsverteilung für alle Klassen berechnet wird. Wenn die Summe der absoluten Differenzbeträge minimal ist, ist die Schiefe und somit auch die Gammaverteilung optimal angepasst:

$$g(n, a_c, a_0) = \sum_{i=1}^m |p_i - f(a_i)\Delta A|$$

In Excel steht hier das Add-In *Solver* zur Verfügung, mit dem dieser Vorgang automatisiert werden kann.

5.3.1 Auswertung der Abbiegevorgänge

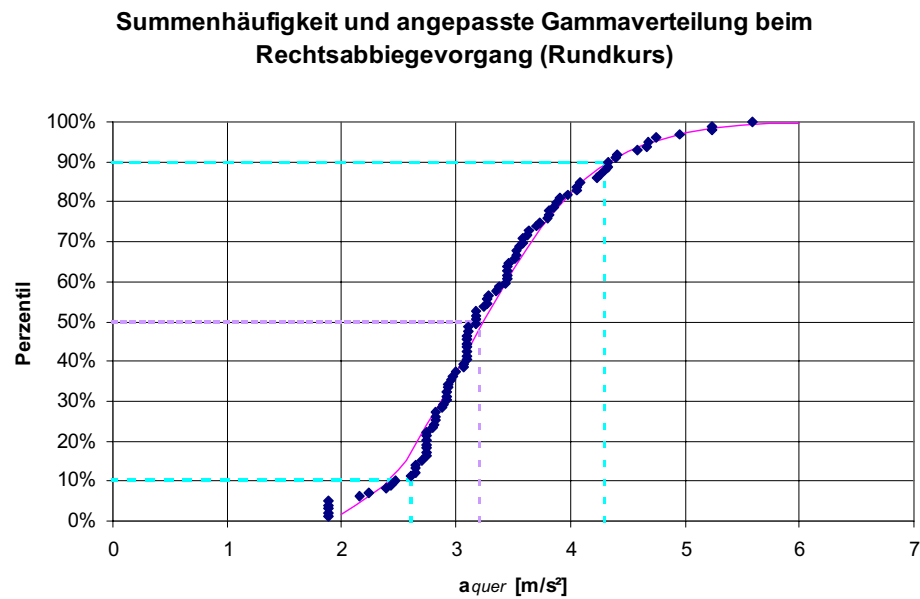


Abb. 41:

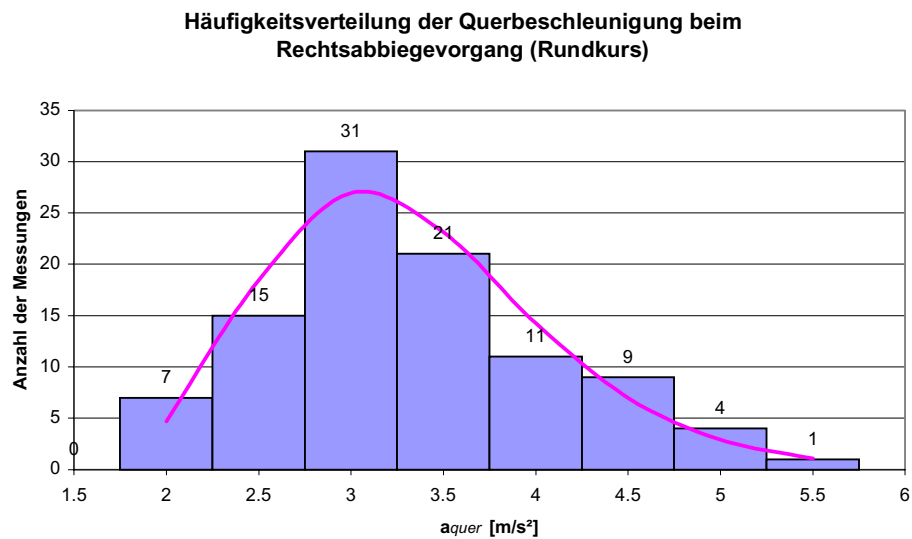


Abb. 42:

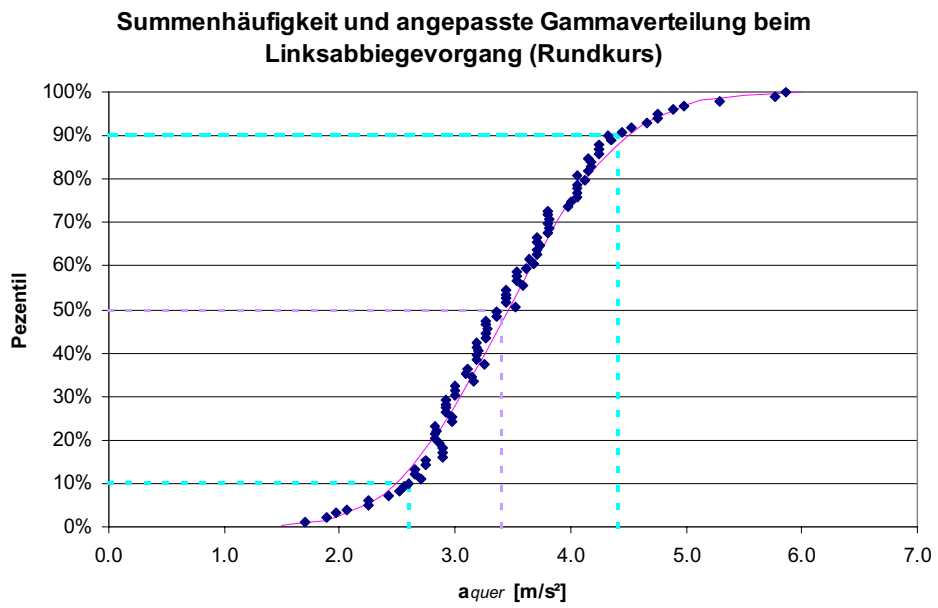


Abb. 43:

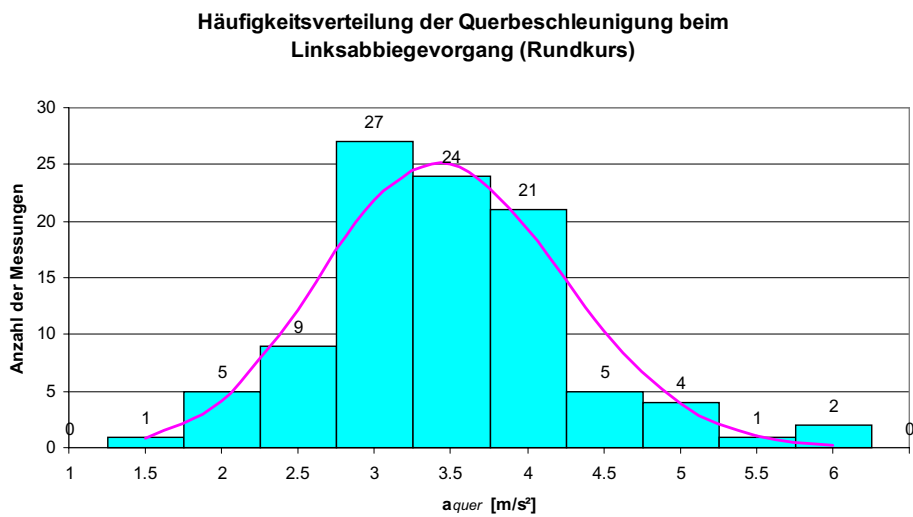


Abb. 44:

5.3.2 Vergleich einzelner Probanden bei Abbiegevorgängen

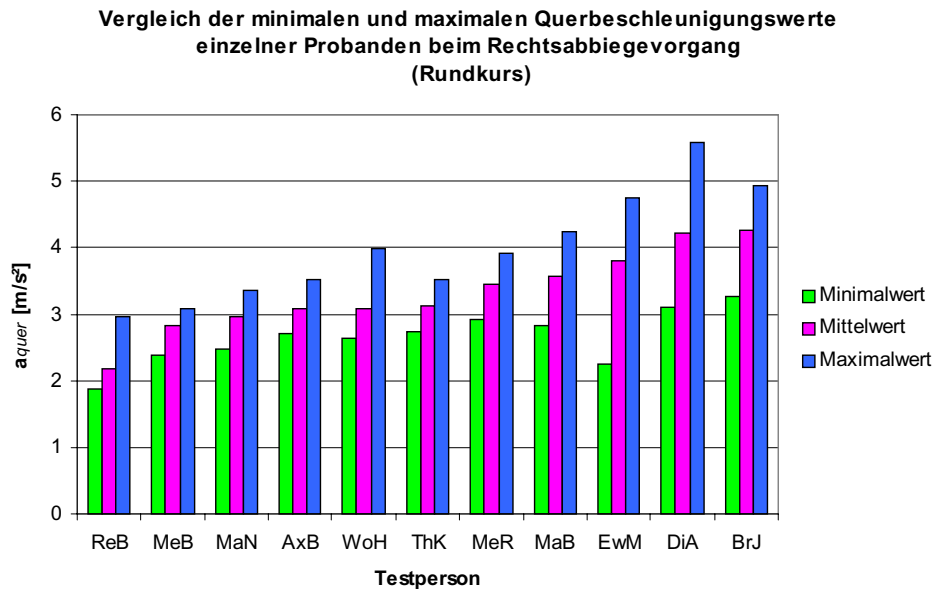


Abb. 45:

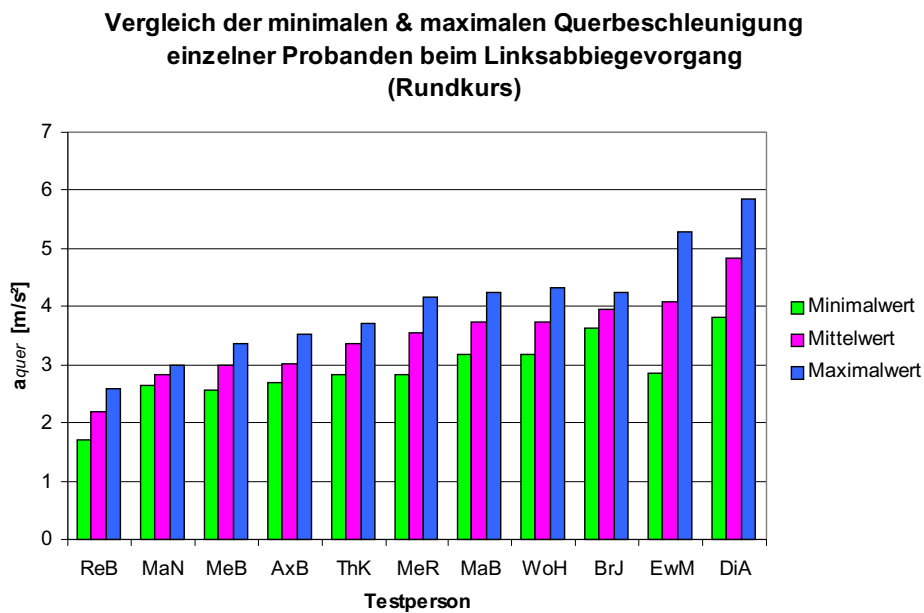


Abb. 46:

5.3.3 Auswertung verschiedener Kurvenkategorien

Bei der zweiten Teststrecke werden die Beschleunigungswerte jedes Probanden nach Kurvenkategorien sortiert. Der Radienbereich, den jede Kurvenkategorie abdeckt, ist über jedem Diagramm aufgeführt:

- § Kategorie A: Rechts- und Linksabbiegevorgänge (Fahrbahnmittenradien 11–18 m)
- § Kategorie B: Rechts- und Linkskurven (Fahrbahnmittenradien 24–40 m)
- § Kategorie C: Rechts- und Linkskurven (Fahrbahnmittenradien 40–70 m)*
- § Kategorie D: Rechts- und Linkskurven (Fahrbahnmittenradien 70–105 m)*
- § Kategorie E: Rechts- und Linkskurven (Fahrbahnmittenradien 150–200 m)
- § Kategorie F: Rechts- und Linkskurven (Fahrbahnmittenradien 150–300 m)

In jeder Kategorie sind die Querbeschleunigungen nach Rechts- und Linkskurven sowie Tal- und Bergfahrten unterschieden. Dazu wurde die Teststrecken in beiden Fahrtrichtungen befahren. Diese Vorgehensweise ermöglicht, dass innerhalb einer Kategorie der Rechts- und Linksvergleich für gleiche Kurven stattfindet.

* Durch die zusätzliche Unterscheidung nach Berg- und Talfahrt kommt es vor das die Kategorie C und D doppelt aufgeführt sind.

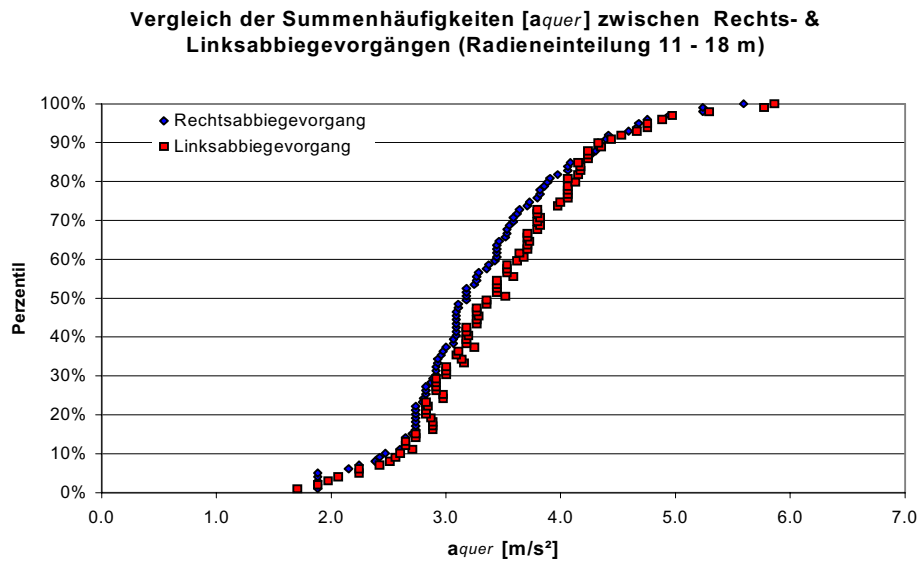


Abb. 47: Kurvenkategorie A
1. Teststrecke (Kurven-Nr.: 1-3)

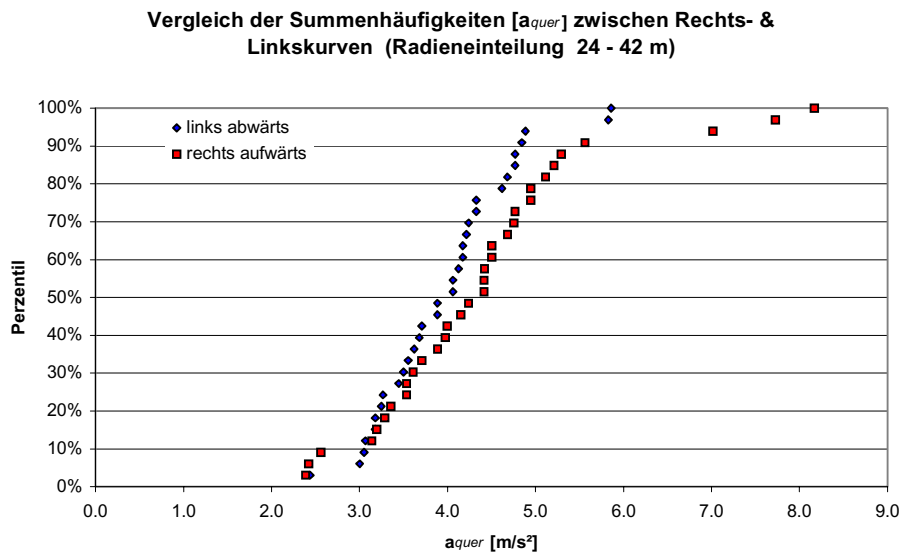


Abb. 48: Kurvenkategorie B
2. Teststrecke (Kurven-Nr.: 8, 15, 21, 22)

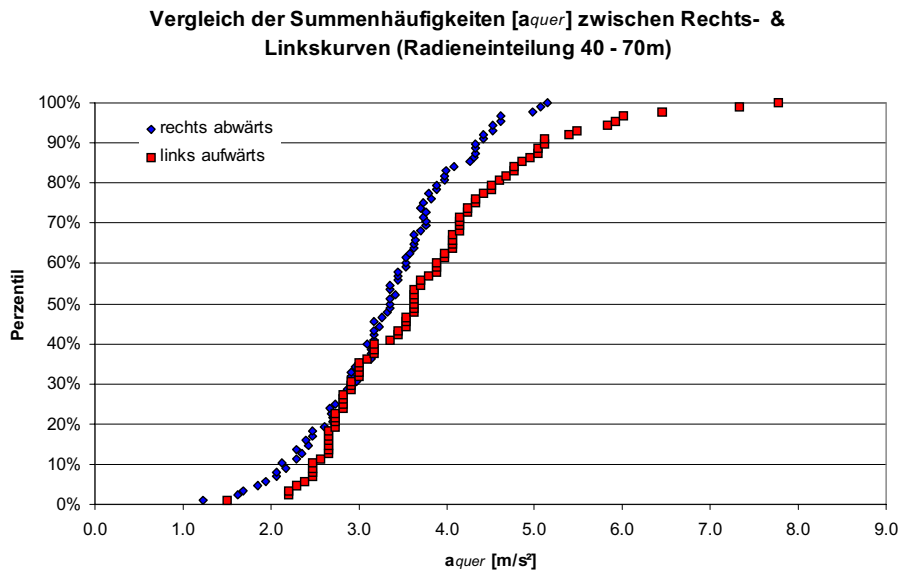


Abb. 49: Kurvenkategorie C
2. Teststrecke (Kurven-Nr.: 5, 7, 9, 11, 13, 14, 16, 18)

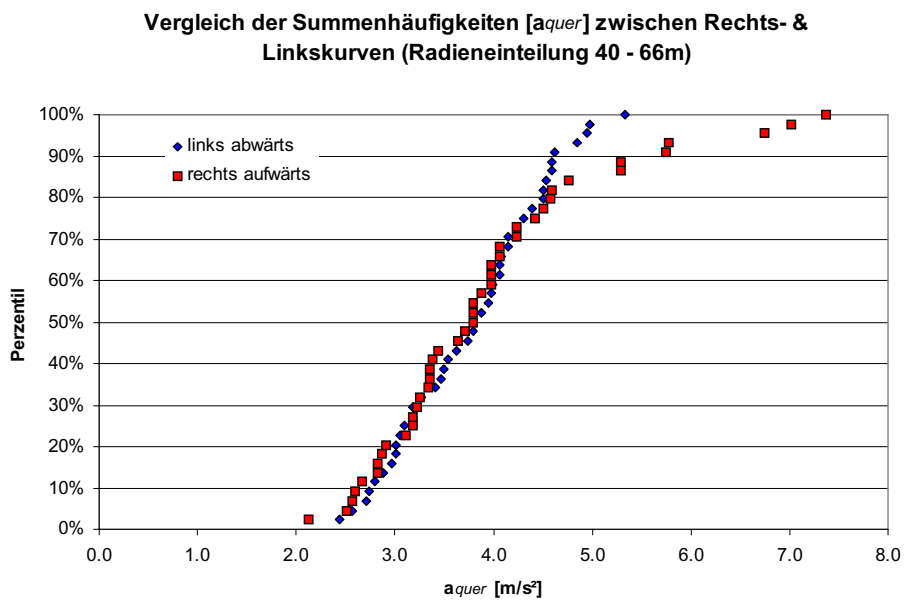


Abb. 50: Kurvenkategorie C
2. Teststrecke (Kurven-Nr.: 4, 6, 12, 17)

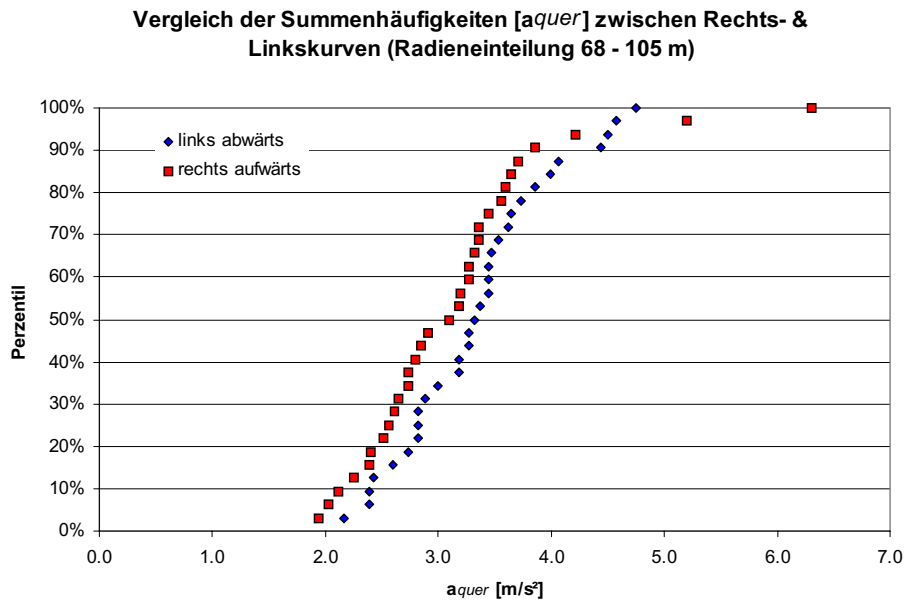


Abb. 51: Kurvenkategorie D
2. Teststrecke (Kurven-Nr.: 10, 24, 28)

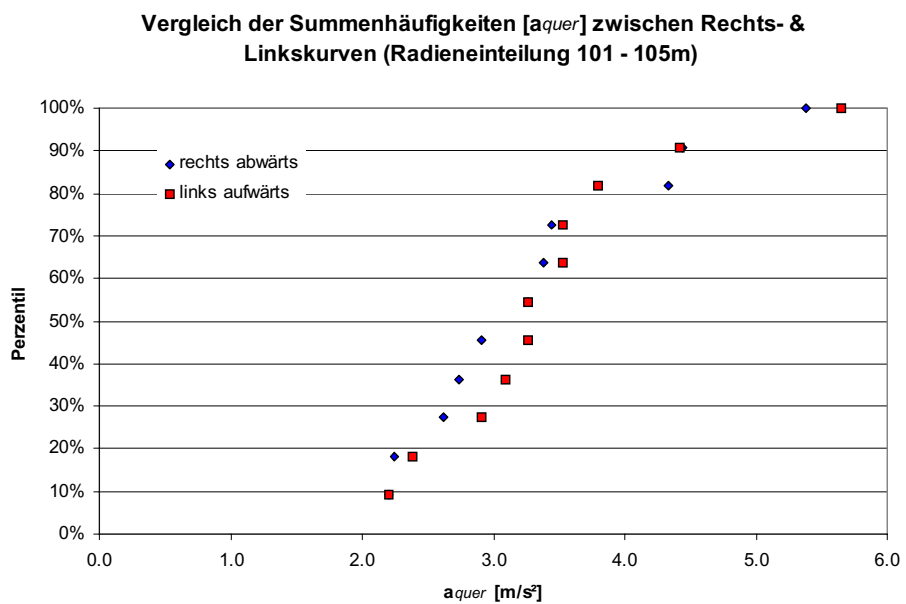


Abb. 52: Kurvenkategorie D
2. Teststrecke (Kurven-Nr.: 27)

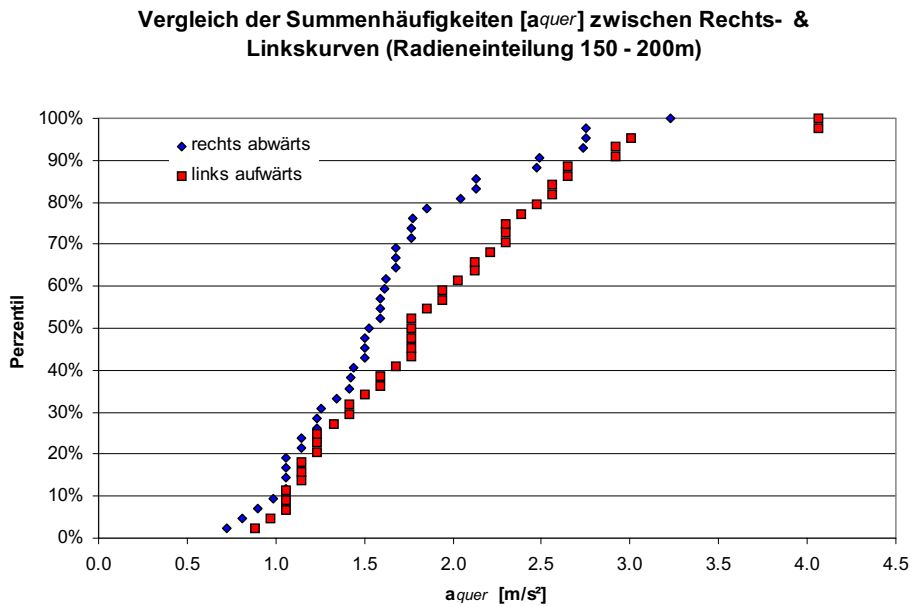


Abb. 53: Kurvenkategorie E
2. Teststrecke (Kurven-Nr.: 3, 20, 25, 26)

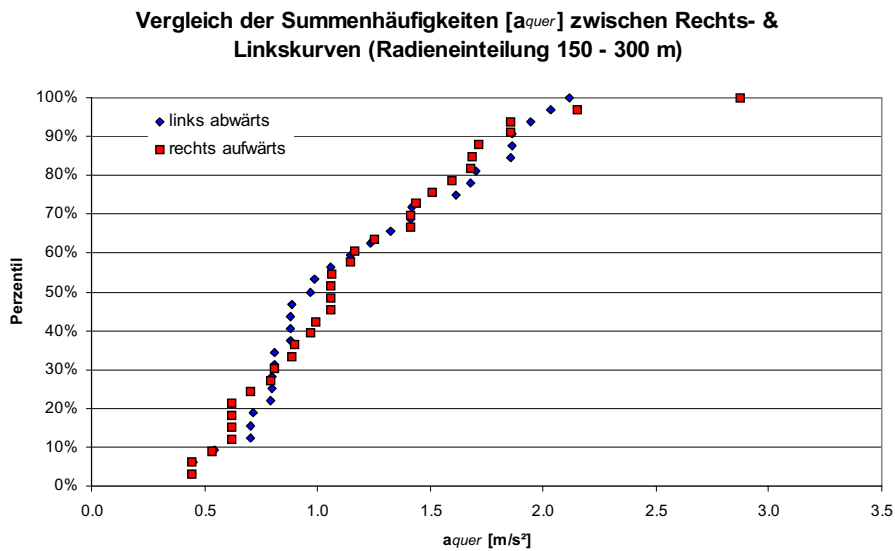


Abb. 54: Kurvenkategorie F
2. Teststrecke (Kurven-Nr.: 2, 19, 23)

5.3.4 Querschleunigung beim Durchfahren eines Autobahnkreuzes

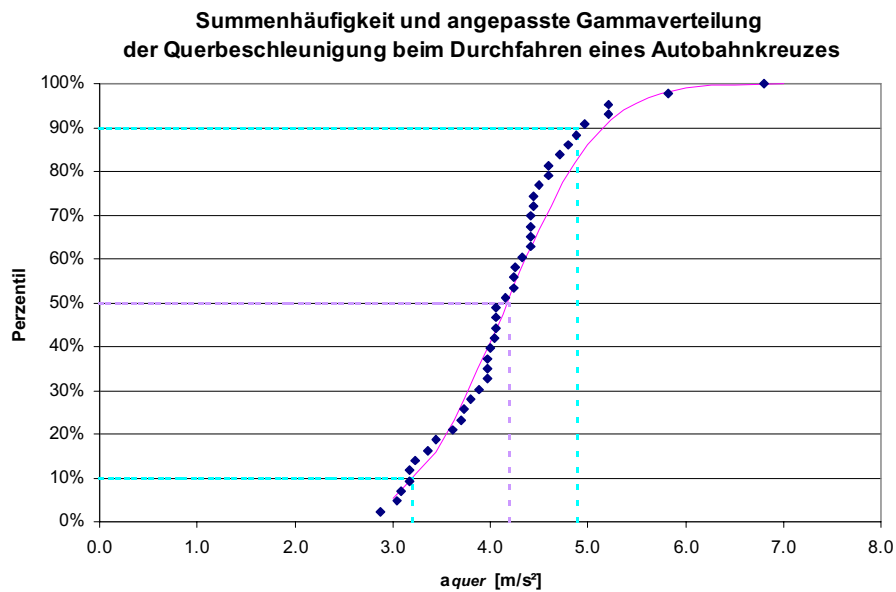


Abb. 55:

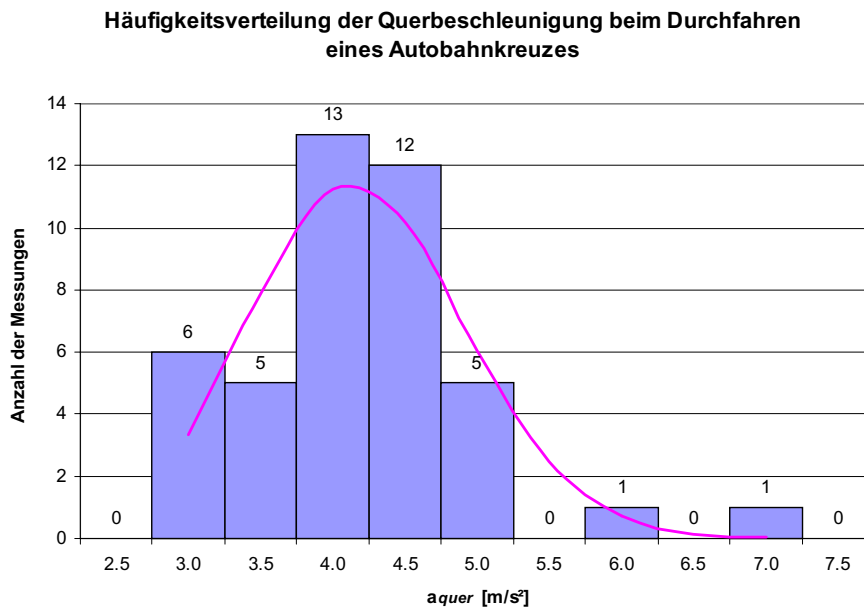


Abb. 56:

5.3.5 Vergleich einzelner Testpersonen beim Durchfahren eines Autobahnkreuzes

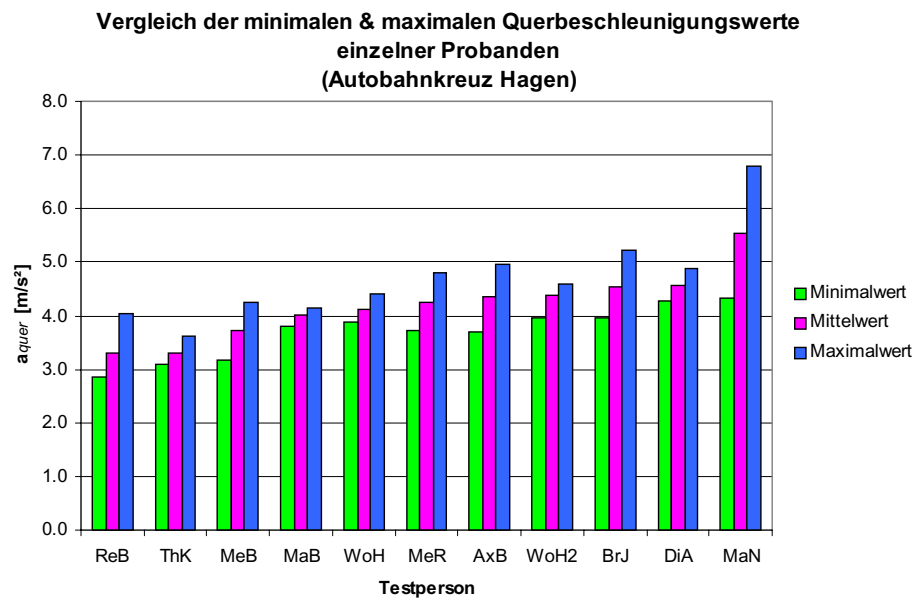


Abb. 57:

5.3.6 Vergleich der Fahrradien mit den Kurvenradien

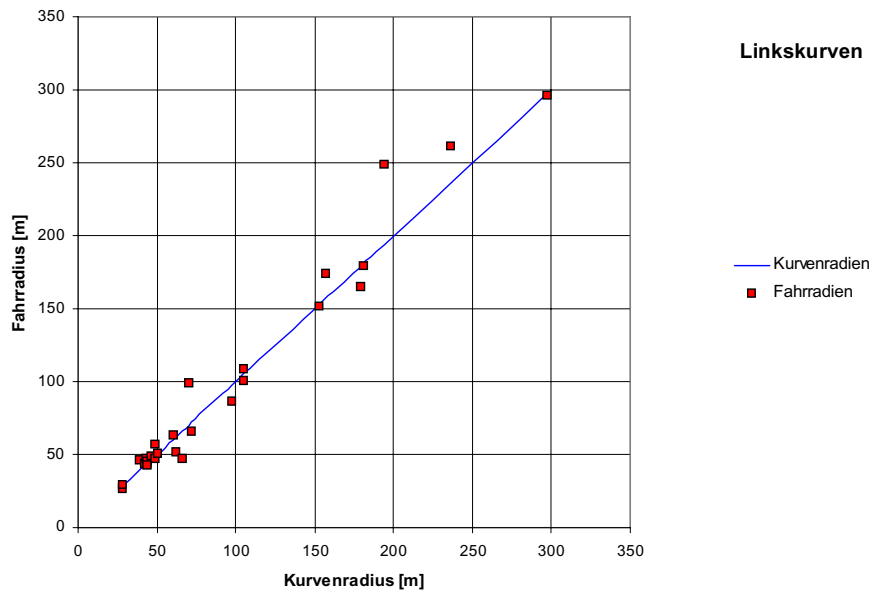


Abb. 58: Vergleich des tatsächlichen Kurvenradius mit dem gemittelten Fahrradius der Probanden (Linkskurven)

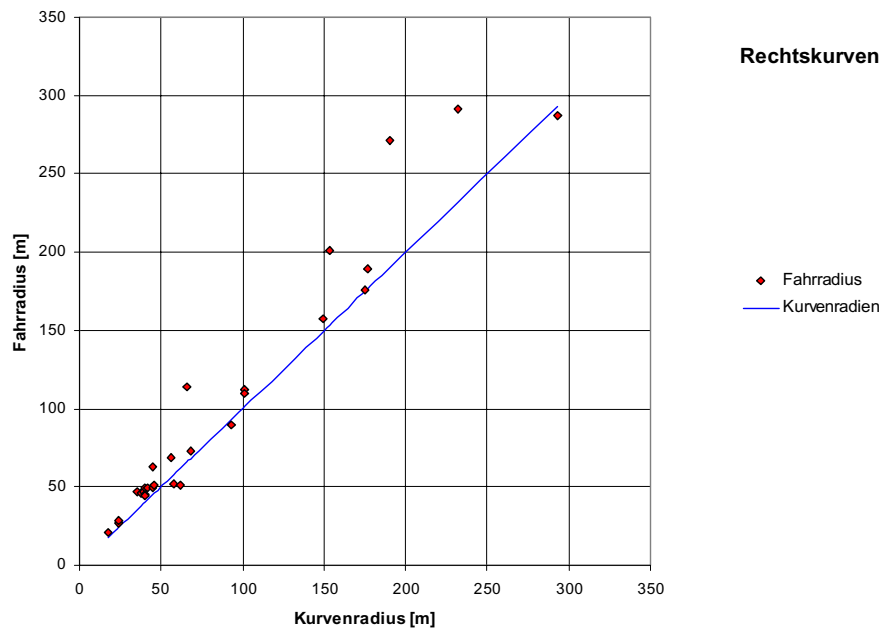


Abb. 59: Vergleich des tatsächlichen Kurvenradius mit dem gemittelten Fahrradius der Probanden (Rechtskurven)

5.3.7 Gemessenen Querbeschleunigungen in Abhängigkeit des Fahrradius'

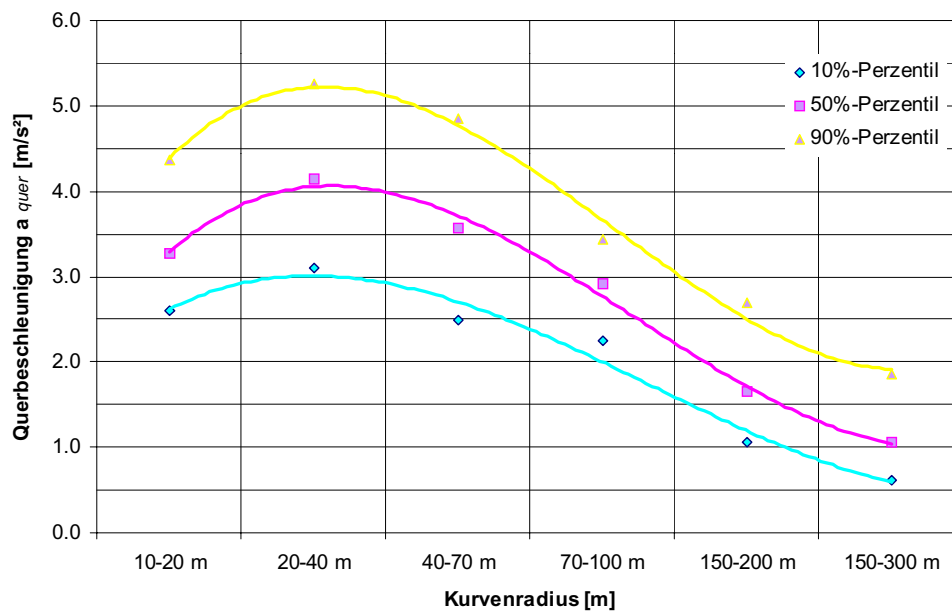


Abb. 60: Querbeschleunigungsbereiche bei den verschiedenen Kurvenkategorien

Für diese Darstellung sind die Messwerte nicht nach Rechts- und Linkskurve bzw. Berg- und Talfahrt unterschieden. Alle Messwerte sind innerhalb der Kategorien gepoolt. Für diese Neuordnung dieser Kategorien ist jeweils das 10%- und das 90%- Perzentil sowie der Median berechnet.

5.3.8 Auswertung der Beschleunigungsvorgänge

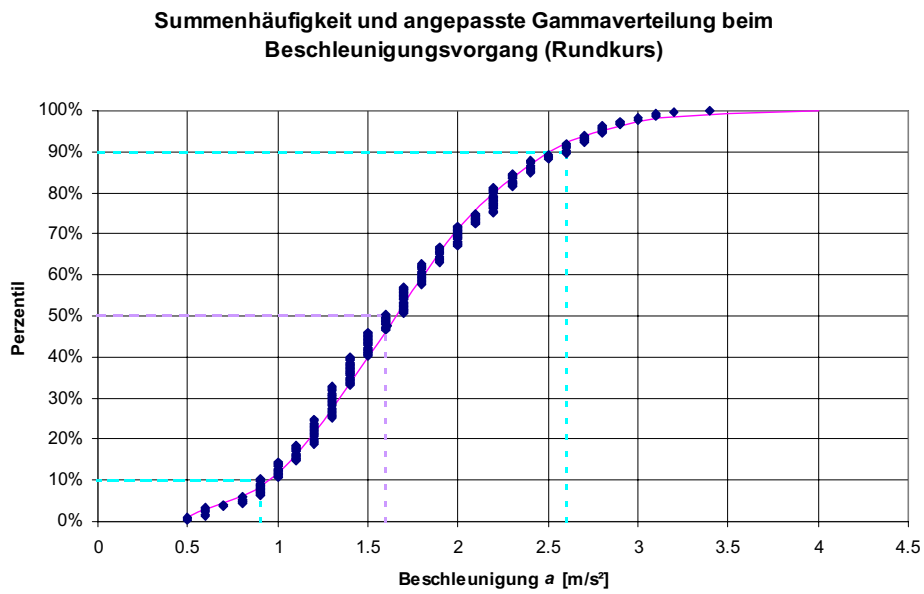


Abb. 61:

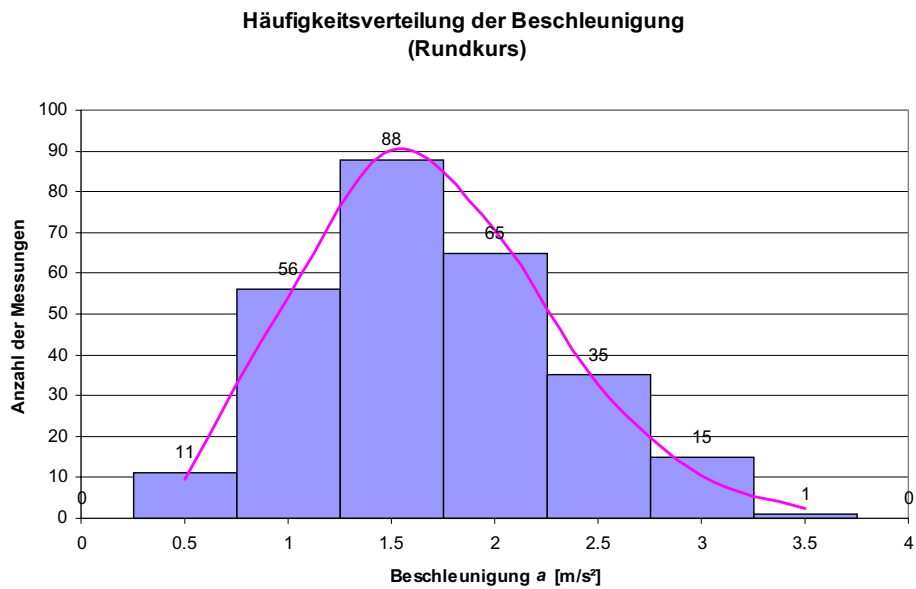


Abb. 62:

5.3.9 Auswertung der Verzögerungsvorgänge

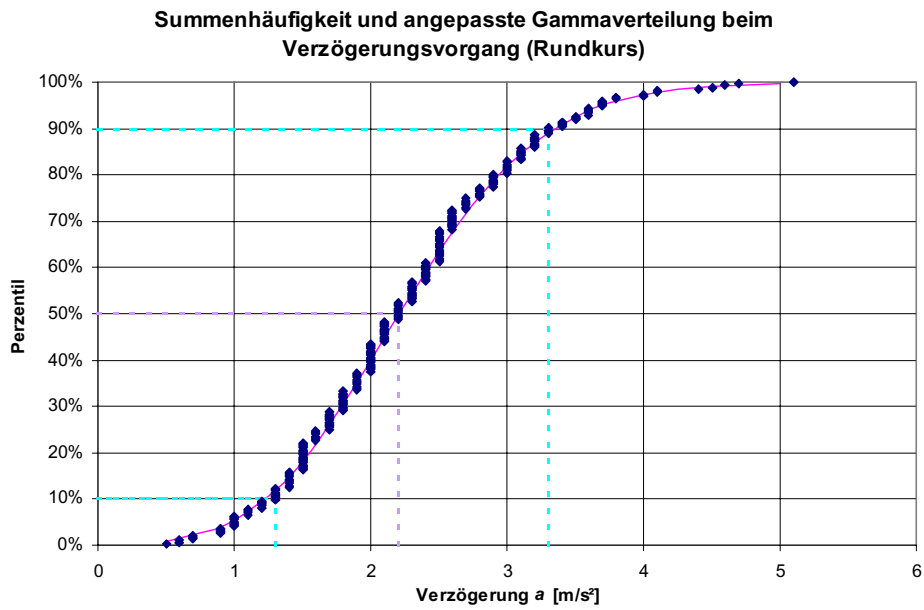


Abb. 63:

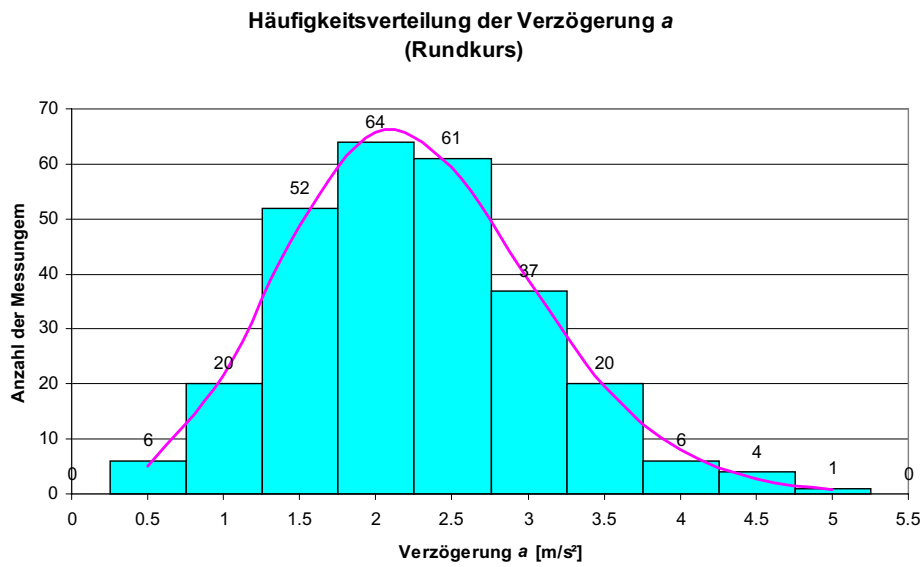


Abb. 64:

5.3.10 Vergleich der Beschleunigungswerte einzelner Testpersonen

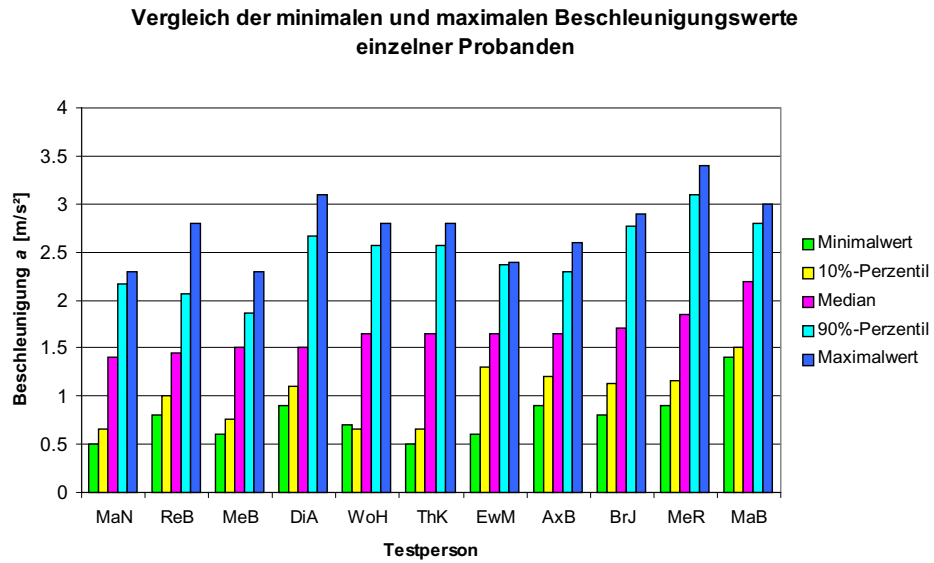


Abb. 65:

5.3.11 Vergleich der Verzögerungswerte einzelner Testpersonen

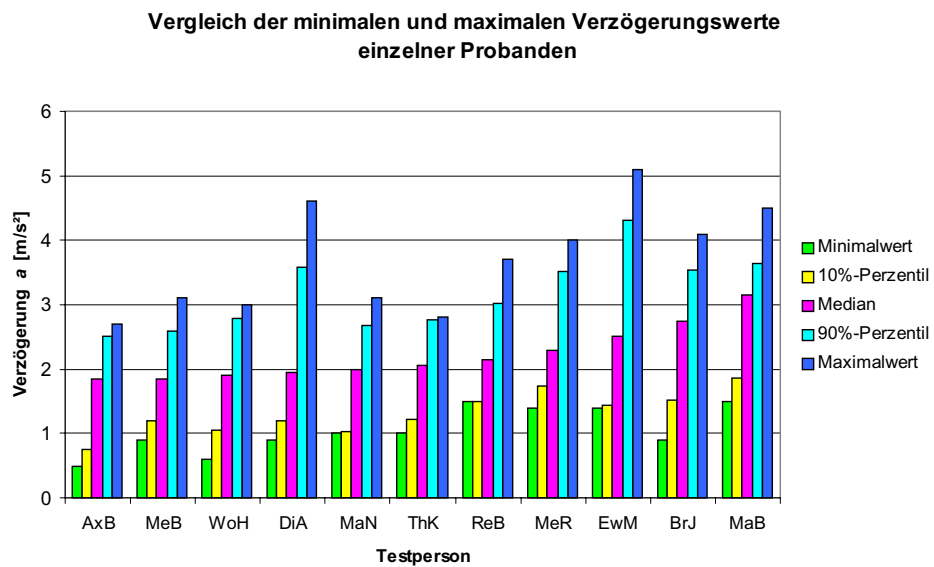


Abb. 66:

6 Die Zusammenfassung der Versuchsergebnisse

6.1 Der Unterschied zwischen Rechts- und Linkskurven

Innerhalb dieses Abschnitts wird geklärt, ob es einen signifikanten Unterschied zwischen dem Durchfahren einer Rechtskurve und dem Durchfahren einer Linkskurve gibt. Erste Überlegungen hierzu lassen vermuten, dass beim Durchfahren einer Rechtskurve höhere Querbeschleunigungen erreicht werden. Diese These beruht auf folgenden Überlegungen:

Insbesondere bei einem Rechtsabbiegevorgang muss der Fahrer keinen Gegenverkehr achten und kann das Abbiegemanöver vergleichsweise unbehindert ausführen.

Aufgrund des Rechtsverkehrs werden die Radien der Rechtskurven immer enger als die der Linkskurven sein.

Geht man davon aus, dass die Querbeschleunigung aus Komfortgründen einen gewissen Wert nicht übersteigt, so könnte dies auch für eine höhere Querbeschleunigung in Rechtskurven sprechen, da sich der Fahrer an der Fahrertür und mit dem linken Fuß im Fußraum abstützen kann.

Bewegt der Fahrer sein Fahrzeug in Rechtskurven im Grenzbereich, so hat er bei einem möglichen Ausbrechen seines Fahrzeuges zumindest die Fahrbahn des Gegenverkehrs zwischen sich und dem Verlassen der Straße.

Der Vergleich zwischen dem Rechts- und Linksabbiege­manöver zeigt aber, dass die Querbeschleunigungen nahezu identisch sind, ja sogar beim Linksabbiegen etwas höher liegen. Genauere Untersuchungen haben gezeigt, dass beim Linksabbiegen ohne Schneiden der Gegenfahrbahn später und damit auch stärker eingelenkt wird. Bei den hier untersuchten Rechtsabbiege­manövern wird hingegen allmählich, nahezu kontinuierlich, der Lenkeinschlag erhöht. Dies hat einen gleichmäßigeren und niedrigeren Querbeschleunigungsverlauf zur Folge.

Betrachtet man nun die Auswertung der einzelnen Kurvenkategorien so fällt deutlich auf, dass der Einfluss der Berg- und Talfahrt bei Querschleunigungsmessungen deutlich größer ausgeprägt ist, als der Einfluss zwischen dem Links- und Rechtsdurchfahren der Kurven. Alle Querschleunigungen in Kurven, die bergauf durchfahren werden, sind größer als die Querschleunigungen der gleichen Kurven bei der Talfahrt. Die Ausnahme bilden die Kurven 10, 24 und 28 der 2. Teststrecke, ausgewertet im Diagramm der Abbildung 51. Die Querschleunigung der ins Tal befahrenen Linkskurven ist jeweils höher. Dies liegt aber an den örtlichen Gegebenheiten. Auf Grund des vorherigen Streckenverlaufes sind diese Kurven bei der Talfahrt besser überschaubar. Deutlich auf dem Luftbild zu erkennen ist dies z. B. für die Kurve 24. Diese wird sozusagen von einer Linkskurve eingeleitet, während beim Durchfahren dieser Kurve bergauf eine Rechts- Links- Kombination durchfahren werden muss.

Signifikante Querschleunigungsunterschiede treten aber auch bei der Unterscheidung von Berg- und Talfahrt nur oberhalb des 90%-Perzentsils auf. Für die endgültige Auswertung der Querschleunigungsbereiche der einzelnen Kurvenkategorien sind diese Unterscheidungen deshalb entfallen.

6.2 Intra- und interpersonelle Unterschiede

Zu jeder für die Auswertung gebildeten Kategorien gibt es ein Diagramm, das Mittel-, Minimal- und Maximalwert für jede Versuchsperson darstellt. Diese machen die intra- und interpersonellen Unterschiede deutlich. Die intrapersonelle Betrachtungsweise hierbei die Variabilität der Messwerte für ein und dieselbe Person auf, wohingegen die interpersonelle Betrachtung die Streuung der Messwerte zwischen den verschiedenen Personen verdeutlicht.

Die Personen sind von links nach rechts auf aufsteigenden Mittelwerten sortiert. Die aufsteigende Sortierung der personenbezogenen Mittelwerte ermöglicht eine interpersonelle Unterscheidung der Beschleunigungen im gleichen Diagramm. Auf diese Weise lassen sich die Fahrerprofile z. B. von „verhalten“ (links) bis „offensiv“ (rechts) einteilen. Ein abstrakter Zahlenwert kann somit leichter in ein Fahrverhalten ausgedrückt werden. Ein

weiterer positiver Nebeneffekt dieser Darstellung ist, dass die Zusammensetzung des Endergebnisses transparent bleibt. Dies ist bei den mir vorliegenden Veröffentlichungen nicht der Fall.

Bei starker Schwankungsbreite zwischen Minimal- und Maximalwert, ist anstelle des Mittelwertes der Median der Messung angegeben. Dieser hat gegenüber dem Mittelwert den Vorteil, dass er von evtl. Ausreißern der Messung unbeeinflusst bleibt. Um auch bei großen Schwankungen genügend Informationen über die Verteilung der Messwerte zu haben, ist bei der intrapersonellen Darstellung zusätzlich das 10%- und das 90%-Perzentil angegeben.

Fahrmanöver	Versuchsperson	kleinster Median	Versuchsperson	größter Median	rel. Unterschied
Linksabbiegen	ReB	2,2 m/s ² *	DiA	4,8 m/s ² *	74 %
Rechtsabbiegen	ReB	2,2 m/s ² *	BrJ	4,3 m/s ² *	64 %
Bremsen	AxB	1,9 m/s ²	MaB	3,2 m/s ²	50 %
Beschleunigen	MaN	1,4 m/s ²	MaB	2,2 m/s ²	44 %

* kleinster bzw. größter Mittelwert

Tabelle 5: Relative Unterschiede bei verschiedenen Fahrmanövern

Die größte Schwankungsbreite beim interpersonellen Vergleich tritt bei Querbeschleunigungsmessungen innerhalb von Linksabbiegevorgängen auf. Der kleinste Median dieser Querbeschleunigungsmessung liegt bei 2,2 m/s² und der größte Median beträgt 4,8 m/s². Die Differenz beider Querbeschleunigungen beläuft sich also auf 2,6 m/s². Die Querbeschleunigung bei dem Linksabbiegevorgang ist bei der offensiv fahrenden Testperson also doppelt so hoch, wie bei der verhaltener fahrenden Testperson unseres Fahrerkollektivs.

Der kleinste Mittelwert der Querbeschleunigung bei dem Rechtsabbiegevorgang ist ebenfalls mit 2,2 m/s² erfasst und der größte Mittelwert beträgt 4,3 m/s². Die Differenz beim Rechtsabbiegevorgang beträgt demnach 2,1 m/s². Mit 2,2 m/s² ist die Differenz beim

Durchfahren des Autobahnkreuzes fast identisch. Jedoch resultiert diese aus einem höheren Niveau der Mittelwerte (3,3 bzw. 5,5 m/s²).

Obwohl die Schwankungsbreite bei den Längsbeschleunigungsmessungen intrapersonell gesehen größer ausfällt, und deshalb der Median verglichen wird, so fällt interpersonell gesehen die Differenz zwischen kleinstem und größtem Median kleiner aus. Der kleinste Median bei Verzögerungsmessungen ist 1,9 m/s² und der größte Median 3,2 m/s². Bei den Beschleunigungsmessungen ist der kleinste Median 1,4 m/s² und der größte Median 2,2 m/s².

Fahrmanöver	Versuchsperson	min [m/s ²]	max [m/s ²]	rel. Unterschied [%]
Linksabbiegen	ReB	1.7	2.6	41.7
Rechtsabbiegen	ReB	1.9	3.0	44.4
Autobahnkreuz	ReB	2.9	4.0	33.8
Bremsen	AxB	0.5	2.7	137.5
Beschleunigen	MaN	0.5	2.3	128.6

Tabelle 6: Intrapersonelle Schwankungsbreiten der jeweils „schwächsten Fahrer“

Fahrmanöver	Versuchsperson	min [m/s ²]	max [m/s ²]	rel. Unterschied [%]
Linksabbiegen	DiA	3.8	5.9	42.2
Rechtsabbiegen	BrJ	3.3	4.9	40.9
Autobahnkreuz	MaN	4.3	6.8	44.4
Bremsen	MaB	1.5	4.5	100.0
Beschleunigen	MaB	1.4	3.0	72.7

Tabelle 7: Intrapersonelle Schwankungsbreiten der jeweils „stärksten Fahrer“

Eine feste Reihenfolge der Probanden bezüglich der Fahrweise kann nicht festgestellt werden. Das Querbeschleunigungsverhalten der einzelner Probanden lässt somit keinen Rückschluss auf das Längsbeschleunigungsverhalten und umgekehrt zu. Die hier beschriebenen Sachverhalte beruhen auf den Diagrammen der Abbildungen 45, 46, 57, 65 und 66.

6.3 Die Verteilung der Messwerte

Sämtliche Messwerte sind wie im Abschnitt „Die Auswertung in Excel“ beschrieben, in Perzentilen über der Beschleunigung aufgetragen. Die experimentelle Häufigkeitsverteilung ist für alle Messungen linkssteil. Der Abstand der unteren Perzentile vom zentralen Wert ist mithin kleiner als der Abstand der oberen Perzentile. Der Unterschied zwischen den „verhaltener“ und „normaler“ Fahrweise ist also geringer als derjenige zwischen „normaler“ und „offensiver“ Fahrweise. Für die Anwendung in der forensischen Unfallrekonstruktion bedeutet dies, dass bei der Einordnung einer Person in eine bestimmte Fahrer-kategorie, letzterer Unterschied bedeutsamere Auswirkungen hat als der erstgenannte (und deshalb mehr Diskussion lohnt).

6.4 Die Abweichungen zwischen Fahrradius und Kurvenradius

Um die Abweichungen zwischen Fahrradius und Kurvenradius darstellen zu können, wurde der Mittelwert des errechneten Fahrradius' aller Probanden für jede Kurve errechnet. Die Abweichungen sind je für Links- und Rechtskurven in den Abbildungen 58 und 59 dargestellt. Die blaue Linie repräsentiert die tatsächlichen Kurvenradien, die roten Markierungen stehen für die gemittelten Fahrradien.

Zum Einen entnimmt man dieser Darstellung die Verteilung der einzelnen Kurvenradien in unseren Versuchen: Der Radienbereich der Kurven bis 100 m ist mit 42 Kurven vertreten, während der Radienbereich oberhalb von 100 – 300 m nur von 18 Kurven repräsentiert wird.

Zum Zweiten lässt sich mit dieser Darstellung überprüfen, inwieweit Kurven- und Fahrradius übereinstimmen. Dies ist auch deshalb von Bedeutung, weil der (objektiv für eine Kurve zu ermittelnde) Kurvenradius für die Bildung der Auswertekategorien verwendet wurde.

Der Fahrradius der Kurven bis 50 m stimmt bei Rechts- und Linkskurven mit dem tatsächlichen Kurvenradius am besten überein. Die Fahrradien der Linkskurven stimmen qualitativ besser mit den tatsächlichen Kurvenradien überein. Während Abweichungen des Fahr-

radius' beim Durchfahren von Rechtskurven nur durch ein Außenanfahren der Kurven entstehen, werden die Abweichungen beim Durchfahren von Linkskurven sowohl durch das Außenanfahren als auch durch das Schneiden der Kurven hervorgerufen.

6.5 Die 10%-, 50%- und 90%-Perzentile aller Messungen

Fahrmanöver	10%-Perzentil [m/s ²]	50%-Perzentil [m/s ²]	90%-Perzentil [m/s ²]
Rechtsabbiegen	2.6	3.2	4.3
Linksabbiegen	2.6	3.4	4.4
Autobahnkreuz	3.2	4.2	4.9

Tabelle 8: Querb beschleunigung bei verschiedenen Fahrmanövern

Kurvenkategorie	10%-Perzentil [m/s ²]	50%-Perzentil [m/s ²]	90%-Perzentil [m/s ²]
10-20 m	2.6	3.3	4.4
20-40 m	3.1	4.1	5.3
40-70 m	2.5	3.6	4.9
70-100 m	2.2	2.9	3.4
150-200 m	1.1	1.7	2.7
150-300 m	0.6	1.1	1.9

Tabelle 9: Querb beschleunigung bei verschiedenen Kurvenkategorien

Fahrmanöver	10%-Perzentil [m/s ²]	50%-Perzentil [m/s ²]	90%-Perzentil [m/s ²]
Beschleunigen	0.9	1.6	2.6
Verzögern	1.3	2.2	3.3

Tabelle 10: Längsb beschleunigung

7 Vergleich der eigenen Versuchsergebnisse mit der Literatur

7.1 Querschleunigungen

Den in [1] ermittelten Grenzquerbeschleunigungen verschiedener Pkw mit unterschiedlichen Beladungszuständen können mit unseren Versuchen keine Ergebnisse gegenübergestellt werden. Jedoch kann die Erkenntnis, dass das Beurteilungsvermögen und das damit zusammenhängende Fahrgefühl, stark von den Erfahrungswerten durch das eigene Fahrzeug geprägt sind, bestätigt werden. In einem kleinen Versuch wurde dazu ein Autobahnkreuz von drei Probanden zunächst mit dem eigenen, danach mit einem fremden Fahrzeugen durchfahren. Dabei sollten die Ausfahrten zunächst normal und dann zügig durchfahren werden. Für alle Probanden galt, dass zumindest bei der zügigeren Fahrt, mit dem eigenen Auto höhere Querschleunigungen erzielt wurden, als mit einem fremden Fahrzeug.

Die von [2] propagierte Sicherheitsgrenze des Normalfahrers zielt speziell auf die Anwendung in der Unfallrekonstruktion. Um die Ergebnisse dieser Veröffentlichung besser mit den Ergebnissen unserer Messungen vergleichen zu können, sind die Beschleunigungswerte dieser Veröffentlichung nach der unten aufgeführten Beziehung in Kurvenradien umgerechnet und dargestellt worden (Abbildung 67):

$$R = \frac{v^2}{a}$$

Bei dem Vergleich des 90%-Perzentil unserer Messung mit dem korrespondierenden Radius der Sicherheitsgrenze des Normalfahrers fallen sofort deutliche Differenzen auf. Bis zu einem Kurvenradius von 60 m liegt das 90%-Perzentil weit oberhalb der Sicherheitsgrenze, obwohl dieser Bereich für einen Normalfahrer als riskant oder sogar unbeherrschbar gilt. Dabei muss zum Einen berücksichtigt werden, dass unsere Ergebnisse bei normaler Fahrweise erzielt wurden und zum Anderen bei einem direkten Vergleich mit der oberen Grenze sicherlich auch Perzentile über dem 90%-Perzentil berücksichtigt werden müssen.

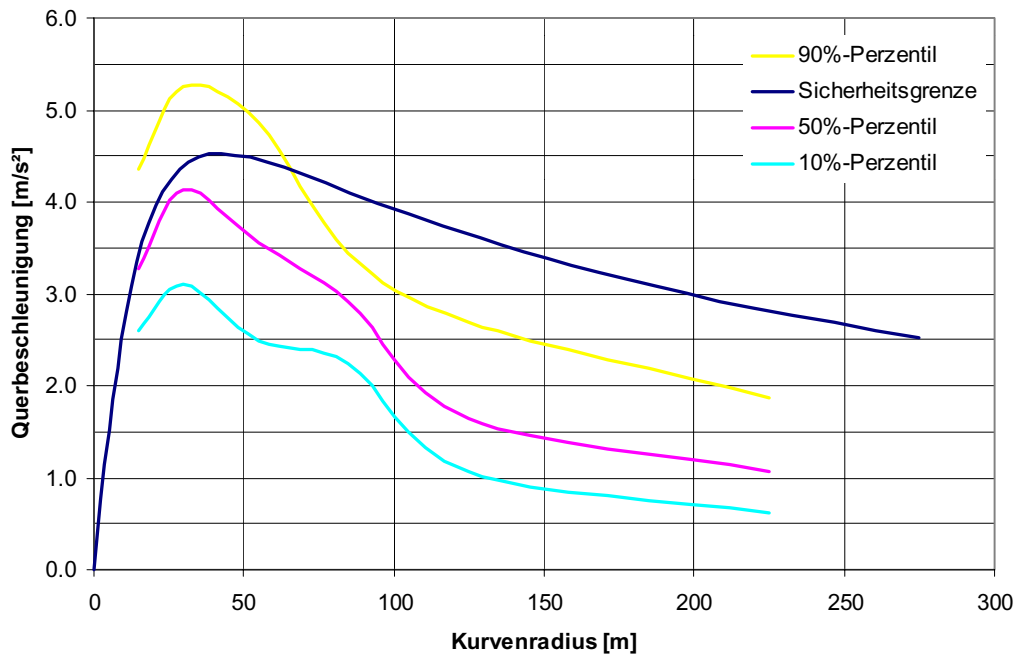


Abb. 67: Direkter Vergleich der Sicherheitsgrenze mit den Perzentilen unserer Messungen

Unsere Messungen bei normalen Fahrmanövern

Sicherheitsgrenze des Normalfahrers nach [2]

Kurvenradien [m]	10%-Perzentil [m/s ²]	90%-Perzentil [m/s ²]	Grenzwert [m/s ²]	err. Kurvenradien [m]
10 – 20	2.6	4.4	3.7	18.8
20 – 40	3.1	5.3	4.5	42.7
40 – 70	2.5	4.9	4.4	63.1
70 – 100	2.2	3.4	4	94.5
150 – 200	1.1	2.7	3.5	141.1
150 – 300	0.6	1.9	2.8	223.2

Tabelle 11: Vergleich unserer Messungen mit der Sicherheitsgrenze des Normalfahrers

Der höchste Querbeschleunigungswert wird bei beiden Untersuchungen bei einem Kurvenradius von 20 – 40 m erreicht. Auch die Tendenz das mit höheren Geschwindigkeiten die Querbeschleunigungswerte abnehmen, ist mit unseren Versuchen in Einklang zu bringen. Jedoch ist nicht einzusehen, weshalb die Querbeschleunigungswerte bei der Sicherheitsgrenze des Normalfahrers unterhalb von 30 km/h so rasch abfällt. Der Kurvenverlauf spiegelt diesbezüglich eher den Verlauf eines normalen Fahrmanövers wieder. Der Grenzbe-
reich der Querbeschleunigung liegt auch für Normalfahrer deutlich höher.

Die Punkt-Wolken-Diagramme aus [4] bestätigen diesen Sachverhalt. Hier werden für einen Normalfahrer Querbeschleunigungen bis 5 m/s^2 angegeben. Ein sportlicher Fahrer erreicht sogar Querbeschleunigungen bis 8 m/s^2 .

Bei der Bestimmung des Wankverhaltens für die verschiedenen Versuchsfahrzeuge, wurden z. B. sämtliche Querbeschleunigungen in einem Geschwindigkeitsbereich unter 30 km/h ermittelt. Die gemessenen Querbeschleunigungen lagen jedoch oberhalb von 4 m/s^2 . Dabei handelte es sich sicherlich nicht um normale Fahrmanöver, jedoch ist ein solcher Fahrvorgang z. B. bei einem zügigen Wendemanöver auf einer stark frequentierten Straße durchaus denkbar und nicht außerhalb des fahrerischen Könnens eines Normalfahrers anzusiedeln. Denn auch bei unseren Versuchen musste das Fahrzeug stets im beherrschbaren Bereich bewegt werden, um nicht das teure Kamera-Equipment in Gefahr zu bringen.

7.1.1 Vergleich mit den Straßenbauvorschriften

Bei dem Vergleich unserer Messwerte, mit den in den Straßenbauvorschriften vorgestellten Querbeschleunigungswerten für verschiedene Kurvenradien, kann eine übereinstimmende Tendenz festgestellt werden: Die Querbeschleunigung sinkt kontinuierlich mit höher werdenden Kurvengeschwindigkeiten.

Da aber die Kurvenradien unserer Teststrecke gerade im Bereich bis 50 km/h Höchstgeschwindigkeit deutlich unter dem vorgeschlagenem Mindestradius von 90m bleiben, ist

nicht verwunderlich, dass die gemessenen Werte deutlich höher sind, als die in diesem Kapitel errechneten Werte.

7.2 Bremsverzögerungen

Fasst man die in [9] veröffentlichten Bremsverzögerungen bis in den Stand zusammen, so ergibt sich für einen Geschwindigkeitsbereich von 25 – 40 km/h eine Verzögerungsbandbreite von 1,5 – 3,2 m/s². Dieser Bereich stimmt sehr gut mit der in dieser Arbeit ermittelten Bandbreite von 1,3 – 3,3 m/s² überein. Auch der Einzelwert in [11] von 2,45 m/s² lässt sich recht gut mit dem Median unserer Messungen von 2,2 m/s² in Einklang bringen. Leider ist bei den Werten aus der Literatur nicht bekannt, ob es sich um Mittelwerte oder um statistisch erhobene Werte handelt. Auch zur Zusammensetzung der Messergebnisse bezüglich intra- und interpersoneller Unterschiede werden in den Veröffentlichungen keine Hinweise gegeben.

7.2.1 Vergleich mit den Straßenbauvorschriften

Bei der Betrachtung der signalbedingten Verzögerungsvorgänge passt zumindest der Bereich von 60 – 70 km/h in die Bandbreite unserer Messungen. Zu Erinnerung sei erwähnt, dass die Vorschrift mit fallender Geschwindigkeit eine höhere Verzögerung fordert. Für 60 – 70 km/h liegt die Verzögerungsbandbreite bei 2,6 – 3 m/s². Bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h wird eine signalbedingte Bremsung von 3,9 m/s² gefordert. Dieser Bereich liegt mit 0,6 m/s² deutlich außerhalb der hier ermittelten Bandbreite von 1,3 – 3,3 m/s². Verzögerungen oberhalb dieser Bandbreite werden demnach, bei normalen Fahrmanövern aus Komfortgründen gemieden. Damit ließe sich vielleicht auch das häufig zu beobachtende Verhalten erklären, vor einer auf gelb umspringenden Ampel lieber zu beschleunigen, um nicht zu stark in die Bremsen steigen zu müssen.

7.3 Anfahrbeschleunigungen

Das Hauptaugenmerk lag, wie die Ausführungen in den einzelnen Kapiteln zeigten, auf der Auswertung der Querbeschleunigungen. Es sind z. B. keine separaten Versuchsstrecken abgefahren worden, um den Einfluss der örtlichen Gegebenheiten auf die Anfahrbeschleu-

nigung zu erörtern, wie es in [14] und [15] beschrieben ist. Dennoch wurden rund 270 Anfahr- oder Beschleunigungsvorgänge ausgewertet. Ca.70 Messungen decken dabei die Anfahrbeschleunigung aus dem Stand heraus ab. Die restlichen 200 Messungen beruhen auf Beschleunigungen nach Abbiegevorgängen. Während alle anderen Messungen direkt mit den Werten der Literatur verglichen wurden, sind die hier ermittelten Werte lediglich ergänzend zu betrachten. Die Ursache hierfür liegt sowohl in der unterschiedlichen Art und Weise der Auswertung der Messergebnisse, als auch an den stark variierenden Randbedingungen.

In [14] wird eine mittlere Anfahrbeschleunigung von $1,3 \text{ m/s}^2$ angegeben. Für die Auswertung wurde die mittlere Beschleunigung nach 6 s Beschleunigungszeit aus dem Stillstand herangezogen. In [15] ist eine Beschleunigungsbandbreite von $1,7 - 2,3 \text{ m/s}^2$ angegeben. Gemäß [15] können Anfahrvorgänge in der Zeitspanne bis 4 s nach Anfahrbeginn hinreichend genau durch eine konstante Beschleunigung beschrieben werden.

Der größte Teil unserer Beschleunigungsmessungen wurde während des Beschleunigungsvorgangs nach Abbiegemanövern aufgezeichnet. Der über zehn Werte (entspricht 1 s) gemittelte Maximalwert wurde dann für die statistische Auswertung herangezogen. Die Beschleunigungen aus dem Stand wurden in gleicher Weise ausgewertet. Die höchsten Anfahrbeschleunigungen können innerhalb der ersten 2 Gänge erfolgen. Bei normaler Fahrweise richtet sich die Beschleunigungswahl aber nach Komfortgesichtspunkten. Ruckartiges Anfahren und Schalten wird dabei eher gemieden. Es werden also möglichst „weiche“ Fahrbewegungen angestrebt, sodass das Beschleunigungspotential der ersten Gänge nicht ausgenutzt wird. Aus diesem Grund können die Anfahrbeschleunigungen und die Beschleunigungen nach Abbiegevorgängen in einem Diagramm zusammengefasst (gepoolt) werden. Dabei entstand eine Beschleunigungsbandbreite von $0,9 - 2,6 \text{ m/s}^2$ (10%- und 90%-Perzentil). Die Fahrgeschwindigkeit bei den Abbiegevorgängen lag bei allen Probanden bei $20 - 30 \text{ km/h}$

8 Zusammenfassung

In dieser Diplomarbeit wurde mit Hilfe digitaler Messtechnik der Erfahrungsbereich des Normalfahrers in alltäglichen Verkehrssituationen untersucht. Besonderes Augenmerk galt der vom Fahrer akzeptierten Querbeschleunigung bei Kurvenfahrten und Abbiegevorgängen. Ergänzend wurde das Beschleunigungs- und Bremsverhalten bei normalen Beschleunigungs- und Anhaltevorgängen untersucht.

Dazu wurden zunächst die Befunde aus der Literatur ausgewertet. Es fiel auf, dass bei den meisten Veröffentlichungen die genaue Zusammensetzung der Ergebnisse nicht nachvollzogen werden kann. Eine Verwendung solcher Daten in der forensischen Unfallrekonstruktion ist somit nur eingeschränkt oder gar nicht möglich. Darum wurde bei dieser Arbeit stets darauf geachtet, dass die Aufzeichnung und Auswertung der Daten auch für Außenstehende möglichst transparent gestaltet wurden.

Um von den Versuchsmessungen des elfköpfigen Fahrerkollektivs auf die Allgemeinheit schließen zu können, wurden alle Messdaten statistisch ausgewertet und aufbereitet. Ein wesentlicher Schritt zur Transparenz dieser Auswertungen erfolgte durch die intra- und interpersonellen Vergleiche der Probanden. Diese Vergleiche wurden für jede untersuchte Beschleunigungsart in einem separaten Balkendiagramm aufgeführt.

Oft werden in der Literatur nur Einzelwerte für die verschiedenen Beschleunigungsarten genannt. Für die Unfallrekonstruktion kommen aber Einzelwerte nur für Grenzwertbetrachtungen (z. B. für physikalische Grenzen) in Frage. Bei der Beschreibung des Fahrverhaltens eines Normalfahrers reicht ein Einzelwert nicht aus. Hier spielt nämlich der Charakter des Einzelnen bezüglich der Risikobereitschaft, Verantwortung und Erfahrung (um nur die wichtigsten zu nennen) eine große Rolle. Aus diesem Grund können Beschleunigungswerte nur in repräsentativen Bandbreiten (10%- und 90%-Perzentil) wiedergegeben werden. In den hier diskutierten Veröffentlichungen zur Querbeschleunigung fehlen diese Bandbreiten vollständig.

Die ausführliche Auswertung der Messungen zeigte, dass eine einzige Bandbreite für den gesamten Querbeschleunigungsbereich ebenfalls ungünstig ist. Deshalb wurden in dieser Arbeit jeweils die Bandbreite für kleinradige Abbiegevorgänge, für das Durchfahren eines Autobahnkreuzes und für insgesamt sechs verschiedene Kurvenkategorien mit 10 – 300 m Kurvenradien gebildet.

Der direkte Vergleich unserer Querbeschleunigungsmessungen mit der Sicherheitsgrenze des Normalfahrers [2] ergab deutliche Differenzen. Bis 60 m Kurvenradius liegen die Querbeschleunigungen des 90%-Perzentils unserer Messungen deutlich oberhalb der in der Unfallrekonstruktion etablierten Sicherheitsgrenze. Dabei ist zu beachten, dass bei einem Vergleich zwischen normalen Fahrvorgängen und der Sicherheitsgrenze des Normalfahrers, sicherlich auch Perzentile über dem 90%-Perzentil berücksichtigt werden müssen.

Bei den Betrachtungen zur Längsbeschleunigung wurden zum Einen Verzögerungen bis in den Stand, wie z. B. vor Ampeln, aber auch Verzögerungen vor Abbiegevorgängen untersucht. Insgesamt wurden knapp 70 Bremsungen bis in den Stand und 200 Bremsungen vor Abbiegevorgängen aufgeführt. Die Anzahl und die Aufteilung der Beschleunigungsmessungen erfolgte analog zu diesen Verzögerungsbetrachtungen.

Die Ergebnisse unserer Verzögerungsmessungen wurden nahezu deckungsgleich mit den Werten aus den Veröffentlichungen bestätigt. Die Beschleunigungsmessungen konnten aufgrund verschiedener Auswertungsmethoden nicht direkt miteinander verglichen werden und sind somit ergänzend zu betrachten.

Der Einfluss der Witterungsbedingungen sowie der Lichtverhältnisse und Ortskundigkeit der Testpersonen könnte in weiteren Untersuchungen Berücksichtigung finden. Weitere Aspekte wären die Quer- und Längsbeschleunigungen von verschiedenen Fahrzeugarten (z. B. von Lkw, Sattel- und Zugmaschinen im Beladenen und unbeladenen Zustand) zu untersuchen. Im Hinblick auf die entstehenden Datenmengen ist es dann aber sinnvoll eine Steuerungslogik zu entwickeln, die die Auswertung der Messwerte erleichtert.

9 Abbildungsverzeichnis

	Seite
Abb. 1: Sicherheitsgrenze des Normalfahrers bei Kurvenfahrt	4
Abb. 2: Querb beschleunigung bei Spurwechselforgängen	5
Abb. 3: Erfahrungsbereich des Normalfahrers	6
Abb. 4: Mindestkurvenradien für ausgewählte Geschwindigkeiten	9
Abb. 5: Tendenz der Querb beschleunigung	11
Abb. 6: Abbremsungen mit und ohne DBC	12
Abb. 7: Blockschaltbild ADXL 202	18
Abb. 8: RMS über Bandbreite	20
Abb. 9: RMS bei unterschiedlicher Abtastrate	20
Abb. 10: Pulsbreitendekodierung	21
Abb. 11: Degeneration eines 1 Hz Sinussignals	23
Abb. 12: Fourier-Transformation	25

Abb. 13:	Abstraktion eines Abbiegevorganges	26
Abb. 14:	Anwendung des Filters auf das Model	27
Abb. 15:	Querbesehleunigungen von kleinradigen Rechtsabbiegevor- gängen	28
Abb. 16:	Messschriebeausschnitt in 5-facher Vergrößerung	28
Abb. 17:	Verschiedene Bandbreiten bei der gleitenden Mittelwertbil- dung	29
Abb. 18:	Draufsicht der Messeinheit	30
Abb. 19:	Seitenansicht der Messeinheit	30
Abb. 20:	Anheben des Fzg.-Hecks	31
Abb. 21:	Abgleich der Koordinatenlage	31
Abb. 22:	Günstigste Platzierung der ME nach Ackermann	32
Abb. 23:	Tatsächliche Querbesehleunigung bei Positionierung der ME im Fußraum	33
Abb. 24:	Fehleranteil bei der Positionierung der ME im Fußraum	34
Abb. 25:	Durch Fliehkraft hervorgerufene Schräglaufwinkel	35
Abb. 26:	Schräglaufwinkel bei verschiedenen Querbesehleunigungen	36

Abb. 27:	Resultierender Schräglaufwinkel an der Hinterachse	37
Abb. 28:	Geometrische Zusammenhänge zwischen Schräglaufwinkel und Querbeschleunigungsabweichung	37
Abb. 29:	Prozentuale Abweichung des Messwertes bei verschiedenen Schräglaufwinkeln	38
Abb. 30:	Wankwinkel φ	39
Abb. 31:	Nickwinkel β	39
Abb. 32:	1. Versuchsaufbau	40
Abb. 33:	Wankwinkel (φ) bei verschiedenen Querbeschleunigungen (VW Golf II)	41
Abb. 34:	2. Versuchsaufbau	42
Abb. 35:	Grafische Darstellung der Zusammenhänge	43
Abb. 36:	Abweichungen zwischen gemessener und tatsächlicher Querbeschleunigung (VW Golf II)	44
Abb. 37:	Phasenverschiebung des Wankwinkels gegenüber der Querbeschleunigung	44
Abb. 38:	Quasistatische Kompensation für verschiedene Fahrzeuge	45
Abb. 39:	Höhenänderung des Aufbaus gegenüber der Vorder- und Hinterachse in Abhängigkeit der Verzögerung a	47
Abb. 40:	Screenshot der Signalanalysesoftware Dadisp	55

Abb. 41:	Summenhäufigkeit der Querschleunigung beim Rechtsabbiegevorgang	59
Abb. 42:	Häufigkeitsverteilung der in Klassen eingeteilten Querschleunigung beim Rechtsabbiegevorgang	59
Abb. 43:	Summenhäufigkeit der Querschleunigung beim Linksabbiegevorgang	60
Abb. 44:	Häufigkeitsverteilung der in Klassen eingeteilten Querschleunigungen beim Linksabbiegevorgang	60
Abb. 45:	Vergleich der intra- sowie der interpersonellen Querschleunigungen (Rechtsabbiegevorgang)	61
Abb. 46:	Vergleich der intra- sowie der interpersonellen Querschleunigungen (Linksabbiegevorgang)	61
Abb. 47:	Kurvenkategorie A 1. Teststrecke (Kurven-Nr.: 1-3)	63
Abb. 48:	Kurvenkategorie B 2. Teststrecke (Kurven-Nr.: 8, 15, 21, 22)	63
Abb. 49:	Kurvenkategorie C 2. Teststrecke (Kurven-Nr.: 5, 7, 9, 11, 13, 14, 16, 18)	64
Abb. 50:	Kurvenkategorie C 2. Teststrecke (Kurven-Nr.: 4, 6, 12, 17)	64
Abb. 51:	Kurvenkategorie D 2. Teststrecke (Kurven-Nr.: 10, 24, 28)	65
Abb. 52:	Kurvenkategorie D 2. Teststrecke (Kurven-Nr.: 27)	65
Abb. 53:	Kurvenkategorie E 2. Teststrecke (Kurven-Nr.: 3, 20, 25, 26)	66
Abb. 54:	Kurvenkategorie F 2. Teststrecke (Kurven-Nr.: 2, 19, 23)	66

Abb. 55:	Summenhäufigkeit der Querbeschleunigung beim Durchfahren eines Autobahnkreuzes	67
Abb. 56:	Häufigkeitsverteilung der in Klassen eingeteilten Querbeschleunigungen beim Durchfahren eines Autobahnkreuzes	67
Abb. 57:	Vergleich der intra- sowie interpersonellen Querbeschleunigungen (Autobahnkreuz)	68
Abb. 58:	Vergleich des tatsächlichen Kurvenradius mit dem gemittelten Fahrradius der Probanden (Linkskurven)	69
Abb. 59:	Vergleich des tatsächlichen Kurvenradius mit dem gemittelten Fahrradius der Probanden (Rechtskurven)	69
Abb. 60:	Querbeschleunigungsbereiche bei den verschiedenen Kurvenkategorien	70
Abb. 61:	Summenhäufigkeit bei Beschleunigungsvorgängen	70
Abb. 62:	Häufigkeitsverteilung der in Klassen eingeteilten Beschleunigung a	71
Abb. 63:	Summenhäufigkeit bei Verzögerungsvorgängen	72
Abb. 64:	Häufigkeitsverteilung der in Klassen eingeteilten Verzögerung a	72
Abb. 65:	Vergleich der intra- sowie der interpersonellen Beschleunigungswerte	73
Abb. 66:	Vergleich der intra- und interpersonellen Verzögerungswerte	73
Abb.67:	Direkter Vergleich der Sicherheitsgrenze mit den Perzentilen unserer Messungen	83

10 Tabellenverzeichnis

	Seite
Tabelle 1: Maximal abverlangte Querschleunigung	10
Tabelle 2: Verzögerungswerte bei signalbedingten Anhaltevorgängen	13
Tabelle 3: Die Probanden	49
Tabelle 4: Die Versuchsfahrzeuge	49
Tabelle 5: Relative Unterschiede bei verschiedenen Fahrmanövern	76
Tabelle 6: Intrapersonelle Unterschiede des jeweils „schwächsten Fahrer“	77
Tabelle 7: Intrapersonelle Unterschiede des jeweils „stärksten Fahrer“	77
Tabelle 8: 10%-, 50%- und 90%-Perzentile beim Durchfahren von Links-/Rechtsabbiegevorgängen/Autobahnkreuz	79
Tabelle 9: 10%-, 50%- und 90%-Perzentile bei den verschiedenen Kurvenkategorien	79
Tabelle 10: 10%-, 50%- und 90%-Perzentile bei Beschleunigung und Verzögerung	79
Tabelle 11: Vergleich unserer Messungen mit der Sicherheitsgrenze des Normalfahrers	81

11 Literaturverzeichnis

- [1] Langwieder, K.:
Aktive Sicherheit und Unfalluntersuchungen
Zeitschriftenaufsatz der Technischenüberwachung
Sicherheit und Zuverlässigkeit Band 21 Heft 9 (1980)
- [2] Schimmelpfennig, K.-H.; Nackenhorst, U.:
Bedeutung der Querbeschleunigung in der Verkehrsunfallrekonstruktion
Sicherheitsgrenze des Normalfahres
Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik Jahrgang `85
Heft 4 (Seite 94 – 96)
- [3] Erfahrungsbereich des Normalfahrers
Audi AG Foliensatz (Bremsen)
- [4] Bachmann, T.; Bielaczek, C.; Breuer, B.
Der Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn und dessen
Inanspruchnahme durch den Fahrer
ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 97 (1995) 10
- [5] Wirth, W.:
Sicherheitsaspekte des Straßenentwurfs
Das deutsche Trassierungsregelwerk im Wandel der Zeit
Straße und Autobahn 3/2000
- [6] Arbeitsgruppe Straßenentwurf
Richtlinie für die Anlage von Straßen (RAS) Jahrgang `88
Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen

-
- [7] Arbeitsgruppe Straßenentwurf
Richtlinie für die Anlage von Landstraßen (RAL) Jahrgang `76
Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen
- [8] Nirschl, G.; Geiser, G.:
Zeitbudgetanalyse der Fahrer Fahrzeug Interaktion als Werkzeug für die
Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen
VDI Bericht Nr. 1046, (1993)
- [9] Claffey, P.J.:
Vehicle Operating Characteristics
Transportation and Traffic Engineering Handbook
Institute of Transportation Engineers, J.E. Baerwald (ed.) Prentice – Hall
Engelwood Cliffs, N.J. 1976
- [10] Ludmann, J.; Weilkes, M.:
Fahrermodell als Hilfsmittel für die Entwicklung von ACC – Systemen
Automobiltechnische Zeitschrift 101 (1999), 5
- [11] Konik, D.; Müller, R.; Prestl, W.; Toelge, T.; Leffler, H.:
Elektronisches Bremsen Management als erster Schritt zu einem Integrierten Chassis Management
Automobiltechnische Zeitschrift 101 (1999), 4
- [12] Arbeitsgruppe Verkehrsführung und Verkehrssicherheit
Richtlinie für Lichtsignalanlagen (RiLSA) Jahrgang `92
Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen

-
- [19] Weber, M.
Die Aufklärung des Kfz – Versicherungsbetruges
Schriftenreihe Unfallrekonstruktion
Münster 1995
- [20] Terra - Map – Server GmbH
Stockholmer Alle 24
44264 Dortmund
www.terramapserver.com
- [21] Hugemann, W.; Zöller, H.
Notbremsreaktionen bei Dämmerungssehen
und niedrigen Objektkontrasten
Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 34. Jahrgang (1996)
Heft 9

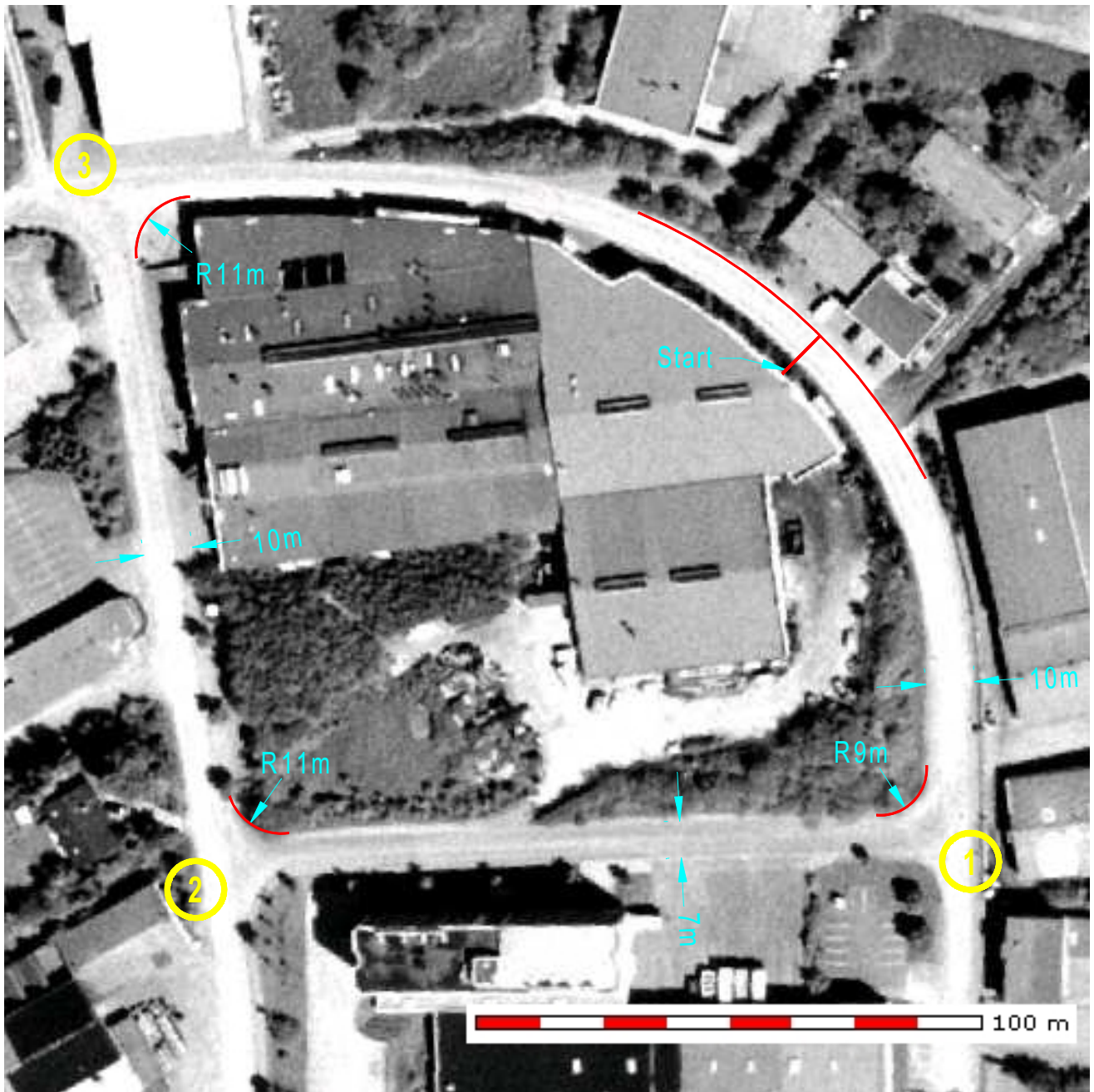


Abbildung A 1 Luftbilddauswertung des Rundkurses

Kurve	Fahrbahnmittenradius beim Rechtsabbiegevorgang	Fahrbahnmittenradius beim Linksabbiegevorgang
1	11 m	16 m
2	14 m	16 m
3	14 m	18 m

Tabelle A 1

Kurve	Radius in Fahrtrichtung Norden	Radius in Fahrtrichtung Süden
1	18 m	22 m
2	236 m	232 m
3	175 m	179 m
4	62 m	58 m
5	45 m	49 m
6	44 m	40 m
7	40 m	44 m
8	42 m	38 m
9	56 m	60 m

Tabelle A 2

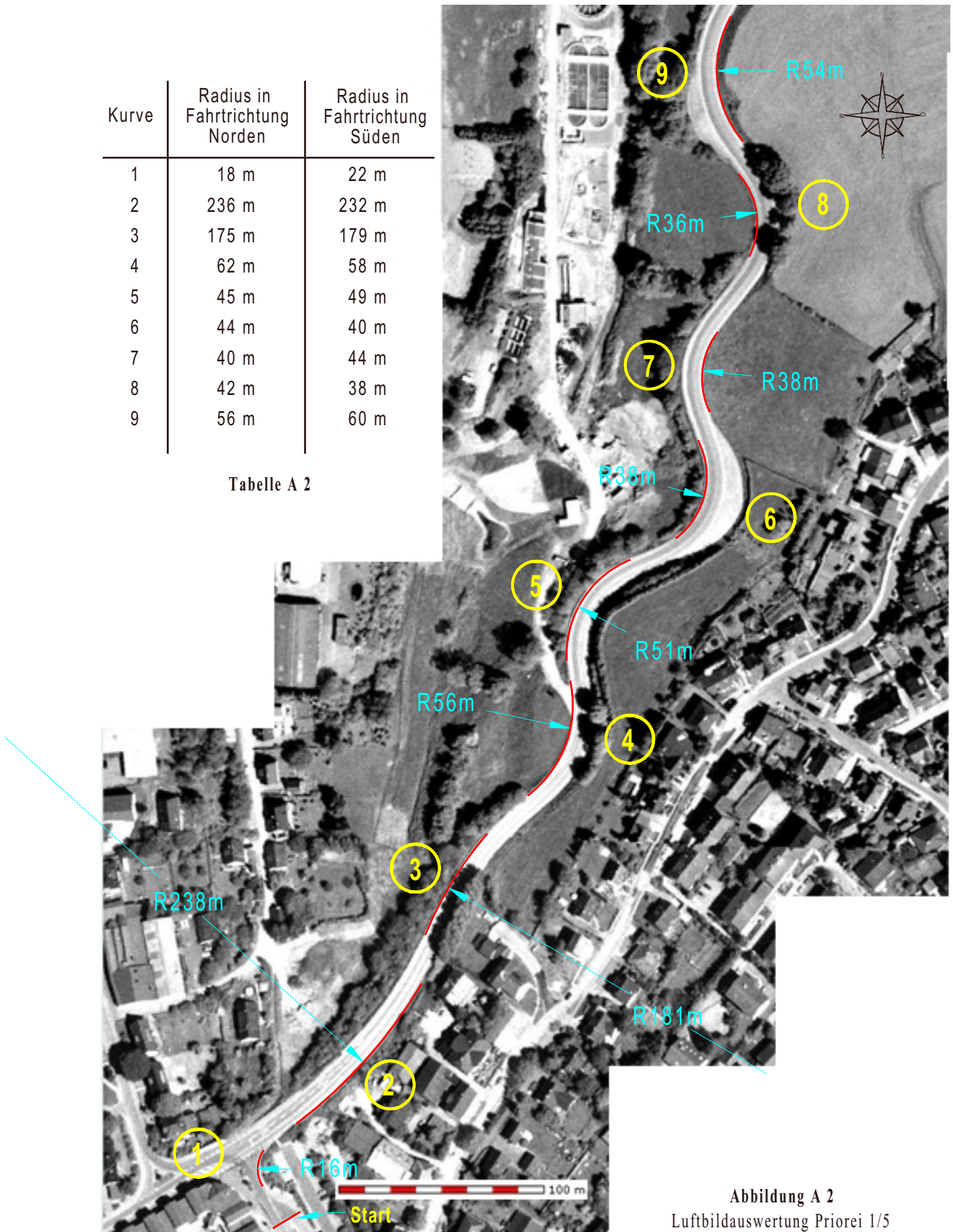


Abbildung A 2
Luftbildauswertung Priorei 1/5

Kurve	Radius in Fahrtrichtung Norden	Radius in Fahrtrichtung Süden
10	72 m	68 m
11	42 m	46 m
12	44 m	40 m
13	66 m	70 m
14	46 m	50 m
15	39 m	35 m
16	39 m	43 m

Tabelle A 3

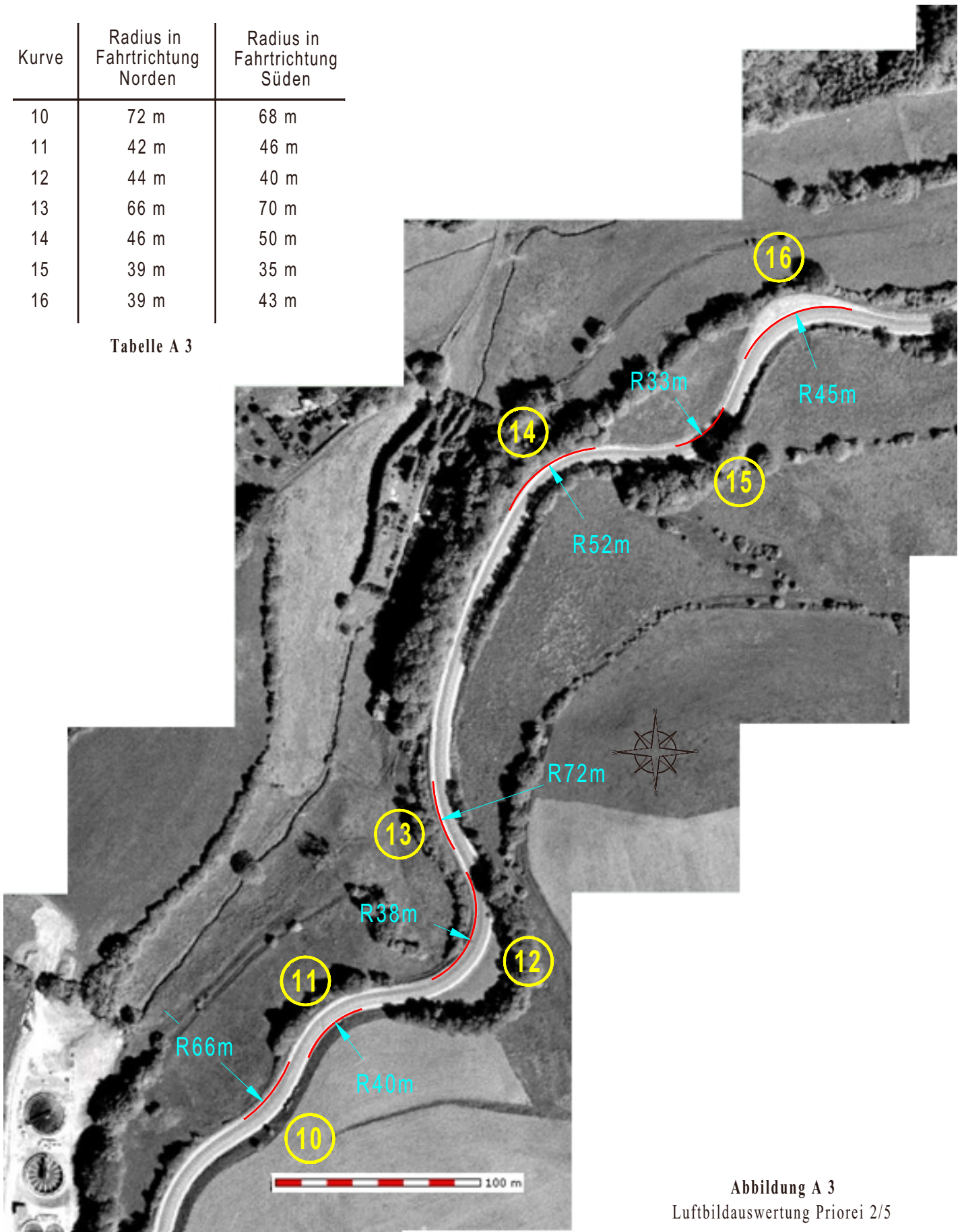


Abbildung A 3
Luftbildauswertung Priorei 2/5

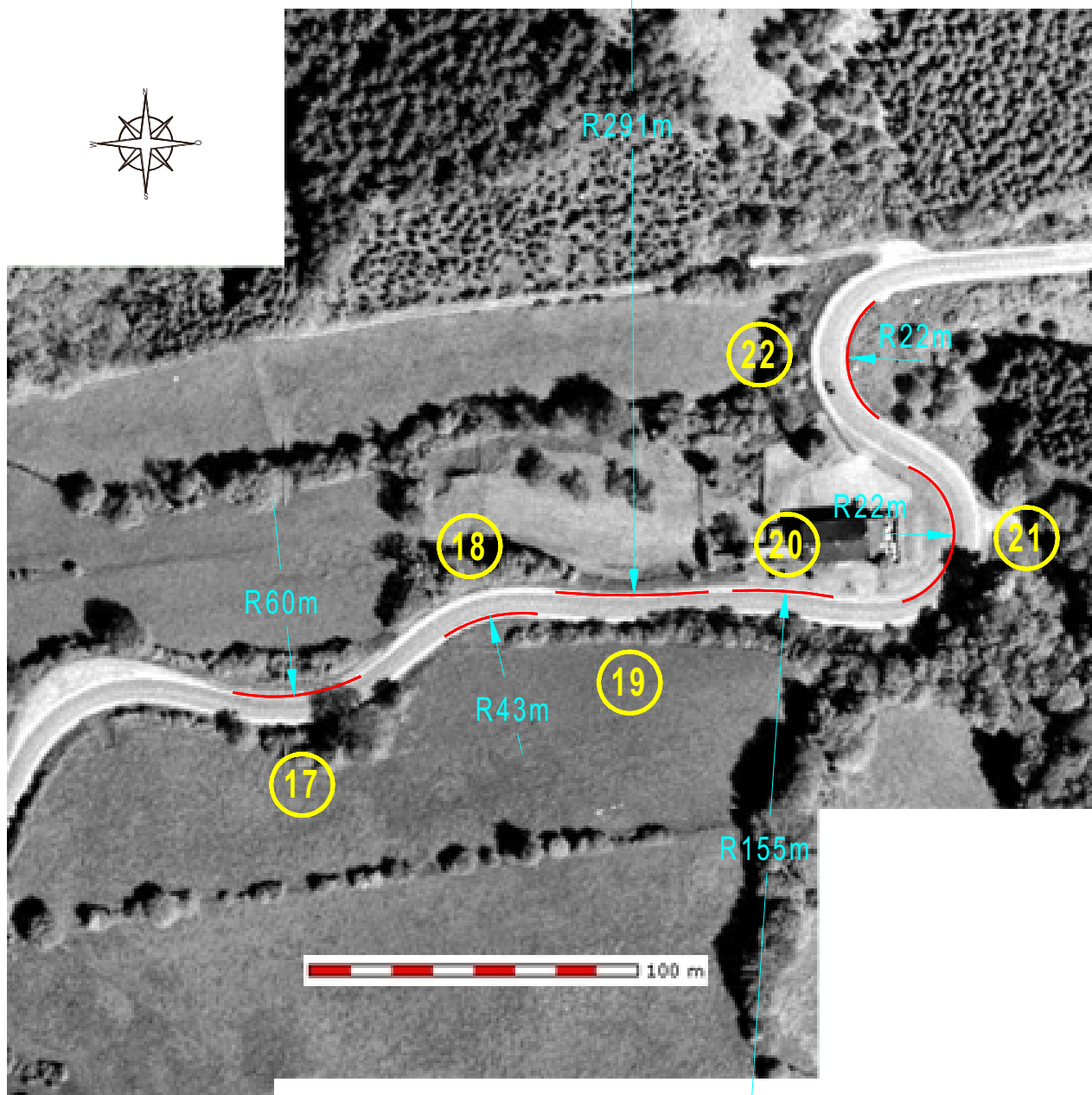
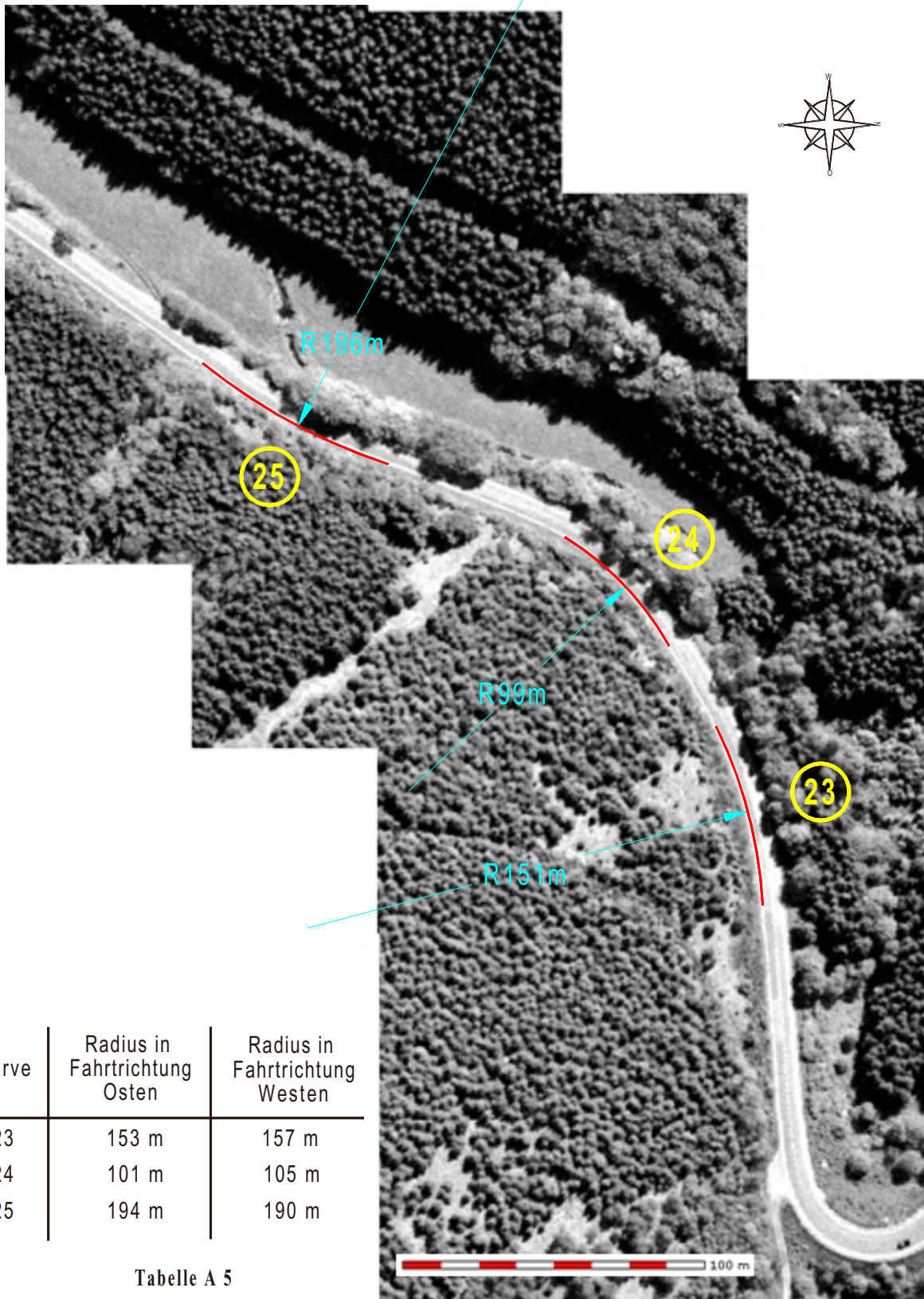


Abbildung A 4
Luftbildauswertung Priorei 3/5

Kurve	Radius in Fahrrichtung Osten	Radius in Fahrrichtung Westen
17	66 m	62 m
18	45 m	49 m
19	297 m	193 m
20	149 m	153 m
21	28 m	24 m
22	24 m	28 m

Tabelle A 4



Kurve	Radius in Fahrtrichtung Osten	Radius in Fahrtrichtung Westen
23	153 m	157 m
24	101 m	105 m
25	194 m	190 m

Tabelle A 5

Abbildung A 5
Luftbilddauswertung Priorei 4/5

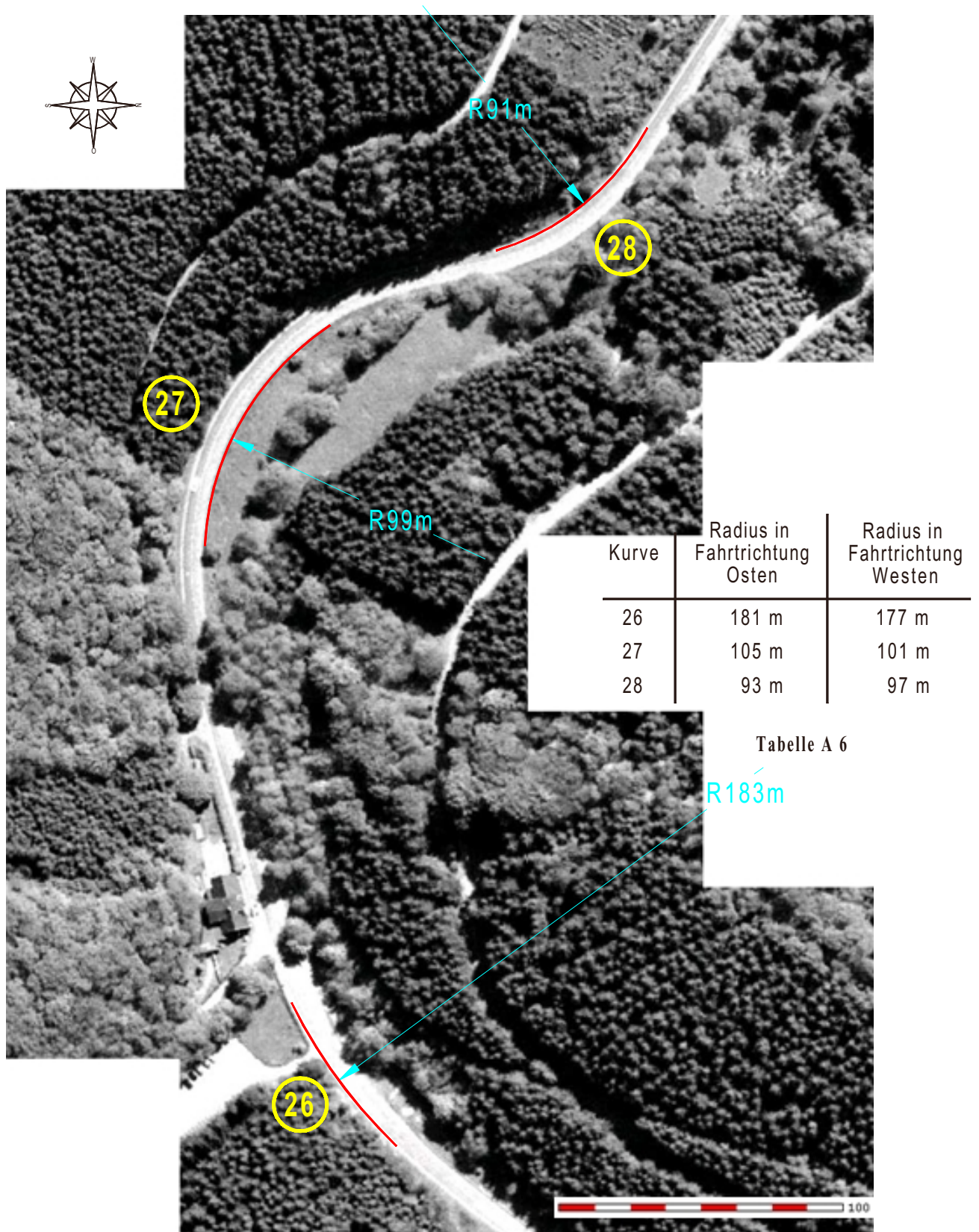


Abbildung A 6
Luftbildauswertung Priorei 5/5

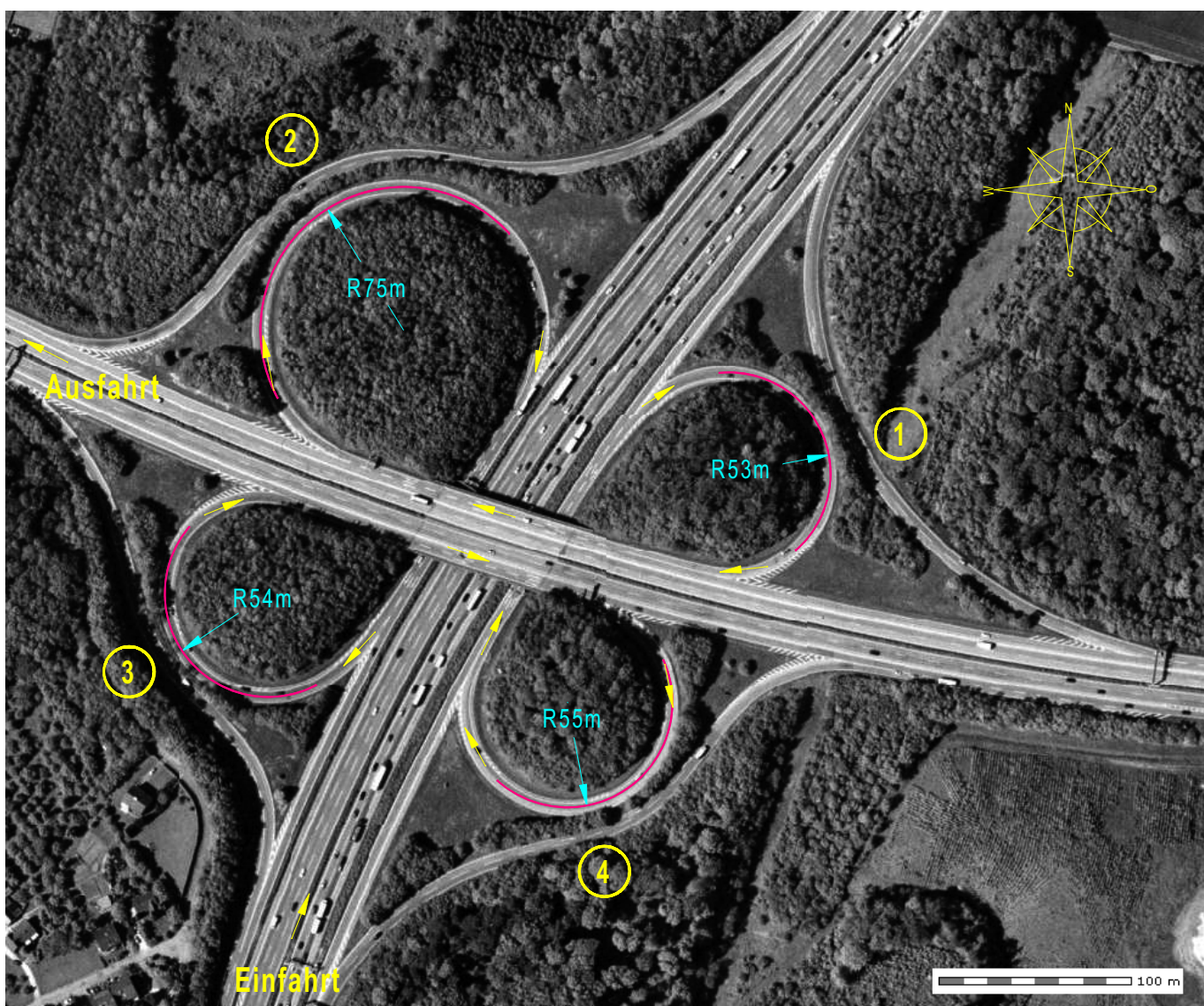


Abbildung A 7 / Luftbildauswertung Autobahnkreuz Hagen

Kurve	mittlerer Fahrbahnradius
1	53 m
2	75 m
3	54 m
4	55 m

Tabelle A 7

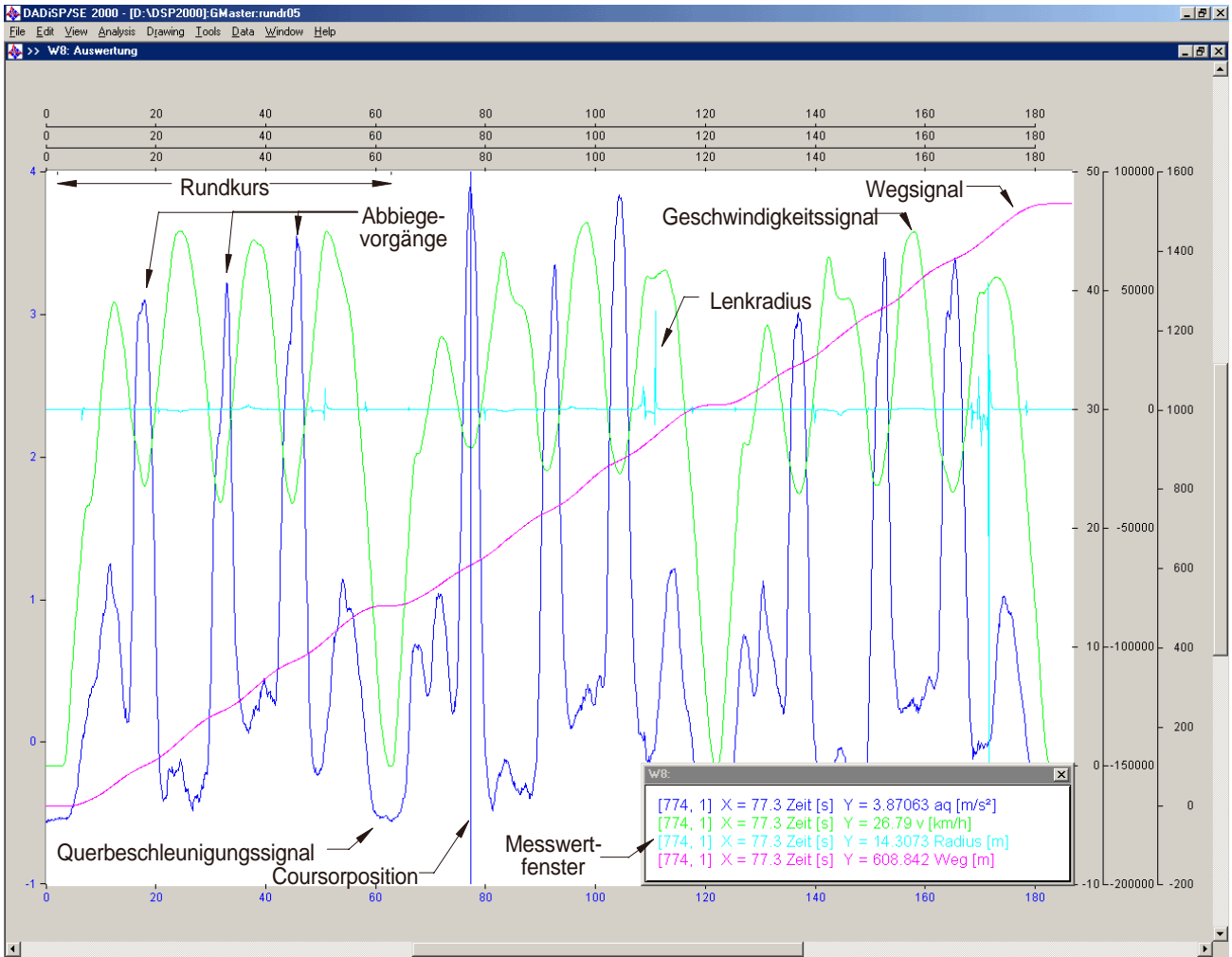


Abb. A 8: Messwertkurven (Rundkurs Rechtsabbiegevorgänge)

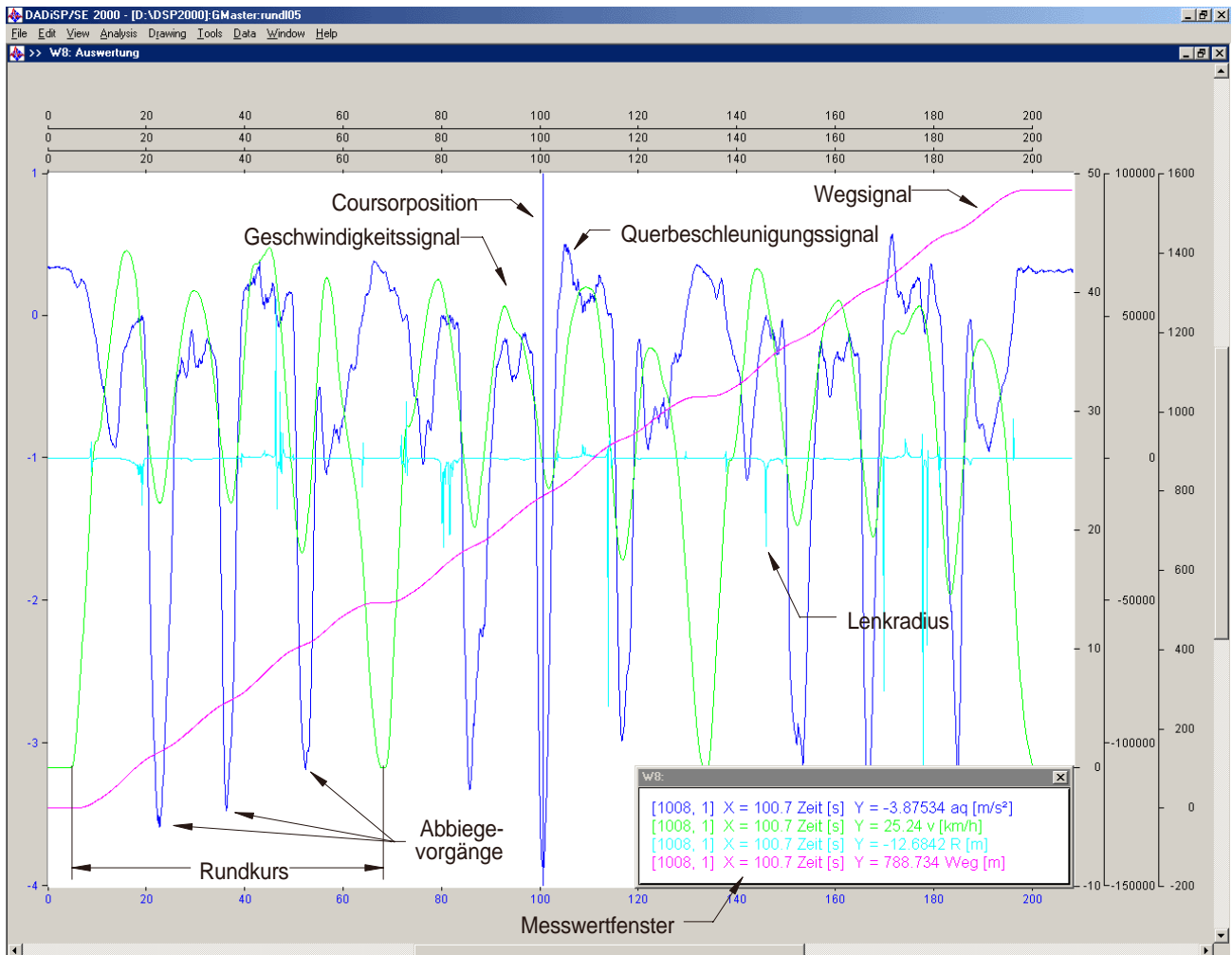


Abb. A 9: Messwertkurven (Rundkurs Linksabbiegevorgänge)

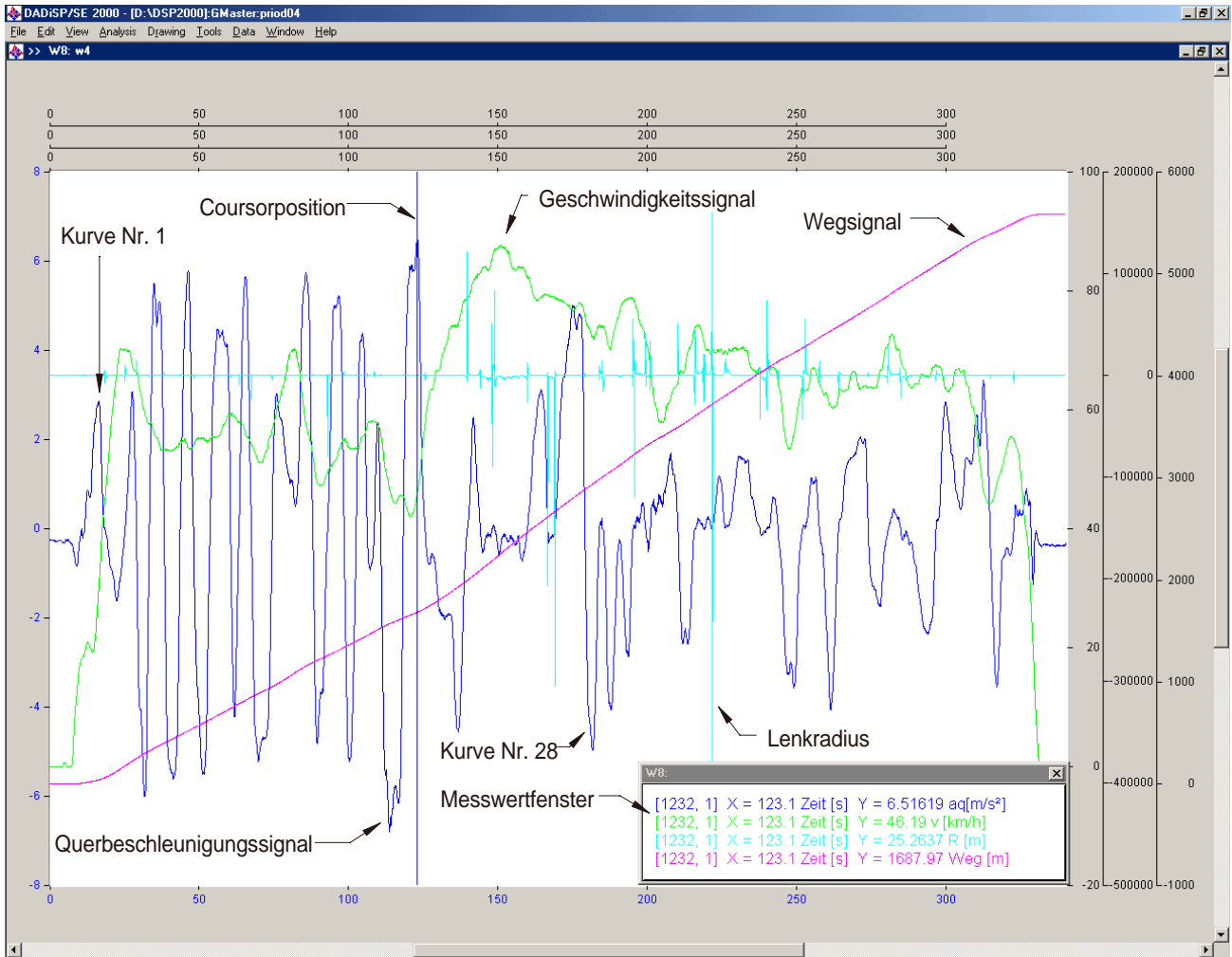


Abb. A 10: Messwertkurven (Priorei abwärts)

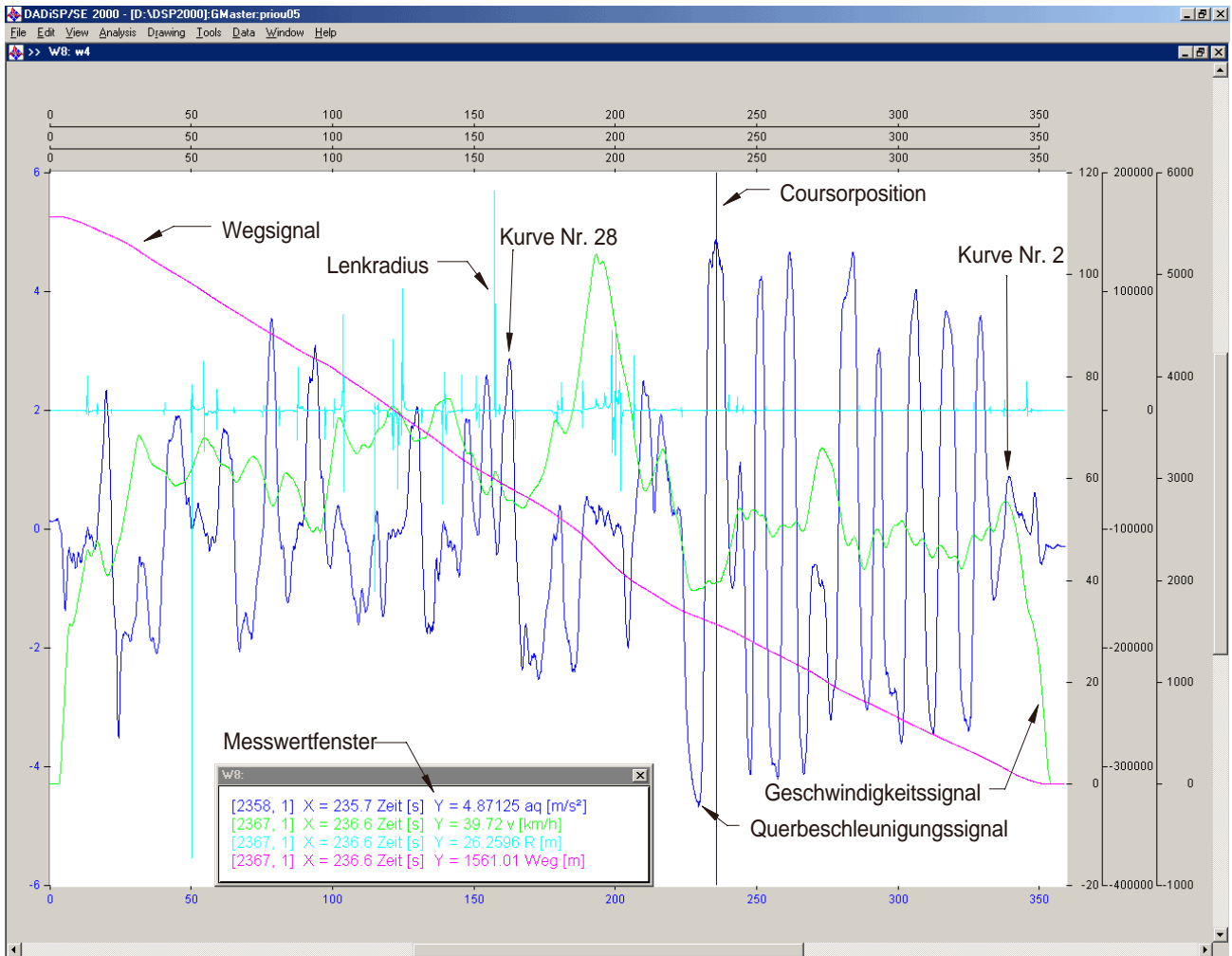


Abb. A 11: Messwertkurven (Priorei aufwärts)

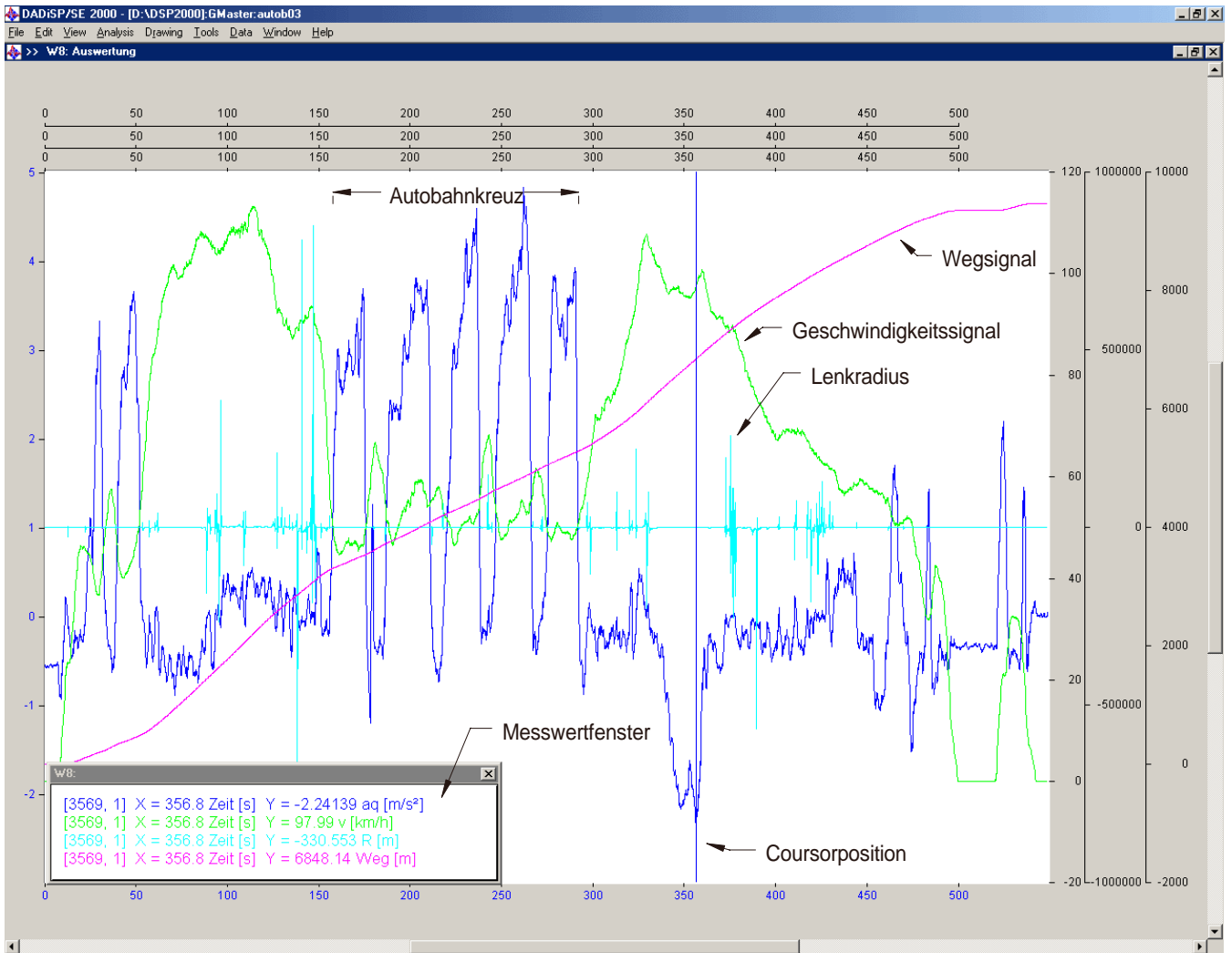
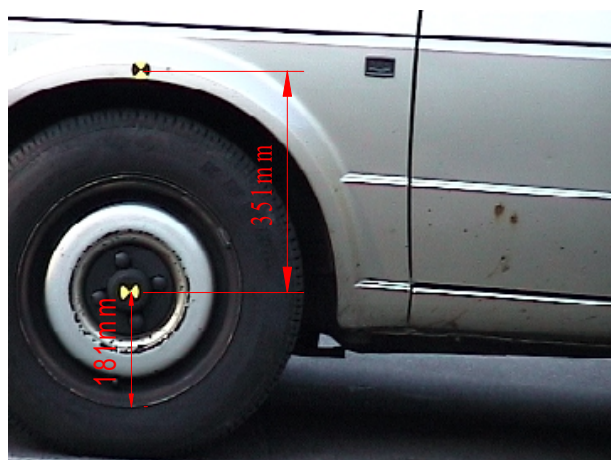


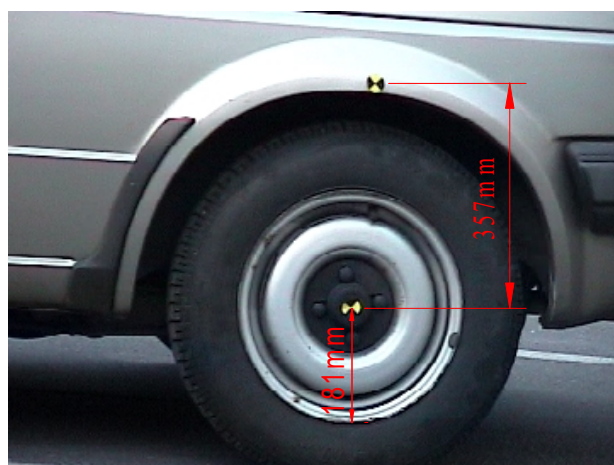
Abb. A12: Messwertkurven (Autobahnkreuz Hagen)

Fahrerseite vorne (Stand)



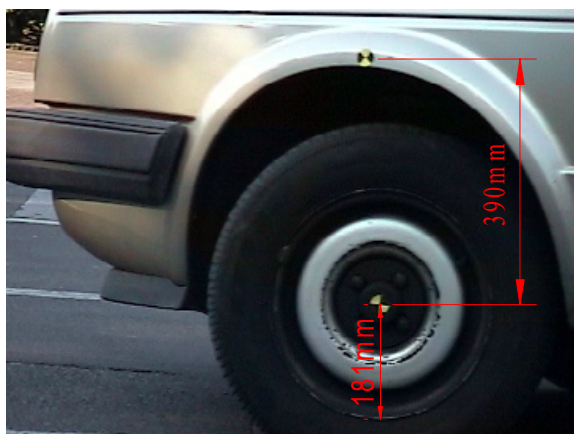
Ausgangshöhe : 351 mm
 Höhenänderung : 0 mm
 Zeitbasis : 0 s
 Querbeschleunigung : 0 m/s²
 Geschwindigkeit : 0 km/h

Fahrerseite hinten (Stand)



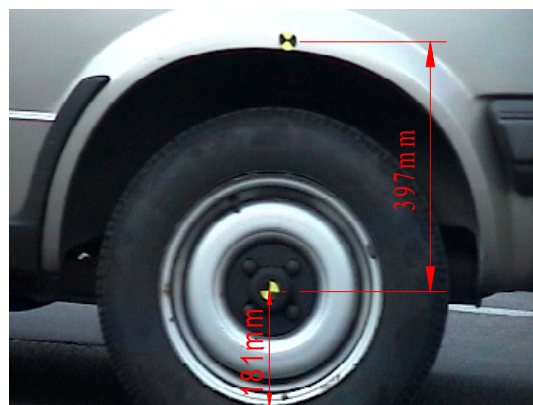
Ausgangshöhe : 357 mm
 Höhenänderung : 0 mm
 Zeitbasis : 0 s
 Querbeschleunigung : 0 m/s²
 Geschwindigkeit : 0 km/h

Fahrerseite vorne (Auslenkung 01)



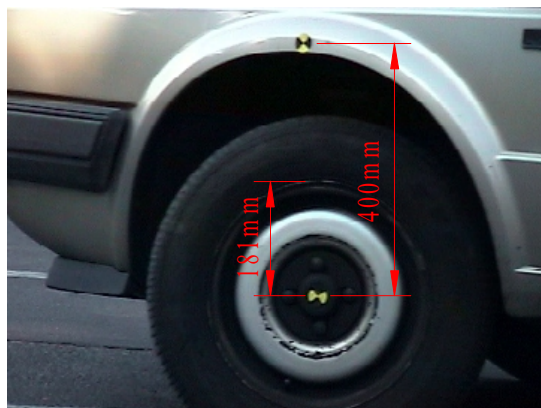
Ausgangshöhe : 351 mm
 Höhenänderung : 39 mm
 Zeitbasis : 13.0 s
 Querbeschleunigung : 4.3 m/s²
 Geschwindigkeit : 19.9 km/h

Fahrerseite hinten (Auslenkung 01)



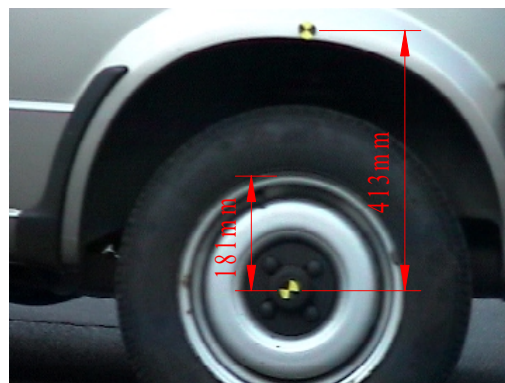
Ausgangshöhe : 357 mm
 Höhenänderung : 40 mm
 Zeitbasis : 13.9 s
 Querbeschleunigung : 4.4 m/s²
 Geschwindigkeit : 20 km/h

Fahrerseite vorne (Auslenkung 02)



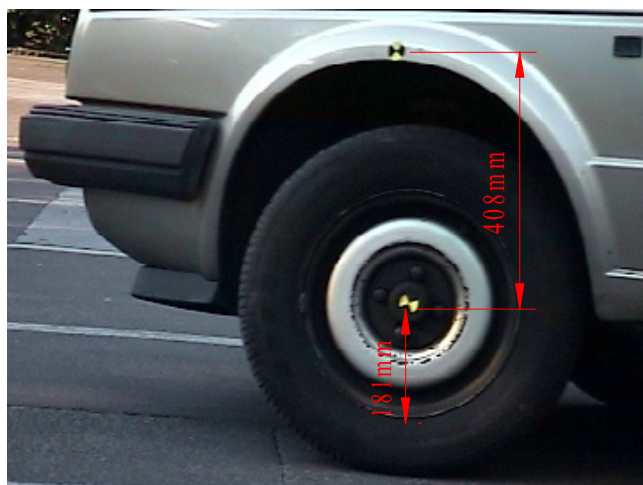
Ausgangshöhe : 351 mm
 Höhenänderung : 49 mm
 Zeitbasis : 21.9 s
 Querbeschleunigung : 5.5 m/s²
 Geschwindigkeit : 22.1 km/h

Fahrerseite hinten (Auslenkung 02)



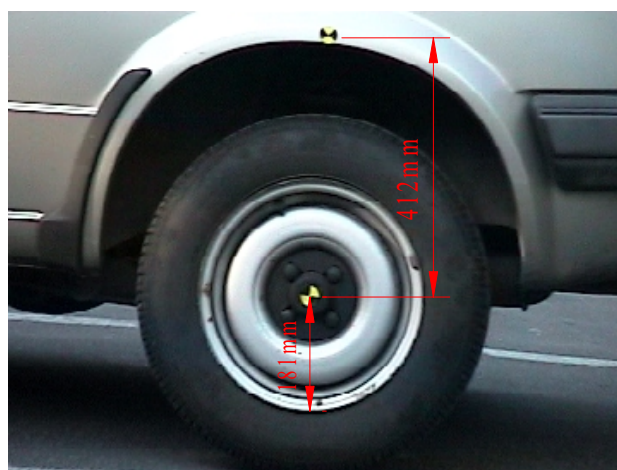
Ausgangshöhe : 357 mm
 Höhenänderung : 56 mm
 Zeitbasis : 22 s
 Querbeschleunigung : 5.4 m/s²
 Geschwindigkeit : 22.1 km/h

Fahrerseite vorne (Auslenkung 03)



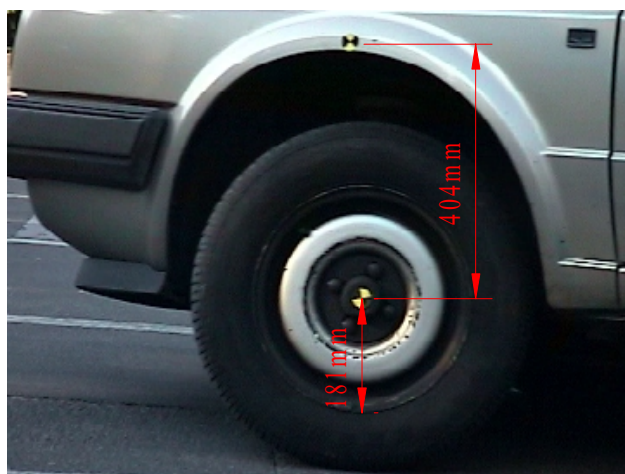
Ausgangshöhe : 351 mm
 Höhenänderung : 57 mm
 Zeitbasis : 29.1 s
 Querbeschleunigung : 5.8 m/s²
 Geschwindigkeit : 23.2 km/h

Fahrerseite hinten (Auslenkung 03)



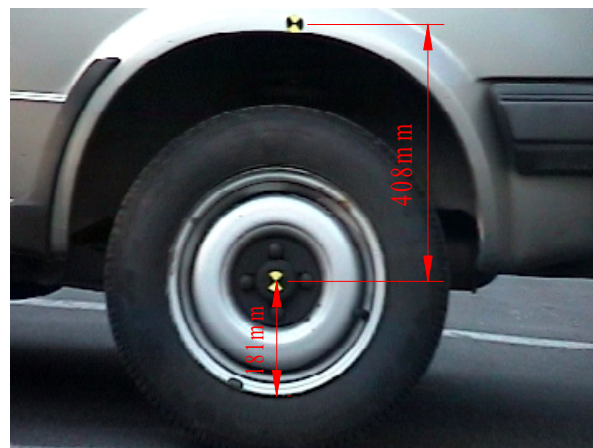
Ausgangshöhe : 357 mm
 Höhenänderung : 55 mm
 Zeitbasis : 30 s
 Querbeschleunigung : 5.7 m/s²
 Geschwindigkeit : 23.5 km/h

Fahrerseite vorne (Auslenkung 04)



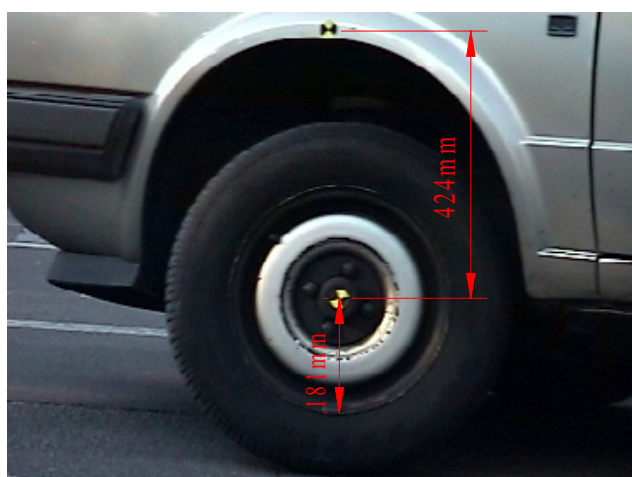
Ausgangshöhe : 351 mm
 Höhenänderung : 53 mm
 Zeitbasis : 36.9 s
 Querbeschleunigung : 7.2 m/s²
 Geschwindigkeit : 25.6 km/h

Fahrerseite hinten (Auslenkung 04)



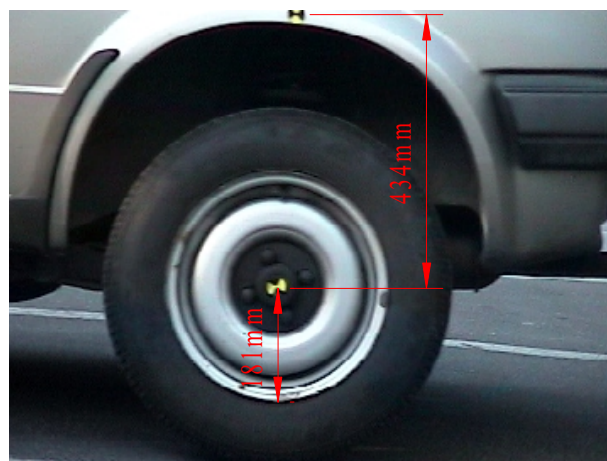
Ausgangshöhe : 357 mm
 Höhenänderung : 51 mm
 Zeitbasis : 37 s
 Querbeschleunigung : 7 m/s²
 Geschwindigkeit : 25.8 km/h

Fahrerseite vorne (Auslenkung 05)



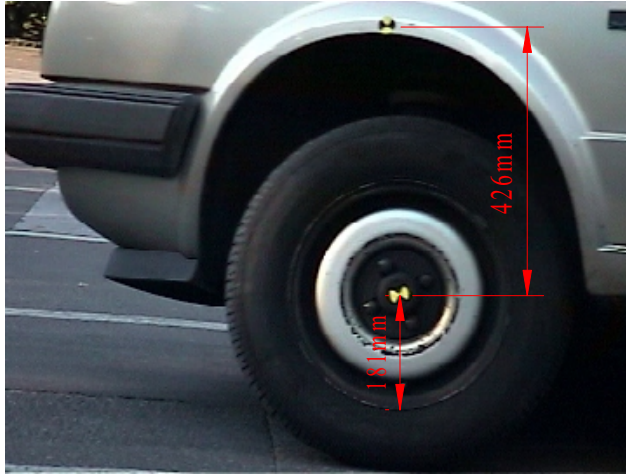
Ausgangshöhe : 351 mm
 Höhenänderung : 73 mm
 Zeitbasis : 44 s
 Querbeschleunigung : 8.9 m/s²
 Geschwindigkeit : 27.9 km/h

Fahrerseite hinten (Auslenkung 05)



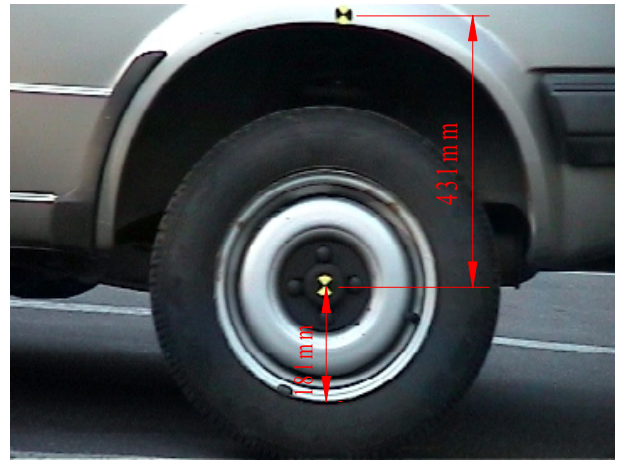
Ausgangshöhe : 357 mm
 Höhenänderung : 77 mm
 Zeitbasis : 44.1 s
 Querbeschleunigung : 8.6 m/s²
 Geschwindigkeit : 27.9 km/h

Fahrerseite vorne (Auslenkung 06)



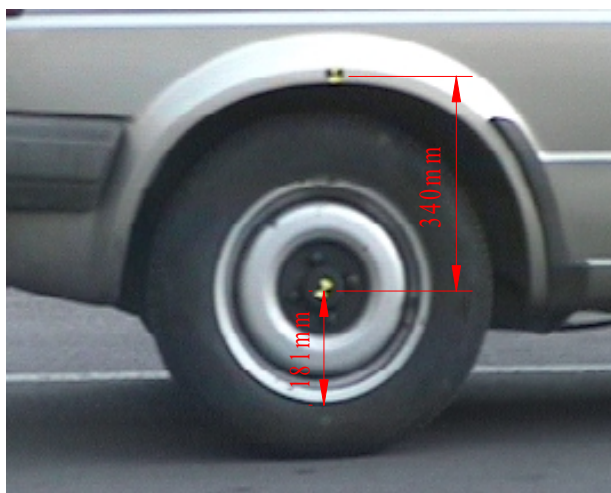
Ausgangshöhe	: 351 mm
Höhenänderung	: 75 mm
Zeitbasis	: 50.2 s
Querbeschleunigung	: 8.4 m/s ²
Geschwindigkeit	: 26.6 km/h

Fahrerseite hinten (Auslenkung 06)



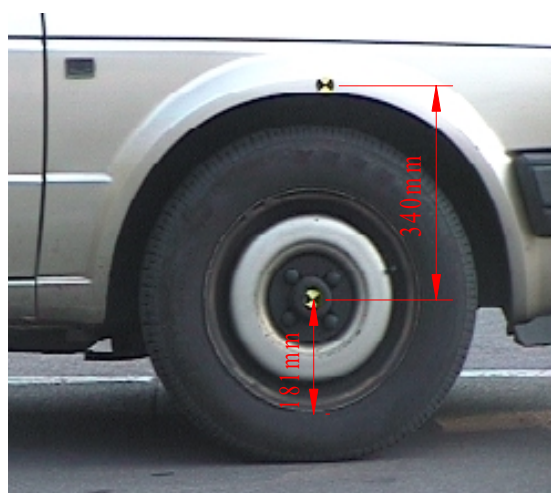
Ausgangshöhe	: 357 mm
Höhenänderung	: 74 mm
Zeitbasis	: 51 s
Querbeschleunigung	: 6.4 m/s ²
Geschwindigkeit	: 23.1 km/h

Beifahrerseite vorne (Stand)



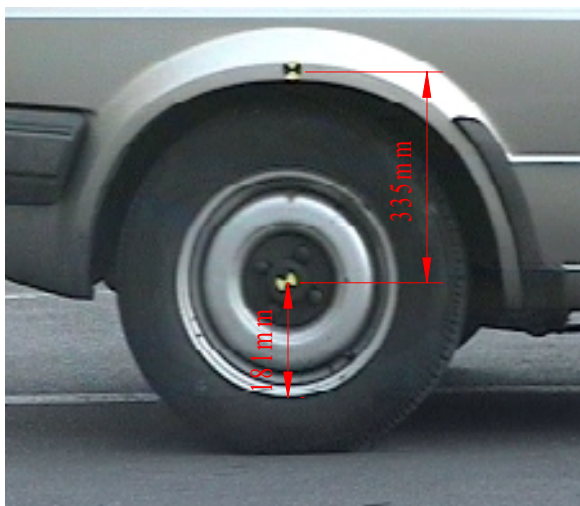
Ausgangshöhe : 340 mm
 Höhenänderung : 0 mm
 Zeitbasis : 0 s
 Querschleunigung : 0 m/s²
 Geschwindigkeit : 0 km/h

Beifahrerseite hinten (Stand)



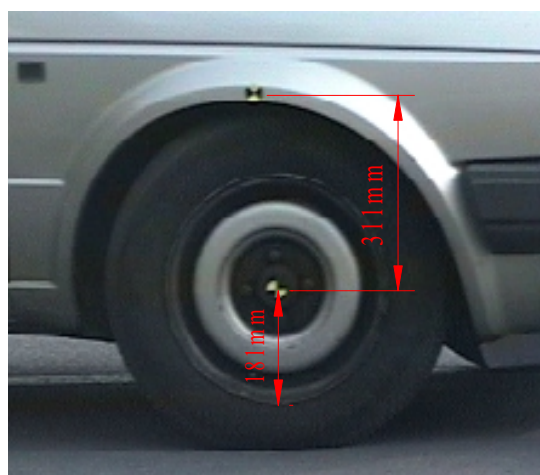
Ausgangshöhe : 340 mm
 Höhenänderung : 0 mm
 Zeitbasis : 0 s
 Querschleunigung : 0 m/s²
 Geschwindigkeit : 0 km/h

Beifahrerseite vorne (Auslenkung 01)



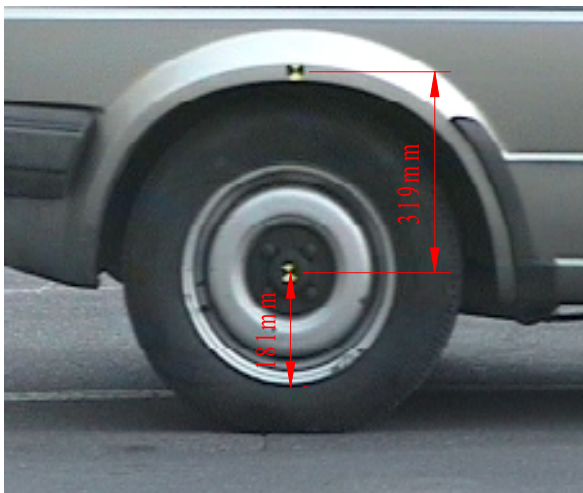
Ausgangshöhe : 340 mm
 Höhenänderung : - 5 mm
 Zeitbasis : 13.1 s
 Querschleunigung : 4.4 m/s²
 Geschwindigkeit : 19.8 km/h

Beifahrerseite hinten (Auslenkung 01)



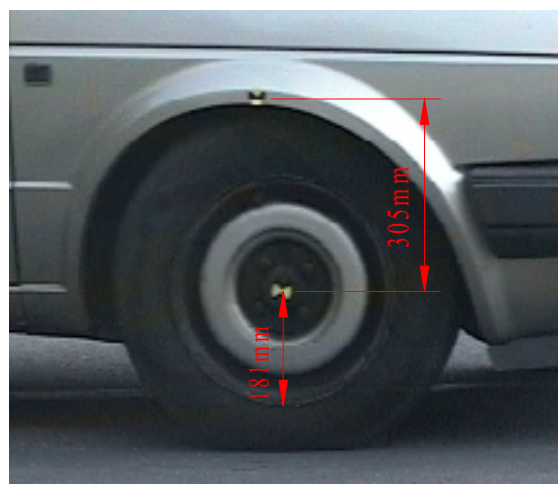
Ausgangshöhe : 340 mm
 Höhenänderung : - 29 mm
 Zeitbasis : 13.2 s
 Querschleunigung : 4.4 m/s²
 Geschwindigkeit : 19.9 km/h

Beifahrerseite vorne (Auslenkung 02)



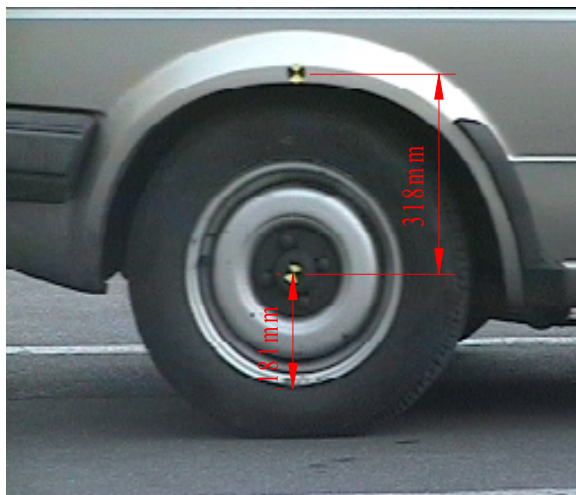
Ausgangshöhe : 340 mm
 Höhenänderung : - 21 mm
 Zeitbasis : 21.2 s
 Querbeschleunigung : 5.4 m/s²
 Geschwindigkeit : 22 km/h

Beifahrerseite hinten (Auslenkung 02)



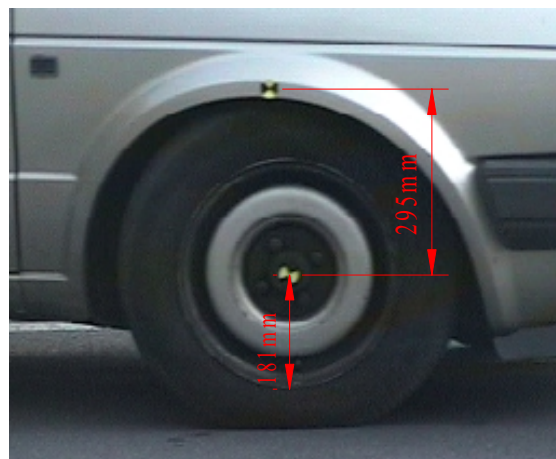
Ausgangshöhe : 340 mm
 Höhenänderung : - 35 mm
 Zeitbasis : 22 s
 Querbeschleunigung : 5.4 m/s²
 Geschwindigkeit : 22.1 km/h

Beifahrerseite vorne (Auslenkung 03)



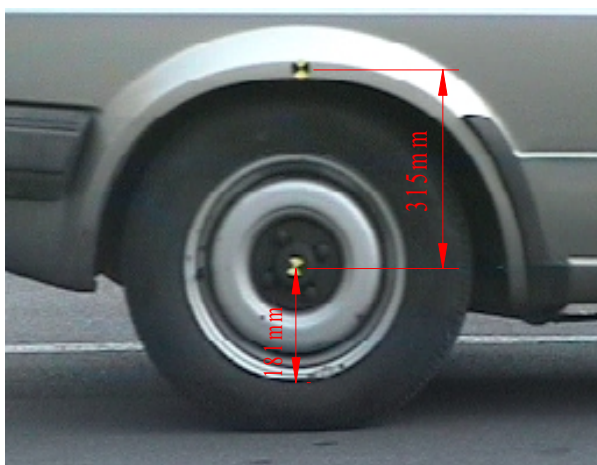
Ausgangshöhe : 340 mm
 Höhenänderung : - 22 mm
 Zeitbasis : 29.1 s
 Querbeschleunigung : 5.8 m/s²
 Geschwindigkeit : 23.2 km/h

Beifahrerseite hinten (Auslenkung 03)



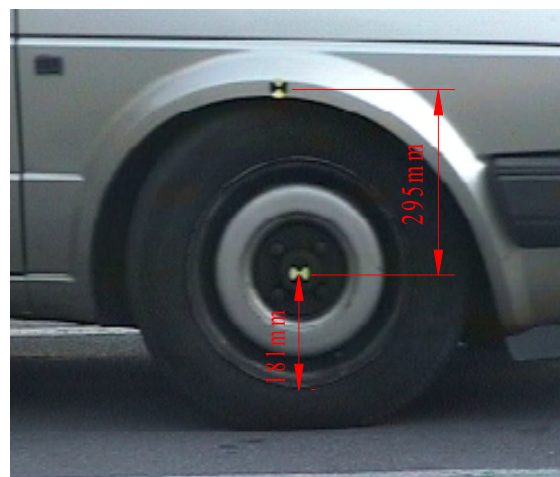
Ausgangshöhe : 340 mm
 Höhenänderung : - 45 mm
 Zeitbasis : 30 s
 Querbeschleunigung : 5.7 m/s²
 Geschwindigkeit : 23.5 km/h

Beifahrerseite vorne (Auslenkung 04)



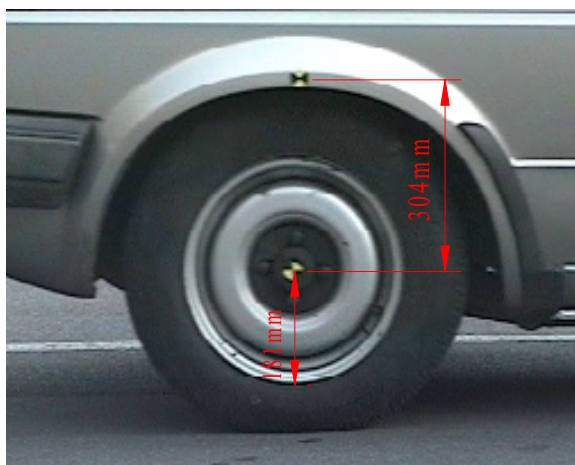
Ausgangshöhe : 340 mm
 Höhenänderung : - 25 mm
 Zeitbasis : 37 s
 Querbeschleunigung : 7.1 m/s²
 Geschwindigkeit : 25.8 km/h

Beifahrerseite hinten (Auslenkung 04)



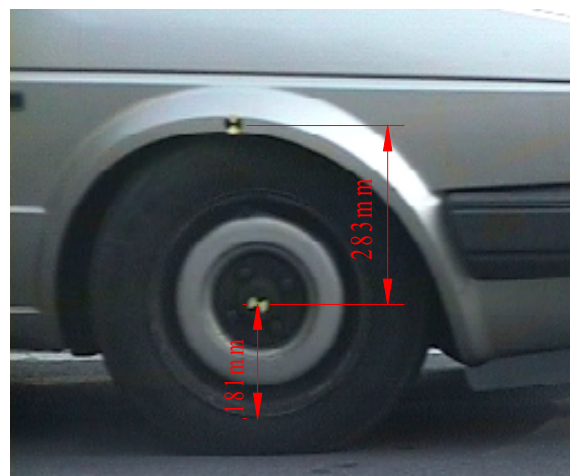
Ausgangshöhe : 340 mm
 Höhenänderung : - 45 mm
 Zeitbasis : 37.1 s
 Querbeschleunigung : 7 m/s²
 Geschwindigkeit : 25.8 km/h

Beifahrerseite vorne (Auslenkung 05)



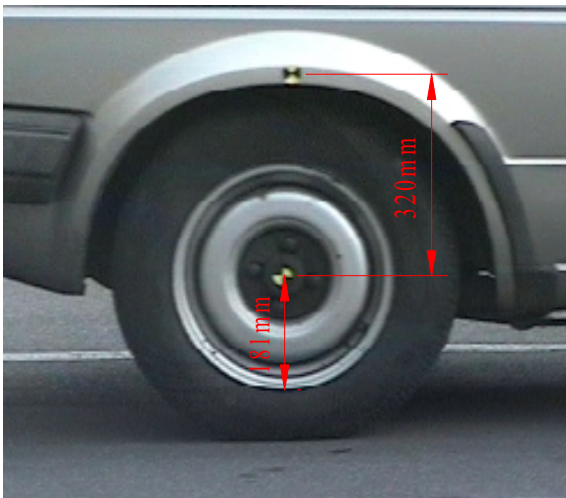
Ausgangshöhe : 340 mm
 Höhenänderung : - 36 mm
 Zeitbasis : 44 s
 Querbeschleunigung : 8.9 m/s²
 Geschwindigkeit : 27.9 km/h

Beifahrerseite hinten (Auslenkung 05)



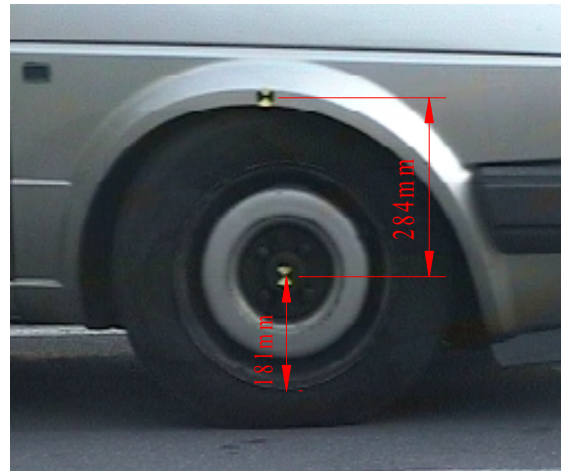
Ausgangshöhe : 340 mm
 Höhenänderung : - 57 mm
 Zeitbasis : 44.1 s
 Querbeschleunigung : 8.6 m/s²
 Geschwindigkeit : 27.9 km/h

Beifahrerseite vorne (Auslenkung 06)



Ausgangshöhe	: 340 mm
Höhenänderung	: - 20 mm
Zeitbasis	: 50.9 s
Querbeschleunigung	: 6.9 m/s ²
Geschwindigkeit	: 23.8 km/h

Beifahrerseite hinten (Auslenkung 06)



Ausgangshöhe	: 340 mm
Höhenänderung	: - 56 mm
Zeitbasis	: 51 s
Querbeschleunigung	: 6.7 m/s ²
Geschwindigkeit	: 23.5 km/h



MB T 290 (Auslenkung 03)

Winkeländerung : 2.14 °
Zeitbasis : 25.1 s
Querschleunigung : 5.1 m/s²
Geschwindigkeit : 20.5 km/h



MB T 290 (Auslenkung 04)

Winkeländerung : 2.80 °
Zeitbasis : 31.1 s
Querschleunigung : 6.0 m/s²
Geschwindigkeit : 22.3 km/h



MB T 290 (Auslenkung 03)

Winkeländerung : 2.14 °
Zeitbasis : 25.1 s
Querschleunigung : 5.1 m/s²
Geschwindigkeit : 20.5 km/h



MB T 290 (Auslenkung 04)

Winkeländerung : 2.80 °
Zeitbasis : 31.1 s
Querschleunigung : 6.0 m/s²
Geschwindigkeit : 22.3 km/h



MB T 290 (Auslenkung 05)

Winkeländerung : 3.28 °
Zeitbasis : 36.6 s
Querschleunigung : 6.7 m/s²
Geschwindigkeit : 24.2 km/h



MB T 290 (Auslenkung 06)

Winkeländerung : 2.76 °
Zeitbasis : 42.1 s
Querschleunigung : 5.7 m/s²
Geschwindigkeit : 21.7 km/h

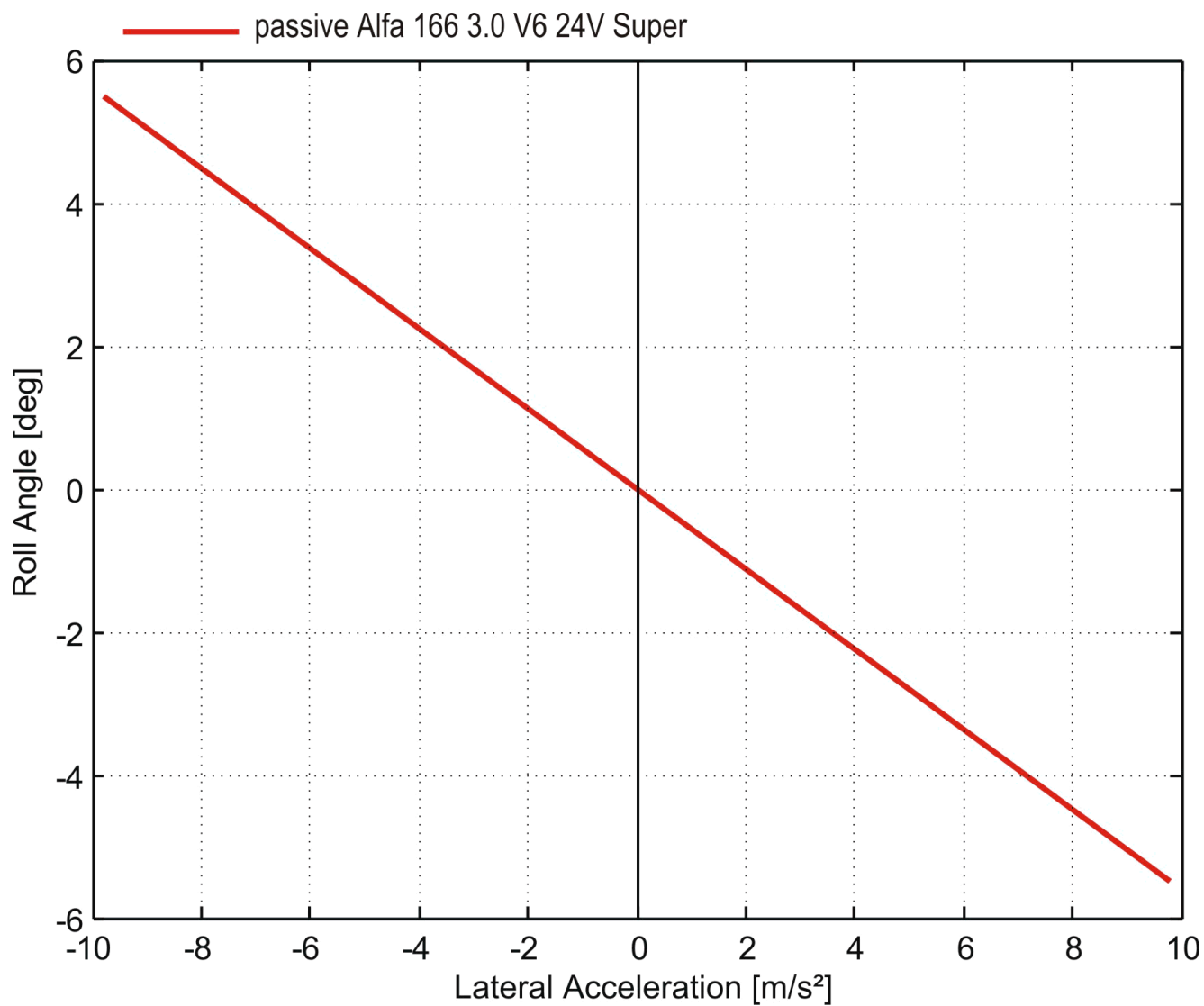


Abb. A 24: Referenzdiagramm Aufbauwanken (Fiat AG)