

Blickverhalten und Orientierung von Kraftfahrern auf Landstraßen

an der
Technischen Universität Dresden
Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“

zur Erlangung des akademischen Grades
eines Doktor-Ingenieurs
genehmigte

Dissertation

Verfasser

Dipl.-Ing. Ralph Schulz

Dresden, 2012

Ralph Schulz

Blickverhalten und Orientierung von Kraftfahrern auf Landstraßen

Inhalt

1	Einleitung und Zielsetzung.....	1
2	Stand der Wissenschaft	4
2.1	Bedeutung der Sicht beim Fahren.....	4
2.2	Visuelle Informationsaufnahme von Fahrern	5
2.2.1	Grundlagen des Blickverhaltens.....	5
2.2.2	Parameter der Blickbewegungsmessung	8
2.2.3	Blickverhalten bei ausgewählten Fahraufgaben	11
2.2.4	Blickverhalten im Zusammenhang mit Nebenaufgaben.....	14
2.3	Sichtweiten im Straßenentwurf.....	16
2.3.1	Psycho-physiologisch begründete Sichtweiten.....	16
2.3.2	Geometrische Sichtweiten	19
2.3.3	Entwicklung der Sichtweitenmodelle in den Entwurfsrichtlinien	23
2.4	Geometrische Einflussgrößen das Fahrverhalten.....	27
2.4.1	Kurvenradius / Krümmung	29
2.4.2	Kurvigkeit.....	30
2.4.3	Elementrelation.....	31
2.4.4	Vorhandene Sichtweite	32
2.4.5	Längsneigung	33
2.4.6	Querschnitt	33
2.5	Sichtweite und Unfallgeschehen	34
2.6	Schlussfolgerungen für die Festlegung der Untersuchungsmethodik	35
3	Untersuchungsmethodik.....	38
3.1	Untersuchungsziel	38
3.2	Datenerhebung	38
3.2.1	Messstrecke.....	40
3.2.2	Messfahrzeug	44
3.2.3	Probandenkollektiv.....	46
3.2.4	Erfassung und Auswertung von Blickbewegung und Fahrverhalten	47
3.3	Durchführung der Fahrten	51
3.4	Auswertung in Sichtweitenklassen	52
3.5	Nebenaufgabe	53
3.5.1	Durchführung	54
3.5.2	Auswertung.....	54
3.6	Untersuchungen im Fahrsimulator	55
3.6.1	Versuchsdesign und Durchführung	55
3.6.2	Auswertung.....	57
4	Ergebnisse	59
4.1	Realfahrten mit Blickbewegungsmessung.....	59
4.1.1	Erkenntnisse während der Aufbereitung der Messdaten und Fehlerbetrachtung.....	59
4.1.2	Geraden mit freiem Umfeld	61

4.1.3	Geraden mit blickdichtem Umfeld.....	68
4.1.4	Leicht kurvige Abschnitte mit freiem Umfeld.....	71
4.1.5	Stark kurvige Abschnitte mit freiem Umfeld.....	73
4.1.6	Stark kurvige Abschnitte mit blickdichtem Umfeld	76
4.1.7	Abschnitte mit Singularitäten und freiem Umfeld.....	78
4.1.8	Abschnitte mit großen Sichtweiten	79
4.1.9	Abschnitte mit mehreren Sichtweitenminima	81
4.1.10	Zusammenfassung Realfahrten	82
4.2	Realfahrten mit Nebenaufgabe	83
4.2.1	Geraden mit freiem Umfeld	83
4.2.2	Geraden mit blickdichtem Umfeld.....	84
4.2.3	Leicht kurvige Abschnitte mit freiem Umfeld.....	85
4.2.4	Zusammenfassung Nebenaufgabe	86
4.3	Unfallgeschehen auf der Untersuchungsstrecke	86
4.4	Simulatorversuch zu abrupten Reaktionen.....	86
4.4.1	Bremsbetätigung.....	87
4.4.2	Verzögerung	89
4.4.3	Maximale Querbeschleunigung.....	90
4.4.4	Time-To-Collision (TTC) mit stehendem Objekt	91
4.4.5	Subjektive Urteile	92
4.4.6	Geschwindigkeiten vor der Kuppe.....	93
4.4.7	Zusammenfassung Simulatorversuch	94
5	Neue Erkenntnisse zum Blickverhalten beim Fahren.....	96
5.1	Grundlegende Parameter der Blickbewegung.....	97
5.2	Blickverhalten bei verschiedenen Geschwindigkeiten	98
5.3	Blickverhalten bei verschiedenen Streckencharakteristika	101
5.4	Videoanalyse	103
5.4.1	Kurven	104
5.4.2	Geraden.....	105
5.4.3	Gegenverkehr	105
5.4.4	Zusammenfassung	106
6	Zusammenführung der Ergebnisse und Empfehlungen für die Gewährleistung der Fahrerorientierung auf Landstraßen	107
6.1	Zusammenführung der Ergebnisse	107
6.2	Ableitung von Empfehlungen für die Berücksichtigung der Fahrerorientierung auf Landstraßen.....	110
6.3	Umgang mit der Orientierungssichtweite im Straßenentwurf	111
7	Zusammenfassung und Ausblick	114
	Literaturverzeichnis	117

1 Einleitung und Zielsetzung

Visuelle Informationen sind für das Fahren im Straßenverkehr unentbehrlich. Die Position und Bewegung des eigenen Fahrzeugs, der voraus liegende Fahrraum mit seinen Merkmalen und Eigenschaften sowie die Relativpositionen anderer Verkehrsteilnehmer und deren Bewegungen bedürfen der stetigen Überprüfung. Je nach Verkehrssituation werden 90 bis 99 % der für das Führen eines Fahrzeugs notwendigen Informationen visuell aufgenommen.

Der Einsehbarkeit eines ausreichenden vorausliegenden Streckenabschnittes für den Fahrer kommt daher im Straßenentwurf und für die Verkehrssicherheit besondere Bedeutung zu. Die Gewährleistung ausreichender Sichtweiten bzw. die Freihaltung entsprechender Sichtfelder sind seit langem grundlegende Forderungen der jeweilig geltenden Entwurfsrichtlinien sowie ein nachweispflichtiger Bestandteil der Planungsunterlagen jedes Straßenbauvorhabens. Auf knotenpunktfreien Außerortsstrecken stehen die Erkennbarkeit der vorausliegenden Strecke sowie die rechtzeitige Wahrnehmung der Verkehrssituation im Vordergrund.

Dabei ist die Sichtweite im Straßenentwurf kein eindeutig bestimmbarer Kennwert wie etwa der Kurvenradius oder die Längsneigung. Um sie als geometrische Größe beschreiben zu können, bedarf es verschiedener Annahmen, die eine Verkehrssituation darstellen und die Festlegung von Parametern für ein zuvor bestimmtes Modell ermöglichen. Das bedeutet, dass sich von einem Punkt der Straße aus in Abhängigkeit vom zugrunde gelegten Modell verschiedene definierte Sichtweiten wahrnehmen lassen.

Die derzeit gültigen Entwurfsrichtlinien RAS-L (FGSV 1995) beschreiben die Modelle der Haltesichtweite und der Überholsichtweite. Beide beruhen auf fahrdynamischen Annahmen. Die für die Sicherheit einer Straßenverkehrsanlage maßgebliche Größe ist die Haltesichtweite, die den Fall einer Gefahrenbremsung vor einem plötzlich auftauchenden Hindernis beschreibt. Sie ist auf der gesamten Strecke zu gewährleisten und kennzeichnet so das Minimum an Sicht, das dem Kraftfahrer stets zur Verfügung stehen soll. Maßgebende Einflussgrößen im Modell der Haltesichtweite sind die Ausgangsgeschwindigkeit, die konstant angesetzte Reaktionszeit des Fahrers und der Bremsweg. Die Dimensionierung der Haltesichtweiten wird demnach vorrangig von technischen Parametern bestimmt.

In den vergangenen Jahren haben Fortschritte in der Kraftfahrzeugtechnik zu immer besseren fahrdynamischen Eigenschaften geführt. Die Bremsverzögerungen moderner Fahrzeuge sind inzwischen wesentlich höher, als sie dem geltenden Haltesichtweitenmodell zugrunde liegen (ROOS U.A. 2003). Vor allem die umfassende Ausstattung der Fahrzeuge mit ABS hat zu einer Diskussion des geltenden Bemessungsmodells geführt. Eine Verkürzung der Haltesichtweiten erscheint auf dieser Grundlage plausibel; durch geländeangepasste Trassierungen oder den Verzicht auf Sichtbermen sind Kosteneinsparungen möglich. Der Haltesichtweite wird über die Gewährleistung von Gefahrenbremsungen hinaus aber auch die Aufgabe zugeschrieben, als regelndes Element im Entwurf zu wirken, das über die direkt wirkende fahrdynamische Bemessung zur Sicherstellung der frühzeitigen Fahrerinformation hinausgeht (RAS-L, FGSV 1995). Da dieser Anspruch nicht quantitativ festgelegt ist, droht er bei einer Reduzierung der Haltesichtweiten verloren zu gehen. Es stellt sich die Frage, ob das Wahrnehmungsvermögen des Fahrers und seine physiologische und psychologische Leistungs- und Reaktionsfähigkeit in den Modellen noch ausreichend Berücksichtigung finden. Geometrische Sichtweiten können lediglich als „technische Hilfsgröße“ für die Bemessung einer Straße dienen, jedoch nicht als alleiniger Bewertungsmaßstab für die Qualität eines Entwurfes hinsichtlich der Sichtbedingungen (HIERSCHKE 1968).

Eine umfassende Bewertung der Sicht muss den Fahrer als Handelnden und dessen Wahrnehmung des Fahrraumes berücksichtigen. Dieser ist durch die Straßenverkehrsordnung verpflichtet und sollte aus eigenem Interesse heraus auch bestrebt sein, sein Fahrverhalten - insbesondere die Geschwindigkeit - den Sichtverhältnissen anzupassen. Zahlreiche Beobachtungen und Auswertungen des Unfallgeschehens zeigen jedoch, dass dies in der Pra-

xis nicht konsequent geschieht. Die Hauptursachen dafür sind neben Schwierigkeiten bei der Einschätzung von Sichtweiten, Entfernungen und Geschwindigkeiten vor allem fehlende Erfahrungen der meisten Fahrer mit Gefahrensituationen. Hindernisse auf der Fahrbahn sind normalerweise sehr selten; die auftretenden Kräfte bei Vollbremsungen werden deshalb in der Regel unterschätzt. Zudem ist häufiges Bremsen und Beschleunigen, wie es die sprunghaft veränderlichen Sichtweiten erfordern würden, nicht besonders komfortabel für die Fahrzeuginsassen. Deshalb wird häufig versucht, mangelnde Sicht vor allem durch erhöhte Aufmerksamkeit zu kompensieren (und erst bei deutlichen Sichtdefiziten langsamer zu fahren, STEINAUER, KRÜGER U.A. 2006). Als Folge treten unangepasste Geschwindigkeiten gerade in kritischen Streckenabschnitten auf, während Aufmerksamkeit und Vigilanz der Fahrer mit zunehmender Häufigkeit solcher Situationen nachlassen. Ziel eines sicherheitsorientierten Straßenentwurfs sollte es daher sein, Fahrern auf Außerortsstraßen Sichtweiten zur Verfügung zu stellen, die deren psycho-physiologische Leistungsfähigkeit berücksichtigen und ihnen ausreichend Zeit zur Orientierung geben.

Die bisherigen Ansätze, aus diesem Wissen heraus „psychophysiologische Sichtweiten“ zu definieren, gründen sich zwangsweise meist auf theoretische Überlegungen. Ihre praktische Umsetzung scheiterte bislang an einer geeigneten Methode, Fahrerkonzentration bzw. -beanspruchung unter Realbedingungen zu messen und somit Grenzwerte für psychologisch erforderliche Sichtweiten auf abgesicherter Basis empfehlen zu können.

Durch den Einsatz moderner Blickbewegungsmesssysteme sind solche Untersuchungen möglich geworden. Blickbewegungen sind zeitlich hochauflösend und ermöglichen Rückschlüsse auf die Beanspruchung des Fahrers in verschiedenen Fahrsituationen. Kurzzeitige Anspannungssituationen können dadurch möglicherweise identifiziert und mit Streckenmerkmalen wie der vorhandenen Sichtweite in Zusammenhang gebracht werden. So lassen sich beginnende Unsicherheiten der Fahrer erkennen, noch bevor Reaktionen im Fahrverhalten beobachtbar sind.

So genannte „*remote tracking*“-Kamerasysteme können die Augenbewegungen von Fahrern berührungsfrei erfassen (*eye tracking*), so dass Messungen im realen Verkehr ohne Beeinträchtigung des Fahrers durchgeführt werden können. In bisherigen Blickverhaltensuntersuchungen bei Fahrern kamen meist helmbasierte Systeme zum Einsatz. Diese liefern akzeptable Messgenauigkeiten, weisen jedoch im praktischen Einsatz Nachteile auf, die die Dauer und den Umfang der Messreihen begrenzen. Die so erzielten Ergebnisse dienen dem wissenschaftlichen Erkenntnisgewinn, waren aber nicht ohne Weiteres auf die Praxis übertragbar.

Im Messfahrzeug des Lehrstuhles Gestaltung von Straßenverkehrsanlagen der TU Dresden sowie im Fahrsimulator des Interdisziplinären Zentrums für Verkehrswissenschaften (IZVV) Würzburg stehen berührungsfreie Blickbewegungsmesssysteme des Typs „SmartEye“ zur Verfügung. Dafür wurden Versuchsfahrten konzipiert und durchgeführt, um in einem ingenieurwissenschaftlich-verkehrspsychologischen Ansatz die Wahrnehmung, Beanspruchung und Reaktion von Fahrern auf bestimmte Streckenmerkmale, insbesondere unter dem Aspekt der vorhandenen Sichtweiten, zu beschreiben. Durch den in Deutschland so erstmalig möglichen, umfassenden Einsatz beeinträchtigungsfreier Blickbewegungsmessung in realen Versuchsfahrten sowie in realitätsnahen Simulatorstudien können bestehende Erkenntnisse zum Wahrnehmungs- und Blickverhalten von Kraftfahrern auf Landstraßen anhand einer breiten Datenbasis überprüft und weiterentwickelt werden.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, das Zusammenwirken entwurfstechnischer, fahrdynamischer und verhaltenspsychologischer Größen zu ergründen und deren Auswirkungen auf das Fahrverhalten zu beschreiben. Die Ergebnisse der Untersuchung sollen die Grundlage für ein psycho-physiologisch begründetes Sichtweitenmodell, die **Orientierungssichtweite**, darstellen, das die Berücksichtigung der Fahrerorientierung im Zuge der Fortschreibung und Neugliederung der Richtlinien für die Anlage von Landstraßen ermöglicht.

Anhand einer Analyse bisheriger Arbeiten mit *eye-tracking*-Systemen, Erkenntnissen zur Fahrerpsychologie und zum Einfluss entwurfstechnischer Parameter auf das Fahrverhalten

sind dafür zunächst geeignete Blickmaße zu identifizieren, die als Indikatoren für die Beanspruchung von Fahrern dienen können. Auf dieser Grundlage wird das Blick- und Fahrverhalten von Versuchspersonen mit dem maßgebenden Faktor Sichtweite untersucht und in Abhängigkeit von der Streckencharakteristik beschrieben. Die Ergebnisse werden in einen messtechnisch abgesicherten Modellvorschlag überführt, der eine Grundlage für die Integration der Fahrerorientierung in die Entwurfsklassen der neuen Richtliniengeneration liefern soll.

2 Stand der Wissenschaft

2.1 Bedeutung der Sicht beim Fahren

Die Straßenverkehrsordnung verpflichtet jeden Verkehrsteilnehmer, nur so schnell fahren, dass er sein Fahrzeug ständig beherrscht. Er hat seine Geschwindigkeit den Straßen-, Verkehrs-, Sicht- und Wetterverhältnissen sowie seinen persönlichen Fähigkeiten und den Eigenschaften von Fahrzeug und Ladung anzupassen. Konkret bedeutet das: Er darf nur so schnell fahren, dass er innerhalb der übersehbaren Strecke anhalten kann. Auf Fahrbahnen, die so schmal sind, dass dort entgegenkommende Fahrzeuge gefährdet werden könnten, muss er so langsam fahren, dass er mindestens innerhalb der Hälfte der übersehbaren Strecke halten kann (§3 Abs. 1 StVO).

Die Richtlinien für die Anlage von Straßen (RAS-L 1995, sowie deren Vorgänger) fordern deshalb im Rahmen der Entwurfsplanung eines jeden Straßenbauvorhabens die Einhaltung einer erforderlichen Haltesichtweite, die über die gesamte Streckenlänge zu gewährleisten ist und anhand ihrer geometrischen Modellvorgaben das rechtzeitige Anhalten gewährleisten soll (s. Kap. 2.3.2). Damit stellt diese Haltesichtweite einen wichtigen Entwurfparameter dar, der Auswirkungen auf die Bemessung weiterer Entwurfs Elemente wie Kuppenhalbmesser oder Kurvenradien besitzt. Zumindest auf neu- oder umgeplanten Strecken der letzten 30 Jahre ist damit ein Mindestniveau an Sicht vorhanden, das den Fahrer in die Lage versetzt, der StVO-Forderung nachkommen zu können.

Die Verantwortung für die Einschätzung der vorhandenen Sicht und die Anpassung der Geschwindigkeit trägt also letztendlich der Fahrer selbst. Das setzt voraus, dass er stets in der Lage ist, auf der Basis seiner Fahrgeschwindigkeit den notwendigen Reaktions- und Bremsweg zumindest ungefähr abzuschätzen und mit der für ihn einsehbaren Streckenlänge (bzw. der Hälfte bei schmalen Querschnitten) zu vergleichen. Fällt dieser Vergleich negativ aus, müsste er verzögern. Zahlreiche Beobachtungen und Auswertungen des Unfallgeschehens zeigen jedoch, dass dies in der Praxis keinesfalls konsequent geschieht. DIETRICH U.A. (1993, in WEISE, DURTH U.A. 1997) führen sinngemäß folgende Gründe dafür an:

- (1) Entfernungen und Geschwindigkeiten sind für den Fahrer nur schwer einzuschätzen.
- (2) Der Fahrer will fahren. Er erwartet nicht vorrangig Hindernisse auf der Fahrbahn, da diese sehr selten vorkommen.
- (3) Bei niedrigen Geschwindigkeiten werden die erforderlichen Bremswege unterschätzt. Auf schnell befahrenen Straßen werden die tatsächlichen Geschwindigkeiten unterschätzt.
- (4) Vollbremsungen sind seltene Ereignisse. Der Fahrer hat kein Gefühl für die dabei auftretenden Kräfte.

Es ließe sich ergänzen, dass häufige Änderungen der Geschwindigkeit nicht komfortabel für den Fahrer und die Fahrzeuginsassen sind. Ein den oft sprunghaft variierenden Sichtweiten angepasstes Fahrverhalten hätte entsprechend zahlreiche und starke Beschleunigungs- und Bremsvorgänge zur Folge, die weder subjektiv noch objektiv sicherheitsfördernd wirken. BERGER (1996) rechnet vor, dass ein Sichthindernis in einer Kurve (beispielsweise innenseitige, blickdichte Bepflanzung), der sich ein Fahrer mit 100 km/h nähert, praktisch eine Vollbremsung erfordern würde.

Es besteht also offenbar eine Diskrepanz zwischen gesetzlich vorgeschriebenem und tatsächlich gezeigtem Verhalten, deren Ursachen in fehlerhaften Einschätzungen einerseits und bewusster Risikokompensation andererseits liegen. Der dem Fahrverhalten zugrunde liegende Informationsfluss zwischen Fahrer, Fahrzeug und Fahrraum wird häufig als steuerungstechnischer Regelkreis beschrieben (z.B. DURTH, 1974). Innerhalb dieser Modelle sind

die visuelle Wahrnehmung sowie die Filterung und Verarbeitung der aufgenommenen Informationen letztendlich die hauptsächliche Grundlage für die Handlungen des Fahrers. Vor dem Hintergrund der aktuellen Diskussion um eine den verringerten Bremswegen moderner Pkw angepasste Reduzierung der erforderlichen Haltesichtweite (vgl. Kap. 2.3.3) und damit der Verringerung des zur Verfügung stehenden Mindestsichtniveaus ist deshalb zunächst zu klären, welche psychologische und physiologische Leistungsfähigkeit bei Fahrern vorausgesetzt und in praktisch handhabbaren Sichtweitenmodellen berücksichtigt werden kann.

2.2 Visuelle Informationsaufnahme von Fahrern

Das Auge ist das alleinige vorausschauende Wahrnehmungs- und Orientierungsmittel des Menschen im Verkehrsraum (HIERSCHE 1968). Als einziges Sinnesorgan kann es über die Blickbewegungen gezielt ausgerichtet werden und ermöglicht die Erfassung räumlich vorausliegender Objekte und ihrer relativen Bewegungen. Das ist die Grundvoraussetzung für antizipierendes Verhalten - also vorausschauendes Fahren. Der Anteil an fahrrelevanten Informationen, der visuell aufgenommen wird, wird unterschiedlich diskutiert, jedoch stets auf mehr als 90% beziffert (z.B. HILLS 1980, KAYSER, SANDERS U.A. 1989).

Einigkeit herrscht in der Literatur auch über die Tatsache, dass die Informationsaufnahme sowohl bewusst als auch unbewusst erfolgt und dass beide Arten beim Fahren eine Rolle spielen, wobei Filtermechanismen zum Aussortieren fahrrelevanter Informationen genutzt werden. Die Darstellung des Informationsflusses in der sich fortlaufend wiederholenden Interaktion zwischen Fahrer, Fahrzeug und Straße lässt sich aus ingenieurwissenschaftlicher Perspektive als steuerungstechnischer Regelkreis beschreiben (z.B. DURTH 1974). So ist es möglich, die maßgebenden Einflussfaktoren zu benennen und ihre Wechselwirkungen übersichtlich darzustellen. Welches Gewicht den einzelnen Faktoren in bestimmten Fahrsituationen zukommt, geht daraus aber noch nicht hervor. Verkehrspsychologische Ansätze vertiefen daher die Betrachtung der Steuerungsabläufe des Fahrers.

Der Prozess der Informationsverarbeitung lässt sich in Wahrnehmung, Entscheidung und Handlung unterteilen (z.B. THEEUWES, 2001). Alle Tätigkeiten können in unterschiedlichem Grad automatisiert erfolgen (wissens-, regel- oder fähigkeitsbasiert), was im Wesentlichen von der Bekanntheit der Situation, der Erfahrung und der Aufmerksamkeit / Vigilanz des Fahrers abhängig ist. Es ist daher zunächst festzustellen, welche Leistungsfähigkeit in der Wahrnehmung bei Fahrern vorausgesetzt werden kann, wie diese Leistungsfähigkeit im Straßenverkehr eingesetzt wird und welche Einflüsse Beanspruchung und Erfahrung der Fahrer dabei ausüben.

2.2.1 Grundlagen des Blickverhaltens

Die Aufnahme und Selektion relevanter Informationen erfolgen durch die Zusammenarbeit zentralen und peripheren Sehens. Um zentrales oder **foveales Sehen** handelt es sich, wenn Objekte auf der Fovea centralis, einem etwa 2° durchmessenden Bereich der Netzhaut mit der höchsten Auflösung (d.h. der höchsten Dichte optischer Rezeptoren, so genannter Zapfen), abgebildet werden. Die Zapfen ermöglichen die Wahrnehmung von Farben und sind verantwortlich für scharfes Sehen. Ihre Dichte nimmt mit zunehmendem Abstand von der Fovea stark ab, in gleichem Maße verringert sich die verfügbare Sehschärfe (SCHWEIGERT, 2003).

Gelangt ein Objekt außerhalb der Fovea zur Abbildung, spricht man von **peripherem Sehen**. Dabei kommt der zweite Typ optischer Rezeptoren, die Stäbchen, zum Einsatz. Deren Dichte ist im Bereich der Fovea gleich null und steigt mit zunehmendem Abstand von ihr an. Stäbchen ermöglichen das Wahrnehmen von Kontrasten. Damit lassen sich Bewegungen und Helligkeitsänderungen wahrnehmen.

Nach physiologischen und psychologischen Kriterien lassen sich verschiedene Bereiche definieren, in denen die visuelle Informationsaufnahme auf unterschiedliche Art erfolgen kann. Als **Gesichtsfeld** wird der Ausschnitt der Umwelt bezeichnet, der ohne Bewegung der

Augen und des Kopfes wahrgenommen werden kann. Dessen Ausdehnung beträgt 180-220° in horizontaler und etwa 130° in vertikaler Richtung (BIEDERMANN 1984, WIERDA & AASMANN 1992). Das **Blickfeld** beschreibt den Bereich, der bei unbewegtem Kopf durch Augenbewegungen erfassbar ist. Von der Mittelstellung gemessen können die Augen maximal ungefähr 60° zur Seite und 40° nach oben oder unten bewegt werden. Das Blickfeld ist demnach in horizontaler Richtung um 120° und in vertikaler Richtung um 80° größer als das Gesichtsfeld.

Als **nutzbares (funktionales) Sehfeld** bzw. **Useful Field Of View (UFOV)** (SANDERS 1970; BALL, OWSLEY 1993) wird derjenige Teilbereich des Blickfeldes bezeichnet, aus dem der Hauptanteil der Informationsaufnahme erfolgt, der auch kognitiv verarbeitet wird. MACKWORTH (1965) vermutete, dass sich das nutzbare Sehfeld von Fahrern mit zunehmender Geschwindigkeit einengt, und bezeichnete diesen Effekt als Tunnelblick. BABKOV (1983) zeigt Fixationsorte von Probanden, die ebenfalls eine solche geschwindigkeitsabhängige Verengung nahelegen. Übereinstimmende Ergebnisse von Feldversuchen anderer Autoren (MIURA, 1986; COHEN, 1987) widersprechen dem und legen stattdessen den Schluss nahe, dass nicht hohe Geschwindigkeiten, sondern komplexe Verkehrssituationen zu einer Verkleinerung des UFOV führen. MIURA (1986) führt dies auf eine tiefere Verarbeitung der Informationen der einzelnen Fixationsorte zurück. Diese ist vor allem dann notwendig, wenn Entscheidungen unter Beachtung vieler verschiedener Faktoren gefällt werden müssen. Insofern ist die Einengung des nutzbaren Sehfeldes in solchen Situationen eine Anpassungsleistung der menschlichen Informationsverarbeitung. „Tunnelsehen“ in direkter Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit gibt es jedoch nicht (SPRENGER, 1997). KAYSER, SANDERS u.a. (1989) gehen davon aus, dass sich bei höherer Beanspruchung nicht das Sehfeld verkleinert, sondern sich die Aufmerksamkeitsverteilung innerhalb desselben verlagert.

Tiefenwahrnehmung

Für das Abschätzen von Entfernungen ist die Tiefenwahrnehmung von Bedeutung. Wird abwechselnd in die Nähe und Ferne geblickt, so bewegen sich beide Augen in Bezug auf die Kopfkoordinaten spiegelbildlich. Bei diesen Vergenzbewegungen ändert sich der Winkel der Sehachsen beider Augen zueinander. Wird ein Punkt in großer Ferne angeblickt, verlaufen die Sehachsen parallel. Ein Fixationswechsel auf einen nahen Punkt bewirkt eine Konvergenzbewegung der Sehachsen. Wird anschließend wieder ein Punkt in der Ferne fixiert, so bewegen sich die Sehachsen durch Divergenzbewegung beider Augen auseinander, bis sie wieder parallel sind.

Für die Dreidimensionalität des Sehens spielt deshalb das Verhältnis von Augenabstand zu Objektentfernung eine entscheidende Rolle: Stereoskopisches Sehen ist nur in einem begrenzten Entfernungsbereich möglich. Es beruht darauf, dass aus der Disparität der Abbilder eines Objektes auf der Netzhaut des linken und rechten Auges die Distanz zwischen den Augen und dem Objekt berechnet wird. WIERDA & AASMAN (1992) nehmen an, dass Stereopsis schon ab einer Distanz von 15 m kaum noch von Bedeutung ist. Auch einäugige Fahrer sind deshalb in der Lage, ein Fahrzeug zu führen, müssen allerdings wegen des verkleinerten Gesichtsfeldes vermehrt Kopf- und Blickbewegungen durchführen (SCHWEIGERT 2003). In größeren Entfernungen wird der räumliche Tiefeneindruck durch monokulare Kriterien wie die Größenunterschiede bekannter Gegenstände, Occlusionen (ein nahes Objekt überdeckt ein weiter entferntes Objekt), Schattenbildung (eine ferne Lichtquelle wie die Sonne bewirkt in Abhängigkeit von Orientierung und Distanz eines Objektes verschiedene Schattenwürfe), Texturgradienten (blickt man z.B. über eine Wiese, so hat das Gras in der Nähe eine definierte Textur, die mit zunehmender Entfernung in eine homogene grüne Oberfläche übergeht) und die Bewegungsparallaxe (nähere Objekte haben eine größere Winkelgeschwindigkeit) bewirkt. Nach BERGER (1996) verschlechtert sich die Tiefenwahrnehmung ab Entfernungen von über 100 m rasch; ab ca. 1200 m tritt der Eindruck der räumlichen Entfernung nicht mehr auf.

Fixationen und Sakkaden

Beim Fahren sind sowohl foveales als auch peripheres Sehen von Bedeutung. Das foveale Sehen garantiert die schnelle und präzise Aufnahme von Informationen aus einem sehr engen Bereich, dem Ort der **Fixation**. Um detaillierte Informationen innerhalb des gesamten für den Fahrer relevanten Umfeldes zu erhalten, sind deshalb Blicksprünge, so genannte **Sakkaden**, notwendig, die diesen Bereich verschieben. Das kann einerseits durch reflexhafte Blickzuwendung zu einem auffälligen Reiz erfolgen, ohne dass bereits Informationen über das anzublickende Objekt vorhanden sind. Dieser reizgesteuerte oder bottom-up-Prozess erfordert wiederum peripheres Sehen, das für die Wahrnehmung des auslösenden Helligkeits- oder Bewegungsreizes verantwortlich ist.

Andererseits entstehen Blickbewegungen aus dem Informationsbedürfnis des Fahrers, der die Umgebung auf der Suche nach fahrrelevanten Informationen mit den Augen abtastet (top-down-Prozess). Da diese Abläufe von der Erwartungshaltung des Fahrers abhängig sind, verlaufen sie kognitionsgesteuert und werden durch Faktoren wie die Erfahrung, die Aufmerksamkeit sowie die Art der Situation beeinflusst. Bild 2-1 verdeutlicht das Zusammenwirken externer und interner Einflussgrößen bei der Steuerung des Blickverhaltens.

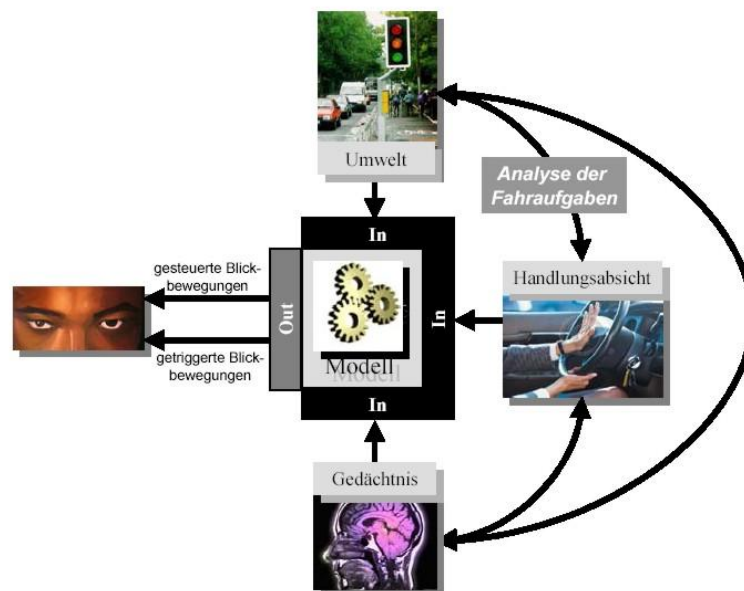


Bild 2-1: Einflussfaktoren auf das Blickverhalten nach SCHWEIGERT (2003)

Sakkaden sind so genannte ballistische Bewegungen, die Geschwindigkeiten von bis zu 1000° pro Sekunde erreichen können. (Damit sind sie die schnellsten Bewegungen, die vom menschlichen Körper ausgeführt werden können). Ist eine Saccade einmal ausgelöst, so kann sie weder in ihrem Verlauf verändert noch abgebrochen werden. Während dieser schnellen Augenbewegungen werden keine visuellen Informationen aufgenommen, auf der Netzhaut entsteht eine Art Graureiz. (Man kann dies beobachten, indem man die eigenen Augen im Spiegel betrachtet, während man vom inneren zum äußeren Augenrand blickt. Dabei sind keine oder nur geringfügige Augenbewegungen wahrnehmbar. Deutlich erkennt man hingegen die Augenbewegungen einer anderen Person, wenn sie dieselben Bewegungen ausführt (nach DODGE, 1900)). Häufig verfehlt eine Saccade ihr Ziel knapp, so dass anschließend eine Korrektursakkade (Mikrosakkade mit einer Amplitude von wenigen Winkelminuten) ausgeführt werden muss. Die Sakkadendauer (inklusive der notwendigen Korrekturbewegung) bewegt sich etwa zwischen 10 und 80 ms. Größere Sakkaden werden häufig von zusätzlichen Kopfbewegungen begleitet, die nach LAND (1992) etwa gleichzeitig mit der Saccade beginnen und deren Geschwindigkeit stark mit der Sakkadensprungweite korreliert:

große Blickrichtungsänderungen werden durch schnelle Kopfdrehungen bewerkstelligt.

Die Aufnahme visueller Informationen erfolgt durch Fixationen. Dabei verharrt der Blick auf einem Objekt. Bleibt dieses Objekt positionsfest innerhalb des Blickfeldes des Betrachters, so ist zur Fixation keine Augenbewegung notwendig. Bewegt sich dagegen das fixierte Objekt und wird mit den Augen verfolgt (Blickfolgebewegung), so erfolgt zwar eine Augen-, aber keine Blickbewegung. Ein wesentlicher Unterschied zwischen Augenbewegungen und Blickbewegungen besteht deshalb darin, dass Augenbewegungen allein durch die Beobachtung der Augen erfasst werden können, während Blickbewegungen nur mit Hilfe von Informationen über angeblickte Objekte erkenn- und interpretierbar sind. Üblicherweise werden sowohl ortsfeste Fixationen als auch Blickfolgebewegungen unter dem Begriff Fixation subsummiert (SCHWEIGERT, 2003).

Wird ein bewegtes Objekt mit den Augen verfolgt, dann treten gleitende Augenfolgebewegungen auf, wenn die Objektgeschwindigkeit nicht zu groß ist. Unterhalb von etwa 50°/s bis 60°/s (SCHWEIGERT, 2003) entspricht die Winkelgeschwindigkeit der Augen näherungsweise der Winkelgeschwindigkeit des bewegten Objektes, so dass ein Folgen mit den Augen möglich ist. Bei höheren Objektgeschwindigkeiten (z.B. beim Blick durch das Seitenfenster eines fahrenden KFZ) kommt es zu einem Wechsel zwischen langsamen Augenfolgebewegungen und Rückstellsakkaden. Dieser Wechsel wird Nystagmus genannt. Fixationswechsel im Fahrerblickverhalten sind allerdings in aller Regel keine Nystagmen, sondern ein Abtasten des Fahrtraums mit den Augen. Für die hier vorliegende Untersuchung sind Augenfolgebewegungen daher nicht von Bedeutung.

Reaktion auf bewegte Objekte im Blickfeld

Die optischen Rezeptoren auf der Netzhaut reagieren, wie andere Sinneszellen auch, hauptsächlich auf Veränderungen. (Wird in Versuchen ein konstantes Bild auf der Netzhaut erzeugt, so verschwimmt dieses mit der Zeit aufgrund von Rezeptorerermüdung). Bewegte Objekte im Blickfeld lenken daher die Aufmerksamkeit stark auf sich. Wenn in der Gesichtsfeldperipherie plötzlich ein bewegter Gegenstand auftaucht, wird eine reflektorische Saccade auf diesen Gegenstand ausgelöst, die von einer Kopfbewegung begleitet sein kann. Dieser Orientierungsreflex ist prä-kognitiv (d.h. ein nicht bewusstseinsfähiger Automatismus): Die Fixation wird ausgelöst, ohne dass man sich darüber im Klaren ist, dass da etwas ist oder was es ist. Insgesamt ist dabei die „Auffälligkeit“ bewegter Objekte in der Gesichtsfeldperipherie stärker als in der Fovea centralis. Reflektorische Sakkaden sind ein Extrembeispiel für *Bottom-Up*-Prozesse (RÖTTING 2001) und gleichzeitig die einzige Ausnahme von der Regel, dass menschliches Sehen nie rein reizgesteuertes Sehen ist. Die Intentionen des Beobachters (z.B. induziert durch eine bestimmte Aufgabe, Instruktion, etc.) sind normalerweise immer mit dafür verantwortlich, welche Elemente der visuellen Umgebung in welcher Reihenfolge fixiert werden.

Übertragen auf das Autofahren bedeutet das, dass im Blickfeld vorhandene und auftauchende Verkehrsteilnehmer wahrgenommen und überwacht werden. Vorausfahrende Fahrzeuge werden zur Orientierung über den Streckenverlauf genutzt, entgegenkommende oder kreuzende auf einen potenziellen Kollisionskurs hin überwacht. Beides geschieht teilweise bewusst und teilweise unbewusst. In jedem Fall besteht eine unvermeidbare Beeinflussung des Blickverhaltens von Fahrern durch andere Verkehrsteilnehmer. Das wird bei Messungen im realen Verkehr zu beachten sein.

2.2.2 Parameter der Blickbewegungsmessung

Die Dauer von Fixationen stellt einen der am häufigsten verwendeten Parameter bei Blickbewegungsuntersuchungen dar. Der Wertebereich wird allgemein zwischen 100 ms und 2000 ms angegeben, wobei die Untergrenze nach übereinstimmenden Untersuchungen von YOUNG, SHEENA (1975), KARSH, BREITENBACH (1983) und SCHWEIGERT (2003) physiologisch begründet ist. Unterhalb dieses Wertes können demnach Informationen nicht bewusst aufgenommen werden. Eine feste Obergrenze gibt es hingegen nicht, SCHWEIGERT findet aber

weniger als 5% Fixationen, die länger als 2.000 ms dauern. Beim Autofahren sind besonders häufig Fixationsdauern zwischen 200 und 600 ms zu beobachten (PANNASCH, 2003).

Da während der Sakkaden keine visuelle Informationsaufnahme erfolgt, wird die **Fixationsdauer** in der Regel als Maß für die Dauer der Verarbeitung der betrachteten Information interpretiert. Dabei wird vorausgesetzt, dass

1. die Information, die gerade fixiert wird, auch verarbeitet wird („eye-mind assumption“, JUST & CARPENTER, 1980) und
2. die Fixationsdauer der Dauer der zentralen Verarbeitung entspricht („immediacy assumption“, JUST & CARPENTER, 1980).

Beide Annahmen, die ursprünglich anhand von Leseaufgaben aufgestellt wurden, sind bereits vielfach auf ihre Gültigkeitsbedingungen hin untersucht worden. RÖTTING (2001) diskutiert sie und kommt zu dem Schluss, dass sie dann angezweifelt werden müssen, wenn die visuelle Stimulation als belastend oder störend empfunden wird. Dies ist beim Autofahren nicht der Fall, im Gegenteil sucht der Fahrer aktiv nach Informationen und ist sich der Bedeutung visueller Eindrücke für die Fahraufgabe bewusst. Auch SCHWEIGERT (2003) bestätigt anhand einer Analyse zahlreicher maßgebender Arbeiten zum Thema Blickbewegungsmessung, dass der Zusammenhang zwischen Blickrichtung und Aufmerksamkeitsfokussierung als gesichert gelten kann. Bestimmte fahrrelevante Informationen können zwar auch durch peripheres Sehen aufgenommen werden oder sind bereits im Gedächtnis gespeichert, für visuelle Aufgaben wie das Einschätzen des vorausliegenden Streckenabschnittes inklusive des Verkehrsgeschehens sind diese jedoch ungeeignet, da eine hohe Sehschärfe und eine ständige Aktualisierung der Informationen erforderlich sind. Hier ist das foveale Sehen maßgebend. Es erscheint deshalb plausibel, dass beide Annahmen für Autofahrer zutreffen, und zwar umso mehr, je schwieriger sich die Fahrsituation darstellt.

Darauf aufbauend kann die Fixationsdauer als Maß für die Beanspruchung dienen. VELICHKOVSKY U.A. (2002) weisen aber darauf hin, dass die Interpretation vom Aufgabentyp abhängig ist. Verlangt eine Aufgabe überwiegend zentral kontrollierte Verarbeitung (wie beim Lesen), so ist eine Verlängerung der Fixationsdauer ein Hinweis auf größere Beanspruchung. Untermuert wird dies z.B. durch Untersuchungen von RAYNER (1978) sowie STAGER & ANGUS (1978). Hingegen finden sich in einigen Untersuchungen bei Aufgaben, die schnelles Reagieren erfordern (wie das Führen von Fahrzeugen oder Flugzeugen), bei hoher Beanspruchung kürzere Fixationsdauern (MIURA 1986, UNEMA & RÖTTING 1990). SCHWEIGERT (2003) findet bei der Analyse von Fixationsdauern bei Ortsdurchfahrten linkssteile, eingipflige Verteilungen mit Modalwerten zwischen 300 ms und 400 ms. Je „komplexer“ die Situation, desto kürzer sind die festgestellten Fixationsdauern. Fixationen auf Verkehrszeichen dauern im Schnitt 500 ms, auf entgegenkommende Fahrzeuge und auf die Fahrbahn 580 ms. Tachometerfixationen dauern ca. 610 ms und Fixationen in den Spiegel auf rückwärtige Fahrzeuge 680 ms. Die längsten mittleren Dauern entfallen mit 730 ms auf das vorausfahrende Fahrzeug.

Allerdings wird in diesen fahrerbezogenen Studien hohe Beanspruchung stets mit dem Bewältigen komplexer Situationen wie Knotenpunkte oder Ortsdurchfahrten gleichgesetzt. Diese sind dadurch gekennzeichnet, dass der Fahrer Informationen von vielen verschiedenen Stellen (Blickzielen) in kurzer Zeit aufnehmen und bewerten muss. Eine Verkürzung der Fixationsdauern ist dann nahezu zwangsläufig; für knotenpunktfreie Außerortsstraßenabschnitte muss das nicht gelten. Hier hat sich stattdessen gezeigt, dass Situationen, die lange Fixationsdauern erfordern, schwieriger sind als solche, bei denen kurze Fixationsdauern gemessen werden (GOLDBERG & KOTVAL, 1999). Dieser Zusammenhang wurde erstmals von BUSWELL (1935, nach GOLDBERG & KOTVAL, 1999) festgestellt und immer wieder bestätigt. SHINAR, MCDOWELL und ROCKWELL (1977) fanden eine signifikante Verlängerung der Fixationsdauern in stark unfallbelasteten Kurven, der Effekt konnte nicht auf Streckenmerkmale zurückgeführt werden.

Bestätigt wird dieser Gegensatz durch die Ergebnisse von KAYSER, SANDERS U.A. (1989), die entsprechend unterschiedliche Entwicklungen für Stadt- und Außerortsstraßen fanden. Je

nach visueller Aufgabe können also sowohl (viele) sehr kurze als auch längere Fixationsdauern auf eine erhöhte Beanspruchung hinweisen (UNDERWOOD U.A. 1999, SCHWEIGERT 2003).

Nahezu alle Autoren weisen daraufhin, dass unter realen Versuchsbedingungen große Unterschiede im Blickverhalten zwischen einzelnen Personen auftreten. Diese lassen sich teilweise mit der Fahrerfahrung begründen, es scheint aber auch einfach individuell verschiedene Blickstrategien zu geben. Es kann deshalb sinnvoll sein, die Betrachtung der Fixationsdauern durch den **Zeitanteil** zu ergänzen, **der auf Fixationen entfällt**. Dadurch können verschieden geartete visuelle Aufgaben sowie personenspezifische Unterschiede in einem Maß vereint und mit der Beanspruchung in Zusammenhang gebracht werden.

Neben diesen rein auf die Augenbewegungen bezogenen Größen gibt es Parameter, die den Gegenstand der Betrachtung einbeziehen oder die Häufigkeit bzw. den zeitlichen Anteil der Blicke auswerten, die in bestimmte Bereiche gerichtet sind (*areas of interest*, AOI). Im Hinblick auf die Wahrnehmung der vorausliegenden Strecke ist vor allem der letztere Aspekt interessant. Dafür kann beispielsweise ein festes Raster über das Blickfeld der Fahrer gelegt werden. Dadurch lässt sich die räumliche Verteilung der Fixationspunkte erfassen. BELT (1969) definiert daraus einen **Konzentrationsindex**, den er als Prozentsatz der Gesamtfixationszeit in das am häufigsten angeblickte Rasterfeld beschreibt. GOLDBERG & KOTVAL (1999) hingegen geben im **Spatial Density Index** (Feldindex) den Anteil der Segmente an, auf die mindestens eine Fixation fällt. In beiden Untersuchungen wird eine Größe der Rasterfelder von 3° Seitenlänge verwendet. Zur Beurteilung der Größe des Sehfeldes reichen diese Maße allein aber noch nicht aus, da keine Bewertung der Entfernung der angeblickten Felder stattfindet. Dies kann durch das Hinzuziehen räumlicher Parameter wie der Scanpfadlänge (s.u.) möglicherweise ausgeglichen werden.

Häufiger gebräuchlich ist die Methode der **qualitativen Objektanalyse**. Dabei werden Fixationen auf verschiedene Elemente des Fahrtraumes (rechter und linker Fahrstreifen, Fahrbahnmarkierungen, Verkehrszeichen, etc.) oder andere Fahrzeuge erfasst und die entsprechenden Zeitanteile ausgewertet. KAYSER, SANDERS U.A. (1989) legen variable Raster auf Streckenfotografien und unterscheiden in fahrrelevante und fahrirrelevante Blickziele. Auf Landstraßen stellen sie so eine Erhöhung der Fixationszeitanteile zur Fahrbahn bei höheren Geschwindigkeiten fest. Dies wird nicht als Verengung des Sehfeldes interpretiert, sondern als Verlagerung der Aufmerksamkeit innerhalb desselben. Nachteilig an dieser Methode ist der hohe manuelle Aufwand der Bildauswertung. MOURANT & ROCKWELL (1970) stellten anhand von Mehrfachbefahrungen derselben Strecke fest, dass sich die Fixationen um den Fluchtpunkt mit zunehmender Vertrautheit verdichten. UNDERWOOD U.A. (2002) stellen sogar fest, dass mehr als zwei Drittel der Zeit zum Fluchtpunkt geblickt wird. Der Fluchtpunkt scheint sich demnach am besten zur Vorausorientierung zu eignen, während für die Spurführung die Wahrnehmung des Nahbereichs durch peripheres Sehen ausreicht (vgl. Kap.0).

VICTOR U.A. (2005) umgehen die aufwändige manuelle Bildauswertung und legen für die Untersuchung der Aufmerksamkeitsverteilung bei Nebenaufgaben ein Fenster (ein Rechteck 20° horizontaler und 15° vertikaler Ausdehnung bzw. einen Kreis mit 16° Durchmesser) um den Modalwert der Blickrichtung, das als Hauptaufmerksamkeitsbereich bezeichnet wird. Da zu erwarten ist, dass das Zentrum dieses Fensters nicht weit vom Fluchtpunkt der Straße entfernt liegt, wird der Anteil der Fixationen innerhalb des Fensters als **Percent Road Center (PRC)** bezeichnet. (Für die Modalwertberechnung wurden nur nach vorn gerichtete Blicke herangezogen). Die Ergebnisse von VICTOR U.A. (2005) zeigen, dass PRC sich sehr gut als Maß für die Schwierigkeit von Nebenaufgaben eignet - je schwieriger die Aufgabe, desto seltener werden Blicke zum Fluchtpunkt. Umgekehrt lässt sich ableiten, dass der Blickanteil dorthin steigen muss, je größer das Informationsdefizit bezüglich des weiteren Streckenverlaufes ist.

Zur räumlichen Beschreibung des Blickverhaltens werden meist **Scanpfadlängen** (euklidische Distanz aufeinanderfolgender Fixationen, teilweise auch als Sakkadenamplituden bezeichnet) sowie die **Standardabweichung des Blickwinkels** verwendet. Beide Maße stehen in einem engen Zusammenhang. Lange Scanpfade sind ein Zeichen für ausgedehnte

visuelle Suche (GOLDBERG & KOTVAL, 1999), können bei Unterforderung des Fahrers aber auch einfach auf Umherschauen in der Landschaft deuten (vorausgesetzt, es gibt etwas zu sehen - hier ist ein Einfluss der Seitenraumgestaltung zu erwarten). Nach STEINAUER, KRÜGER U.A. (2006) ist davon auszugehen, dass für geübte Fahrer ein hoher Anteil der Fahrzeit durch Zustände der Unterforderung gekennzeichnet ist. Zahlreiche Untersuchungen (z.B. MIURA 1986, VICTOR U.A. 2005) nutzen Scanpfadlängen oder verwandte, räumlich definierte Größen zur Beschreibung der Ausdehnung des nutzbaren Sehfeldes. Übereinstimmend stellen diese Untersuchungen eine Verringerung mit zunehmender Beanspruchung fest.

Aus der Übersicht der ausgewählten Maße des Blickverhaltens wird ersichtlich, dass Blickanalysen einen geeigneten Indikator für kognitive Prozesse darstellen und damit Rückschlüsse auf die Beanspruchung von Fahrern ermöglichen. Die Blickbewegungsmessung bei Fahrern ist demnach ein geeignetes Instrument zur Analyse der Informationsaufnahme und psychologischen Reaktion. Es kann davon ausgegangen werden, dass beim Fahren Blickziel und Ort der Aufmerksamkeit identisch sind, da Fahrer aktiv nach fahrrelevanten Informationen suchen.

2.2.3 Blickverhalten bei ausgewählten Fahraufgaben

Unterschiedliche Fahrsituationen erfordern unterschiedliches Blickverhalten. Nach verkehrspsychologischen Modellen lassen sich Fahraufgaben in Navigations-, Bahnführungs- und Stabilisierungsebene einteilen (z.B. STEINAUER, KRÜGER U.A., 2006). Die Navigationsebene umfasst langfristige Handlungen wie Routenplanung und Streckenwahl und beeinflusst das Fahren außerhalb von Knotenpunkten nicht. Auf der Ebene der Bahnführung sind Entscheidungen für und die Durchführung von bewussten Manövern wie Überhol- oder Abbiegevorgängen angesiedelt. Dabei geht es vor allem darum, Situationen richtig einzuschätzen und daraufhin ein erlerntes Verhaltensmuster anzuwenden. Fehler können dabei durch mangelhafte Kontrolle oder falsche Einschätzung der Situation entstehen, in deren Folge ein ungeeignetes Verhaltensmuster aktiviert wird.

Für das Fahren auf knotenpunktfreien Außerortsstraßenabschnitten ist in erster Linie die Stabilisierungsebene maßgebend. Die unmittelbare Regulation des Fahrzeugs und die Wahl der Geschwindigkeit werden (sofern diese nicht durch Restriktionen vorgegeben ist und deshalb bewusst kontrolliert werden muss), in der Regel ohne bewusste Überwachung automatisiert durchgeführt. Welche Blickstrategien dabei eingesetzt werden und welche Sichtfelder dafür notwendig sind, soll im Folgenden für verschiedene Fahraufgaben untersucht werden.

Spurhaltung

Die Spurhaltung (oder Spurführung) erfordert die Kontrolle der lateralen Position des eigenen Fahrzeugs im Fahrstreifen sowie des Gierwinkels, d.h. des Winkels zwischen Fahrzeuglängsachse und Straßenverlauf. Auf Geraden ist die Spurhaltung grob durch Beibehalten dieser Parameter zu erreichen (ausgenommen sind geringfügige Korrekturen, die wegen der Einflüsse aus Querneigung, Seitenwind oder Fahrbahnzustand notwendig werden). In Kurven erfordert die permanente Richtungsänderung eine intensivere Kontrolle von Position und Gierwinkel.

Bereits MOURANT & ROCKWELL (1970) sowie DILLING (1973) stellten fest, dass sich erfahrene Fahrer fast ausschließlich an Fixationspunkten im Fernbereich, d.h. am Fluchtpunkt der Straße, orientieren. In der Literatur besteht Einigkeit darüber, dass die Aufgabe der Spurhaltung weitgehend durch peripheres Sehen bewältigt werden kann. Dies wird durch Studien (LAMBLE U.A. 1999, HE U.A. 1996) bestätigt, die gezeigt haben, dass die Detektionsleistung in der unteren Hälfte des Gesichtsfeldes höher ist. Der relevante Nahbereich vor dem Fahrzeug kann also bei Blicken zum Fluchtpunkt effektiv mit erfasst werden. Bei Blicken zum Armaturenbrett ist das hingegen schwieriger, da neben der geringeren Detektionsleistung im Gesichtsfeld auch die Sehachsen beider Augen aufgrund der geringen Entfernung stärker konvergieren, wodurch sich die Wahrnehmung mit zunehmender Entfernung rasch verschlechtert.

Nach WIERDA & AASMANN (1992) dienen etwa 25% aller Fixationen der Spurhaltung. Der Anteil steigt bei schmalen Fahrbahnen und dem Passieren von Hindernissen - je schwieriger die Aufgabe wird, umso mehr kommt das schärfere foveale Sehen zum Einsatz.

Im Zusammenhang mit Nebenaufgaben wie der Bedienung des Radios oder Navigationssystems wurde mehrfach untersucht, wie lange der Blick von der Straße abgewandt werden kann, ohne die Spurhaltung zu gefährden. REICHART (2000) gibt dafür eine kritische Schwelle von 25 cm Annäherung an den rechten Fahrbahnrand an. SCHWEIGERT (2003) berechnet die maximale Blickabwendungszeit, die sich ein Fahrer bei verschiedenen Fahrstreifenbreiten erlauben kann, ohne diese Schwelle zu überschreiten. Eine Geschwindigkeitsabhängigkeit besteht demnach nicht, die Werte für einbahnige Straßen liegen zwischen 2,5 s (Kreisstraßen, 2,75 m Fahrstreifenbreite) und 4 s (Bundesstraßen, 3,50 m Fahrstreifenbreite). Die Werte decken sich mit empirischen Untersuchungen von GODTHELP (1988).

In einer einfachen Fahrsimulation (beschränkt auf die Darstellung der Fahrbahnmarkierungen) geben LAND & HORWOOD (1995) nur Sichtbänder einer vertikalen Ausdehnung von 1° in verschiedenen Höhen frei, was verschiedenen Entfernungen des sichtbaren Straßenschnittes entspricht. Bei mittleren und hohen Geschwindigkeiten zeigt sich, dass sowohl der Nah- als auch der Fernbereich der Straße für die Spurhaltung von Bedeutung sind (bei geringen Geschwindigkeiten genügt der Nahbereich). Bei einer Geschwindigkeit von 60 km/h wird das spurtreueste Verhalten beobachtet, wenn das Sichtband 4° unterhalb des Horizonts liegt, was einer Entfernung des sichtbaren Straßenabschnittes von ca. 16 m entspricht. CHATZIASTROS U.A. (1999) finden in einem gleichartigen Versuch ebenfalls bei einer Sicht von 7 bis 21 m vor dem Fahrzeug die besten Ergebnisse zur Spurhaltung, zusätzlich dargebotene Sicht auf größere Entfernung hatte keinen verbessernden Einfluss. Sie kommen zu dem Schluss, dass die periphere Wahrnehmung des Nahbereichs für die Spurhaltung entscheidend ist.

Bei Kurvenfahrten beginnen Fahrer etwa 2 bis 3 s vor Kurvenbeginn in Richtung der Kurve zu blicken (SHINAR U.A., 1977). Dabei kommt es zu häufigen Blickwechseln zwischen Nah- und Fernbereich. In Rechtskurven sind Blicke um $3,6^\circ$ nach rechts, in Linkskurven um $0,3^\circ$ nach links am häufigsten. Untersuchungen von FRIEDINGER (1982) und BERGER (1996) kommen zu vergleichbaren Ergebnissen und ordnen diese Blicke der jeweiligen inneren Fahrstreifenbegrenzung zu. In Rechtskurven wird bevorzugt der rechte Fahrbahnrand fixiert, in Linkskurven entweder die Mittellinie oder der linke Fahrbahnrand.

Verschiedene Theorien gibt es über den genauen Punkt der Fixierung beim Durchfahren einer Kurve. LAND & LEE (1994) untersuchten das Blickverhalten von drei Fahrern auf einer kurvenreichen Strecke und identifizieren den Tangentenpunkt, d.h. den aus Fahrersicht kurveninnersten Punkt der jeweiligen Fahrstreifenbegrenzungslinie, als bevorzugtes Blickziel. Sie vermuten, dass der Winkel zwischen Fahrzeugachse und Tangentenpunkt bei der Einschätzung des Kurvenradius hilfreich ist. UNDERWOOD U.A. (1999) finden in ähnlichen Versuchen eine Abhängigkeit von der Bepflanzung an der Kurveninnenseite: Ist solche vorhanden, wird der Tangentenpunkt weniger häufig und weniger exakt fixiert als in „offenen“ Kurven. Dieser Effekt wird damit erklärt, dass der Fahrer aufgrund der Sichtbeeinträchtigung durch innenseitige Bepflanzung mehr Aufmerksamkeit auf die Fahrbahn selbst richten muss, um eventuelle Hindernisse rechtzeitig zu erkennen. In eigenen Untersuchungen (LIPPOLD, KRÜGER U.A. 2009) zeigten sich indes nur schwache Zusammenhänge des Blickverhaltens mit der Bepflanzung in Kurven. In der Wahrnehmung der Kurven vom Annäherungsbereich aus wurden Unterschiede beobachtet, die aber nicht stringent über verschieden große Radien auftraten. Das Spurverhalten und die Geschwindigkeiten in Kurven mit und ohne innenseitige Bepflanzung deuteten aber darauf hin, dass die Annahmen von UNDERWOOD U.A. (1999) zutreffen: War innenseitige Bepflanzung vorhanden, wurden Kurven weniger stark geschnitten, stärker angebremsst und langsamer durchfahren. Die Sichtbehinderung durch Bäume hat in Kurven (auf Bestandsstrecken) Sichtweiten weit unterhalb der Haltesichtweite zur Folge, was die Fahrer offenbar auch registrieren. Sie reagieren darauf und bremsen ab, allerdings in unzureichendem Maße. Nicht eindeutig geklärt werden konnte aber bisher, zu welchen Anteilen Fehleinschätzungen der Geschwindigkeit und der vorhandenen Sichtweite einer-

seits und das bewusste Eingehen von Risiken andererseits bei diesem Verhalten eine Rolle spielen.

Schätzen der eigenen Geschwindigkeit

Nicht angepasste Geschwindigkeiten sind mit einem Anteil von 16% am Gesamtunfallgeschehen die häufigste Ursache von Unfällen mit Personenschaden. Noch größere Bedeutung erlangt diese Zahl vor dem Hintergrund der besonderen Schwere solcher Unfälle: Im Jahr 2006 kamen 43% der Verkehrstoten bei Unfällen ums Leben, die auf zu hohe Geschwindigkeiten der beteiligten Fahrzeuge zurückzuführen sind (DESTATIS 2007). Ähnliche Zahlen bzw. Verteilungen sind bereits seit langem und auch aus anderen Ländern bekannt und werfen die Frage auf, ob unangepasste Geschwindigkeiten absichtlich gefahren werden oder ob Fahrer ihre Geschwindigkeit falsch einschätzen und deshalb zu schnell fahren.

COHEN (1987) verweist in einer Analyse der psychologischen Literatur zu diesem Thema auf eine Reihe von Studien, in denen Versuchspersonen entweder eigene Geschwindigkeiten schätzen, vorgegebene Geschwindigkeiten fahren oder diese um einen bestimmten Faktor verändern (z.B. halbieren oder verdoppeln) mussten, ohne dabei auf Tachometerinformationen zurückgreifen zu können. Die Ergebnisse lassen vermuten, dass die menschlichen Fähigkeiten zur Geschwindigkeitsschätzung beschränkt sind. MOSER (1979, zitiert nach COHEN, 1987) begründet das mit der Entwicklungsgeschichte: Der Mensch sei von daher auf ein Tempo von maximal 30 km/h „vorprogrammiert“. COHEN (1987) selbst nimmt hingegen an, dass die Grenze weit höher liegt.

Zum Schätzen von Geschwindigkeiten werden verschiedene Wahrnehmungsmechanismen verwendet. Im realen Verkehr ist zunächst der Tachometer eine wichtige Informationsquelle. Fixationen zum Tacho führt jeder Fahrer relativ gleichförmig durch, die Häufigkeit variiert jedoch zwischen verschiedenen Personen stark (WIERDA & AASMAN 1992). Es kann aber davon ausgegangen werden, dass auf Landstraßen ungefähr alle 30 s ein Blick zum Tacho erfolgt; typische Fixationsdauern dabei betragen ca. 0,6 s (GENGENBACH 1997). SCHWEIGERT (2003) berechnet, wie oft Fahrer ihre Geschwindigkeit kontrollieren müssen, um den zulässigen Wert nicht um mehr als 20% zu überschreiten. Bei Geschwindigkeiten zwischen 80 und 100 km/h auf Außerortsstraßen muss dafür die Anzeige mindestens einmal pro Minute überprüft werden - je näher man am erlaubten Limit fährt, desto öfter.

Eine weitere Informationsquelle sind Objekte im Fahrraum und deren relative Positionsänderungen. Aus der (ungefähr bekannten) Distanz stationärer Objekte sowie der Beobachtung der Winkelgeschwindigkeiten lässt sich die eigene Geschwindigkeit schätzen (so genannte Bewegungsparallaxe). Die Winkelgeschwindigkeit ist umso größer und die Schätzung damit umso besser möglich, je weiter Objekte von der Geradeausrichtung entfernt sind. WIERDA & AASMAN (1992) nehmen an, dass für die Geschwindigkeitsschätzung nur Objekte verwendet werden können, die mindestens 5° Exzentrizität aufweisen. Näher in der eigenen Bewegungsrichtung befindliche Objekte können aufgrund der retinalen Expansion (die Ausdehnung des Objektbildes auf der Netzhaut wächst bei Annäherung) genutzt werden. Dieser Effekt ist besonders für die Einschätzung der Relativgeschwindigkeiten anderer Fahrzeuge von Bedeutung.

Auch regelmäßig entlang der Fahrtrichtung vorkommende oder alternierende Elemente (Fahrbahnmarkierungen, Leitpfosten, Alleenbäume) tragen zur Geschwindigkeitsschätzung bei. Dieser Effekt wird zur Verdeutlichung von Geschwindigkeitsbeschränkungen vor Gefahrenstellen genutzt, z.B. durch das Anbringen von Quermarkierungen oder Bremsschwellen in kürzer werdenden Abständen.

Es ist bislang nicht klar, ob während des Fahrens nur jeweils einer der beschriebenen Mechanismen zur Geschwindigkeitsschätzung verwendet wird oder ob mehrere parallel wirken können. Ist Letzteres der Fall, so müssen gegebenenfalls unterschiedliche Ergebnisse der einzelnen Wahrnehmungsarten zu einer abschließenden Bewertung zusammengeführt werden. Anderenfalls muss, wie WIERDA & AASMAN (1992) vermuten, der für die jeweilige Situation geeignetste Mechanismus ausgewählt werden, der dann dominiert.

Abgesehen vom Ablesen des Tachometers beruht die Schätzung der Geschwindigkeit also auf relativen Vergleichen. Da es keine unveränderlichen Anhaltspunkte gibt, ist die Genauigkeit der Schätzung empfindlich für Adaptionseffekte. Die Tatsache, dass Fahrer ihre Geschwindigkeit in Abhängigkeit unmittelbar vorher gefahrener Geschwindigkeiten über- oder unterschätzen, ist seit langem bekannt (z.B. SCHMIDT & TIFFIN 1969). So wird nach längeren Phasen des Fahrens mit hoher Geschwindigkeit auf der Autobahn das anschließende Befahren einer Innerortsstraße mit 50 km/h fast wie Stehen empfunden. Zu dieser Täuschung tragen neben visuellen Eindrücken auch die akustische und kinästhetische Sinneswahrnehmung bei.

Erkennen von Hindernissen

Um Kollisionen zu vermeiden, muss der Fahrer den vorausliegenden Fahrraum kontinuierlich überwachen. Das bedeutet, er muss die eigene Bewegung und die Bewegungen anderer Verkehrsteilnehmer extrapolieren und entscheiden, ob und wann eine Reaktion zur Vermeidung einer Kollision erforderlich wird. Die dafür erforderliche Sehschärfe kann nur durch foveales Sehen erreicht werden (COHEN, 1976). Der Fahrer tastet dafür den vorausliegenden, für ihn einsehbaren Fahrraum kontinuierlich ab („exploratives Scanning“). Da dies permanent durchgeführt wird, gibt es keine Blickbewegungsparameter, die das Suchen nach bzw. das Erkennen von Hindernissen speziell charakterisieren. Im Mittelpunkt von Untersuchungen im Zusammenhang mit Hindernissen steht stattdessen die Zeit, die Fahrer zum Realisieren eines Hindernisses und zum Abschätzen der erforderlichen Reaktion benötigen.

Auf der knotenpunktfreien Strecke können unbewegte Objekte auf der Fahrbahn sowie vorausfahrende oder entgegenkommende Fahrzeuge Hindernisse darstellen, auf die der Fahrer reagieren muss. Die entscheidende Information ist dabei nicht der Abstand zu einem Objekt, sondern die Zeit bis zum Zusammenstoß (*time to collision*, TTC). Nach FÄRBER (1986) schätzt der Fahrer diesen Zeitraum aus dem Fluss des visuellen Feldes. Für das Erkennen eines vorausfahrenden Fahrzeugs, das Abschätzen der TTC und die Kalkulation der notwendigen Bremsstärke benötigt der Fahrer etwa 2 s (FÄRBER, 1986). Die in Versuchen gemessenen Reaktionszeiten an festen Hindernissen sind meist geringer (vgl. Kap. 2.3.3), mit Blick auf die Unterschiede in der Konzentration zwischen Versuch und Realverhalten wird aber meist ein sicherheitsorientierter Wert von 2,0 s für die Modellierung von Anhaltevorgängen verwendet.

2.2.4 Blickverhalten im Zusammenhang mit Nebenaufgaben

Im Zuge der zunehmenden Verbreitung von Fahrerinformationssystemen (z.B. Bordcomputer, Navigationssysteme, Infotainmentsysteme) rückt verstärkt die Frage in den Vordergrund, wie lange Fahrer den Blick von der Straße abwenden können, wollen oder dürfen, ohne dass negative Auswirkungen auf das Fahrverhalten auftreten. Die Aufteilung der visuellen Aufmerksamkeit zwischen der Fahraufgabe und der Bedienung von Zusatzsystemen hat Verkehrsblindzeiten zur Folge, die sich negativ auf die Fahrzeugsteuerung und die Beobachtung des Fahrraumes auswirken können. In Phasen der Unterforderung durch die Fahraufgabe muss dies nicht zwangsläufig der Fall sein - hat der Fahrer die vorausliegende Strecke ausreichend weit eingesehen und erfordert eine gerade Linienführung kaum Querregulation, so kann er freie Kapazitäten weitgehend gefahrlos für andere Tätigkeiten verwenden. Nach der Theorie der Risikohomöostase (GELAU, 1997, in SCHWEIGERT, 2003) sind Fahrer sogar bestrebt, das subjektive Risiko auf einem konstanten Niveau zu halten und suchen bei ereignisarmer Fahrt nach Ablenkung.

Eine einheitliche Grenze für gefährliche Blickabwendungszeiten („*eyes off-road time*“) gibt es nicht. In verschiedensten Verkehrssituationen sind sehr unterschiedliche Anforderungen zu bewältigen, die einen Einfluss auf die maximal mögliche Abwendungsdauer ausüben. Für die Erarbeitung von verkehrssicheren Bedienungsdesigns von Fahrerinformationssystemen ist ein solcher allgemeingültiger Grenzwert dennoch sehr interessant. Es wird deshalb häufig versucht, Grenzwerte für die Maße TTC (für den Fall des Fahrens im gebundenen Verkehr)

und TLC (*time to line crossing*, das Verlassen der eigenen Fahrspur) zu finden, die als unkritisch gelten können und von Fahrern freiwillig akzeptiert werden. SCHWEIGERT (2003) berechnet auf der Grundlage menschlicher Wahrnehmungsschwellen maximale Abwendungsdauern, die nur von der Fahrzeug- und Fahrstreifenbreite abhängig sind. Die Werte liegen bei 2,5 s (Fahrstreifenbreite 2,75 m) bis 4,5 s (3,75 m). In der empirischen Untersuchung in unterschiedlich komplexen Fahrumgebungen (Landstraße, Ortsannäherung, Autobahn) werden jedoch wesentlich geringere Zeiten gemessen; Abwendungsdauern größer als 1,6 s treten so gut wie nicht auf.

GODTHELP (1988) stellt in Fahrversuchen mit 19 Probanden eine Abhängigkeit der freiwillig akzeptierten Blickabwendungszeiten von der Geschwindigkeit fest. Für Geschwindigkeiten zwischen 20 km/h und 80 km/h werden ebenfalls 2 - 4,5 s angegeben. Ähnliche Werte finden sich auch bei ZWAHLEN U.A. (1988). Der empirisch festgestellte Zusammenhang mit der Geschwindigkeit, der im Widerspruch zum theoretischen Ansatz steht, wird mit dem höheren Ausmaß des potenziellen Schadens begründet. NOY (1999, zitiert nach SCHWEIGERT 2003) fasst diese Untersuchungen zusammen und empfiehlt als Bewertungskriterium für Fahrerinformationssysteme die „Zwei-Sekunden-Regel“, nach der solche Systeme dann als ungefährlich gelten können, wenn das 85. Perzentil der Abwendungsdauern von der Straße unterhalb von 2 s liegt.

Nach GENGENBACH (1997) beeinflussen visuelle Nebenaufgaben auch das auf die Straße gerichtete Blickverhalten. Kurz vor der Verlagerung des Blickes zur Nebenaufgabe wurde eine Erhöhung der Scanning-Rate (Anzahl von Fixationen pro Sekunde) festgestellt, die als vorbereitendes Einprägen des Fahrraumes interpretiert werden kann. Nach der Ablenkung zeigte sich ein ausgeprägtes Maximum, da die Fahrer bestrebt waren, das alte Informationsniveau so schnell wie möglich wieder herzustellen. Auch SCHWEIGERT (2003) beschreibt eine Abnahme der Fixationsdauern durch Nebenaufgaben, im Schnitt um 26%.

Für die Anwendung von Nebenaufgaben zur Untersuchung der visuellen Beanspruchung von Fahrern ist die Gültigkeit des so genannten Sekundäraufgabenparadigmas Bedingung. Dabei wird angenommen, dass bei der parallelen Bearbeitung zweier Aufgaben die Leistung einer Aufgabe konstant gehalten wird und somit eine gleichbleibende Menge der verfügbaren Ressourcen verbraucht. Die Leistung bei der zweiten Aufgabe ist von den verbleibenden Ressourcen abhängig und kann somit als Maß für die Restkapazität gelten. Dies ist der Fall, wenn beide Aufgaben ähnlich gelagert sind, d.h. auf dieselben Verarbeitungsressourcen zurückgreifen müssen (für eine Diskussion des Sekundäraufgabenparadigmas siehe z.B. THEOFANOU, 2002). Auf den Fahrer und seine Wahrnehmung der Straße übertragen bedeutet das, dass er Nebenaufgaben nur dann ausführen wird, wenn er sich ausreichend über den weiteren Verlauf und die Verkehrssituation informiert fühlt.

Auch BERGER (1996) stellte fest, dass Versuchspersonen bei schlechten Sichtverhältnissen eine geringere Leistungsfähigkeit bei Nebenaufgaben zeigten, wenn sie gleichzeitig aufgefordert waren, hohe Geschwindigkeiten beizubehalten. Er geht davon aus, dass erfahrene Fahrer im realen Verkehrsgeschehen solche Überbeanspruchungen bemerken und darauf mit einer Reduzierung der Geschwindigkeit reagieren, so dass keine Gefahrensituationen entstehen. Anders verhält es sich mit Fahranfängern oder eingeschränkt aufnahmefähigen Verkehrsteilnehmern (z.B. durch Alkoholkonsum) sowie Fahrern, die sich durch riskantes Verhalten selbst in Situationen bringen, deren Bewältigung Fähigkeiten weit oberhalb der menschlichen Leistungsfähigkeit erfordern würde. BERGER (1996) weist außerdem anhand von Literaturauswertungen nach, dass sehr hohe Beanspruchung verstärkt zu objektiv falschen Bewertungen, zum so genannten menschlichen Fehlverhalten, führt.

In neueren Arbeiten wurde begonnen, nicht mehr die Sekundäraufgabenleistung als Maß für freie Aufmerksamkeitsressourcen zu verwenden, sondern den Blickaufwand zu untersuchen, den der Fahrer der Sekundäraufgabe widmet. Dabei konnte gezeigt werden, dass sowohl die Anzahl der Blickzuwendungen pro Zeiteinheit (PIECHULLA, MAYSER, GEHRKE & KÖNIG, 2003), als auch der für die Sekundäraufgabe verwendete relative Zeitanteil (VICTOR U.A., 2005) sensitive Maße für die visuelle Beanspruchung durch die Aufgabenschwierigkeit der Fahraufgabe darstellen.

Beim Sekundäraufgabenparadigma (WICKENS, 1992; WICKENS & CARSWELL, 1997) wird aus der Leistung in einer Nebenaufgabe ein Maß für die verbleibende Restverarbeitungskapazität abgeleitet, die nicht von der Primäraufgabe verbraucht wird. Sekundäraufgabenmaße haben demnach den Vorteil einer hohen Sensitivität bei kurzen Beobachtungszeiträumen ab ca. 10 Sekunden, während Primäraufgabenmaße wie die Fahrgeschwindigkeit die Fahrerbeanspruchung nicht in vergleichbarem Maße widerspiegeln können (VERWEY & VELTMAN, 1996). Mit Primäraufgabenmaßen lassen sich in der Regel nur extrem hohe Beanspruchungen nachweisen (O`DONELL & EGGEMEIER, 1986).

Für die Frage nach der Orientierungssichtweite ist die visuelle Beanspruchung relevant. Fahren ist eine visuelle Mehrfachaufgabe, bei der die Aufmerksamkeit zwischen dem Beobachten der Verkehrssituation und natürlichen, so genannten eingebetteten Sekundäraufgaben wie Tachometer ablesen oder Spiegelblicken eingeteilt wird. Künstliche Nebenaufgaben haben den Vorteil, dass ihr Schwierigkeitsgrad beliebig variiert werden kann.

In der Summe dieser Erkenntnisse erscheinen insbesondere visuelle Nebenaufgaben geeignet, um die Beanspruchung von Fahrern in Abhängigkeit von bestimmten Entwurfparametern zu untersuchen. Dabei sollte eine Versuchsanordnung gewählt werden, in welcher der Fahrer seine Aufmerksamkeitskapazität kontinuierlich zwischen der Straße und einer Nebenaufgabe verteilen muss. Aus der Leistung bzw. der Zuwendungszeit zur Nebenaufgabe kann dann auf seine Beanspruchung durch die eigentliche Hauptaufgabe des Fahrens in verschiedenen Situationen geschlossen werden. Grenzwerte, die auf eine potenziell gefährliche Überforderung hindeuten, werden erreicht, wenn keine Zuwendung zur Nebenaufgabe mehr erfolgt. Um willkürliche und unwillkürliche Adaptionseffekte zu vermeiden, sollte nicht langsamer als ohne zusätzliche Aufgaben gefahren werden, was durch entsprechende Anweisungen und Überwachung durch den Versuchsleiter zu gewährleisten ist.

2.3 Sichtweiten im Straßenentwurf

2.3.1 Psycho-physiologisch begründete Sichtweiten

Aufgrund der überragenden Bedeutung der visuellen Wahrnehmung für das Fahren waren Sichtweiten auf Straßen bereits häufig Thema von Untersuchungen. Ein allgemeingültiges Modell, welches der Gesamtheit aller möglichen Situationen und Anforderungen gerecht werden kann, existiert jedoch nicht und ist auch nicht realistisch. In der Literatur finden sich verschiedene Ansätze, die sich aus unterschiedlichen Perspektiven und Anforderungen ergeben. Eine Gesamtübersicht der möglichen Einflussfaktoren auf die dem Fahrer zur Verfügung stehende Sichtweite gibt DURTH (1974):

- Einflüsse vom Menschen:
 - Auflösungsvermögen des Auges
 - datenbegrenzte und ressourcenbegrenzte Informationsverarbeitungsprozesse
 - Fahrerfahrung
 - Alter
 - Beanspruchung
 - Nachtsehleistung
 - Blendung
 - Sehhilfen
 - Einfluss von Medikamenten und Drogen
- Einflüsse vom Fahrzeug:
 - Scheibenverschmutzung
 - Bauart (Sicht nach hinten)
- Einflüsse aus Witterungsbedingungen:
 - Niederschläge
 - Flimmern bei starker Sonne

- Schattenwurf
- Einflüsse aus der Trassierung:
 - Linienführung im Lageplan
 - Linienführung im Höhenplan
 - räumliche Linienführung

Zur Berücksichtigung in Sichtweitenmodellen für den Straßenentwurf sind aus dieser Gesamtmenge nur Faktoren geeignet, die für das Fahrverhalten und die Verkehrssicherheit relevant sind und bei denen eine Beeinflussung durch Entwurfsmaßnahmen möglich ist. So sind beispielsweise die Verkehrssicherheit des Fahrzeugs oder die Fahrtauglichkeit des Fahrers (generelle Sehtüchtigkeit, Einfluss von Medikamenten oder Drogen) Gegenstand des Verkehrsrechts und können für den Bemessungsfall als gegeben angesehen werden. Auch witterungsbedingte Sichtbeschränkungen stellen seltene Ausnahmefälle dar, die nicht Grundlage für ein allgemeingültiges Modell sein können.

Psycho-physiologische Sichtweitenmodelle stellen den Fahrer als Handelnden in den Mittelpunkt ihrer Betrachtungen und beschreiben die räumlich vorausschauende Wahrnehmung unter Berücksichtigung unterschiedlicher Randbedingungen (DURTH / LIPPOLD 1995). Zur Berücksichtigung des tatsächlichen Verhaltens der Kraftfahrer führte HIERSCHE im Jahr 1968 den Begriff der „**psychologisch vorhandenen Sichtweite**“ ein. Unter ihr ist die Tiefe des Verkehrsraumes zu verstehen, von dem der Fahrer den Eindruck hat, ihn für die Fahraufgabe ausreichend und einwandfrei erfasst zu haben.

Danach muss der Verkehrsraum so gestaltet sein, dass die aufnehmbaren Informationen das vom Fahrer gewählte Geschwindigkeitsniveau rechtfertigen. Das bedeutet, dass er genügend Zeit haben muss, den vor ihm liegenden Fahrraum wahrzunehmen, zu erfassen und die dafür angepasste Fahrweise zu wählen, wobei diese Vorgänge möglichst ausschließlich ohne Überschreiten der Bewusstseinschwelle erfolgen sollen. Für eine Quantifizierung sieht HIERSCHE noch keine Grundlage. Er weist aber darauf hin, dass Fahrer ihre Fahrweise nicht auf plötzlich auftauchende Hindernisse abstellen. Hinsichtlich ihrer Größenordnung tendiert die psychologische Sichtweite demnach über die Haltesichtweite hinaus.

AULHORN (1971) definiert die **wahrnehmungsphysiologische Sichtweite** als Abstand, aus dem ein Objekt mit gegebener Charakteristik (Kontrast, Form, Größe) vom Fahrer mit gegebener Sehschärfe und bei gegebenen Witterungs- und Lichtverhältnissen wahrgenommen werden kann. Bei optimalen Bedingungen erreicht sie somit Maximalwerte, welche nur durch die Geometrie der Straße (im Extremfall durch das Auflösungsvermögen des menschlichen Auges) begrenzt werden. Die wahrnehmungsphysiologische Sichtweite kommt indirekt in der Verkehrsplanung bei der Gestaltung von Verkehrsschildern zum Einsatz. Eine direkte Verwendung im Straßenentwurf ist dagegen nicht möglich, da konkrete Objekteigenschaften definiert werden müssen.

LORENZ (1974) fordert eine **vorauslaufende Erfassungssichtweite**, mit der der Fahrer in der Lage sein soll, sowohl Straßenverlauf als auch Verkehrsaufkommen so zu beurteilen, dass unvermittelte Bremsmanöver verhindert werden. Zudem soll eine vorausschauende Beurteilung des Fahrtraumes möglich sein, da sich die Fahrgeschwindigkeit nach dem sichtbaren Straßenverlauf richtet. Dafür setzt LORENZ die Strecke an, die der Fahrer in den nächsten 10 Sekunden durchfährt. Diese Größenordnung basiert auf eigenen Beobachtungen und konnte damals nicht durch Messungen belegt werden. LORENZ vermutet aber, dass „die Erfassungszeit kein Festwert ist, sondern verschieden je nach der Fahrgeschwindigkeit und der persönlichen Veranlagung des Fahrers und seines gegenwärtigen psychischen Zustandes“.

Nach DILLING (1973) beginnt die Verzögerung etwa 2,5 bis 3 Sekunden vor einer Kurve. Dies entspricht bei einer angenommenen Geschwindigkeit von 90 km/h einer Wegstrecke von 62,5 - 75 m. Für die Ermittlung seiner **Erkennbarkeitssichtweite** bezieht er den Straßenverkehr mit ein. Er charakterisiert den Streckenbereich, in dem die Fahrbahn uneingeschränkt überschaubar ist und geht dabei vom größten Abstand zwischen zwei Fahrzeugen aus, bei dem noch Blickkontakt zum vorausfahrenden Fahrzeug besteht.

LEUTNER (1974) fasst die vorangegangenen Erkenntnisse zusammen und unterscheidet in drei Zonen, die durch wachsende Anspannung und Aufmerksamkeit des Fahrers bestimmt sind:

- Zone 1: Fernorientierung und Information (600 m ... 250 m)
- Zone 2: Bereitschaft und Entscheidung (250 m ... 75 m)
- Zone 3: Nahorientierung und Handlung (< 75 m).

Zone 1 wird bestimmt durch die natürlichen Grenzen, die dem Auflösungsvermögen des menschlichen Auges gesetzt sind. So können bewegte Hindernisse in einem Abstand von 600 – 800 m gerade noch erkannt werden; für unbewegte Objekte liegt der Wert bei 400 – 500 m. Für die Einschätzung des Streckenverlaufs ist diese Zone ohne Bedeutung. LEUTNER'S Darstellungen zeigen, dass sich enge und großzügigere Kurven aus der Fahrerperspektive in dieser Entfernung kaum unterscheiden, so dass eine vorausschauende Anpassung der Geschwindigkeit noch nicht möglich ist.

Der Angabe von Zone 2 liegen die Annahmen von LORENZ (1974) zu Grunde. Bei einer Geschwindigkeit von 90 km/h legt der Fahrer in zehn Sekunden 250 m zurück. Vom gedanklichen Ansatz her entspricht diese Entfernung der Sichtweite, die für vorausschauendes Fahren erforderlich ist. Allerdings ist eine Absicherung durch Messwerte erforderlich, auch um im Laufe der Zeit veränderten Geschwindigkeiten und Verhaltensweisen gerecht zu werden.

Nach unten wird diese Zone durch die Erkennbarkeitssichtweite nach DILLING (1973) begrenzt. Da der Wert von 75 m deutlich unterhalb der heute geforderten Haltesichtweiten auf Außerortsstraßen liegt, ist er für eine Übernahme in das Entwurfsregelwerk im Sinne benötigter Sichtweiten nicht geeignet. Bedeutsam erscheint dennoch die zugrunde liegende Reaktionszeit von 2,5 - 3 Sekunden, die eine im normalen Fahrablauf auftretende Anpassungszeit beschreibt. Sie kann als Hinweis darauf verstanden werden, was Fahrer ohne besondere Anspannung zu leisten imstande sind. Die Bedeutung der Zone 3 liegt im Bereich von Reaktionen im fließenden Verkehr und bezieht sich nicht auf die Erkennbarkeit der vorausliegenden Strecke.

BERGER (1996) vertritt die Auffassung, dass großzügig dimensionierte Straßenanlagen nur einen scheinbaren Sicherheitsgewinn bieten. Die von Hindernissen in Entfernungen größer als 150 m ausgehende Gefahr könne vom Fahrer auf Grund des begrenzten Auflösungsvermögens des Auges nicht rechtzeitig erkannt werden. Demzufolge sei es nicht möglich, das Fahrzeug aus mehr als 130 km/h (er bezieht sich auf Autobahnen) rechtzeitig zum Stillstand zu bringen, unabhängig von der tatsächlich vorhandenen Sichtweite. Diese Aussage bleibt jedoch unbegründet und wird nicht durch Untersuchungen belegt. Sie erscheint auch deshalb fragwürdig, weil in zahlreichen Arbeiten die Wahrnehmungsgrenze für unbewegte Objekte in einer Entfernung von 400 - 500 m angegeben wird (z.B. LEUTNER 1974). Auch wenn man davon ausgeht, dass aus Entfernungen dieser Größenordnung noch nicht eindeutig entschieden werden kann, ob ein Objekt (i.d.R. handelt es sich um ein Fahrzeug) steht oder langsam bewegt wird, so wird es zumindest als potenzielles Hindernis erkannt und in den Fokus der Aufmerksamkeit gerückt. Daraus folgend sind deutlich geringere Reaktions- und Entscheidungszeiten anzunehmen, im Falle zusätzlicher Warnhinweise (Warnblinkanlage, ungewöhnliche Position oder Deformationen) auch Bremsbereitschaft und Verzögerungen. Insofern kann aus diesen großen Sichtweiten durchaus ein realer Sicherheitsgewinn resultieren.

Es zeigt sich, dass trotz zahlreicher theoretischer Ansätze bisher keine zuverlässige Quantifizierung für den Orientierungsbedarf von Fahrern gefunden werden konnte. Insgesamt erscheint die zusammenfassende Charakterisierung nach LEUTNER (1974) plausibel und nützlich, ist jedoch den Bedingungen des heutigen Verkehrsgeschehens und den Anforderungen an Entwurfsrichtlinien anzupassen. Während Zone 3 in etwa den Bereich der Haltesichtweite kennzeichnet, entspricht die Charakterisierung der Bereitschafts- und Entscheidungszone dem Erwartungsraum der Orientierungssichtweite. Da die Zahlenwerte auf einer angenommenen Geschwindigkeit von 90 km/h basieren, ist eher eine Ausdehnung nach oben in den

Bereich der LORENZ'schen Erfassungssichtweiten zu erwarten, wobei die dort angesetzte Erfassungszeit von 10 s ebenfalls einer Absicherung bedarf.

Als Grundlage für die Bemessung von Entwurfselementen werden psycho-physiologische Sichtweiten deshalb bisher durch geschwindigkeitsabhängige, geometrische Hilfsgrößen ersetzt.

2.3.2 Geometrische Sichtweiten

Für geometrische Sichtweitenmodelle ist es zunächst notwendig, Situationen zu definieren, in denen Fahrer zu einer Reaktion gezwungen sind und dafür ausreichende Wegstrecken, also bestimmte Sichtweiten, benötigen. Dies können häufig auftretende oder besonders sicherheitskritische Situationen sein, die im Hinblick auf ihrer Eingangsparameter standardisiert werden können. Im aktuellen Entwurfsregelwerk RAS-L (FGSV 1995) sind das die Haltesichtweite und die Überholsichtweite. (Die ebenfalls in den Entwurfsrichtlinien festgelegten Anhalte- und Anfahrtsichtweiten an Knotenpunkten sind für die freie Strecke und damit für diese Untersuchung nicht von Belang).

Die Festlegung der für die zu bewältigende Situation erforderlichen Sichtweite erfolgt auf der Grundlage von Messungen und fahrdynamischen Gesetzen in einer vereinfachten geometrisch-anschaulichen Form. Diese Modelle entsprechen deshalb nur annähernd den tatsächlichen Verhältnissen, da sie notwendige Vereinfachungen enthalten (standardisierte Reaktions- und Auswirkzeit, standardisierter Zustand und Ausrüstung des Fahrzeugs u.ä.), optische und wahrnehmungspsychologische Gesetzmäßigkeiten aber nicht berücksichtigen (WEISE, DURTH u.a. 1997). HIERSCHE (1968) weist deshalb darauf hin, dass eine zuverlässige Beurteilung der tatsächlichen Sichtqualität so nicht möglich ist. Geometrische Sichtweiten sollten als „technische Hilfsgröße“ für die Bemessung von Straßen verstanden werden.

Haltesichtweite

In den aktuellen RAS-L (FGSV 1995) ist die Haltesichtweite eine für die Sicherheit der Straßenverkehrsanlage maßgebende Entwurfsgröße. Sie ist definiert als die Strecke, die ein mit der Geschwindigkeit V_{85} fahrender Fahrer benötigt, um sein Fahrzeug vor einem unerwartet auftretenden Hindernis auf der Fahrbahn zum Halten zu bringen. Damit entspricht sie dem Anhalteweg eines frei fahrenden Pkw und setzt sich aus dem Weg während der Reaktions- und Auswirkdauer sowie dem reinen Bremsweg zusammen (Bild 2-2). Die Haltesichtweite kennzeichnet so das Minimum an Sichtqualität, das dem Kraftfahrer stets zur Verfügung stehen soll.

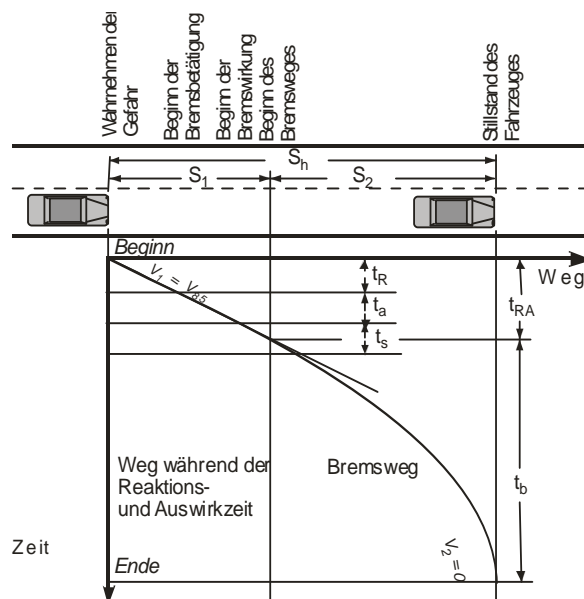


Bild 2-2: Modell zur Bestimmung der erforderlichen Haltesichtweite, WEISE/ DURTH u.a. (1997)

Die Bemessung der Haltesichtweite erfolgt nach den folgenden Gleichungen:

$$S_h = S_1 + S_2 \quad (\text{Gl. 2.1})$$

$$S_1 = \frac{V_0}{3,6} \cdot t_R \quad (\text{Gl. 2.2})$$

$$S_2 = \frac{1}{3,6^2 \cdot g} \cdot \int_{V_1}^{V_2} \frac{V}{f_T(V) + \frac{s}{100} + \frac{W_L}{G}} dV \quad (\text{Gl. 2.3})$$

S_h [m]	Haltesichtweite
S_1 [m]	Weg während der Reaktions- und Auswirkdauer
S_2 [m]	reiner Bremsweg
V [km/h]	Geschwindigkeit
V_0 [km/h]	Geschwindigkeit bei Beginn der Bremsung
t_R [s]	Reaktions- und Auswirkdauer $t_R = 2 \text{ s}$
g [m/s ²]	Erdbeschleunigung
f_T [-]	tangentialer Kraftschlussbeiwert $f_T = 0,241 \cdot \left(\frac{V}{100}\right)^2 - 0,721 \cdot \left(\frac{V}{100}\right) + 0,708$
s [%]	Längsneigung (positiv: Steigung, negativ: Gefälle)
W_L [N]	Luftwiderstand eines Pkw
G [N]	Gewicht eines Pkw $\frac{W_L}{G} = 0,327 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{V}{3,6}\right)^2$

Das Bemessungsmodell beruht auf folgenden Annahmen:

- **Das Fahrzeug wird physikalisch als Massepunkt angesehen; innere Widerstände werden nicht berücksichtigt.** Diese Festlegung erfolgt aus praktischen Gründen. Nach DURTH (1974) macht „die Vielzahl der wirklichen Verknüpfungen zwischen den Teilen des Fahrzeuges untereinander [...] Vereinfachungen und Vernachlässigungen unumgänglich“.
- **Steigungs- und Luftwiderstand werden berücksichtigt, der Rollwiderstand hingegen vernachlässigt.** Aktuelle Luftwiderstandsbeiwerte und Fahrzeugmassen wurden eingearbeitet (DURTH / LIPPOLD 1993). Der Einfluss des Rollwiderstandes ist gering; seine Vernachlässigung dient als Sicherheitsreserve.
- **Die angesetzte Reaktionszeit beträgt 2 Sekunden.** Dieser Wert findet sich in den meisten internationalen Richtlinien (vgl. BERNHARD 1999). Er liegt deutlich über der in der Literatur angegebenen „Mindestreaktionszeit“ von 1,0 s und somit auf der sicheren Seite. Damit wird auch dem Umstand Rechnung getragen, dass Kraftfahrer nicht permanent mit dem plötzlichen Auftauchen eines Hindernisses rechnen.
- **Während der Reaktions- und Auswirkdauer bleibt die Geschwindigkeit gleich.** BERNHARD (1999) bemerkt dazu, dass mit der Wegnahme des Fußes vom Gaspedal durch das Einsetzen der inneren und äußeren Fahrwiderstände eine, wenn auch ver-

gleichsweise geringe, Verzögerung eintritt. Der tatsächlich während dieser Zeit zurückgelegte Weg sei damit kürzer als der berechnete. Gleiches gelte für den darauf folgenden Bremsweg, da der Bremsvorgang bereits bei einer niedrigeren Geschwindigkeit eingeleitet werde. Der errechnete Wert liegt somit auf der sicheren Seite.

- **Der Bremsvorgang erfolgt auf nasser Fahrbahn.** Auch diese Annahme basiert auf der Sicherheitsforderung. Eine Berücksichtigung noch ungünstigerer Bedingungen wie z.B. Glatteis ist auf Grund deren seltenen Auftretens aus wirtschaftlicher Sicht nicht sinnvoll. In diesem Falle greift die Forderung der StVO, dass der Fahrer sein Fahrverhalten den äußeren Bedingungen anzupassen hat.
- **Zur Bremswegberechnung wird der maximale tangentielle Kraftschlussbeiwert angesetzt, der dem 95. Perzentil der auf deutschen Straßen gemessenen Griffigkeitswerte entspricht.** Die Anwendung des maximalen tangentialen Kraftschlussbeiwertes bedeutet, dass keine radiale Komponente berücksichtigt wird. Der Bremsweg ist damit per Definition in Kurve und Gerade gleich lang. Die zugrunde liegenden Griffigkeitsmessungen stammen aus den 70er Jahren und entsprechen nicht mehr dem Stand der Technik. Aktuelle Beiwerte liegen deutlich unterhalb der im Regelwerk verwendeten (BERNHARD 1999, ROOS U.A. 2003). Die zunehmende Ausstattung des Fahrzeugkollektivs mit ABS verstärkt diesen Trend zusätzlich. Bereits seit 1991 sind Antiblockiersysteme für Busse und Lkw Zulassungsvoraussetzung; Pkw werden seit dem 1. Juli 2004 aufgrund einer Selbstverpflichtung der europäischen und japanischen Automobilhersteller serienmäßig mit ABS ausgestattet. Diese Entwicklung hat zur Forderung nach einer Anpassung des Regelwerkes im Sinne reduzierter Haltesichtweiten geführt (vgl. Kap. 2.3.3).
- **Die Augpunkthöhe des Fahrers beträgt 1,00 m.** Dieser Wert besteht seit Herausgabe der RAL-L-1 (1973) und war damals die Konsequenz eines Entwicklungstrends hin zu immer niedrigeren Fahrzeugen. Dieser Trend stagnierte seit Beginn der achtziger Jahre; neuere Messungen von DURTH / LEVIN (1991) ergaben einen Mittelwert von 1,11 m und ein 5. Perzentil von 1,03 m. Dieses ist maßgebend, um ausreichende Sicherheitsreserven gewährleisten zu können. (Je höher der Augpunkt tatsächlich liegt, um so größer wird die zur Verfügung stehende Sichtweite beim Überfahren von Kuppen). Der gemessene Wert wurde auf den nächstkleineren, durch 5 teilbaren Wert abgerundet. BERNHARD (1999) bestätigt dies als sinnvolle Festlegung. Im Lageplan liegt der Augpunkt in der Mitte des eigenen Fahrstreifens.
- **Die Zielpunkthöhe ist geschwindigkeitsabhängig gestaffelt.** Sie bewegt sich zwischen 0,00 m ($V_{85} \leq 60$ km/h) und 0,45 m ($V_{85} \geq 120$ km/h, Tab. 2-1). Der Grund ist das begrenzte Auflösungsvermögen des menschlichen Auges (vgl. Kap. 2.2.1). Hindernisse in einem bestimmten Abstand müssen eine Mindestgröße aufweisen, um noch erkannt werden zu können. Bei geringen Geschwindigkeiten sind selbst flächige Objekte, z.B. Vereisungen, noch rechtzeitig erkennbar. Auf schnell befahrenen Straßen soll zumindest bei auf der Fahrbahn liegenden Personen noch reagiert werden können.

Zielpunktposition		
Lage	V_{85} [km/h]	Höhe h_z [m]
in der Achse des eigenen Fahrstreifens	60	0,00
	70	0,05
	80	0,15
	90	0,25
	100	0,35
	110	0,40
	120	0,45
	130	0,45

Tab. 2-1: Zielpunkthöhe nach RAS-L (FGSV 1995)

Die Dimensionierung der erforderlichen Haltesichtweite orientiert sich so am tatsächlichen Geschwindigkeitsverhalten – repräsentiert durch die V_{85} – und ist durch die Wahl ihrer maßgebenden Parameter auf zusätzlichen Sicherheitsspielraum ausgelegt. In den RAS-L (FGSV 1995) wird weiter darauf hingewiesen, dass sich die Aufgabe der Haltesichtweite nicht auf die Möglichkeit des rechtzeitigen Anhaltens beschränkt, sondern dass sie ähnlich der Entwurfsgeschwindigkeit ein regelndes Element im Entwurf darstellt, dass über die direkt wirkende fahrdynamische Bemessung zur Sicherstellung der frühzeitigen Fahrerinformation hinausgeht. Diese Formulierung beinhaltet die Erkenntnis, dass ein auf rein geometrischen Parametern basierendes Sichtweitenmodell nicht ausreicht, um die tatsächlichen Sichtverhältnisse adäquat zu beschreiben. Im Rahmen der Diskussion um die Fortschreibung und Anpassung der Richtlinien an die kürzeren Bremswege moderner Fahrzeuge wird deshalb die Einbindung wahrnehmungspsychologischer Erkenntnisse in die Sichtweitenmodelle geprüft (s. Kap. 2.3.3).

Überholsichtweite

Die zweite in den RAS-L (FGSV 1995) enthaltene Sichtweite ist die Überholsichtweite. Sie entspricht dem Weg, den ein Fahrer benötigt, um ein vorausfahrendes langsames Fahrzeug unter Nutzung des Gegenfahrstreifens ohne Sicherheitsrisiko zu überholen. Sie setzt sich zusammen aus dem Weg des Überholers und dem Weg des Entgegenkommenden während der Dauer des Überholvorganges sowie einem Sicherheitsabstand zwischen diesen beiden am Ende des Überholvorganges. Ausreichende Überholsichtweiten sollen außerhalb bebauter Gebiete auf 20 bis 25 % der Gesamtstrecke zur Verfügung gestellt und nach Möglichkeit gleichmäßig verteilt werden, um starken Überholdruck zu vermeiden. Die Größenordnung für verschiedene Geschwindigkeiten ist in Tab. 2-2 dargestellt.

Auch die Überholsichtweite stellt eine sicherheitsrelevante Größe dar und wird nach RAS-L (FGSV 1995) nach dem tatsächlich erwarteten Geschwindigkeitsverhalten (V_{85}) bemessen. Der Augpunkt befindet sich am Anfang des Überholvorgangs in der Mitte des eigenen Fahrstreifens, analog zum Haltesichtweitenmodell in einer Höhe von 1,00 m.

Im Gegensatz zum Modell der Haltesichtweite ist das zu erkennende Objekt hier kein Hindernis auf der Fahrbahn, sondern ein entgegenkommendes Fahrzeug. Die Höhe des Zielpunktes wird daher für alle Geschwindigkeiten mit 1,00 m angenommen.

Geschwindigkeit V_{85} [km/h]	60	70	80	90	100
Mindestüberholsichtweite $S_{\bar{u}}$ [m]	475	500	525	575	625

Tab. 2-2: Mindestüberholsichtweiten nach RAS-L (FGSV 1995)

Das Wahrnehmungsverhalten ist dabei anders einzuschätzen als bei der Haltesichtweite, da der Fahrer während des Überholvorganges jederzeit mit auftauchendem Gegenverkehr rechnet und entsprechend aufmerksamer ist. Eine übersichtliche Einordnung der maßgebenden Sichtweitenmodelle zeigt Bild 2-3.

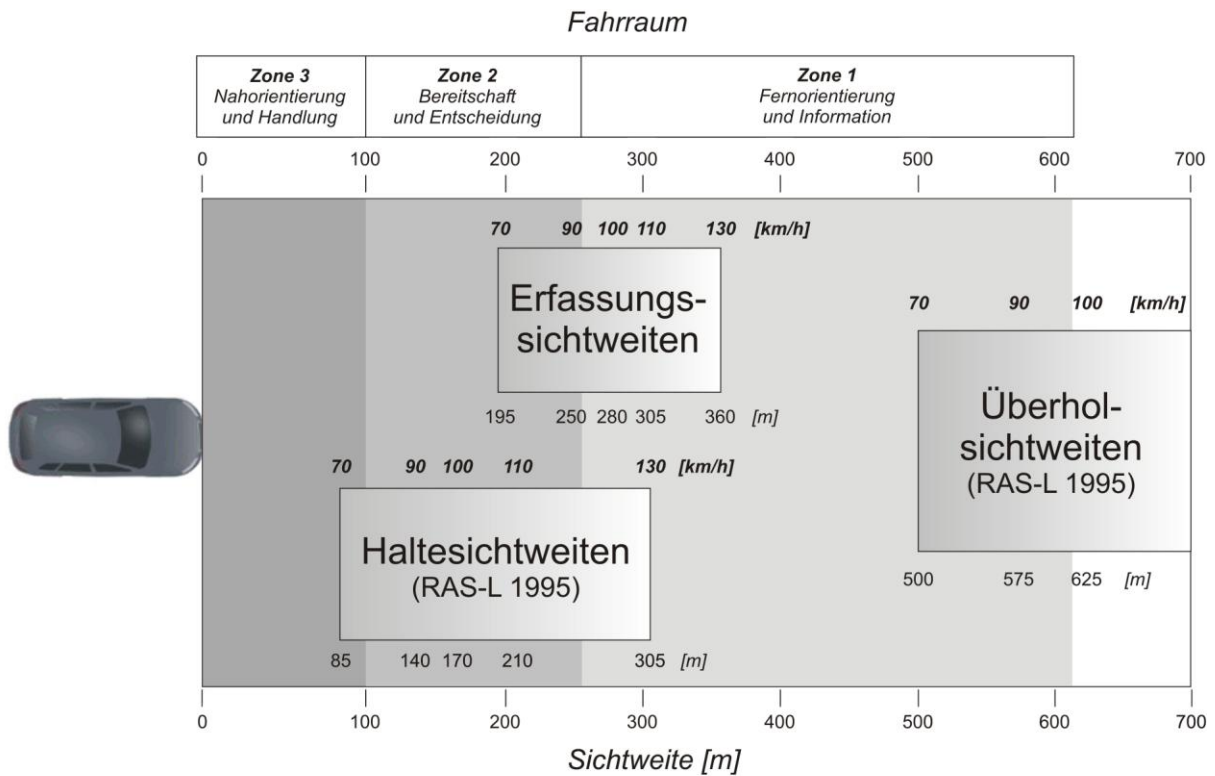


Bild 2-3: Zusammenhang Fahrraum – Geometrische Sichtweiten, aktualisiert nach WEISE / DURTH U.A. (1997)

2.3.3 Entwicklung der Sichtweitenmodelle in den Entwurfsrichtlinien

In den vergangenen Jahren ist das Geschwindigkeitsniveau auf Außerortsstraßen stetig angestiegen. Bei der Weiterentwicklung der Entwurfsrichtlinien wurde dies durch eine Aktualisierung des Diagramms zur Ermittlung der V_{85} berücksichtigt. Gleichzeitig erfolgte bei einbahnigen Straßen eine Begrenzung auf die zulässige Höchstgeschwindigkeit, da es weder wirtschaftlich sinnvoll noch rechtlich möglich ist, immer höhere Geschwindigkeiten im Entwurf zu berücksichtigen. Für Straßen mit untergeordneter Verbindungsfunktion bedeutet dies eine Anhebung der Entwurfsgeschwindigkeit und daraus folgend eine Erhöhung der Mindesttrassierungsparameter. Dadurch werden hier Möglichkeiten zur geländeangepassten und kostengünstigen Trassierung eingeschränkt.

Auf höher kategorisierten Straßen kommt es aufgrund der Deckelung durch die zulässige Höchstgeschwindigkeit nicht zu Veränderungen. Hier wird ein gegensätzlicher Trend wirksam: Verbesserungen der Bremssysteme und Reifen moderner Kraftfahrzeuge führen zu höheren Kraftschlussbeiwerten und deren besserer Ausnutzung, wodurch die Bremswege kürzer geworden sind.

In der Überlagerung höherer Geschwindigkeiten und kürzerer Bremswege überwiegt in den Auswirkungen auf die erforderliche Haltesichtweite eindeutig die Verkürzung. Bereits in der Fortschreibung der RAS-L-1 (FGSV 1984) zu den RAS-L (FGSV 1995) wurde deshalb das Modell so verändert, dass sich für eine Geschwindigkeit V_{85} von 100 km/h (bei 0% Steigung) eine von 188 m auf 170 m reduzierte Haltesichtweite ergab.

BERNHARD (1999) überprüfte im Zuge der weiteren Fortschreibung das Haltesichtweitenmodell erneut und empfiehlt eine Anpassung der Parameter an die technischen Verbesserungen. Er untersuchte die Unterschiede der Reibwerte moderner Pkw-Reifen zum PIARC-Messreifen mit Hilfe des Messanhängers „PETRA I“ und des Stuttgarter Reibungsmessers. Es wurden komplette Reibwert-Schlupf-Kurven ermittelt, so dass sowohl Gleitreibwerte bei 100% Schlupf als auch die für ABS-Bremssungen maßgebenden Maximalreibwerte vorliegen. Der Vergleich zeigte, dass die mit modernen Reifen (hier: Pirelli P 600) erzielbaren Werte

sowohl bei trockener als auch bei nasser Fahrbahn deutlich höher lagen als in den RAS-L (FGSV 1995) angenommen.

Zur Überprüfung der Reaktionszeiten und der auftretenden Bremsverzögerungen wurden Fahrversuche mit Probanden verschiedener Altersgruppen durchgeführt. Diese trafen bei verschiedenen Geschwindigkeiten auf unerwartete Hindernisse. Die gemessenen Reaktionszeiten lagen zwar deutlich unterhalb des Regelwertes von 2,0 Sekunden, mit dem Hinweis auf die vermutete höhere Konzentration der Versuchspersonen im Vergleich zu Alltagssituationen wird jedoch eine Beibehaltung dieses Wertes empfohlen.

Empfohlen wird eine Anhebung des Bemessungswertes der Bremsverzögerung von $3,37 \text{ m/s}^2$ auf $4,5 \text{ m/s}^2$. Dadurch würde sich die erforderliche Haltesichtweite ($V_{85} = 100 \text{ km/h}$, $s = 0\%$) auf 141 m reduzieren. Trotz der Erhöhung liegt dieser Wert nach dem heutigen Stand der Technik auf der sicheren Seite; Messungen auf Bundesautobahnen ergaben ihn als untere Grenze für Fahrzeuge ohne ABS, während mit ABS mittlere Verzögerungen von $7 - 9 \text{ m/s}^2$ in Abhängigkeit von der Straßengriffigkeit erreicht werden. (Legte man $7,0 \text{ m/s}^2$ an, ergäbe sich eine mögliche Verkürzung der Haltesichtweite auf 111 m unter den o.g. Bedingungen).

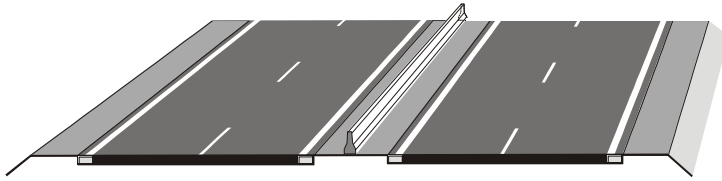
ROOS U.A. (2003) untersuchten in einem umfangreichen Programm mögliche Bremsverzögerungen von Fahrzeugen mit und ohne ABS in Abhängigkeit von der Straßengriffigkeit. Auf Grundlage der ermittelten Verzögerungswerte, des aktuellen Fahrzeugbestandes und der serienmäßigen Ausstattung von Neuwagen mit ABS wurde eine konstante Verzögerung von $3,7 \text{ m/s}^2$ zur Berechnung der Haltesichtweite vorgeschlagen. Der Wert liegt deutlich unter den Messergebnissen für ABS-Fahrzeuge (am Griffigkeits-Schwellenwert) und kann bei Geschwindigkeiten bis 100 km/h auch von Fahrzeugen ohne ABS erreicht werden. Für Neubaumaßnahmen, bis zu deren Verkehrsfreigabe noch einige Jahre vergehen werden, wird aufgrund des bis dahin weiterhin steigenden Anteils der Fahrzeuge mit ABS eine konstante Verzögerung von $4,3 \text{ m/s}^2$ vorgeschlagen.

Zusätzlich wird auf der Grundlage einer Literaturanalyse die Möglichkeit geprüft, geschwindigkeitsabhängige Reaktionszeiten einzuführen. Demnach treten bei niedrigeren Ausgangsgeschwindigkeiten längere Reaktionszeiten auf. Zur Begründung kann davon ausgegangen werden, dass bei höheren Geschwindigkeiten Konzentration und Aufmerksamkeit des Fahrers ansteigen und die Bremsbereitschaft erhöht wird. Im Ergebnis wird eine Diskussion darüber angeregt, die Reaktions- und Auswirkdauer bei Geschwindigkeiten bis 75 km/h mit $2,0 \text{ s}$, zwischen 75 und 100 km/h linear geschwindigkeitsabhängig und über 100 km/h mit konstant $1,0 \text{ s}$ anzusetzen.

Insgesamt resultiert aus diesen Ergebnissen die Forderung, die erforderlichen Haltesichtweiten besonders im Bereich hoher Geschwindigkeiten deutlich zu reduzieren. Dies geschieht vor dem Hintergrund, dass künftig nahezu das gesamte Fahrzeugkollektiv mit ABS ausgestattet sein wird. Bild 2-8 zeigt einen Vergleich ausgewählter Modelle, wobei hier die variablen Reaktionszeiten nicht berücksichtigt sind, die eine weitere Verringerung der Werte im Bereich hoher Geschwindigkeiten zur Folge hätten.

Mit der Entwicklung der neuen Richtlinien für die Anlage von Landstraßen (RAL, FGSV Entwurf 2010) werden Entwurfsklassen eingeführt, die den bisherigen Entwurfsablauf auf der Grundlage der Entwurfsgeschwindigkeit ersetzen. Damit wird das Ziel verfolgt, wieder erkennbare und unterscheidbare Straßentypen zu gestalten. Die Zusammenführung von entwurfstechnischer Gestaltung (z.B. Lageplan-, Höhenplan- und Querschnittelemente, Knotenpunktformen), Betriebsform (z.B. Kraftfahrstraße, allgemeiner Verkehr) und verkehrsrechtlicher Elemente (Geschwindigkeitsbeschränkung, Überholverbote) soll dazu führen, dass für den Fahrer „selbsterklärende“ Straßen entstehen. Das richtige Fahrverhalten soll dabei durch eine bewusste Wahl und Einheit aller Ausprägungsmerkmale vor allem intuitiv erreicht werden, wodurch eine Verbesserung der Verkehrssicherheit und des Verkehrsablaufs erwartet wird.

Jedem Straßentyp wird dafür eine - die V_{85} ersetzende - planerisch angemessene Geschwindigkeit zugeordnet. Die einzelnen Entwurfsklassen (EKL) sind wie folgt definiert:

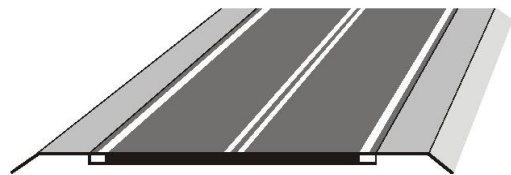


RQ 21 mit durchgehender Richtungstrennung (Ausnahmefall bei hoher Verkehrsbelastung)



RQ 15,5 mit wechselseitig angeordneten Überholfahrstreifen (Regelfall)

Bild 2-4: Querschnitte und Betriebsform der EKL 1



RQ 11,5+ mit streckenweiser Anordnung von Überholfahrstreifen

Bild 2-5: Querschnitte, zulässige Geschwindigkeit und Betriebsform der EKL 2



RQ 11: Überholen bei ausreichender Sicht zulässig, ansonsten Überholverbot

Bild 2-6: Querschnitte und Betriebsform der EKL 3



RQ 9: generelles Überholverbot

Bild 2-7: Querschnitte und Betriebsform der EKL 4

Straßen der Entwurfsklasse EKL 1 sind dreistreifige Straßen des Regelquerschnitts RQ 15,5. Durch den ständigen Wechsel ein- und zweistreifiger Abschnitte besteht auf etwa 40 % jeder Fahrtrichtung eine gesicherte Überholmöglichkeit. Die Notwendigkeit einer Überholsichtweite besteht also hier nicht. Beide Fahrtrichtungen werden durchgängig durch einen verkehrstechnischen Mittelstreifen voneinander getrennt. Die planerisch angemessene Geschwindigkeit, die dem Entwurf zugrunde gelegt wird, beträgt 110 km/h. (Im Regelfall soll dies gleichzeitig die zulässige Höchstgeschwindigkeit sein, für den Entwurfsstandard ersetzt sie damit praktisch die V_{85}). Die Linienführung soll nach Möglichkeit sehr gestreckt ausgebildet werden, um hohe Geschwindigkeiten zu ermöglichen.

Straßen der Entwurfsklasse EKL 2 sind zweistreifige Straßen des Regelquerschnitts RQ 11,5+, die abschnittsweise durch einen zusätzlichen Überholfahrstreifen dreistreifig aufgeweitet werden. Beide Fahrtrichtungen werden eine ununterbrochene Doppellinie verkehrrechtlich voneinander getrennt. In übersichtlichen zweistreifigen Abschnitten kann davon abgewichen werden, wenn nicht genügend dreistreifige Abschnitte zur Verfügung stehen, um dem Überholbedürfnis zu entsprechen (angestrebt: 20% der Streckenlänge). Diese „Über-sichtlichkeit“ ist mit dem Anspruch auf eine Überholsichtweite gleichzusetzen, ohne dass dieser hier quantifiziert wird. Die planerisch angemessene Geschwindigkeit beträgt 100 km/h. Das erfordert eine gestreckte Linienführung.

Straßen der Entwurfsklasse EKL 3 sind zweistreifige Straßen des Regelquerschnitts RQ 11. Die beiden Fahrtrichtungen werden durch eine Leitlinie getrennt. Überholen ist unter Nutzung des Gegenfahrstreifens möglich, wenn die entsprechenden geometrischen und verkehrlichen Voraussetzungen gegeben sind. Das bedeutet, dass Überholverbote angeordnet werden, wenn keine ausreichenden Sichtweiten vorliegen. Als Grenzwert für die Anordnung werden 300 m vorgegeben, bei einer vorhandenen Sichtweite von 450 m kann das Verbot wieder aufgehoben werden. Vereinzelt können Überholfahrstreifen angelegt werden. Um eine dem Gelände angepasste Linienführung zu ermöglichen sowie auf Grund der kurzen bis mittleren Fahrweiten auf Straßen dieser Netzfunktion wird eine planerisch angemessene Geschwindigkeit von 90 km/h zugrunde gelegt. Es kann davon ausgegangen werden, dass dies - wenn überhaupt - nur im Falle einer Begrenzung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit dem realen Fahrverhalten entsprechen wird. Straßen dieser Entwurfsklasse haben den größten Anteil am gesamten Außerortsstraßennetz.

Straßen der Entwurfsklasse EKL 4 sind einbahnige Straßen des Regelquerschnitts RQ 9, die nicht über eine optische Trennung der Fahrtrichtungen (Leitlinie) verfügen. Dadurch soll auf eine langsamere Fahrweise hingewirkt werden. Zwei seitliche Leitlinien kennzeichnen die Kernfahrbahn, die vom Pkw-Verkehr genutzt werden soll. Bei Begegnungsfällen muss die gesamte befestigte Fläche in Anspruch genommen werden. Dies setzt für die Kraftfahrer erhöhte Aufmerksamkeit und wechselseitige Abstimmung voraus. Auf Grund der im Allgemeinen kurzen Fahrweiten ist ein Überholen nicht vorgesehen. Die planerisch angemessene Geschwindigkeit beträgt 70 km/h, was nur bei sehr kurviger, höhenmäßig bewegter Linienführung oder entsprechenden Geschwindigkeitsbeschränkungen realistisch erscheint.

Zur Bestimmung der erforderlichen Haltesichtweiten für alle Entwurfsklassen orientieren sich die RAL (FGSV, Entwurf 2010) an den Vorschlägen von ROOS u.A. (2003) für Ausbaumaßnahmen. Angesetzt werden eine Bremsverzögerung von $3,7 \text{ m/s}^2$ sowie eine Reaktionszeit von 2,0 s. Dadurch soll bei der Anpassung der Sichtweitenmodelle an den technischen Fortschritt die Kontinuität in der Entwicklung des Straßennetzes gewährleistet werden. In Bild 2-8 wird deutlich, dass die so geforderten Sichtweiten zwar oberhalb der in Versuchen ermittelten Gefahrenbremswege liegen, andererseits aber deutlich unterhalb dessen, was dem im normalen Fahrablauf anzunehmenden Verhalten entspricht.

Das Modell einer Überholsichtweite ist im neuen RAL-Entwurf nicht mehr vorhanden. Grundlage ist die folgende Überlegung: Die Einhaltung der Überholsichtweite ist mit einer großzügigen und aufwändigen Trassierung verbunden. Diese erfordert hohe Investitionen, die nur auf Strecken mit einer entsprechend hohen Verkehrsbelastung sinnvoll erscheinen. Liegt aber eine hohe Verkehrsstärke vor, ist das Überholen trotz der baulichen Möglichkeit in den meisten Fällen durch unzureichende Zeitlücken im Gegenverkehr nicht möglich. Auf hoch-

wertigen Straßen der EKL 1 und EKL 2 wird daher zur Gewährleistung sicheren Überholens ein 2+1 Querschnitt angeordnet. Auf dem im Netz am häufigsten vorhandenen Straßentyp der EKL 3 soll Überholen unter Nutzung des Gegenfahrstreifens bei ausreichenden Sichtweiten gestattet sein. Die angegebene Größenordnung (z.T. ab 300 m) liegt allerdings in etwa im Bereich der Hälfte des heute geltenden Wertes (vgl. Tab. 2-2). Untersuchungen von HABERMEHL (1987) haben gezeigt, dass gerade Sichtweiten im Bereich zwischen der halben und vollen Überholsichtweite Gefahren in sich bergen, da sie den Fahrer zu falschen Einschätzungen und in der Folge zu riskanten Überholvorgängen verleiten können.

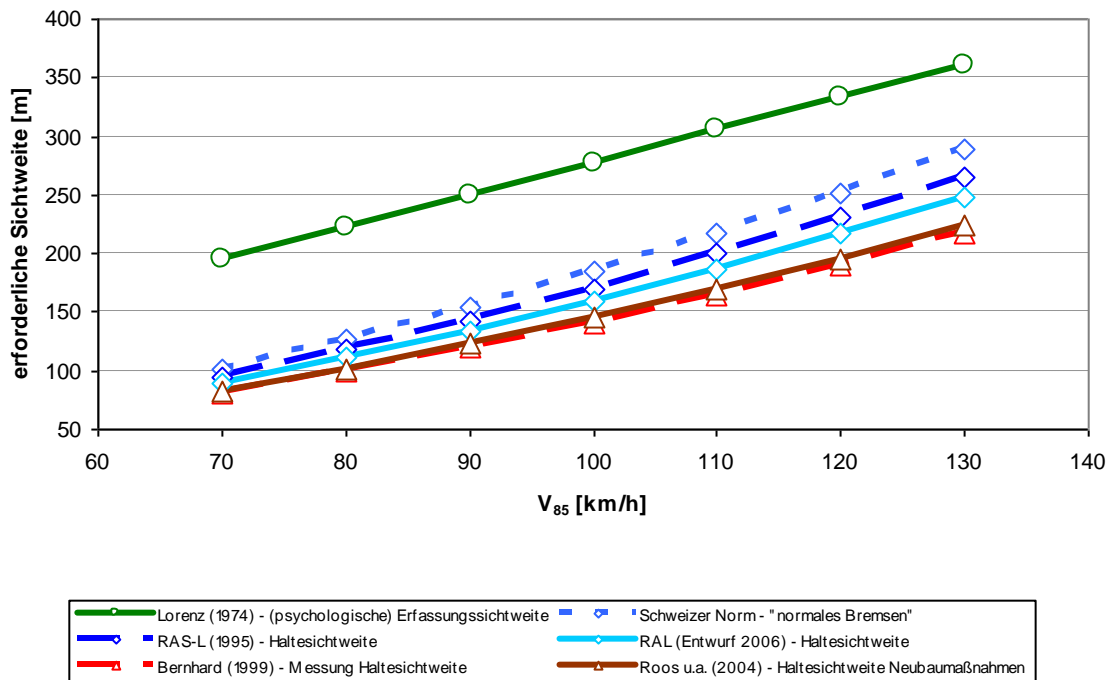


Bild 2-8: Vergleich ausgewählter Sichtweitenmodelle (für $s = \pm 0\%$)

In der Summe führen beide Entwicklungen, die Verkürzung der Haltesichtweite und die Abschaffung der Überholsichtweite auf einem Großteil des Netzes, zu einer deutlichen Einschränkung der in zukünftigen Entwürfen zu schaffenden Sichtweiten. Daraus ergeben sich Möglichkeiten, Straßen besser an bewegte Geländeformen anzupassen und Baukosten zu sparen. Dem entgegen steht jedoch die Forderung nach frühzeitiger Erkennbarkeit und Befreibarkeit des Fahrtraumes durch den Kraftfahrer.

Die daraus abzuleitende Erkenntnis, dass menschliches Verhalten im Straßenentwurf auch weiterhin berücksichtigt werden muss und eine rein fahrdynamisch begründete Festlegung der Sichtweiten nicht ausreicht, führte zur Berücksichtigung einer Orientierungssichtweite im frühen Entwurf der RAL (SCHNÜLL 2002, pragmatisch festgelegt auf den 1,3fachen Wert der Haltesichtweite). Erst damit erscheint die Verkürzung der Haltesichtweite möglich, da sie von ihrer Aufgabe als regelndes Element im Straßenentwurf befreit wird. Eine umfassende Untersuchung, auf deren Grundlage eine zahlenmäßige Vorgabe für das Richtlinienwerk aufgebaut werden kann, wurde mit dem Forschungsprojekt „Orientierungssichtweite - Definition und Beurteilung“ (LIPPOLD, KRÜGER U.A. 2007) von der Bundesanstalt für Straßenwesen in Auftrag gegeben, auf dem diese Arbeit aufbaut.

2.4 Geometrische Einflussgrößen das Fahrverhalten

Innerhalb der Prozesskette Wahrnehmen - Entscheiden - Handeln, die der Fahrer kontinuierlich durchlebt, lassen sich die Entscheidungsvorgänge nicht direkt messen. Auch Befragun-

gen von Probanden sind aufgrund der schnellen Abläufe und unbewussten Einflüsse nur von begrenzter Aussagekraft. Die Beschreibung und Bewertung von Entscheidungen ist deshalb nur indirekt möglich. Werden neben der Erfassung des Wahrnehmungsverhaltens zusätzlich Daten des Fahrverhaltens herangezogen, kann daraus auf die Qualität der Informationsverarbeitung unter bestimmten Randbedingungen geschlossen und die Umsetzung in die Handlungsebene beschrieben und beurteilt werden (SCHWEIGERT 2003). Für die Verkehrssicherheit ist ohnehin vor allem das Ergebnis, d.h. das resultierende Fahrverhalten, maßgebend.

Die Auswahl geeigneter Messstrecken zur Untersuchung des Einflusses der vorhandenen Sichtweite auf das Fahrverhalten erfordert die Berücksichtigung der Auswirkungen strecken-spezifischer Parameter auf das Fahrverhalten. Dadurch wird es möglich, den Faktor Sichtweite isoliert zu betrachten bzw. nicht vermeidbare Überlagerungen mit anderen Größen angemessen zu berücksichtigen. Der Fahrer reagiert auf äußere Einflüsse vorwiegend über eine Änderung der Geschwindigkeit. Weitere Fahrverhaltensparameter sind auftretende Beschleunigungen in Längs- und Querrichtung sowie das Spurverhalten, die jedoch nicht in Zusammenhang mit der vorhandenen Sichtweite in der hier untersuchten Größenordnung zu bringen sind. Deutliche Veränderungen dieser Größen treten in der Regel nur bei heftigen Reaktionen des Fahrers auf. Sie werden deshalb nur dort untersucht, wo solche Reaktionen eine Rolle spielen (s. Kap. 3.6 und 4.4). Im störungsfreien Fahrtablauf ist die Geschwindigkeit der hauptsächlich interessante Parameter.

Um den Einfluss einzelner Kenngrößen auf das Fahrverhalten zu beurteilen, bedarf es zunächst einer „streckencharakteristischen Geschwindigkeit“, die das typische Geschwindigkeitsverhalten eines Straßenabschnitts beschreibt. In der Literatur finden sich dafür verschiedene Definitionen:

TRAPP (1971) und TRAPP / OELLERS (1974) bezeichnen die streckencharakteristische Geschwindigkeit als die höchste Reisegeschwindigkeit ohne Aufenthalte, mit der ein Durchschnittsfahrer in einem Durchschnittsfahrzeug auf einer Straße unter den vorherrschenden Bedingungen und unter Wahrung der Verkehrssicherheit fahren kann. Das charakterisiert in etwa die Höchstgeschwindigkeit.

LAMM (1973) definiert die streckencharakteristische Geschwindigkeit als die von 85% der unbeeinflusst fahrenden Pkw auf nasser, sauberer Fahrbahn nicht überschrittene Geschwindigkeit. Als unbeeinflusst fahrend gelten Fahrzeuge, die eine Zeitlücke von mindestens 6 bis 8 s zum Vorfahrer aufweisen. Diese Definition hat sich durchgesetzt. Auf Grund ihres statistischen Bezugs repräsentiert sie das tatsächliche Fahrverhalten besser und ist in den RAS-L (FGSV 1995) enthalten. Die Definition des frei fahrenden Fahrzeugs wurde leicht modifiziert; die Mindestzeitlücke beträgt 7 s zum vorausfahrenden und 4 s zum nachfolgenden Fahrzeug.

Angestrebt wird eine homogene Streckencharakteristik, da sie normalerweise ein ebensolches Geschwindigkeitsverhalten bewirkt. Die verschiedenen Einflussgrößen wirken dabei nicht einzeln, sondern in ihrer Gesamtheit und überlagern einander. Als maßgebende Merkmale der Streckencharakteristik nennt LAMM (1973):

- Linienführung
 - Kurvigkeit, Krümmung, Querneigung
 - Sichtweite
 - Längsneigung, Länge der Längsneigung
- Querschnitt
 - einbahnig, zweibahnig, Mittelstreifen
 - Fahrbahnbreite
 - Randstreifenbreite
 - Standstreifen, Mehrzweckstreifen
 - Abstand seitlicher Hindernisse
- Knotenpunkte

- Knotenpunktart
- Knotenpunktfolge

Eine ähnliche Zusammenstellung findet sich bei anderen Autoren (DILLING 1973, KÖPPEL, BOCK 1979). In Sinne der Untersuchungen zur Orientierungssichtweite sind in erster Linie die Merkmale der Linienführung sowie des Querschnitts bedeutsam, auf deren Einfluss in den folgenden Kapiteln genauer eingegangen wird. An Knotenpunkten stehen vor allem deren Erkennbarkeit sowie die Begreifbarkeit der Vorfahrt und der Verkehrsführung im Vordergrund, für die es eigene Sichtweitenmodelle gibt (Annäherungssichtweite, Anfahrsichtweite). Sie sind nicht Gegenstand dieser Untersuchung.

Zusätzlich können Ortsdurchfahrten, Geschwindigkeitsbeschränkungen sowie Lichtsignalanlagen von Bedeutung sein. Untersuchungen von AL-KASSAR / HOFFMANN / ZMECK (1981) belegen, dass ihr Einfluss auf einer Länge von bis zu 500 m vor und 400 m nach einer solchen Restriktion wirksam sein kann. Solche Bereiche sollten deshalb in der Auswertung von Versuchsfahrten gesondert betrachtet werden.

2.4.1 Kurvenradius / Krümmung

Alle Untersuchungen über den Zusammenhang zwischen Streckencharakteristik und Fahrverhalten weisen einen Einfluss des Kurvenradius nach (z.B. KÖPPEL / BOCK 1979, BUCK 1992). Besonders kleine Radien wirken sich stark auf die Geschwindigkeitswahl aus, bei Werten von ca. 350 m und mehr verringert sich die Stärke des Einflusses. Ein direkter, konstanter Zusammenhang existiert nach übereinstimmender Meinung nicht. Ursachen sind unterschiedliche Richtungsänderungswinkel, Überlagerungen mit der vorhandenen Sichtweite, die räumlich verzerrte Wahrnehmung der tatsächlichen Krümmung sowie die Tatsache, dass das Fahrverhalten nie ausschließlich von Einzelelementen bestimmt wird (TRAPP 1971, DILLING 1973, DURTH 1974).

DILLING (1973) zeigt, dass der Kurvenradius einen Einfluss auf die Geschwindigkeit im Annäherungsbereich der Kurve hat, ohne diesen zu quantifizieren und stellt fest, dass der Radius allein die mittlere Kurvengeschwindigkeit nur ungenügend erklärt. Dies wird von KREBS (1973) bestätigt, der darauf hinweist, dass der Kurvenradius allein nicht zur Beurteilung einer Kurve ausreicht, da durch das Schneiden der Kurve insbesondere im Bereich von Richtungsänderungen von 10-15° beträchtliche Radiengewinne erzielt werden können. Dieses Verhalten tritt nicht nur bei ausgesprochen sportlichen Fahrern in Erscheinung, sondern kennzeichnet nahezu das gesamte Fahrerkollektiv. Fast jeder Fahrer ist bestrebt, durch Anpassung seiner Fahrlinie einen Geschwindigkeits- oder Komfortgewinn zu erzielen.

Nach KÖPPEL / BOCK (1979) besteht generell eine enge Korrelation zwischen Kurvenradius und Sichtweite. Sie folgern daher, dass eine Betrachtung des Kurvenradius den Einfluss der Sichtweite bereits enthält. Dieser Zusammenhang mag für Kurven mit innenseitigen Sichthindernissen zutreffen, nicht jedoch im Fall gerader Kuppen und generell weithin einsehbarer Landschaften (vgl. Bild 2-9). Für die Ableitung allgemeingültiger Aussagen sollten beide Einflussgrößen getrennt betrachtet werden.

BUCK (1992) wertete Geschwindigkeitsprofile frei fahrender Fahrzeuge aus und fand für Radien ≥ 500 m keine Beeinflussung des Geschwindigkeitsverhaltens. Er bestätigte damit entsprechende Untersuchungen von LAMM (1973) und DURTH U.A. (1983). Unterhalb dieses Bereichs wurde eine lineare Abnahme der Geschwindigkeiten bei kleinerem Radius festgestellt. Die Geschwindigkeit in der Kurve hängt stark von der dabei auf den Fahrer wirkenden Seitenbeschleunigung ab. Sie entspricht dem Produkt der Erdbeschleunigung g und dem radialen Kraftschlussbeiwert f_R und stellt den Anteil der Zentrifugalbeschleunigung dar, der nicht durch die Querneigung aufgenommen wird (DURTH / KÖRNER / MANNS 1982). In der Literatur gilt allgemein ein Bereich von 3-4 m/s^2 als Sicherheits- und Komfortgrenze, da diese Werte in der Praxis nur selten überschritten werden (MANNS 1985).



Bild 2-9: Kurven mit und ohne Beschränkung der Sichtweite

Generell scheint ein Einfluss einzelner Radien auf das Fahrverhalten vorzuliegen, der vor allem im fahrdynamisch bestimmten Bereich enger Kurven wirksam wird. Eine genaue Quantifizierung dieses Einflusses ist jedoch nicht möglich, da zugleich auch andere Parameter wirksam sind. Vor allem die Charakteristik des Streckenabschnitts vor dem betrachteten Radius, insbesondere dessen Kurvigkeit, spielt offenbar eine wichtigere Rolle.

2.4.2 Kurvigkeit

Die Kurvigkeit beschreibt das Verhältnis der Summe aller Winkeländerungen über eine betrachtete Streckenlänge (RAS-L, FGSV 1995). Sie erlaubt damit eine allgemeine Charakterisierung der Strecke im Lageplan, ohne einen Aufschluss über die Stetigkeit und die Elementrelationen zu geben.

Der Einfluss der Kurvigkeit auf das Fahrverhalten ist in der Literatur unumstritten. TRAPP (1971) und TRAPP / OELLERS (1974) ermitteln die Kurvigkeit als die maßgebliche Einflussgröße auf das Fahrverhalten und stellen fest, dass eine zunehmende Kurvigkeit fahrdynamisch ein einheitliches Geschwindigkeitsverhalten erzwingt. Es wird zusätzlich darauf hingewiesen, dass die Wirkung der Kurvigkeit von Einflüssen der Sichtweite und der Längsneigung überlagert wird.

BOCK (1968) und DILLING (1973) weisen einen statistisch gesicherten Zusammenhang zwischen Kurvigkeit und Fahrverhalten nach. Mit zunehmender Kurvigkeit nimmt auch die mittlere Verzögerung im Annäherungsbereich vor der Kurve zu.

AL-KASSAR / HOFFMANN / ZMECK (1981) stellen fest, dass die Kurvigkeit und die Querschnittsbreite den maßgeblichen Einfluss auf die Momentangeschwindigkeit ausüben.

BUCK (1992) betrachtet anstelle der Kurvigkeit die mittlere Krümmung über eine Strecke von 400 m vor dem Beobachtungsquerschnitt. Auf Strecken mit hoher Kurvigkeit ist dabei mit zunehmender mittlerer Krümmung ein deutlicher Rückgang der Geschwindigkeiten zu erkennen. Liegen die Kurvenradien über 500 m, ist kein Einfluss der Krümmung auf das Fahrverhalten mehr zu erkennen.

LAMM (1973) und SCHLICHTER (1976) weisen darauf hin, dass die Kurvigkeit nur eine Art Mittelwert über einen Streckenabschnitt darstellt und demzufolge das Fahr- und Geschwindigkeitsverhalten nicht allein erklären kann.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass die Kurvigkeit in entscheidendem Maße zur Gestaltung des Fahrverhaltens beiträgt. Geringe Kurvigkeiten entsprechen einer großzügigen Lageplantrassierung und sind zumeist mit großen Sichtweiten verbunden. Dadurch werden hohe Geschwindigkeiten ermöglicht, allerdings ist auch eine größere Streuung vorhanden. Höhere Kurvigkeiten erzeugen – fahrdynamisch bedingt – ein gleichmäßigeres Fahrverhalten. Zur Beurteilung der Sicherheit einer Trasse genügt die Kurvigkeit jedoch nicht; hier ist zusätzlich die Betrachtung der Stetigkeit, d.h. der Relationen aufeinander folgender Kurvenradien notwendig.

2.4.3 Elementrelation

Die Forderung nach einer ausgewogenen Gestaltung der Radien aufeinander folgender Kurven bei Straßen der Kategoriengruppen A und B II basiert auf Untersuchungen von KÖPPEL / BOCK (1970). Untersucht wurde der Zusammenhang zwischen Radius und mittlerer Radiengeschwindigkeit unter der Voraussetzung, dass sich die Geschwindigkeiten nach einem Radienwechsel nur um einen gewissen Prozentsatz verändern sollten. Dieser Satz wurde mit 20% festgelegt. Daraus wurden zulässige Werte für das Verhältnis R_1/R_2 ermittelt, die in das Regelwerk RAL-L-1 (FGSV 1973) und später unverändert in die folgende RAS-L-1 (FGSV 1984) Eingang fanden.

LEUTNER (1974) untermauerte mit seinen Untersuchungen, dass eine harmonische Linienführung ein gleichmäßiges Geschwindigkeitsverhalten erzeugt. Es traten deutliche Unterschiede zu den Geschwindigkeitsprofilen un stetig trassierter Straßen auf.

Auch die Untersuchungen von AL-KASSAR / HOFFMANN / ZMECK (1981) belegen, dass bei ungünstiger Radienfolge (als Beurteilungsgrundlage diente die RAL-L-1) ein zunehmend uneinheitliches Fahrverhalten auftritt, weil die Kurvigkeit unterschiedlich eingeschätzt wird. Dies spricht für eine steigende Unsicherheit und ein erhöhtes Unfallrisiko.

Der stetige Anstieg des Geschwindigkeitsniveaus machte eine Anpassung der Verhältniswerte im Zuge der Überarbeitung des Richtlinienwerkes im Jahre 1995 notwendig. In umfangreichen Untersuchungen verglich LIPPOLD (1997) das Geschwindigkeitsverhalten und Unfallgeschehen auf relationstrassierten und un stetig geführten Strecken. Auffällig war ein deutlicher Rückgang der Unfallzahlen durch eine stetige Linienführung. Im Ergebnis der Untersuchungen entstand eine überarbeitete Version der Relationstulpe, die auch im neuen RAL-Entwurf unverändert enthalten ist (Bild 2-10, links).

Mit zunehmender Länge einer Geraden zwischen aufeinander folgenden Kurven kann und wird der Fahrer die Geschwindigkeit dort erhöhen. Die Ausgangsgeschwindigkeit für die nächste Kurve wird dann immer weniger vom voraus liegenden Radius, sondern stattdessen von der Länge der Zwischengeraden bestimmt. Aus diesem Grund wurde in den RAL (FGSV, Entwurf 2010) zusätzlich eine Empfehlung für Mindestradien im Anschluss an Geraden ausgesprochen (Bild 2-10, rechts).

Es ist mittlerweile unumstritten, dass eine ausgewogene Relation aufeinander folgender Trassierungselemente zu einem gleichmäßigen Fahrverhalten führt.

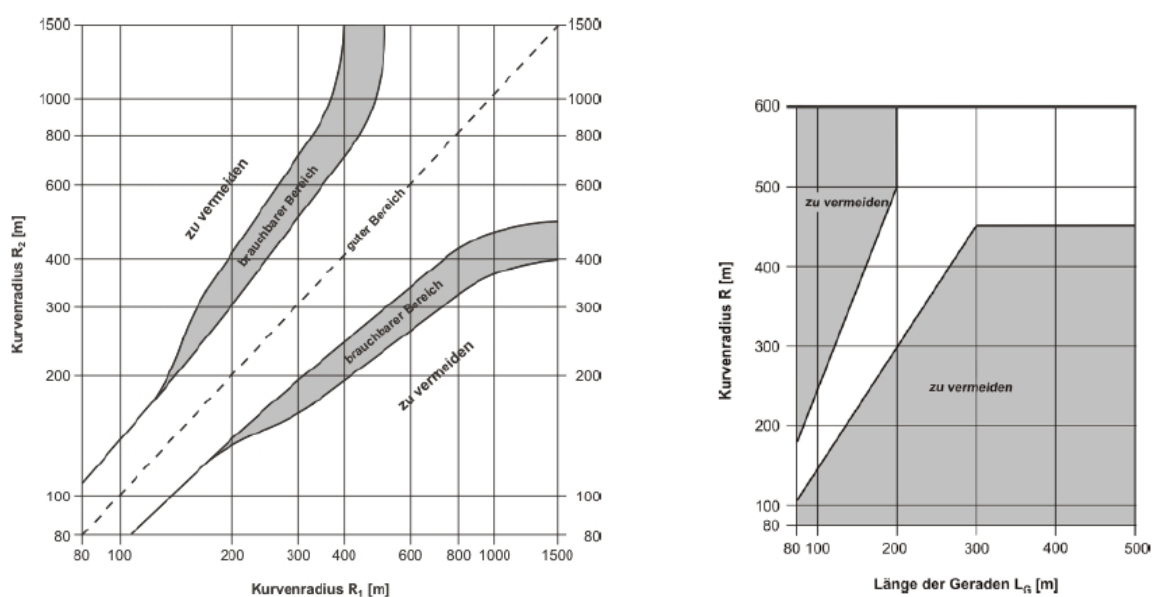


Bild 2-10: Elementrelationen nach RAL (FGSV, Entwurf 2010)

2.4.4 Vorhandene Sichtweite

Der Einfluss der Sichtweite auf die gefahrene Geschwindigkeit wird in der Literatur verschieden dargestellt. HIERSCHE (1968) weist darauf hin, dass die Erkennbarkeit des weiteren Verlaufs der Straße über das gesuchte Element hinaus die Fahrgeschwindigkeit maßgeblich beeinflusst. Er leitet eine eindeutige Abhängigkeit zwischen den tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeiten und den Sichtweiten ab. Solange nicht die Verkehrsdichte maßgebend ist, bestimmt die Sichtweite sogar ausschließlich das Geschwindigkeitsverhalten.

TRAPP (1971) beobachtet, dass geringe Sichtweiten (< 300 m) mit einem stark uneinheitlichen Fahrverhalten des schnelleren Verkehrsanteils verbunden sind. Größere Sichtweiten haben eine Abnahme der Kurvigkeit zur Folge, wodurch die Wahl der Geschwindigkeit fahrdynamisch freier wird. Es zeigt sich eine zunehmende Gleichförmigkeit des Geschwindigkeitsverhaltens. Die Wirkung der Sichtverhältnisse im unteren Bereich ist nur dann kritisch, wenn ihr Eindruck der Kurvigkeit widerspricht. Für ihn ist nicht die absolute Sichtweite für das Geschwindigkeitsverhalten maßgebend, sondern die Kurvigkeit und damit die Geschwindigkeit vor dem Streckenabschnitt mit kritischer Sichtweite; der Einfluss der Sichtweite selbst ist uneinheitlich und von unterschiedlicher Relevanz.

Den Untersuchungen von DILLING (1973) zufolge kann nur ein schwacher Zusammenhang zwischen Sichtweite und mittlerer Kurvengeschwindigkeit als gesichert gelten, da sich Radius und Kurvigkeit ebenfalls darauf auswirken. Da diese Aussage nicht zwischen geringen und großen Sichtweiten unterscheidet und auch durch unterschiedliche Ursachen bedingte Sichtbeschränkungen außer Acht lässt, ist dies nicht als direkter Widerspruch zu den voranstehenden Ergebnissen zu verstehen. Auch für LEUTNER (1974) stellt die Sichtweite in Bezug auf das Fahrverhalten eine geometrische Größe der Umfeldtopographie dar und kann nicht direkt mit dem Profil der Geschwindigkeiten bzw. der Radienfolge korreliert werden.

DURTH (1974) untersuchte den Sichtweiteneinfluss aus einer informationstheoretischen Perspektive und kommt zu dem Schluss, dass eine schwankende Sichtweite den Fahrer überfordert, während bei konstant großer oder kleiner Sichtweite eine Anpassung des Fahrverhaltens erfolgt.

Nach AL-KASSAR / HOFFMANN / ZMECK (1981) haben Sichtweiten keine signifikante Bedeutung für das Geschwindigkeitsverhalten; sie sind durch Querschnittsbreite, Längsneigung und Kurvigkeit geprägt und dadurch bereits erfasst. Bis zu einer Sichtweite von 300 m wird das Fahrverhalten stark beeinflusst, da sie hier als Haltesichtweite die Höhe der Geschwindigkeit einschränkt. Fahrer reagieren im Allgemeinen auf eine Verschlechterung der Sichtweite nur dann, wenn ihre eigene Geschwindigkeit wesentlich über der Geschwindigkeit liegt, die sie auf Grund der Haltesichtweite fahren dürfen. Da das Schätzen der erforderlichen Haltesicht und das Abstimmen der Geschwindigkeit auf kritische Sichtverhältnisse individuell sehr unterschiedliche Ergebnisse liefern, treten im Grenzbereich, in dem die Sichtweite für das Fahrverhalten bedeutsam wird, große Unsicherheiten und ein sehr unterschiedliches Fahrverhalten auf. Abgeleitet wird die Forderung, dass die Sichtweite im Mittel über einen Streckenabschnitt 300 m nicht unterschreiten soll.

KÖPPEL / BOCK (1979) bildeten den ungewichteten Mittelwert der Sichtweiten über den zurückliegenden Streckenabschnitt. Sie ermittelten die beste Übereinstimmung zwischen diesem Wert und der gefahrenen Geschwindigkeit für einen zurückliegenden Abschnitt von 400 m Länge.

DURTH / BALD (1987) ermitteln einen großen Einfluss der Sichtweite auf Ort und Stärke der Fahrerreaktion vor Kurven. Enge, unübersichtliche Kurven weisen große Verzögerungen im Annäherungsbereich auf, werden aber „genauso schnell, wenn nicht schneller“ durchfahren wie übersichtliche.

Ein Absinken der Geschwindigkeiten bei abnehmender Sichtweite zeigt sich bei BUCK (1992), eine stärkere Beeinflussung des Verhaltens wird jedoch erst bei Sichtweiten unter 150 m vermutet. Zudem findet sich keine Abhängigkeit der Sichtweite von der Kurvigkeit, die Sichtweite kann daher als eigenständige Einflussgröße betrachtet werden.

Von LIPPOLD U.A. (2009) wurden Geschwindigkeit und Spurverhalten frei fahrender Fahrzeuge in Kurven mit unterschiedlicher Seitenraumbepflanzung (beidseitig, einseitig, freies Umfeld) untersucht. Es zeigte sich, dass bei beidseitiger Bepflanzung vor der Kurve stärker verzögert und die Kurve langsamer und spurtreuer durchfahren wird. Dieses Verhalten wird auf die Beschränkung der Sichtweite durch die innenseitige Bepflanzung zurückgeführt. Allerdings treten diese Reaktionen erst bei sehr geringen Sichtweiten unterhalb der Haltesichtweite auf.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass geringe Sichtweiten im Bereich der Haltesichtweite und darunter das Fahrverhalten zwar beeinflussen, jedoch nicht in dem Ausmaß, wie es die StVO fordert. Zudem scheint eine breite Streuung der Auswirkungen vorzuliegen. Im Bereich größerer Sichtweiten ist der Einfluss unklar.

2.4.5 Längsneigung

Bei der Betrachtung des Einflusses der Längsneigung ist neben der Steigung selbst die Länge der Steigung von Bedeutung. Nach DIETRICH (1965, zit. nach KÖPPEL / BOCK 1979) sollen untersuchte Steigungsstrecken mindestens 400 m lang und konstant ohne Kurven im Lageplan sein. Er kommt zu dem Ergebnis, dass Steigungen sich erst ab +2,5% bzw. -5,0% bemerkbar machen.

KÖPPEL / BOCK (1979) griffen diese Definition für eigene Untersuchungen auf und ermittelten ein unbeeinflussten Bereich von $-4 \% < s < +2 \%$. Für darüber liegende Werte wurde zusätzlich die Kurvigkeit einbezogen und durch Regression ermittelt, bis zu welcher Kurvigkeit die Geschwindigkeit von der Längsneigung beeinflusst wird.

Für TRAPP (1971) liegt das Maximum der streckencharakteristischen Geschwindigkeit bei $s = -1,5 \%$. Steigungen von über 4 % sind zu vermeiden; die günstigste Längsneigung soll $\pm 2 \%$ betragen.

AL-KASSAR / HOFFMANN / ZMECK (1981) weisen darauf hin, dass der Einfluss der Längsneigung abhängig von Fahrer und Fahrzeug ist; insgesamt wird auf Steigungsstrecken von 4% ein Unterschied in den Richtungsgeschwindigkeiten von durchschnittlich 8 km/h festgestellt.

BUCK (1992) stellt bei mittleren Längsneigungen von -2 % bis +2 % keinen Einfluss auf das Geschwindigkeitsverhalten fest. Auf einer großzügig trassierten Strecke lag die V_{85} selbst bei 5% Steigung über 100 km/h.

Mit dem allgemein vorhandenen Anstieg der durchschnittlichen Motorleistung des Fahrzeugkollektivs dürfte der Einfluss der Längsneigung mehr und mehr zurückgedrängt werden. Die vorliegende Untersuchung soll den Faktor Längsneigung weitgehend ausschließen, indem die Messstrecken keine längeren Steigungsstrecken außerhalb des unbeeinflussenden Bereichs von ca. $\pm 4 \%$ aufweisen sollen.

2.4.6 Querschnitt

In der Literatur finden sich verschiedene Zusammenhänge zwischen Querschnittsgestaltung und Fahrverhalten.

Für TRAPP (1971) hat die Fahrbahnbreite dann keinen Einfluss auf das Geschwindigkeitsverhalten, wenn die Randstreifenbreite 0,50 m beträgt.

TRAPP / OELLERS (1974) stellen nur bei größeren Unterschieden in den Fahrspurbreiten (ab 0,50 m) eine Auswirkung auf die streckencharakteristische Geschwindigkeit fest. Mit zunehmender Fahrspurbreite verbessert sich die Gleichförmigkeit des Geschwindigkeitsverhaltens.

Die Untersuchungen von KÖPPEL / BOCK (1979) ergaben einen steigenden Einfluss der Fahrbahnbreite bei abnehmender Kurvigkeit und zunehmender Sichtweite.

Nach AL-KASSAR / HOFFMANN / ZMECK (1981) besteht nur ein loser Zusammenhang zwischen den Querschnittsmerkmalen Fahrbahnbreite, Randstreifenbreite sowie Seitenstreifen-

breite und den gemessenen Momentangeschwindigkeiten. Trotzdem wird ein maßgeblicher Einfluss insbesondere der Rand- und Seitenstreifenbreite ermittelt. Auch hier konnte bezüglich der Fahrspurbreite nur bei größeren Unterschieden (ab 0,50 m) eine Änderung des Fahrverhaltens festgestellt werden.

BAUMANN (1984) findet dagegen keine wesentlichen Unterschiede im Geschwindigkeitsverhalten frei fahrender Fahrzeuge auf verschiedenen zweistreifigen Querschnitten mit Fahrspurbreiten zwischen 3,25 m und 3,75 m (konstante Randstreifenbreite von 0,25 m).

HEGEWALD / WEBER (2008) weisen auf die Gefahren ausgefahrener Straßenränder an schmalen Querschnitten hin. Die Analyse von Unfallzahlen zeigt, dass bereits eine Verbreiterung der Fahrbahn von 5,50 m auf 6,00 m eine Reduzierung der Unfallzahlen und der Unfallschwere erwarten lässt. Dass bei einem Großteil der Unfälle eine deutlich überhöhte Geschwindigkeit festgestellt wurde, spricht gegen eine geschwindigkeitsmindernde Wirkung schmaler Querschnitte.

Insgesamt scheint ein Einfluss des Querschnitts nur bei deutlichen Änderungen der Fahrbahnbreite zu bestehen. Es kann vermutet werden, dass eine Unterteilung in zwei Gruppen breiter und schmaler Querschnitte ausreicht, innerhalb derer kein signifikanter Einfluss auf die Geschwindigkeitswahl mehr zu erwarten ist. Als Grenze wird nach LIPPOLD (1997) ein Bereich von 6,00 m bis 6,50 m angenommen.

2.5 Sichtweite und Unfallgeschehen

Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen Sichtweite und Unfallgeschehen stehen grundsätzlich vor der Schwierigkeit, dass die streckenbedingt tatsächlich vorhandene Sichtweite nur sehr aufwändig zu ermitteln ist und deshalb nur für geringe Streckenlängen zur Verfügung steht. Gleichzeitig erfordert das seltene Auftreten von Unfällen, bezogen auf die Gesamtfahrleistung, die Auswertung großer Kollektive. Zuverlässige Erkenntnisse auf einer statistisch abgesicherten Datengrundlage sind deshalb schwer zu erhalten.

Die vorhandenen Ansätze beziehen sich auf theoretische Überlegungen, geringe Untersuchungskollektive oder werten Unfälle aus, die bei witterungsbedingten Sichteinschränkungen geschehen. Das häufige Auftreten solcher Unfälle deutet darauf hin, dass Fahrer ihr Verhalten in der Regel selbst dann nicht ausreichend an schlechte Sichtbedingungen anpassen (können), wenn diese extrem und damit offensichtlich sind. Nasse oder glatte Fahrbahn sowie Unstetigkeiten in der Linienführung wirken sich dann oft zusätzlich verschärfend auf das Unfallrisiko aus. Entwurfstechnisch kann zur Verhinderung solcher Unfälle möglicherweise bei der Fahrbahntwässerung oder der Linienführung angesetzt werden. Verbesserungen bei den Sichtweiten sind planerisch hingegen in diesen Fällen nicht möglich, da der Fahrer die theoretisch zur Verfügung stehende Sichtweite nicht ausnutzen kann.

Die vorhandenen Unfalluntersuchungen, die in direktem oder indirektem Zusammenhang mit der Sichtweite vorgenommen wurden, zeigen meist eine umgekehrt U-förmige Verteilung der Unfallzahlen. HIERSCHE (1968) zitiert amerikanische Studien, nach denen die Anzahl der Unfälle bei zunehmender Anzahl von Sichthindernissen zunächst ansteigt, später aber wieder abfällt. Bei sehr häufigen Sichthindernissen wird generell langsamer gefahren, wodurch das Unfallrisiko geringer wird.

Zu ähnlichen Ergebnissen kommt HAMMERSCHMIDT (2008). Darin werden die Unfalldaten eines größeren Streckennetzes im Hinblick auf Fahrbahnbreiten, Radien und Kurvigkeiten untersucht. Anhand der beschriebenen Korrelation insbesondere der Kurvigkeit mit der vorhandenen Sichtweite lassen sich auch dafür entsprechende Rückschlüsse ziehen. Auch hier zeigt sich zunächst ein Ansteigen der Unfallraten mit steigender Kurvigkeit, das sich später wieder umkehrt. Wie bei HIERSCHE (1968) werden dafür die an enge, kurvige und schlecht einsehbare Straßen angepassten geringeren Geschwindigkeiten als Ursache vermutet. Die Umkehr erfolgt allerdings erst bei sehr hoher Kurvigkeit, d.h. dementsprechend sehr geringer Sichtweite, die nach heutigen Trassierungsrichtlinien nur im Ausnahmefall erreicht werden. Unterhalb dieser Extrembereiche kann von steigenden Unfallzahlen bei geringer werdender

Sichtweite ausgegangen werden.

HABERMEHL (1987) bemerkt, dass Sichtweiten zwischen der halben und vollen Überhol-sichtweite Risiken bergen, da der Fahrer Überholmöglichkeiten falsch einschätzen könnte. Der Hinweis findet sich auch in den Entwurfsrichtlinien (RAS-L, FGSV 1995 sowie RAL, Entwurf FGSV 2010), ist aber in der Praxis schwer umzusetzen. Teilweise finden dann Überholverbo-te Anwendung.

2.6 Schlussfolgerungen für die Festlegung der Untersuchungsmethodik

Die Literaturlauswertung zeigt, dass bei der Neufassung der Entwurfsrichtlinien für Landstra-ßen Haltesichtweiten in verringertem Maße vorgesehen sind. Anstelle definierter Überhol-sichtweiten für einbahnige Straßen wird empfohlen, bei Sichtweiten unterhalb 300 m Überholverbote anzuordnen. Überholmöglichkeiten werden künftig in der Regel sicherer durch Zusatzfahrstreifen zur Verfügung gestellt, das Überholen unter Nutzung des Gegenfahrstreifens soll weitgehend verhindert werden. Das geforderte Sichtweitenniveau auf Landstraßen wird in der Folge zukünftig geringer sein. Es ist die Frage zu beantworten, ob damit noch eine ausreichende Fahrerorientierung gewährleistet ist.

Für die Auswahl einer geeigneten Untersuchungsmethodik lassen sich weiterhin die folgen-den Konsequenzen ableiten:

- Zur Beschreibung der Wahrnehmung, Orientierung und Beanspruchung von Fahrern steht mit der berührungsfreien Blickbewegungsmessung eine geeignete Methode zur Verfügung. Überlagert man Parameter des Blickverhaltens mit Fahrverhaltensdaten, so lassen sich Fahrerreaktionen von der Informationsaufnahme bis zur Handlungs-umsetzung beschreiben und bewerten. Diese Daten können durch Probandenfahrten im realen Verkehrsraum erhoben werden.
- In psychologischen Studien hat es sich bewährt, die Restaufnahmekapazität von Fahrern mit Hilfe einer Nebenaufgabe zu messen.
- Verschiedene Entwurfparameter korrelieren häufig miteinander, so dass eine voll-ständig isolierte Betrachtung einzelner Faktoren im realen Umfeld nicht möglich ist. Im Fahrsimulator ist dies durch gezielte Manipulationen der Sichtweite bei ansonsten gleichen Randbedingungen jedoch möglich.
- Um den Einfluss der vorhandenen Sichtweite auf das Blick- und Fahrverhalten zu un-tersuchen, müssen die Untersuchungsstrecken eine große Variationsbreite bezüglich dieses Entwurfparameters aufweisen.
- Das Aufmessen der vorhandenen Sichtweiten bedarf der Festlegung einer Aug- und Zielpunkthöhe. Für die Höhe des Augpunktes wird der in den Modellen der RAS-L (FGSV 1995), RAL (FGSV, Entwurf 2010) und RAA (FGSV, 2008) enthaltene, auf Messungen basierende Wert von 1,00 m verwendet (vgl. Kap. 2.3.2). Die Festlegung der Zielpunkthöhe ergibt sich aus der Orientierungsfunktion des Fahr-raumes. Hin-sichtlich der Vorausorientierung in größere Entfernungen ist für den Fahrer weniger die Fahrbahnmarkierung (die in großen Entfernungen zunehmend schlechter erkenn-bar ist) von Bedeutung, als vielmehr optisch leitende Elemente wie Leitpfosten, Schutzplanken oder Seitenraumbepflanzung. Auch vorausfahrende Fahrzeuge (bzw. deren Rücklichter bei Dunkelheit) geben dem Fahrer Anhaltspunkte über den weite-ren Streckenverlauf. Die verwendete Zielpunkthöhe richtet sich daher nach der Höhe dieser Objekte und wird auf 1,00 m festgelegt. Dieser Wert korrespondiert mit dem Sichtweitennachweis der RAA (FGSV 2008) und gewährleistet die Erkennbarkeit vo-rausfahrender (bzw. stehender) Fahrzeuge (RAL-Entwurf, FGSV 2010).
- Weitere streckencharakteristische Merkmale sind dann von Bedeutung, wenn ein starker eigener Einfluss oder eine erhebliche Überlagerung mit Sichtweiteneinflüssen besteht. Sie sind in einer möglichst umfassenden Variationsbreite zu untersuchen.

Dies gilt für die Merkmale Kurvenradius, Kurvigkeit und Radienrelation. Konkret bedeutet das die Berücksichtigung von:

- verschiedenen Kurvenradien in einer Größenordnung bis zu 500 m,
 - großzügigen und eng trassierten Linienführungen,
 - relationstrassierten und un stetigen Strecken sowie
 - Singularitäten.
- Die Längsneigung soll das Geschwindigkeitsverhalten nicht beeinflussen. Gleichzeitig bieten gerade Kuppen die beste Möglichkeit, den Einfluss der Sichtweite auf das Geschwindigkeitsverhalten isoliert von dem (oft stärker wirkenden) Einfluss der Kurvigkeit zu betrachten. Der geschwindigkeitsdämpfenden Wirkung von Steigungen kann durch ausreichende Leistung des Messfahrzeuges entgegengewirkt werden (vgl. Kap. 3.2.2). Daher wurde von einer generellen Vorgabe maximaler Längsneigungen abgesehen, stattdessen soll ein verfälschender Einfluss der Längsneigung über eine Klassifizierung ausgewählter Streckenabschnitte vermieden werden.
 - Der Querschnitt soll möglichst gleich bleiben. Damit ist hier gemeint, dass die gesamte Strecke eine Fahrbahnbreite von 6,50 m oder mehr aufweisen soll.
 - Für die Bewertung des Fahrverhaltens ist der Einzelfahrer auf freier Strecke maßgebend. Es sollten deshalb nur Streckenabschnitte ausgewertet werden, in denen sich keine anderen Verkehrsteilnehmer im Blickfeld der Probanden befinden. Diese würden den Blick unweigerlich auf sich ziehen und zur Antizipation des vorausliegenden Streckenabschnitts herangezogen werden. Um die Auswirkungen streckenspezifischer Parameter auf das Blick- und Fahrverhalten zu untersuchen, sollen die Probanden den Streckenverlauf nur anhand des Fahrraumes einschätzen.
 - Die Auswirkungen der vorhandenen Sichtweite auf die Verkehrssicherheit soll anhand des Unfallgeschehens auf den ausgewählten Messstrecken beschrieben werden. Es werden dazu die Unfalldaten eines Dreijahreszeitraumes im Zusammenhang mit den gemessenen Sichtweiten dargestellt und vorhandene Auffälligkeiten beschrieben. Wie bei den bisher vorliegenden Studien zu diesem Thema ist die Datenbasis dieser Auswertung aufgrund der Gesamtstreckenlänge, für die gemessene Sichtweiten zu Verfügung stehen, nur gering. Durch die Auswahl verkehrsarmer Strecken ist ebenfalls keine besondere Häufung von Unfällen zu erwarten. Die Auswertung wird sich deshalb auf die Beschreibung von Einzelereignissen konzentrieren, belastbare Korrelationen können auf dieser Grundlage nicht erwartet werden.

Mögliche zusätzliche Forderungen bezüglich der Gestaltung des Fahrraumes wären wohl zu erheben (z.B. größtmögliche Homogenität; Strecken mit / ohne vorhandener optischer Führung), in der Realität jedoch kaum zu erfüllen. Variationen des Fahrraumes erfolgten deshalb im Simulator.

Abgrenzung

Die vorliegende Untersuchung befasst sich mit dem Einfluss der Sichtweite auf das Verhalten von Fahrern. Dieser unverfälschte Einfluss ist nur gewährleistet, wenn der Fahrer in seiner Geschwindigkeitswahl und seinem Blickverhalten nicht durch andere Verkehrsteilnehmer beeinflusst ist. Die Betrachtungen beziehen sich daher auf frei fahrende Fahrzeuge; verkehrliche Einflüsse sollen weitgehend ausgeschlossen werden.

Die Analyse beschränkt sich auf Straßen, deren Bemessung nach fahrdynamischen Gesichtspunkten erfolgt. Das sind nach RIN (FGSV 2008) Außerortsstraßen der Kategorie LS. Der Fahrraum auf Innerortsstraßen unterliegt anderen Gestaltungsmerkmalen und verkehrsrechtlichen Vorgaben als auf Außerortsstraßen. Demzufolge orientiert sich der Kraftfahrer an anderen Elementen und unterliegt in seiner Geschwindigkeitswahl zusätzlichen restriktiven Einflüssen.

Für die Gestaltung von Knotenpunkten gibt es gesonderte Sichtweitenmodelle, die den veränderten Anforderungen an den Fahrer gerecht werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Orientierung auf der freien Strecke weniger Aufmerksamkeit erfordert als in Knotenpunktbereichen mit allgemein höherem Informationsgehalt. Zudem bestehen andere Ansprüche an das Geschwindigkeitsverhalten (rechtzeitiges Anhalten vor einbiegendem Verkehr) sowie bezüglich der Erkennbarkeit (z.B. Lesen von Wegweisern). Eine gesonderte Berücksichtigung dieser Situationen ist in den Richtlinien (RAL-Entwurf, FGSV 2010) bereits enthalten (Annäherungssichtweite) und erfolgt deshalb hier nicht.

Ebenfalls auszuschließen ist die Berücksichtigung von Dunkelheit. Die Sicht ist dann durch die Leuchtweite der Scheinwerfer begrenzt und ein anderes Fahrverhalten zu erwarten.

Das zu erarbeitende Bemessungsmodell orientiert sich am Pkw als dem häufigsten und schnellsten Verkehrsteilnehmer. Er ist daher alleiniger Untersuchungsgegenstand.

Dem Versuch, das Unfallgeschehen unter Berücksichtigung der vorhandenen Sichtweite auszuwerten, stehen die folgenden Schwierigkeiten entgegen:

- Die vorhandene Sichtweite muss exakt erfasst sein. Diese Daten liegen nur für die verwendeten Messstrecken vor.
- Eine Festlegung, welche Unfälle zumindest teilweise ursächlich auf nicht ausreichende Sichtweiten zurückzuführen sind, erweist sich als schwierig. Da sich die Untersuchung auf die freie Strecke beschränkt, traten keine Unfälle der Typen 2 (Abbiegeunfall), 3 (Einbiegen / Kreuzen-Unfall), 4 (Überschreitungsunfall) und 5 (Unfall durch ruhenden Verkehr) auf. Als nicht sichtweitenbezogen wurden außerdem Wildunfälle sowie Unfälle bei Nacht von der Betrachtung ausgeschlossen. Es verbleiben Fahrnunfälle und Unfälle im Längsverkehr (Unfalltypen 1 und 6), die sich bei Tageslicht ereigneten.
- Bei Unfällen, deren Ursache mindestens teilweise durch nicht ausreichende Sichtweite begründet sein könnte, besteht eine Diskrepanz zwischen Unfallort und Entstehungsort, die im Nachhinein nur im Ausnahmefall ermittelt werden kann. Der Entstehungsort wurde daher dem polizeilich erfassten Unfallort gleichgesetzt.

Das Unfallgeschehen kann deshalb nur für die Messstrecken im Zusammenhang mit der vorhandenen Sichtweite beschrieben werden. Eine umfangreichere Auswertung wäre zur Beschreibung von Zusammenhängen zwischen Sichtweiten und Unfallgeschehen zwar wünschenswert, jedoch von hohem Aufwand bei begrenztem Nutzen. Die polizeilichen Unfallanzeigen enthalten im Hinblick auf Unfallursachen keine Angaben über die streckenbedingt vorhandene Sichtweite, so dass eine nachträgliche Aufmessung in einem größeren Streckennetz nötig würde. Gleichzeitig ist der Einfluss der Sichtweite auf die Ursache einzelner Unfälle nicht exakt herauszuarbeiten. Da der Ansatz der Orientierungssichtweite nicht in Richtung einer „Notfallgröße“ wie z.B. die Haltesichtweite zielt, kann allenfalls ein schwacher Zusammenhang zur Verkehrssicherheit angenommen werden. Dessen Nachweis bedürfte der Untersuchung eines sehr großen Strecken- bzw. Unfallkollektivs.

3 Untersuchungsverfahren

3.1 Untersuchungsziel

Die Betrachtung der vorhandenen Haltesichtweitenmodelle macht deutlich, dass darin bisher nicht die Berücksichtigung des Fahrerverhaltens im Vordergrund steht, sondern fahrdynamisch begründete Bremswege. Wenig ist darüber bekannt, welche Sichtweite dem Fahrer ausreicht bzw. ab wann er unsicher wird. Obwohl einige Untersuchungen einen Zusammenhang zwischen Sichtweite und gefahrenen Geschwindigkeiten ergaben (HIERSCHKE 1968, BUCK 1992), sind die Zusammenhänge zu schwach, um daraus eine Modellgleichung ableiten zu können (BERNHARD, 1999). Die auftretenden Geschwindigkeitseffekte unterliegen starken Streuungen und sind in ihrer Ursache oft nicht eindeutig. Unumstritten ist hingegen, dass Fahrer auf unzureichende Sichtweiten meist nicht adäquat reagieren, so dass Sicherheitsrisiken entstehen.

Das im Regelwerk enthaltene Modell der Haltesichtweite ist schwerpunktmäßig fahrdynamisch begründet und beschreibt eine Gefahrenbremsung vor einem plötzlich auftauchenden Hindernis. Fahrerverhalten wird darin nur über die standardisierte Reaktionszeit berücksichtigt. Das Verhalten orientiert sich jedoch nicht permanent an möglichen Extremsituationen. Zu geringe Sichtweiten führen nicht zu einer angemessenen Verringerung der Geschwindigkeit, sondern werden eher durch erhöhte Anspannung kompensiert. Die Ergebnisse sind eine unangepasste Geschwindigkeit und eine schnellere Ermüdung des Fahrers. Um dies zu vermeiden, sollte die vorausliegende Strecke für den Fahrer weit genug einsehbar sein, um die Streckencharakteristik zu erfassen und sein Fahrverhalten darauf auszurichten, ohne dafür auf abrupte Reaktionen angewiesen zu sein.

Die Literaturanalyse zeigt, dass die Erfassung des Blickverhaltens von Fahrern eine messtechnische Basis für die Beschreibung der Streckenwahrnehmung darstellen kann. Durch die Überlagerung von Parametern des Blickverhaltens mit Daten des Fahrverhaltens kann der Ablauf des Prozesses Wahrnehmung – Entscheidung – Reaktion untersucht und im Hinblick auf Zusammenhänge mit streckenspezifischen Parametern beschrieben werden.

Ziel der Untersuchung ist somit die Erfassung und Bewertung von Blick- und Fahrverhalten auf unterschiedlichen Strecken unter dem Aspekt der vorhandenen Sichtweite. Aus den Ergebnissen soll das Modell einer Orientierungssichtweite abgeleitet werden, das sich in der Wahrnehmungs- und Reaktionsleistung der Fahrer begründet. Zur wissenschaftlichen Absicherung dieses Modells sind Untersuchungen zur Streckenwahrnehmung von Fahrern und zu den Auswirkungen unterschiedlicher und speziell geringer Sichtweiten auf Wahrnehmung und Fahrverhalten notwendig. Darüber hinaus werden anhand der umfangreich erhobenen Daten bestehende Erkenntnisse zum Blickverhalten von Fahrern auf Landstraßen, die sich teilweise nur auf geringe Untersuchungskollektive oder reine Simulatoruntersuchungen gründen, auf ihre Belastbarkeit überprüft.

3.2 Datenerhebung

Die Untersuchung der Streckenwahrnehmung und des Fahrverhaltens bei unterschiedlichen Sichtweiten erfolgte durch Fahrerbeobachtung. Dies kann nur im Rahmen von Versuchsfahrten geschehen. Probandenfahrten im realen Verkehr haben den Vorteil, dass sich der Kraftfahrer in seiner gewohnten Umgebung hinsichtlich Fahrzeug und Fahrraum befindet. Der Fahrraum wird ohne Abbildungsbeeinträchtigung einer ersatzweisen virtuellen Umgebung wahrgenommen, getroffene Einschätzungen und ausgeführte Handlungen haben reale Folgen. Aus diesem Grund lag der Schwerpunkt der Untersuchung auf solchen Versuchsfahrten. Dabei wird die Informationsaufnahme der Fahrer anhand ihres Blickverhaltens untersucht und gleichzeitig die Umsetzung der aufgenommenen Informationen anhand des Fahr-

verhaltens analysiert. Um dem unbeeinflussten Fahren möglichst nahe zu kommen, wurden den Probanden keine besonderen Anweisungen zum Fahrstil gegeben (freies Fahren). Die Fahrten erfolgten auf ausgewählten Außerortsstraßen, in denen ein breites Spektrum an vorhandenen Sichtweiten und geeignete Kombinationen mit anderen Streckeneigenschaften zur Verfügung standen.

In einem weiteren Ansatz wurde die Restverarbeitungskapazität der Fahrer anhand einer Nebenaufgabe untersucht (s. Kap. 3.5). Die Nebenaufgabe erforderte regelmäßige Blickzuwendung zu einem Bildschirm, d.h. eine gleichzeitige Blickabwendung von der vorausliegenden Strecke. Der Fahrer muss dabei seine Aufmerksamkeitskapazität kontinuierlich zwischen der Straße und der Nebenaufgabe verteilen. Mit Hilfe der Blickbewegungsmessung kann diese Verteilung erfasst und mit der vorhandenen Sichtweite überlagert werden. Dabei wird zu sehen sein, ob und wann Fahrer bei abnehmenden Sichtweiten die Strecke konzentrierter wahrzunehmen versuchen und weniger empfänglich auf Nebenaufgaben reagieren. Ein solches Verhalten kann als deutlicher Hinweis auf eine erhöhte Beanspruchung gedeutet werden.

Querschnittsmessungen und andere Formen der Verkehrsbeobachtung können zwar Fahrverhaltensdaten größerer Kollektive liefern, lassen aber keine Beobachtung der Fahrer zu. Die Frage nach dem Warum des beobachteten Verhaltens kann deshalb nur durch statistische Zusammenhänge und nicht durch direkte Messungen beantwortet werden. Für die Ableitung und Begründung eines fahrerpsychologisch orientierten Sichtweitenmodells sind sie deshalb nicht vorrangig geeignet.

Die Probandenfahrten im realen Verkehrsraum liefern Erkenntnisse im Rahmen des gewöhnlichen Verkehrsablaufs, d.h. ohne das Auftreten von Extremsituationen, die eine besondere Reaktion der Fahrer erfordern. Dennoch sollten auch solche Situationen untersucht werden, um eine harte Grenze für das Reaktionsvermögen von Fahrern sichtbar zu machen. Im Sinne der Messungen zur Festlegung der Haltesichtweite (vgl. Kap. 2.3.2) wäre dies eine absolute Untergrenze für ein psychologisches Sichtweitenmodell. Im Zuge dessen ist auch die Frage von Bedeutung, welche Veränderungen im Blickverhalten dem Erreichen dieser Grenze vorausgehen.

Zur Ergänzung der Messreihen um die Messung von Blickverhalten und Fahrerreaktionen in Extremsituationen wurden deshalb zusammen mit dem Interdisziplinären Zentrum für Verkehrswissenschaften Würzburg (IZVW) Versuche im dortigen Fahrsimulator durchgeführt, deren Ergebnisse für die vorliegende Arbeit herangezogen werden können. Simulatoruntersuchungen bieten den Vorteil einer vollständig kontrollierbaren Umgebung, in der Situationen dargestellt werden können, die im realen Umfeld nicht reproduzierbar sind. So kann die Sichtweite gezielt manipuliert werden, während alle anderen Randbedingungen unverändert bleiben. Zudem ist die Durchführung von Versuchen möglich, die im realen Raum aus Sicherheitsgründen nicht umgesetzt werden können. Höchste Validität kann hier erreicht werden, wenn das reale Fahrverhalten unbeeinflusster Verkehrsteilnehmer beobachtet wird, um Probandenfahrten und Simulatorversuche zu vergleichen. Dafür wurde die reale Messstrecke komplett im Simulator nachgebildet und unter den gleichen Vorgaben wie bei den Realmessungen von Probanden befahren (mit und ohne Nebenaufgabe).

In einem zweiten Versuch wurde die Sichtweite durch die Gestaltung von Kuppen gezielt manipuliert. Hinter diesen Kuppen wurden Hindernisse platziert, an denen die auftretenden Reaktionsparameter untersucht wurden. Beide Simulatoruntersuchungen sowie der Vergleich mit den Ergebnissen der Realfahrten wurden im Rahmen des Gesamtprojektes am IZVW Würzburg durchgeführt und sind ausführlich in LIPPOLD, KRÜGER U.A. (2007) beschrieben. Die Ergebnisse, die bedeutsam für die Interpretation der eigenen Daten und das zu erstellende Sichtweitenmodell sind, werden in Kap. 4.4 wiedergegeben. Die Beschreibung des Unfallgeschehens erfolgte auf den für die Probandenfahrten hinsichtlich der Sichtweiten erfassten Strecken (vgl. Kap. 2.6) und ist in Anhang 1 dargestellt. Bild 3-1 zeigt die Untersuchungsmethodik im Überblick.

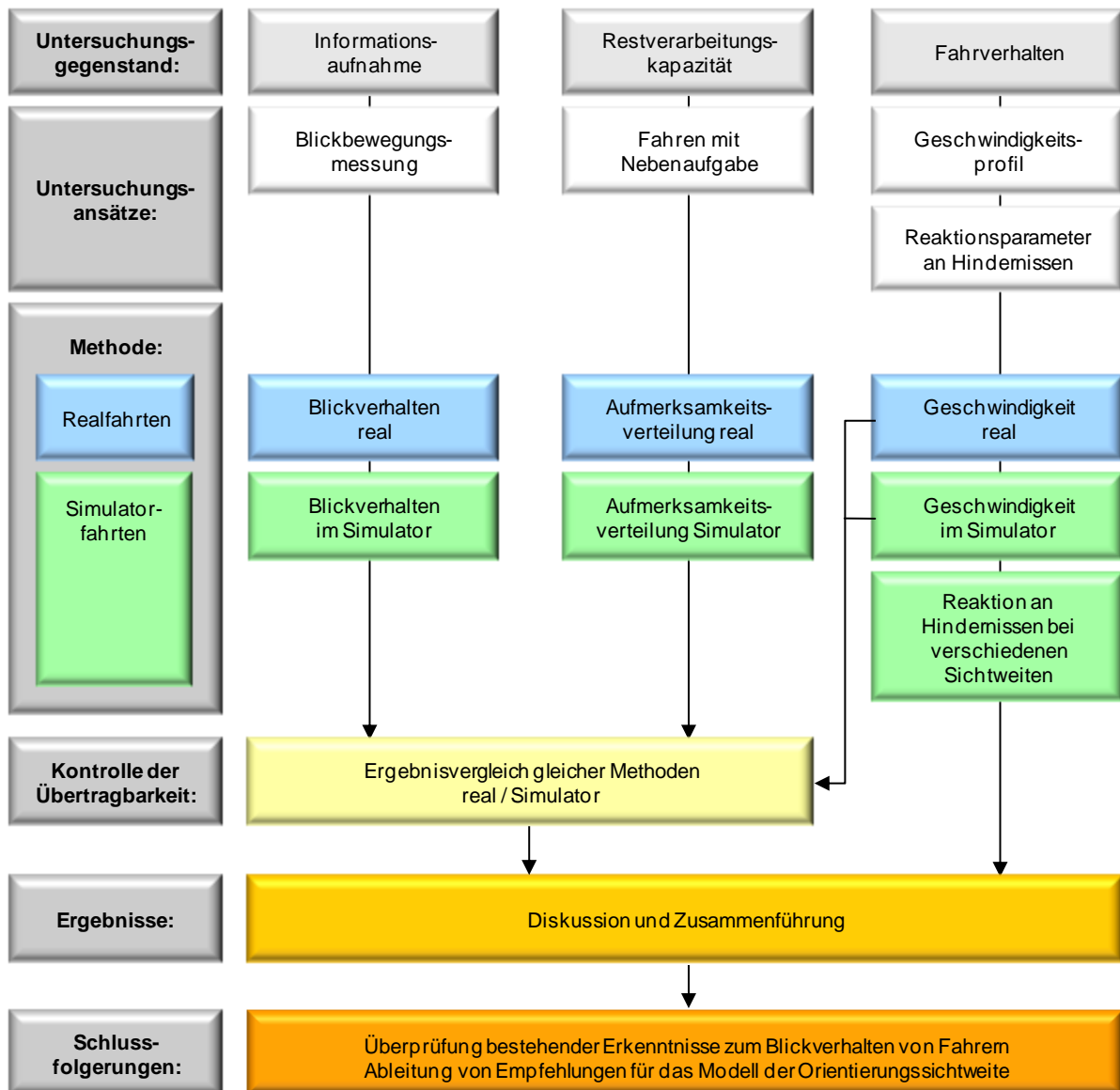


Bild 3-1: Überblick über die Untersuchungsmethodik

3.2.1 Messstrecke

Als Messstrecke für die Realfahrten wurde ein Rundkurs in der Nähe von Dresden ausgewählt. Die Gesamtlänge inklusive Ortsdurchfahrten beträgt 76,6 km, eine durchschnittliche Fahrt dauert etwa 75 min. Die Strecke umfasst Abschnitte auf einer gut ausgebauten Bundesstraße (größtenteils relationstrassiert), drei Staatsstraßen unterschiedlicher Charakteristik sowie einer Kreisstraße mit erneuerter Decke und ausgebautem Querschnitt. Die gesamte Strecke zeichnet sich durch ein relativ geringes Verkehrsaufkommen aus. Dadurch soll gewährleistet werden, dass Messungen möglichst selten durch andere Verkehrsteilnehmer beeinflusst werden.

Der auswertbare Streckenanteil beträgt 33,1 km. Er umfasst Bereiche, die

- nicht durch Ortsdurchfahrten oder Knotenpunkte beeinflusst werden (mind. 400 m außerorts bzw. nächster Ort noch nicht einsehbar),
- einen einbahnig zweistreifigen Querschnitt mit 6,00 m - 6,50 m Fahrbahnbreite haben,
- relationstrassierte und unstetige Linienführungen aufweisen sowie
- den Probanden weitestgehend unbekannt sind.

Die vorhandenen Sichtweiten erstrecken sich über ein Spektrum von 57 m (Kurve) bzw. 75 m (Kuppe¹) bis über 1.000 m. Um Veränderungen in Blick- und Fahrverhalten im Hinblick auf die Sichtweite festzustellen, wurde besonderer Wert auf Kuppen mit geringen Sichtweiten gelegt. Insbesondere die Befahrung von geraden Kuppen soll Aufschluss darüber geben, welchen Einfluss die vorhandene Sichtweite auf Blick- und Fahrverhalten ausübt. In diesen Bereichen gibt es keine Beeinflussung durch die Faktoren Krümmung und Kurvigkeit, die sich überlagernd auf Geschwindigkeitswahl und Blickverhalten (das in Kurven fast ausschließlich der Spurhaltung dient) auswirken.

Die zulässige Geschwindigkeit beträgt fast durchgängig 100 km/h. Die einzige Ausnahme bildet eine kurvenreiche Walddurchfahrt mit einer historisch „gewachsenen“ Linienführung ohne Radianrelation, die auf Tempo 80 beschränkt ist. Weitere Geschwindigkeitsbeschränkungen liegen in Knotenpunktbereichen vor, die nicht zur Auswertung herangezogen werden.

Die Streckenprofile aller Abschnitte, die für die Auswertung in Frage kommen, sind in Anhang 1 zusammengestellt. Insgesamt wurde die Strecke in 50 Einzelabschnitte unterteilt, die nach vorhandener Sichtweite und Kurvigkeit klassifiziert sind (s. u.).

Messung der vorhandenen Sichtweite

Auf dem gesamten Außerortsanteil der Messstrecke wurde die vorhandene Sichtweite gemessen. Die Messung erfolgte mit zwei Fahrzeugen, die mit GPS-Systemen desselben Typs ausgerüstet sind. Das vorausfahrende Fahrzeug besaß eine Zielpunktmarkierung in 1,00 m Höhe (ein retroreflektierender Streifen über die gesamte Fahrzeugbreite) und wurde vom hinteren Fahrzeug aus über eine Funkverbindung so dirigiert, dass diese Markierung gerade noch erkennbar war. Gewertet wurde der Punkt des ersten Verschwindens der Zielmarkierung, ein späteres Wiederauftauchen (in Folge einer tauchenden oder springenden Linienführung) bleibt unberücksichtigt.

Abhängig vom Satellitenempfang ermöglichen die GPS-Systeme die Positionsbestimmung mit einer Genauigkeit von 0,1 m bis 3,0 m. Der überwiegende Streckenanteil bietet freie Sicht zum Himmel und damit eine hochgenaue Positionsbestimmung, in wenigen dicht bewaldeten Abschnitten wurden hingegen Abweichungen bis zu 3,0 m ermittelt. Die so bestimmte Sichtweite kann daher im Extremfall um bis zu 6,0 m von der tatsächlichen abweichen. Ein Fehler dieser Größenordnung kann hier in Kauf genommen werden, da ein solcher Unterschied vom Fahrer kaum bemerkt wird und daher die Ergebnisse nicht maßgeblich beeinflusst.

Gemessen wurde die vorhandene Sichtweite generell in Intervallen von 50 m (nach Leitpfostenabstand); bei geringen Sichtweiten in Kurven oder an Kuppen in Intervallen von 25 m. Zusätzlich wurde an jeder Sichtweitenbeschränkung der Ort der minimalen Sichtweite bestimmt, um Fehler durch eine ungünstige Intervalleinteilung zu minimieren. Zwischen den Messpunkten wurde die Sichtweite linear interpoliert, was den realen Verhältnissen entspricht.

¹ Bei einer Zielpunkthöhe von 1,00 m. In Kuppenbereichen bedeutet das, dass abhängig vom Halbmesser die Straßenoberfläche selbst nur für weniger als 50 m einsehbar ist.

Abschnittseinteilung nach Kurvigkeit und Seitenraumbepflanzung

Zur Auswertung des Fahrerhaltens wurde die Messstrecke in Abschnitte vergleichbarer Charakteristik eingeteilt. Hauptkriterium bildet dabei die vorhandene Sichtweite. Der typische Verlauf eines Sichtweitenbandes ist gekennzeichnet durch die Aufeinanderfolge von einem Sichtweitenmaximum (beispielsweise vom Standort auf einer Kuppe), einem konstanten Abfall der Sichtweite bis hin zu einem Minimum (Standort kurz vor der nächsten Kuppe, so dass diese noch nicht überblickt werden kann) und einem sprunghaften Anstieg zum nächsten Maximum (im Moment des Überfahrens der Kuppe, vgl. Anhang 1). In diesen Abschnitten konstant abfallender Sichtweite, in denen die Streckencharakteristik ansonsten weitgehend unverändert bleibt, kann nach Veränderungen des Blick- und Fahrverhaltens gesucht werden. Gesucht werden diejenigen Sichtweitenbereiche, an denen sich Verhaltensweisen ändern, in erster Linie ansteigende Konzentration und Anpassungen der Geschwindigkeit.

Die einzelnen Abschnitte werden anhand ihrer Charakteristik in Gruppen eingeteilt. Von besonderer Bedeutung ist die Unterteilung in Geraden und kurvige Abschnitte, da hier a priori ein unterschiedliches Blickverhalten erwartet werden muss (COHEN, 1987). Während auf Geraden der Fluchtpunkt der Straße im Fahrerblickfeld positionsfest bleibt, verschiebt er sich während einer Kurvenfahrt kontinuierlich. Auch im Hinblick auf die Beanspruchung des Fahrers gibt es Unterschiede: Die Befahrung von geraden Abschnitten (ohne Beeinflussung durch andere Verkehrsteilnehmer) erfordert lediglich eine Beibehaltung der Fahrverhaltensparameter, auf Kurven hingegen muss durch eine Richtungsänderung und oft auch eine Geschwindigkeitsanpassung reagiert werden, was eine gesteigerte Informationsaufnahme erfordert. Die Kurvigkeit stellt daher eine entscheidende Einflussgröße auf Blickbewegungs- und Beanspruchungsmaße dar.

Von allen ausgewählten Abschnitten abfallender Sichtweiten wurde die Streckencharakteristik anhand folgender Größen erhoben:

- Kurvigkeit (KU),
- die maximale Krümmung bzw. der minimale Radius (R_{\min}),
- die Art der Sichtweitenbegrenzung (Kurve, Kuppe oder Kombination) sowie
- das Straßenumfeld (frei einsehbar oder blickdicht).

Anhand dieser Eigenschaften wurden die Abschnitte in Gruppen gleicher Charakteristik eingeteilt. Es wurde eine Unterteilung in 4 Gruppen vorgenommen:

- **Geraden:**
KU < 25 gon / km
- **leicht kurvige Abschnitte (LKA):**
25 gon / km < KU < 100 gon / km
- **stark kurvige Abschnitte (SKA):**
KU > 100 gon / km
- **Abschnitte mit Singularitäten:**
KU < 100 gon / km und
 $R_{\min} < 200$ m, $L_{R\min} > 40$ m

Die Einteilung der Kurvigkeitsklassen basiert neben den Vorgaben der Entwurfsrichtlinien (nach RAS-L [FGSV 1995] ist bei Strecken mit einer Fahrbahnbreite von 6,00 m ab einer Kurvigkeit von ca. 125 gon/km mit einem Einfluss auf die Geschwindigkeit zu rechnen) auf der Beurteilung der Messstrecke. Leicht kurvige Abschnitte sind Streckensequenzen, in denen Kurven auftreten, die i.d.R. keine Reduzierung der Geschwindigkeit erfordern. Stark kurvige Abschnitte hingegen bedingen eine solche Anpassung.

Innerhalb dieser Gruppen werden die Abschnitte weiterhin nach dem Straßenumfeld unter-

schieden. Hier genügt eine Unterteilung in die Kategorien „blickdichtes Umfeld“ und „freies Umfeld“ (Tab. 3-1), die sich nach der Verfügbarkeit alternativer Blickziele richtet. Die Straßenumfeldgestaltung wird in Betracht gezogen, da sie einen Einfluss auf vorhandene alternative Blickziele zur Straße haben kann. So gibt es innerhalb von Walddurchfahrten auch bei unzweifelhaft ausreichender Sichtweite kaum einen Grund, den Blick von der Straße abzuwenden, da keine optischen Reize vom Umfeld ausgehen. Im Gegensatz dazu bietet ein freies Straßenumfeld meist mehr Ablenkung.

Kategorie	Anzahl Abschnitte	Umfeld	Anzahl Abschnitte
Gerade ($KU < 25 \text{ gon/km}$)	23	frei	17
		blickdicht	6
Leicht kurvige Abschnitte (LKA) ($25 \text{ gon/km} < KU < 100 \text{ gon/km}$)	13	frei	13
		blickdicht	-
Stark kurvige Abschnitte (SKA) ($KU > 100 \text{ gon / km}$)	5	frei	3
		blickdicht	2
Singularität ($KU < 100 \text{ gon / km}$ und $R_{\min} < 200 \text{ m}$, $L_{R\min} > 40 \text{ m}$)	9	frei	9
		blickdicht	-

Tab. 3-1: Unterteilung der Messstreckenabschnitte nach Kurvigkeit und Straßenumfeld

Querschnittsmessungen

Zur Einordnung des Fahrverhaltens der Probanden im Gesamtfahrerkollektiv wurden Querschnittsmessungen durchgeführt. An zwei Querschnitten auf der Untersuchungsstrecke wurde die Geschwindigkeit frei fahrender Pkw durch Radarmessungen bestimmt. Die Messung erfolgte in beiden Richtungen, insgesamt stehen also vier Vergleichsmessungen zur Verfügung. Pro Messstelle und Richtung wurden mindestens 100 frei fahrende PKW erfasst und die maßgebenden Perzentilgeschwindigkeiten V_{15} , V_{50} , V_{85} und V_{95} bestimmt. Die zulässige Geschwindigkeit liegt jeweils bei 100 km/h; die Messstellen waren im Bereich von Lageplangeraden mit geringer Längsneigung angeordnet.

Ausgehend von der Zusammensetzung des Probandenkollektivs, das aus vergleichsweise leistungsfähigen Fahrern besteht (vgl. Kap. 3.2.3) und unter Berücksichtigung des leistungsstarken Messfahrzeugs wurde eine Einordnung der Probandengeschwindigkeiten im oberen Bereich der streckenspezifischen Geschwindigkeiten erwartet. Die aufgezeichneten Geschwindigkeitsprofile der Versuchsfahrten bestätigen diese Einschätzung, sie sind in Anhang 2 aufgeführt. Die Messungen dienen dem Nachweis der Übertragbarkeit der Probandenfahrten auf das streckenübliche Verhalten. Erkenntnisse im Hinblick auf Sichtweiteinflüsse lassen sich daraus nicht ableiten.

3.2.2 Messfahrzeug

Die Durchführung von Probandenfahrten erfolgte mit dem Messfahrzeug des Lehrstuhles Gestaltung von Straßenverkehrsanlagen der TU Dresden, einem BMW 525 d Touring. Dieser verfügt über eine Nennleistung von 177 PS / 130 kW. Einflüsse auf das gemessene Fahrverhalten, die aus mangelnder Leistung des Fahrzeugs z.B. an Steigungsstrecken entstehen, sind somit weitgehend ausgeschlossen.

Folgende fahrverhaltensrelevante Daten wurden aufgezeichnet:

- momentane Geschwindigkeit (vom Fahrzeug – CAN-Bus)
- Längs- und Querschleunigung (vom Fahrzeug – CAN-Bus)
- Bremspedalbetätigung (vom Fahrzeug – CAN-Bus)
- Fahrzeugposition (Applanix DGPS-System)

Zur Erfassung des Blickverhaltens steht ein System vom Typ Smart Eye Pro 2.5 zur Verfügung (Bild 3-3). Die Messung erfolgt berührungslos (*remote tracking*) durch zwei Infrarotkameras (Augenkameras), die an der Frontscheibe des Fahrzeugs befestigt sind. Eine zusätzliche Szeneriekamera erfasst den Sichtbereich des Fahrers durch die Frontscheibe. Diese Methode bietet im Vergleich zu den bisher häufig verwendeten kopfbasierten Systemen zahlreiche Vorteile:

- Keine intrusive Belastung des Fahrers (Druckreize, Gewicht, ungewohnte Sicht)
- Freie Sicht ohne Einschränkung des Blickfeldes
- Keine häufige Neukalibrierung aufgrund des Verrutschens am Kopf der Probanden angebrachter Messsysteme. Es wird einmalig ein Kopfmodell der Testperson erstellt, welches sowohl für längere Fahrten als auch für verschiedene Fahrten in zeitlichem Abstand ohne Genauigkeitsverlust verwendet werden kann.
- Bereitstellung absoluter (Welt-)Koordinaten. Das Anbringen der Kameras im Fahrzeug ermöglicht die Zuordnung der erfassten Blickvektoren relativ zur Position des Fahrzeuges im Straßenraum. Damit entfällt die zusätzliche und oft mit beträchtlichen Fehlern behaftete Berechnung der Kopfposition.

Aufgrund dieser Eigenschaften ist der messtechnische Aufwand im Vergleich zu vorangegangenen Studien geringer, was umfangreichere Messreihen mit gleichbleibend hoher Genauigkeit ermöglicht. Die so erzielten Ergebnisse sind demzufolge auf einer breiteren Basis abgesichert als zahlreiche bisherige Studien und besser auf die Praxis übertragbar.

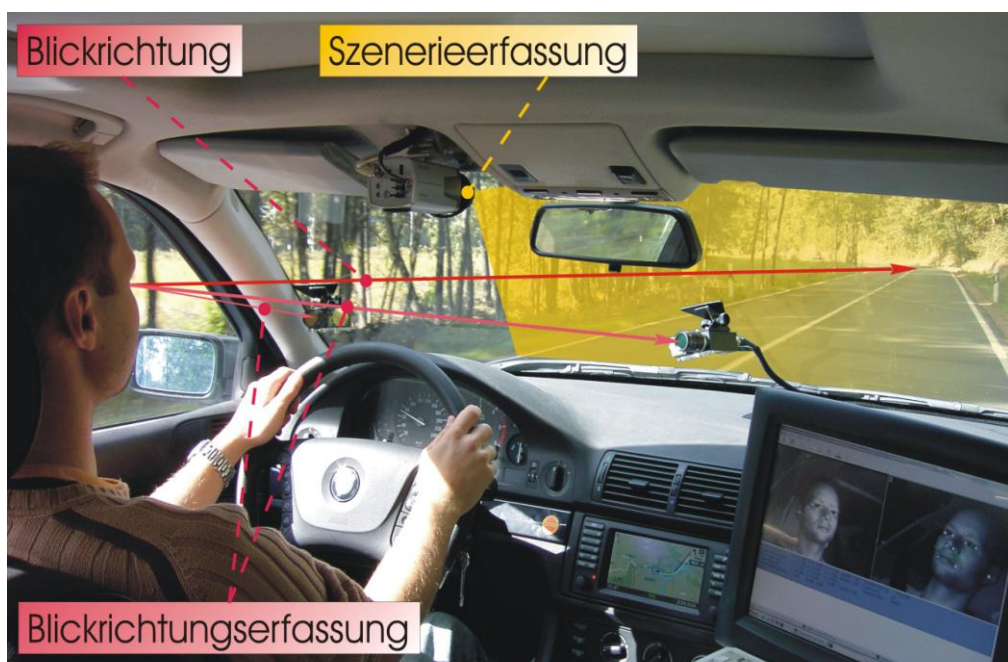


Bild 3-3: Blickbewegungsmesssystem Smart Eye im Messfahrzeug des Lehrstuhls „Gestaltung von Straßenverkehrsanlagen“ der TU Dresden

Die Kopfposition wird durch die Festlegung und Verfolgung von Kontrastpunkten am Kopf des Probanden gemessen; die Pupillenbewegung durch Hornhautreflexion erfasst. Zur Vermeidung störender Effekte aus variierenden Lichtverhältnissen sind zwei aktive Infrarotspots vorhanden.

Die Messgenauigkeit des Systems wurde in Vorversuchen unter Laborbedingungen ermittelt. Die Genauigkeit des Blickvektors kann mit etwa $\pm 1,6^\circ$ angegeben werden (WEICHERT, 2005). Erfahrungen des Interdisziplinären Zentrums für Verkehrswissenschaften in Würzburg (IZVW) mit einem 4-Kamera-System im Würzburger Fahr Simulator bestätigen dies. Allerdings sind im Simulator die Lichtverhältnisse sehr viel konstanter und damit günstiger für eye-tracking als unter Feldbedingungen. Eine Überprüfung der eye-tracking-Genauigkeit im Feld durch Vorversuche war Bestandteil der Untersuchung (Kap. 3.2.4). Unter Versuchsbedingungen ist eine Genauigkeit des gemessenen Blickvektors von etwa 3° realistisch, bei Blendung der Probanden durch Lichtwechsel sind größere Abweichungen möglich.

Aufgezeichnet werden die folgenden Daten:

- Kopfposition relativ zur Fahrzeugposition
- Blickvektor relativ zur Kopfposition
- Szenerievideo mit:
 - aktuellem Blickpunkt
 - Gesamtbereich der letzten 5 Blickpunkte (entspricht 1/6 s)

Das Video der Szeneriekamera ermöglicht außerdem die Beurteilung der Verkehrssituation und das Ausschließen von Streckenabschnitten, in denen der Blick des Probanden durch andere Verkehrsteilnehmer abgelenkt wurde. Solche Abschnitte wurden von der Auswertung ausgeschlossen, da die Orientierung dann nicht mehr anhand von Streckenmerkmalen erfolgt (s. Kap. 2.6).

Um die Beanspruchung von Fahrern bei verschiedenen Sichtweiten zu untersuchen, wurden den Fahrern Sekundäraufgaben gestellt. (s. Kap. 3.5). Die Aufgabe bestand in der Reaktion auf Informationen, die auf einem Bildschirm dargeboten wurden. Dazu ist im Beifahrerraum, in bequemer Reichweite des Fahrers, ein Touchscreen angebracht, der als Ein- und Ausgabegerät zugleich fungiert. Der Bildschirm ist so positioniert, dass der Fahrer zur Bearbeitung der Nebenaufgabe den Blick von der Straße abwenden muss.

3.2.3 Probandenkollektiv

Die Versuche wurden mit 20 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der TU Dresden im Alter von 26 bis 39 Jahren durchgeführt. Keine der Versuchspersonen trug eine Sehhilfe (Brille oder Kontaktlinsen). Alle Teilnehmer waren erfahrene Fahrer, d.h. sie besaßen den Führerschein seit mindestens 6 Jahren, verfügten über einen eigenen PKW und mehr als 60.000 km Fahrerfahrung. Die Homogenität des Probandenkollektivs wurde angestrebt, um die Ergebnisse zufallskritisch abzusichern. Es erfolgte deshalb eine Orientierung am „Normalfahrer“, d.h. an der Personengruppe, die statistisch die größten Fahrleistungen erbringt. Auf eine zusätzliche Berücksichtigung von Extremgruppen wie z.B. Fahranfängern oder älteren Fahrern wurde verzichtet, um die Anzahl der notwendigen Versuchsfahrten in einem wirtschaftlich vertretbaren Rahmen zu halten. Für die Interpretation der Ergebnisse ergibt sich daraus die Konsequenz, dass die untersuchten Personen eher den leistungsfähigeren Teil im Gesamtkollektiv repräsentieren, in abgeleiteten Schlussfolgerungen ist deshalb ein zusätzlicher Sicherheitszuschlag zu berücksichtigen.

Die Strecke war den Probanden vor der ersten Fahrt nicht bekannt. Dadurch ist sichergestellt, dass Informationen über den Streckenverlauf nur aus dem Sichtfeld entnommen werden können und nicht durch vorhandenes Wissen überlagert werden.

3.2.4 Erfassung und Auswertung von Blickbewegung und Fahrverhalten

Das Blickbewegungsmessverfahren wurde erstmalig in dieser Form in Realfahrten eingesetzt, so dass vor den Versuchen unklar war, mit welcher Genauigkeit die Blickbewegungsmessung arbeitet und welche der aus der Literatur bekannten Maße angewendet werden können. Die Grundlage für die Verwendung der unten aufgeführten Maße bildet die Erkennung von Fixationen und Sakkaden aus den Rohdaten. Diese erfolgte nach einem Verfahren, das auf dem Algorithmus von JACOB (1995) beruht und im Rahmen von Vorversuchen anhand von Realfahrt- und Simulatormessungen getestet wurde. Dadurch ist eine übereinstimmende Definition der Blickverhaltensmessung gewährleistet. Diese ist bei der Fixationserkennung besonders wichtig, denn wie KARSH / BREITENBACH (1983) gezeigt haben, können unterschiedliche Parametrisierungen von Fixationsalgorithmen großen Einfluss auf die Ergebnisse haben.

Aus der Literatur sind verschiedene Blickverhaltensmaße bekannt, die das zeitliche Verhalten der visuellen Aufmerksamkeitsverteilung, die räumliche Konzentration des Blickverhaltens und die Intensität der Informationsaufnahme anzeigen. Das liegt daran, dass sehr unterschiedliche Messsysteme verwendet werden, deren Aufbau und Leistungsfähigkeit differieren und die für ganz unterschiedliche Untersuchungszwecke eingesetzt werden. Aus dem breiten Spektrum dieser Maße wurden nach Sichtung der Daten der Pilotversuche diejenigen ausgewählt, die die größte Sensitivität und Aussagekraft in Bezug auf Sichtweiteneffekte besitzen und geeignet sind, das Blickverhalten von Fahrern unter diesem Aspekt zu beschreiben. Dabei sollen zeitliche sowie räumliche Maße berücksichtigt werden.

Zeitliche Blickbewegungsmaße:

- *Arithmetisches Mittel der Fixationsdauern*: Situationen, die lange Fixationsdauern erfordern, sind schwieriger als solche, bei denen kurze Fixationsdauern gemessen werden. Eine Erhöhung der mittleren Fixationsdauer auf Landstraßen deutet auf eine höhere Beanspruchung des Fahrers hin (vgl. Kap. 2.2.2).
- *Zeitanteil Fixationen*: Bei verschiedenen Probanden, z.T. mit unterschiedlicher Fahrerfahrung, wurde unterschiedliches Blickverhalten bei gleicher Aufgabenschwierigkeit festgestellt. Dies bestätigte sich in der Auswertung der Pilotversuche. Aufmerksamkeit kann sich demnach in wenigen langen oder vielen kurzen Fixationen ausdrücken. In beiden Fällen ist der Zeitanteil der Fixationen höher als bei unaufmerksamen Blickverhalten, welches den Blick schweifen lässt und so mehr Zeit für Sakkaden verwendet. Zudem geht bei größerer Aufmerksamkeit der Anteil der Trackingausfälle zurück, da weniger Kopfdrehungen zur Seite, Tachoblicke und Blicke ins weiter entfernte Straßenumfeld auftreten. Der Zeitanteil, der auf Fixationen entfällt, wird daher als Maß für die Aufmerksamkeit interpretiert.
- *Prozentualer Zeitanteil der Blickrichtung auf den Hauptaufmerksamkeitsbereich (percent road center - PRC)*: Die Fixationsdauern und -zeitanteile sagen nichts darüber aus, wohin der Blick gerichtet ist. Die Auswertung wird daher um dieses Maß ergänzt. In der Arbeit von VICTOR U.A. (2005), in der es erstmals verwendet wurde, wird dazu ein 20° breites und 15° hohes Fenster um den Modalwert der Blickrichtung gelegt. Der Anteil der in dieses Fenster fallenden Blickmessungen wird in Prozent angegeben und als percent road center (PRC) bezeichnet. Für die vorliegende Untersuchung wird diese Vorgehensweise angepasst: Anstelle des Modalwertes als Fensterzentrum wird in den Videoaufzeichnungen der Fahrt an jedem Fixationsbeginn der Fluchtpunkt der Straße markiert und um diesen Punkt ein Fenster von $30^\circ \times 15^\circ$ definiert. (Unter Fluchtpunkt der Straße wird hier der letzte einsehbare Punkt in der Mitte der Straßenfläche verstanden). Die Verbreiterung des Fensters sorgt dafür, dass auch bei geringen Sichtweiten die volle Straßenbreite innerhalb des Fensters liegt. Gewertet wird der Anteil der Fixationen innerhalb einer Sichtweitenklasse, der innerhalb dieses Fensters liegt und somit der Voraussicherung dient.

Räumliche Blickbewegungsmaße:

- *Scanpfadlänge*: Als Scanpfadlänge wird die euklidische Distanz (gemessen in Grad) zwischen aufeinander folgenden Fixationsorten bezeichnet. Lange Scanpfade sind ein Zeichen für ausgedehnte visuelle Suche (GOLDBERG & KOTVAL, 1999). Konzentriert sich der Blick auf einen bestimmten Bereich, nimmt die Scanpfadlänge ab.
- *Feldindex (Spatial Density Index)*: Ein Maß für die Anzahl verschiedener angeblickter Orte (das Blickfeld wird für die Auswertung in quadratische Segmente mit 3 Grad Seitenlänge aufgeteilt). Das Maß ist definiert als die Anzahl an Segmenten, auf die mindestens eine Fixation fällt, dividiert durch die Gesamtzahl der Segmente. Geringe Werte zeigen eine gerichtete Suche an. Eine gemeinsame Interpretation mit einem Abstandsmaß zeigt, ob sich die angeblickten Segmente eng beisammen oder in großem Abstand zueinander befinden. Ein Ansteigen des Feldindex bei gleichzeitiger Verringerung der Scanpfadlänge deutet also auf das intensive Absuchen eines engen Bereichs.
- *Standardabweichung des Blickwinkels*: VICTOR U.A. (2005) fanden einen Konzentrations-effekt beim Bearbeiten auditorisch dargebotener Aufgaben. Ein ähnlicher Effekt kann bei schwierigen Sichtweitenbedingungen erwartet werden, wenn sich der Blick zum Fluchtpunkt der Straße konzentriert. Die Aussage dieses Maßes lehnt sich stark an die der Scanpfadlänge an, es reagiert aber empfindlicher auf Messfehler. In den Versuchen wurden sehr ähnliche Ergebnisse für beide Maße festgestellt. Auf eine Darstellung der Standardabweichung in den Ergebnissen wird daher verzichtet.

Zeitliche und räumliche Blickbewegungsmaße dienen der Beschreibung des Wahrnehmungsverhaltens und der empfundenen Beanspruchung. Bisher gibt es jedoch keine gesicherte Definition von „normalem“ oder „gutem“ Blickverhalten, und es sind große personenspezifische Unterschiede zu vermuten. Die Analyse konzentriert sich daher auf die Beobachtung von Veränderungen, die mit der vorhandenen Sichtweite in Zusammenhang gebracht werden können.

Fehlende Orientierung sollte sich auch anhand eines abweichenden Fahrverhaltens bemerkbar machen. Daher werden ergänzend fahrdynamische Maße ausgewertet, um einen Zusammenhang zwischen dem die Informationsaufnahme beschreibenden Blickverhalten und den daraus resultierenden Entscheidungen zu untersuchen:

Fahrverhaltensmaße:

- *Geschwindigkeit*
- *maximale Verzögerung*
- *auf tretende Bremsbetätigungen*

Ein verändertes Blickverhalten allein kann noch nicht als Grundlage für ein Sichtweitenmodell im Straßenentwurf gelten. Die Auswertung der fahrdynamischen Maße zielt daher auf die Auswirkungen unterschiedlicher Sichtweiten auf das Fahrverhalten. Zu erwarten sind hier geringe Variationen als Zeichen beginnender Unsicherheit; starke (und damit auf sehr geringe Sichtweiten angepasste) Verzögerungen sind nach den Erfahrungen der Literatur seltene Ausnahmen (s. Kap. 2.4.4). Von besonderem Interesse ist zusätzlich der Zeitpunkt einer Fahrerreaktion. Fällt dieser mit dem Zeitpunkt einer Blickverhaltensveränderung zusammen (unter Berücksichtigung der Verarbeitungszeit), so kann auf eine Reaktion auf die vorhandene Sichtweite geschlossen werden. Bei Maßen der Quereschleunigung, die Veränderungen in der Spurhaltung aufdecken sollen, muss zusätzlich die vorhandene Krümmung berücksichtigt werden, deren Verlauf bekanntlich starke Überlagerungen mit der Sichtweite aufweist.

Möglichkeiten und Grenzen der Blickbewegungsmessung in Realfahrten

Die Messgenauigkeit der Blickbewegungsmessung in Realfahrten hängt von verschiedenen Faktoren ab. Am wichtigsten ist die grundsätzliche Eignung jedes Probanden, die von physiognomischen Eigenschaften wie der Kopfform, dem Aussehen und der Position der Augen und Ohren, der Kopf- und Gesichtsbehaarung sowie der Hautstruktur abhängt. Darüber hinaus erlaubt die Arbeitsweise der berührungslosen Blickbewegungsmessung keine Sehhilfen, mit Ausnahme weicher Kontaktlinsen.

Vorversuche unter Laborbedingungen ergaben, dass die Messgenauigkeit des Blickvektors bei geeigneten Testpersonen Werte um $1,6^\circ$ erreicht (WEICHERT 2005). Diese Bedingungen liegen jedoch im Messeinsatz selten unverändert vor. Die größte Beeinflussung ergibt sich durch wechselnde Lichtverhältnisse. Diese sind für das Messsystem ohne Belang, umso mehr aber für den Probanden, der auf Blendung durch Zusammenkneifen der Augen reagiert. Dadurch wird die Augenerkennung erschwert, und die Genauigkeit der Messung sinkt. Diese Effekte treten temporär auf, sind bei unterschiedlichen Personen verschieden stark ausgeprägt (Stichwort Blendempfindlichkeit) und können nicht direkt mit der Messung erfasst werden. Die einzige Möglichkeit des Auffindens und Beseitigens solcher Fehlerquellen liegt in der manuellen Sichtung der Videoaufzeichnung und dem Vergleich sonniger und schattiger Abschnitte der Messstrecke. In einigen Fällen ergibt sich durch Blendeffekte eine nahezu konstante Verschiebung des projizierten Blickpunktes in vertikaler Richtung, was durch manuelle Korrektur ausgeglichen werden kann. Diese Korrektur wirkt sich jedoch nur auf blickzielabhängige Maße aus; die aus den Rohdaten berechneten zielunabhängigen Maße können nicht korrigiert werden. Sie stehen für den betreffenden Abschnitt nicht zur Verfügung. Eine solch starke Blendung trat während der Messungen jedoch nur sehr selten auf.

Generell treten Lichtwechseleffekte bei fast jeder Fahrt auf. Die Stärke der Auswirkungen auf die Genauigkeit ist von der Lichtintensität und der Empfindlichkeit der spezifischen Person abhängig. Die Auswertung der Pilotversuche ergab für einen als geeignet eingestuften Probanden unter verschiedenen Lichtverhältnissen durchschnittliche Messgenauigkeiten zwischen $1,6^\circ$ und $3,5^\circ$. Streuungen in der Messgenauigkeit sind also sowohl zwischen verschiedenen Probanden als auch verschiedenen Streckenabschnitten derselben Fahrt zu erwarten.

Die Messungen finden im realen Verkehrsraum statt. Dies ist notwendig, um die Originalität der äußeren Bedingungen zu wahren und reales Fahrverhalten abzubilden. Andere Verkehrsteilnehmer im Blickfeld der Versuchspersonen beeinflussen allerdings deren Blickverhalten – als fahrrelevante Objekte ziehen sie den Blick auf sich. Dies beeinflusst die Auswertung von zeitlichen sowie räumlichen Fixationsmaßen, die auf die Streckencharakteristik bezogen werden. Die betreffenden Bereiche müssen daher mittels manueller Sichtung aussortiert werden. Ebenso ist die Verwendung zeitlicher Maße nur eingeschränkt möglich, da die Stückelung der Aufzeichnung eine kontinuierliche Betrachtung über längere Zeiträume nicht erlaubt. Es können jedoch alle Blickmaße, deren Auswertung kein Zeitfenster erfordert, ausgewertet werden.

Aufbereitung der Messdaten

Zur Erkennung der Fixationen aus den Systemdaten wird ein räumlich-zeitlich arbeitender Algorithmus, der sogenannte JACOB-Algorithmus (JACOB 1995), verwendet. Algorithmen dieser Art haben sich im Vergleich mit rein räumlich oder zeitlich arbeitenden Verfahren als robuster und zuverlässiger erwiesen (GOLDBERG, KOTVAL 1999). Der JACOB-Algorithmus teilt die Daten in einzelne Sequenzen mit einer festen Länge von 100 ms. Bei der verwendeten Aufzeichnungsfrequenz von 30 Hz entspricht das 3 Datensätzen. Ändert sich innerhalb einer Sequenz die Blickrichtung um weniger als $0,5^\circ$, wird der Beginn einer Fixation registriert. Der Mittelwert der Positionen innerhalb dieser Sequenz wird als Fixationsort definiert. Jeder folgende Blickpunkt, der im Umkreis von 1° um den Fixationsort liegt, wird als Fortsetzung der Fixation interpretiert. Das Ende der Fixation wird registriert, wenn nachfolgende Blickpunkte für mindestens 100 ms außerhalb dieses Umkreises liegen.

In Vorversuchen unter lichtneutralen Bedingungen und bei Realfahrten wurde eine Anpassung des Algorithmus an das verwendete Messsystem getestet. Diese erfolgt durch eine Erweiterung der räumlich-zeitlichen Bereiche, innerhalb derer eine Fixation beginnt oder endet. Für die meisten Messungen, die eine gute Datenqualität besaßen, haben sich die folgenden Werte als angemessen erwiesen (WEICHERT 2005):

- Fixationsbeginn: Blickrichtung 100 ms lang innerhalb von $0,6^\circ$
- Fixationsende: Blickrichtung 100 ms lang außerhalb von $1,6^\circ$ um den Fixationsort

Um auf unterschiedliche Messgenauigkeiten reagieren zu können, wurde eine Anpassung des Algorithmus an jeden einzelnen Probanden erwogen. Dafür wurden verschiedene Wertekombinationen innerhalb der ermittelten Grenzwerte auf alle Probanden angewandt. Die dadurch erzielbaren Veränderungen von Fixationsanzahl und -dauer erwiesen sich jedoch als minimal. Eine Erhöhung der Grenzwerte erzeugt geringfügig mehr und länger andauernde Fixationen, der qualitative Verlauf der Blickmaße über einen Streckenabschnitt ändert sich hingegen nicht. Von einer Einzelanpassung wurde daher auch im Sinne der besseren Vergleichbarkeit abgesehen und für alle Probanden die genannten Grenzwerte verwendet.

Liegen die Fixationen einer Fahrt vor, können Maße des Blickverhaltens berechnet werden. Dabei muss zwischen blickzielunabhängigen und blickzielabhängigen Maßen unterschieden werden. **Blickzielunabhängige Maße** bewerten die zeitliche und räumliche Verteilung von Fixationen, ohne dass es dabei eine Rolle spielt, was angeblickt wurde. Sie können aus den Logfiles des Systems automatisiert berechnet werden und stehen daher schnell zur Verfügung. Es wird hauptsächlich unterschieden zwischen weiträumiger Suche und konzentriertem Blick in eine bestimmte Richtung sowie zwischen kurzen, schnellen und langen, „tiefen“ Fixationen. Die Überlagerung dieser Informationen, ergänzt durch die Streckencharakteristik, kann Aufschluss über Suchverhalten und Anstrengung der Fahrer geben. Teilweise treten jedoch Interpretationsprobleme auf: Betrifft ein langer, konzentrierter Blick ein fahrrelevantes Objekt, z.B. den Fluchtpunkt der Straße, und deutet damit auf erhöhte Anspannung und möglicherweise den Wunsch auf mehr Voraussicht an, oder ruht er z.B. auf Objekten im Seitenraum, die mit der Fahraufgabe nichts zu tun haben, was wiederum als Indiz für mehr als ausreichende Voraussicht gewertet werden müsste?

Blickzielabhängige Maße ergänzen daher die Untersuchungen um die Information, wohin der Blick des Fahrers in einer bestimmten Situation gerichtet ist. Da die Fahrersicht in Realfahrten nicht (wie im Simulator) systemimmanent vorliegt, muss hier auf manuelle Auswertung der Videoaufzeichnung zurückgegriffen werden. Dabei wird in jedem einen Fixationsbeginn repräsentierenden Videobild der Fluchtpunkt der Straße markiert, der als Zentrum des Hauptaufmerksamkeitsbereiches angenommen wird (Bild 3-4). Der Hauptaufmerksamkeitsbereich erfasst so den Fahrraum am Fluchtpunkt komplett, auch bei geringen Sichtweiten. Eine noch genauere Identifikation des Blickziels ist auf diese Entfernung nicht zuverlässig möglich. Das Maß PRC (percent road center) als Anteil der in den Hauptaufmerksamkeitsbereich entfallenden Fixationen kann Aufschluss darüber geben, welcher Anteil der optisch aufgenommenen Informationen fahrrelevant ist.



Bild 3-4: Hauptaufmerksamkeitsbereich bei sehr geringer Sichtweite

3.3 Durchführung der Fahrten

Die Messfahrten auf realer Strecke fanden grundsätzlich bei Trockenheit statt, um Abweichungen im Fahrverhalten auszuschließen, die durch unterschiedliche Fahrbahnzustände hervorgerufen werden. Zudem hat die Betätigung der Scheibenwischer Verzerrungen in der Blickbewegungsmessung zur Folge, da die Wischbewegung unwillkürliche Augenfolgebewegungen auslöst.

Starke Sonneneinstrahlung kann durch die damit einhergehende Blendung der Probanden ebenfalls Auswirkungen auf die Messergebnisse haben (das Tragen von Sonnenbrillen ist nicht möglich). Diese können jedoch durch ein geeignetes Kalibrierungsverfahren, in dem der Proband bereits den gleichen Lichtverhältnissen wie während der Fahrt ausgesetzt ist, reduziert werden. Ein Verzicht auf Fahrten bei Sonneneinstrahlung war nicht möglich.

Alle Probanden wurden vor der Fahrt auf ihre Eignung für die Blickbewegungsmessung getestet. Die Genauigkeitskontrolle erfolgte, indem die Versuchspersonen aufgefordert wurden, bestimmte markante Punkte im Straßenraum anzublicken. Dieser Vorgang lässt sich anhand der Videoaufzeichnung der Szeneriekamera in Echtzeit überprüfen, und es kann eine Abschätzung der Messgenauigkeit getroffen werden. Vorausgehende Untersuchungen (WEICHERT 2005) haben gezeigt, dass die Genauigkeit während einer Messung konstant bleibt, so dass die Zuverlässigkeit im Voraus visuell überprüft werden kann.

Da für die Kalibrierung ein spezielles Umfeld mit geeigneten Umgebungspunkten notwendig war, fand sie räumlich getrennt von der Messstrecke statt. Die dadurch notwendige Überführungsfahrt wurde zur Eingewöhnung an Fahrzeug und Systeme genutzt. Der Proband sollte seine eventuelle Scheu vor dem Messfahrzeug ablegen, sich auf dessen fahrdynamische Möglichkeiten einstellen (da sich diese in den meisten Fällen vom eigenen Wagen unterscheiden) und lernen, die am Rande seines Gesichtsfeldes angeordneten Kameras zu ignorieren. Auf diese Weise sollte ein von der natürlichen Fahrweise abweichendes Verhalten, das auf die ungewohnte Umgebung zurückzuführen ist, vermieden werden.

Für die Messfahrt wurden den Probanden keine speziellen Verhaltensvorgaben gegeben – schließlich soll unbeeinflusstes Fahren untersucht werden. Es galten die Vorgaben der StVO, deren Einhaltung den Fahrern jedoch selbst überlassen blieb. Auch zum Blickverhalten erhielten die Probanden keine besonderen Hinweise; Untersuchungen von BLAAUW und RIEMERSMA (1975) haben gezeigt, dass es eine gezielte Beeinflussung des eigenen Blick-

verhaltens (z.B. um als besonders guter Fahrer zu gelten) nicht gibt.

Da für die Auswertung des Blickverhaltens andere Fahrzeuge im Blickfeld als Störfaktor gelten, wurden die vorhandenen Ortsdurchfahrten bei Bedarf genutzt, um anzuhalten und den Verkehr abfließen zu lassen. Ein Einfluss dieser kurzen Stopps auf das Geschwindigkeitsverhalten war nicht zu befürchten, da die Ortsdurchfahrten ohnehin zu einer Reduzierung der Geschwindigkeit zwingen und alle auswertbaren Abschnitte einen Mindestabstand von 400 m von Ortschaften haben, so dass ausreichend Raum bleibt, um die Geschwindigkeit wieder auf Außerortsniveau anzugleichen. Die einzige Ausnahme betrifft Streckenabschnitt 34, die Zufahrt auf eine Kuppe direkt im Anschluss an eine Ortschaft. Dieser Abschnitt stellt eine Möglichkeit dar, das Orientierungsverhalten bei geringeren Geschwindigkeiten sowie während des Beschleunigungsvorganges zu untersuchen und wird daher gesondert betrachtet.



Bild 3-5: Kalibrierung der Szeneriekamera anhand markanter Umgebungspunkte (WEICHERT 2005)

3.4 Auswertung in Sichtweitenklassen

Zur Untersuchung der Veränderungen des Blickverhaltens beim Durchfahren eines Einzelabschnitts wird dieser in Sichtweitenklassen unterteilt. Dabei stehen sich zwei Anforderungen konträr gegenüber: Die Erkennung von Grenzbereichen, an denen signifikante Veränderungen eintreten, erfordert eine möglichst feine Unterteilung in viele Klassen. Dagegen unterliegt das Blickverhalten naturgemäß großen Streuungen, so dass zuverlässige Durchschnittswerte erst anhand einer größeren Datenmenge gebildet werden können, was für eine gröbere Unterteilung spricht.

Als sinnvoller Kompromiss wurde eine Klassenbreite von 25 m gewählt. Bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h bedeutet das, dass eine solche Klasse in ca. 1 s durchfahren wird. Die durchschnittliche Fixationsdauer beim Autofahren beträgt ca. 0,3 s (SCHWEIGERT 2003), so dass die Registrierung von etwa drei Fixationen pro Klasse zu erwarten ist. Ausgehend von der geringsten an einer Kuppe gemessenen Sichtweite von 75 m beginnt die Klasseneinteilung mit der Klasse „Sichtweite < 100 m“, dieser Bereich liegt bereits unterhalb der erforderlichen Haltesichtweite für 100 km/h und ist für eine Modellbildung im Hinblick auf die Orientierungssichtweite von geringer Relevanz, zur Beschreibung der Blickverhaltensänderung jedoch notwendig.

Für große Sichtweiten über 300 m ist eine solch feine Unterteilung nicht mehr notwendig – Sichtweiten dieser Größenordnung lassen sich nicht im Verhalten differenzieren. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass die Sichtweitenmaxima sehr unterschiedliche Beträge aufweisen, die aber möglichst oft in einer Klasse zusammengefasst werden sollen, wird bei Sichtweiten ab 300 m eine gröbere Klasseneinteilung (50 m Klassenbreite, letzte Klasse 100 m) getroffen. Eine übersichtlichere Darstellung ist ein Nebeneffekt dieser Vorgehensweise.

3.5 Nebenaufgabe

In einer zweiten Versuchsreihe wurde die Beanspruchung der Probanden unter verschiedenen Sichtweiten anhand einer Nebenaufgabe (Sekundäraufgabe) untersucht. Dabei wurde von der Hypothese ausgegangen, dass die Aufgabenschwierigkeit des Fahrens im ungebundenen Verkehr maßgeblich von der vorhandenen Sichtweite beeinflusst wird (insbesondere auf geraden Strecken), und dass der Fahrer seine visuelle Aufmerksamkeit auf Kosten natürlicher wie künstlicher Sekundäraufgaben auf die Straße konzentriert, wenn die Sichtweite abnimmt.

Die Nebenaufgabe bestand aus einer Zielwortsuche in kurzen Textzeilen, die in einer vertikalen Lauftextdarstellung dargeboten werden (wie der Abspann eines Kinofilms). Bei zunehmend geringeren vorhandenen Sichtweiten ist zu erwarten, dass die Koordination der zwei Aufgaben schlechter wird und immer weniger Blickzuwendung zur Nebenaufgabe erfolgt. Der Fahrer minimiert dann seine Verkehrsblindzeit, um alle vorhandenen Hinweise über den Streckenverlauf optimal zu nutzen. Die Zuwendung zu einzelnen Blickzielen wird durch das Blickbewegungsmesssystem erfasst. Der Anteil der Fixationen, die auf die Nebenaufgabe gerichtet sind, kann als Maß für die visuelle Restaufmerksamkeitskapazität verstanden werden, die der Fahrer normalerweise für Aufgaben wie das Ablesen von Instrumenten (z.B. Tachometer oder Navigationssystem-Display) verwenden könnte. Sichtweiten, die „vorausschauendes Fahren“ ermöglichen, werden nie die volle visuelle Aufmerksamkeitskapazität des Fahrers beanspruchen.

Die Darstellung und Bearbeitung der Nebenaufgabe erfolgte auf einem Touchscreen, der im Beifahrerraum in bequemer Reichweite des Fahrers angebracht ist (Bild 3-6). Die Aufgabe bestand darin, aus einer kontinuierlich durchlaufenden Liste von Begriffskombinationen eine bestimmte Kombination zu erkennen und durch Berühren des Touchscreens zu identifizieren. Das Tempo des Scrollings war so abgestimmt, dass der Fahrer ungefähr 1 x pro Sekunde auf den Touchscreen blicken musste, wenn er keine Kombination verpassen wollte. Die Anforderung durch die Nebenaufgabe war während der gesamten Fahrt konstant, das Auftauchen der gesuchten Kombination zufällig.



Bild 3-6: Messanordnung für die Bearbeitung der Nebenaufgabe

3.5.1 Durchführung

Die Fahrten mit Nebenaufgabe wurden von 15 Probanden auf demselben Rundkurs im zeitlichen Abstand von mindestens vier Wochen nach der ersten Versuchsreihe durchgeführt. Es wurden dafür diejenigen Personen aus dem Gesamtkollektiv ausgewählt, bei denen die Blickbewegungsmessung am zuverlässigsten funktionierte. Durch die zeitliche Verzögerung der Fahrten wurde eine Veränderung des Fahrverhaltens durch eine bessere Kenntnis des Streckenverlaufs weitgehend verhindert. Nach einer Befragung der Probanden im Anschluss an die Fahrten konnte eine solche Beeinflussung ausgeschlossen werden.

Die Erfassung der Blickzuwendungen zur Nebenaufgabe erfolgte durch das Blickbewegungsmesssystem. Die Qualität der Datenerfassung hängt deshalb grundsätzlich von denselben Parametern ab wie bei reiner Blickbewegungsmessung. Aufgrund unterschiedlicher Lichtintensität, Blendungseffekten und unterschiedlicher Eignung der Probanden treten Streuungen auf. Zusätzlich gibt es eine weitere Einschränkung: Die Blickzuwendung zum Touchscreen erfordert eine Drehung des Kopfes zur Seite. Diese ist je nach Drehwinkel teilweise mit einem Verlassen des Erfassungsbereichs der Augenkameras verbunden – im Bild der linken Kamera sind die Augen dann nicht mehr zu sehen, die berechnete Blickrichtung wird ungenauer. Eine nähere Platzierung des Touchscreens am normalen Blickfeld des Fahrers, auf das die Kameras fest ausgerichtet sind, war jedoch nicht möglich: Eine eindeutige Zuordnung der Blicke zu Straßenraum bzw. Touchscreen wäre dann nicht mehr gegeben, eine Auswertung der Aufmerksamkeitsverteilung unmöglich.

3.5.2 Auswertung

Ausgewertet wurde der Anteil der Fixationen, die auf den Touchscreen gerichtet waren. (Eine gleichzeitige Erhebung der in Kapitel 4 aufgeführten Blickmaße wäre hier nicht zielführend, da die Erfassung von Blickzielen innerhalb des Fahrzeuges eine andere Kalibrierungsweise des Systems erfordert. Gleichzeitig wären daraus keine Erkenntnisse zu erwarten, die über die der ersten Versuchsreihe hinausgingen; häufige Blicke auf den Touchscreen würden die Datenbasis verringern und die Zuordnung einzelner Fixationen erschweren). Unerheblich für die Auswertung ist die Bearbeitungsleistung, d.h. die Anzahl oder der Anteil richtig oder falsch erkannter Begriffskombinationen. Aufgrund des verhältnismäßig seltenen und zufälligen Auftauchens der gesuchten Kombination sind keine verwertbaren Erkenntnisse zu erwarten, zudem zeigen neuere Studien (PIECHULLA, MAYSER, GEHRKE & KÖNIG 2003, VICTOR U.A. 2005), dass die Blickzuwendung das zuverlässigere Maß darstellt. Den Probanden ist dies freilich nicht bekannt: Um die Motivation zur Bearbeitung der Nebenaufgabe auf einem hohen Niveau zu halten, wurde die Leistung als auszuwertender Parameter dargestellt. Die konstante Bearbeitung wurde während der Fahrt durch den Versuchsleiter stetig überprüft.

Die Auswertung erfolgt zunächst nach denselben Gesichtspunkten wie bei reiner Blickbewegungsmessung. Die Daten wurden für jeden Abschnitt in 25 m – Sichtweitenklassen (bzw. den entsprechend breiteren Klassen bei größeren Sichtweiten, vgl. Kap. 3.4) ausgewertet. Auch die Einteilung der Abschnitte nach Kurvigkeit und Straßenumfeld erfolgt nach den Kriterien der ersten Messreihe (vgl. Kap. 3.2.1). Die These, dass in kurvigen Streckenbereichen die Kurven (bzw. deren Radius) selbst den maßgebenden Einfluss auf Blickverhalten und Geschwindigkeit ausüben und den der Sichtweite weitgehend verdrängen, gilt für beide Messreihen gleichermaßen. Hinzu kommt bei Fahrten mit Nebenaufgabe, dass für die Bearbeitung am Touchscreen eine Hand vom Lenkrad genommen werden muss, was in Kurven eine zusätzliche Schwierigkeit darstellt. In solchen Bereichen muss daher mit Verzerrungen der Messergebnisse gerechnet werden, weswegen sich die Auswertung der Nebenaufgabe insbesondere auf die geraden und leicht kurvigen Abschnitte konzentriert. Wie bei der Blickbewegungsmessung wurden auch hier solche Abschnitte nicht ausgewertet, in denen Gegenverkehr auftrat.

3.6 Untersuchungen im Fahrsimulator

Die Untersuchungen im realen Verkehr zielten auf Veränderungen im Blick- und Fahrverhalten, die sich einstellen, wenn die Sichtweite unter ein bestimmtes Niveau sinkt. Die Einschätzung, ab wann die vorhandene Situation als kritisch zu betrachten ist und eine Reaktion erforderlich wird, obliegt dabei allein dem Fahrer. Ob die gewählte Reaktion in jedem Fall zum richtigen Zeitpunkt und in der richtigen Art und Weise erfolgt, ist nach den Erkenntnissen der Literatur (vgl. Kap. 2) zu bezweifeln. Aufgrund von Fehleinschätzungen und der Erfahrung, dass plötzliche Hindernisse auf der Fahrbahn äußerst selten auftreten, wird nicht auf jede Sichtweitenbeschränkung angemessen reagiert – auch deshalb, weil dies einen sehr wechselhaften und unkomfortablen Fahrstil zur Folge hätte.

In einem weiteren Untersuchungsansatz im Fahrsimulator des IZVW Würzburg wurde deshalb anhand der Fahrerreaktion auf plötzlich auftretende Hindernisse geprüft, wann die vorhandene Sichtweite ausreichte, eine Situation in angemessener Weise zu antizipieren und zu bewältigen. Ausreichende Orientierung sollte sich darin dadurch zeigen, dass eine überraschende Situation ohne abrupte Manöver durchfahren werden kann; gesucht wird hier nach der (minimalen) Sichtweite, ab der die Fahrer dazu in der Lage sind. Um die Übertragbarkeit der Ergebnisse dieser Untersuchung auf reales Verhalten sicherzustellen, wurden zudem Vergleichsmessungen auf einer Nachbildung der Realstrecke durchgeführt.

Das Bewegungssystem des Würzburger Fahrsimulators hat 6 Freiheitsgrade und kann lineare Beschleunigungen bis 5 m/s^2 darstellen, rotatorische bis $100^\circ/\text{s}^2$. Die Fahrzeugkonsole ist voll instrumentiert und entspricht der eines serienfertigen BMW 520i mit Automatikgetriebe. Alle Parameter der Fahrzeugbewegung und –bedienung können aufgezeichnet werden. Zur Blickrichtungsmessung ist –wie im Messfahrzeug der Realfahrten – ein Eyetrackingsystem des Typs SmartEye eingebaut. Ebenso steht ein Bildschirm für Nebenaufgaben zur Verfügung. Das Auftauchen und Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer ist gezielt manipulierbar und wird mit aufgezeichnet.



Bild 3-7: Fahrsimulator des IZVW, Fahrzeugkonsole BMW 520i

3.6.1 Versuchsdesign und Durchführung

Für die Sicherstellung der Vergleichbarkeit von realen und Simulatorergebnissen wurde die reale Messstrecke anhand einer hochgenauen GPS-Vermessung und Videoaufnahmen hinsichtlich Geometrie (Lageplan, Höhenplan, Querschnitt), Markierung, Beschilderung, Ausstattung und Seitenraumgestaltung möglichst naturgetreu nachgebildet. Die vorhandene

Sichtweite wurde analog zur realen Messung bestimmt und vorab mit deren Ergebnissen verglichen. Es zeigte sich ein hoher Grad an Übereinstimmung.

Die nachgebildete Strecke wurde von 16 Probanden nach denselben Vorgaben wie in den Realmessungen mit und ohne Nebenaufgabe befahren. In der Auswertung der Daten zeigten sich die gleichen Tendenzen und Reaktionen in Blick- und Fahrverhalten wie im realen Umfeld. Ausnahmen bestanden in weniger Blicken ins Straßenumfeld und einem höheren Anteil an Fixationen auf die Fahrbahn. Dies ist ein bekannter Simulatoreffekt, da hier das Umfeld der Strecke weniger Ablenkung bietet und der Versuchscharakter der Fahrt den Probanden stärker bewusst ist und bleibt. In der Folge lagen die gemessenen PRC-Werte auf einem höheren Niveau, folgten aber qualitativ den gleichen Verläufen wie in den Realmessungen. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse der Simulatormessungen in die Realität konnte damit als gegeben angesehen werden (vgl. LIPPOLD, KRÜGER U.A. 2007), gleichzeitig wurden die erzielten Ergebnisse durch diese Messreihe bestätigt.

Für die Untersuchung der Reaktionsparameter in überraschenden Situationen im eigentlichen Hauptversuch wurden zwei Szenarien definiert, die vom Fahrer eine kontrollierte Reaktion erfordern:

- Singularitäten, d.h. Einzelkurven, bei denen eine deutliche Reduktion der Geschwindigkeit nötig ist. (Solche Kurven haben kleine Radien und liegen meist am Ende längerer Geraden; sie sind insbesondere auf Bestandsstrecken noch häufig anzutreffen).
- Stehende Hindernisse auf der Fahrbahn, die prinzipiell an jedem Ort auftreten können. (Fahrzeug mit Panne; Wild; verlorene Ladung; umgestürzte Bäume etc.).

Beide Möglichkeiten wurden in der Versuchsstrecke implementiert. In beiden Fällen musste das Geschwindigkeitsniveau angepasst werden, um eine Kollision oder ein Verlassen der Fahrbahn zu vermeiden. Prinzipiell kann Hindernissen auch ausgewichen werden; im Versuch wurde diese Reaktion durch das Einspielen von Gegenverkehr jedoch verhindert. Die Sichtweite als unabhängige Größe wurde auf der Simulatorstrecke durch unterschiedliche Kuppenhalbmesser vorgegeben, während die übrigen Parameter des Lageplans konstant gehalten wurden.

Die Sichtweiten auf die Hindernisse betragen 70 m, 80 m, 90 m, 100 m, 120 m, 140 m, 160 m, 180 m, 200 m und 220 m. Die kritische Situation lag in jedem Untersuchungsabschnitt stets 450 m nach Abschnittsbeginn. Die Steigung vor der Kuppe betrug 3,5%, nach der Kuppe -3,5%. Die Hindernisse befanden sich stets am Ende der Kuppenausrundung, auf die eine langgezogene Wanne folgte. Der Querschnitt entsprach dem RQ 10,5 (Fahrstreifenbreite 3,50 m).

Die Singularitäten bestanden aus Kurven der Länge 50 m mit Radius 80 m ohne Übergangsbögen. Radien dieser Größenordnung verlangen vom Fahrer eine deutliche Geschwindigkeitsreduktion und erhöhte Aufmerksamkeit. Es wurde nur eine Rechtskurve verwendet. Die Singularitäten waren an der Kurvenaußenseite bepflanzt und mit Kurventafeln (StVO §625-10 bzw. -20) versehen. Die zweite kritische Situation bestand aus einem auf dem Fahrstreifen parkenden gelben Fahrzeug mit eingeschalteter Warnblinkanlage, das mit Pylonen und Warndreieck versehen ist. Der Streckenverlauf nach der Kuppe war in diesem Fall gerade. Die kritischen Situationen waren also leicht erkennbar gestaltet, sobald Sicht auf die Situation zur Verfügung stand, konnte der Fahrer reagieren (Bild 3-8).

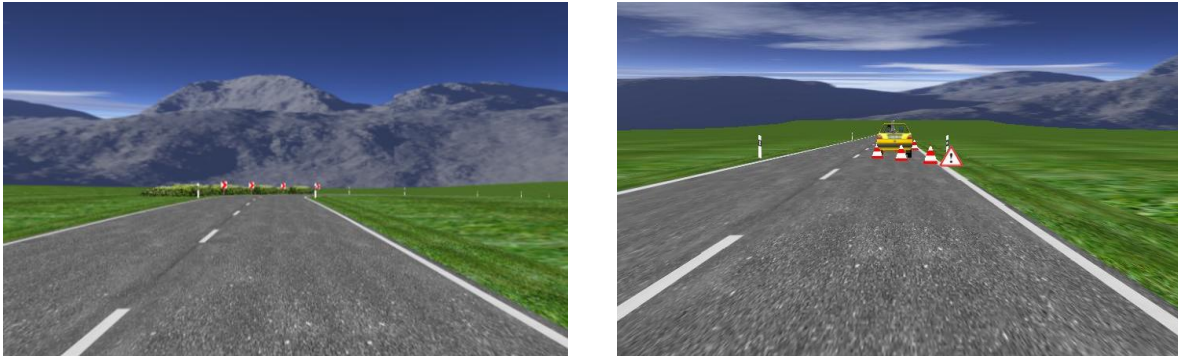


Bild 3-8: Kritische Situationen, die eine Fahrerreaktion erfordern. Das linke Bild zeigt die Singularität (Radius 80 m, Länge 50 m), das rechte Bild das Pannenfahrzeug

Im Hauptversuch wurde die Strecke von 13 zuvor instruierten Personen befahren. Die Reihenfolge der Abschnitte wurde für jede Versuchsperson per Zufall bestimmt. Um Lerneffekte auszuschließen, wurden nur hinter der Hälfte der zu befahrenden Kuppen Hindernisse platziert. Zwischen den geraden Zufahrten auf Kuppen wurden Kurven mit großen Radien (5.000 m) angeordnet, um die Eintönigkeit der Strecke zu mildern und den Realitätsgrad der Strecke zu erhöhen. In diesen Zwischenabschnitten tauchte sporadisch Gegenverkehr auf.

Aufgezeichnet wurden die Fahrerbedienhandlungen (Gas, Bremse, Bremsbereitschaft, Lenkung), streckenabhängige Größen (Abschnitt, Sichtweite, Station, Höhe, Steigung etc.), fahrdynamische Größen (Station, Geschwindigkeit, Beschleunigungen, Gierwinkel etc.) sowie die Positionen der simulierten Fahrzeuge. Zur subjektiven Bewertung der Orientierung durch die vorhandene Sichtweite wurden den Versuchspersonen nach dem Befahren jeder kritischen Situation mündlich drei Fragen gestellt:

- „Konnten Sie sich rechtzeitig auf die Situation einstellen (Ja/Nein)?“
- „Wie schwierig war die Fahraufgabe (auf einer Skala von 1-7, 1 = sehr leicht, 7 = sehr schwer)?“
- „Wie gut haben Sie die Fahraufgabe gelöst (auf einer Skala von 1-7, 1 = sehr gut, 7 = sehr schlecht)?“

Die Fahrer antworteten mündlich, ohne die Fahrt zu unterbrechen. Zum Zeitpunkt der Befragung hatten alle Fahrer wieder die streckentypische Geschwindigkeit erreicht (100 km/h) und noch ausreichend freie Strecke vor sich.

3.6.2 Auswertung

Kritische Reaktionen sind durch abrupte Änderungen des Fahrverhaltens gekennzeichnet. Sie lassen sich am besten an der Fahrzeugbedienung wie z.B. einer kurzen Bremsbereitschaftszeit, d.h. einem kurzen Übergang von Gas- auf Bremspedal erkennen. Ebenso wurde der maximale Bremsdruck als Variable verwendet (CARSTEN U.A., 2004; WITT & HOYOS, 1976; jedoch nur relative Vergleiche, keine absoluten Kriterien). Kritisches Lenkverhalten zeigte sich nach vorangegangenen Untersuchungen bei Lenkwinkelgeschwindigkeiten von mehr als 100 Grad/s.

Diese Bedienhandlungen des Fahrers resultieren im Zusammenspiel mit Fahrzeugeigenschaften in fahrdynamischen Größen, die sich prinzipiell auch von außen beobachten lassen; von besonderem Interesse sind hier Beschleunigungen in Fahrzeuginnen- und -querrichtung. In der Literatur werden verschiedene Kriterien für abruptes Verhalten angegeben. So werden Bremsvorgänge mit Verzögerungen $> 6 \text{ m/s}^2$ als Notbremsung bezeichnet (UN, 2004); im Normalverkehr akzeptieren Fahrer je nach Situation Verzögerungen zwischen $2,5$ und 3 m/s^2 (HACKENBERG & HEISING, 1982). Im Kontext von Abstandsregelungssystemen (ACC) werden Verzögerungen von mehr als $2,5 \text{ m/s}^2$ als Überschreiten der Komfortgrenze betrachtet. Daher kann bei Längsverzögerungen von mehr als 3 m/s^2 von einer abrupten Reaktion gespro-

chen werden.

Für Querbearleunigungen finden sich in der Literatur akzeptierte Werte bis zu 4 m/s^2 (SCHIMMELPFENNIG & NACKENHORST, 1985). Bittet man Testfahrer, Kurven so zu durchfahren, wie sie es „gerade noch als sicher“ empfänden, so werden maximal $4,5 \text{ m/s}^2$ gewählt (NACKENHORST, 1984). REICHART (2000) definiert Kurvendurchfahrten mit mehr als 5.8 m/s^2 als Fahrfehler. Querbearleunigungen von mehr als 4 m/s^2 können daher als abruptes Fahren bezeichnet werden. Der Kriteriumswert für den Querruck wurde aus der Literatur übernommen (NATZSCHKA, 2003).

Eine vollständige Bewertung des Fahrerhaltens verlangt neben der quasi isolierten Betrachtung der Fahrerhandlungen bzw. des Fahrer-Fahrzeug-Systems eine Berücksichtigung der Interaktion zwischen Fahrer-Fahrzeug und der Umwelt (Straßenumgebung und Verkehr). In der Literatur haben sich als Parameter für die Kritikalität einer Fahrsituation zeitbasierte Maße bewährt. So gibt die Zeit, die bei konstanter Lenkradstellung und Geschwindigkeit noch verbleiben würde, bevor das Fahrzeug die Fahrbahn verlässt, die sog. Time-to-Line-Crossing (TLC), ein Maß für die Güte der Spurführung (GODTHELP U.A., 1984; WINSUM & GODTHELP, 1996). Dieses Maß hängt allerdings vom individuellen Fahrstil ab, so dass kein absolutes Kriterium angegeben werden kann. Für Zeitabstände in Längsrichtung (die Minima der Time-to-Collision TTC) werden in der Literatur Werte bis 4-5 s als kritisch bezeichnet ((Warnstufe für Kollisionswarnsysteme, VOGEL, 2003).

	Parameter	Kriterium
Bedienhandlungen	Bremsbereitschaft	nur relativ zu bestimmen
	maximaler Bremsdruck	nur relativ zu bestimmen
Fahrdynamik	Längsverzögerung	$> 3 \text{ m/s}^2$
	Querbearleunigung	$> 4 \text{ m/s}^2$
	Querruck	$> 0,5 \text{ m/s}^3$
Fahrer-Umwelt-Interaktion	TTC_min	$> 4 - 5 \text{ s}$

Tab. 3-2: Kriterien für abruptes Fahrerhalten

4 Ergebnisse

4.1 Realfahrten mit Blickbewegungsmessung

Insgesamt wurden 20 Probandenfahrten zur Blickbewegungsmessung durchgeführt. Davon konnten zwei Fahrten aufgrund von GPS-Ausfällen im Messfahrzeug nicht ausgewertet werden. Von einer Wiederholung der Fahrten wurde abgesehen, da den Probanden die Strecke nunmehr bekannt war und dadurch möglicherweise ein verändertes Fahrverhalten auftreten könnte. Es lagen somit 18 auswertbare Messungen vor.

4.1.1 Erkenntnisse während der Aufbereitung der Messdaten und Fehlerbetrachtung

Theoretisch können alle Messungen Fehlern unterliegen, die die Ergebnisse beeinflussen. Dabei ist zwischen systematischen und zufälligen Fehlern zu unterscheiden. Zufällige Fehler unterscheiden sich in Betrag und Vorzeichen und tendieren dadurch zur gegenseitigen Aufhebung bei einer hohen Grundgesamtheit an Messungen, d.h. ihrem Einfluss kann durch eine große Anzahl an Messwerten entgegengewirkt werden. Da es sich beim Blickverhalten um eine zeitlich hochauflösende Tätigkeit handelt und gleichzeitig mit 30 Hz eine hohe Datenaufzeichnungsrate vorliegt, sind in allen für die Auswertung herangezogenen Abschnitten ausreichende Datenmengen vorhanden. Bild 4-1 zeigt, dass auch in den im Streckenkollektiv am geringsten vertretenen Bereich fast 500 Fixationen erfasst wurden, in allen anderen Bereichen deutlich mehr. Die Erkennung der Fixationen aus den Rohdaten des Blickverhaltens stellt die Grundlage für die Berechnung aller weiteren räumlichen und zeitlichen Blickmaße dar. Eine Beeinträchtigung der Ergebnisse durch zufällige Fehler ist damit unwahrscheinlich.

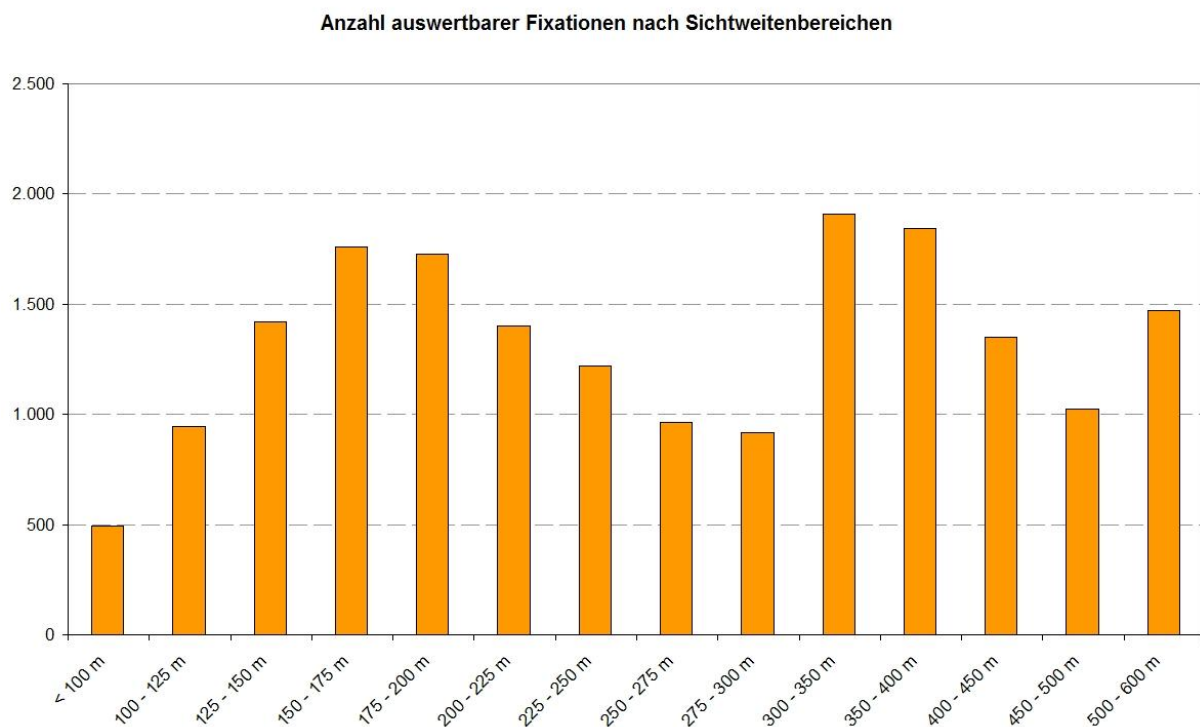


Bild 4-1: Anzahl auswertbarer Fixationen in den einzelnen Sichtweitenbereichen

Systematische Fehler können durch fehlerhafte Kalibrierung des Messsystems entstehen und bewirken eine Verschiebung aller Messwerte in eine bestimmte Richtung, d.h. sie können nicht durch wiederholtes Messen ausgeglichen werden. Eine Prüfung der Kalibrierungsgenauigkeit des Messsystems ist nicht möglich, ebensowenig eine Vergleichsmessung – Blickverhalten ist hochauflösend, reagiert stark auf äußere Einflüsse und ist nicht wiederholbar. Zur Plausibilitätsprüfung wurde deshalb der Vergleich der Messergebnisse mit denen der Simulatorstrecke vorgenommen. Es zeigten sich keine wesentlichen Abweichungen (LIP-POLD, KRÜGER U.A. 2007). Auch ein Abgleich der Häufigkeitsverteilung der Fixationsdauern mit aus der Literatur bekannten Werten (s. Kap. 5.1) zeigt eine hohe Übereinstimmung. Es ist also nicht davon auszugehen, dass systematische Fehler einen wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse ausüben.

Die Abschnittseinteilung erfolgte nach den Kriterien Sichtweite, Kurvigkeit und Seitenraumbepflanzung (vgl. Kap. 3.2.1). Innerhalb dieser Kriterien sind dennoch Unterschiede in der Charakteristik der Abschnitte vorhanden, insbesondere in Bezug auf Lage und Betrag der minimalen Sichtweite sowie Besonderheiten im Seitenraum. Eine Plausibilitätsprüfung der Daten zeigte, dass in einigen Abschnitten der Verlauf der Blickmaße von den Erwartungen und den durchschnittlichen Ergebnissen abweicht. Daher wurden diese Einzelabschnitte einer genaueren Betrachtung unterzogen, die sich speziell auf die folgenden Punkte konzentrierte:

- Verteilung der Anzahl der Messergebnisse,
- Unterbrechung der Messfahrten (z.B. durch entgegenkommende Fahrzeuge),
- allgemeine Auffälligkeiten auf der Strecke (aus den Szenerievideos).

Drei Abschnitte wiesen eine sehr geringe Datenmenge auf. Ursache dafür war die häufige Unterbrechung der Messung durch entgegenkommenden oder vorausfahrenden Verkehr, in einem Abschnitt durch Bauarbeiten während des Untersuchungszeitraums und eine damit verbundene Geschwindigkeitsbeschränkung. Diese Abschnitte, die der Kategorie „Geraden mit freiem Umfeld“ angehörten, wurden daraufhin aus dem Gesamtkollektiv entfernt.

Ein weiterer Abschnitt dieser Kategorie (Nr. 34, vgl. Anhang 1) befindet sich direkt im Anschluss an eine Ortsdurchfahrt. Dadurch liegt eine deutlich geringere Ausgangsgeschwindigkeit vor, so dass dieser Abschnitt nicht mit schneller befahrenen Abschnitten überlagert werden sollte. Er wird gesondert betrachtet, da das Blick- und Fahrverhalten an der anschließenden Kuppe mit äußerst geringer Sichtweite (75 m) Aufschluss darüber geben kann, ob während der Beschleunigungsphase eine andere Reaktion auf Sichtbeschränkungen erfolgt als im Zuge unbeeinflussten Fahrens mit gleichmäßig hoher Geschwindigkeit.

Die Datengrundlage erwies sich für alle verbleibenden Abschnitte als ausreichend. Obwohl einige Sichtweitenbereiche (125 m – 275 m) innerhalb der Abschnitte stärker repräsentiert sind, liegen für jeden Bereich mindestens 300 auswertbare Datensätze mit je 20 erkannten Fixationen vor, die eine Mittelwertbildung ermöglichen. Die Breite der Konfidenzintervalle in den weniger repräsentierten Sichtweitenbereichen entspricht denen der stärker repräsentierten, eine Auswirkung auf die Datenqualität ist somit nicht gegeben. Ausnahmen bestehen lediglich in Einzelabschnitten, deren Sichtweitenminimum knapp unterhalb von 100 m liegt, wodurch die Datenbasis für diese Datenklasse sehr gering ist. Diese Tatsache wird bei der Auswertung berücksichtigt, das Hauptaugenmerk liegt ohnehin oberhalb dieses Bereichs.

Werden zur Auswertung ausschließlich Fahrten herangezogen, in denen der jeweilige Untersuchungsabschnitt komplett (d.h. ohne Unterbrechung durch Gegenverkehr oder vorausfahrende Fahrzeuge) durchfahren wurde, verändert sich das Gesamtbild der Messdatenverläufe kaum (s. auch WEICHERT 2006). Dies war auch nicht erwartet worden: Blickverhalten ist eine Tätigkeit mit sehr hoher zeitlicher Auflösung, Störungen wirken daher nicht lange nach.

Als wesentlich bedeutsamer erwiesen sich Lage und Charakteristik der Sichtweitenminima. Aus diesem Grund wurden zwei weitere Abschnittskategorien eingeführt, die diesen Unterschieden Rechnung tragen sollen. Dies sind zum einen Abschnitte, deren

Sichtweitenminimum oberhalb von 175 m liegt. Werden sie mit anderen Abschnitten gemeinsam betrachtet, sind die größeren Sichtweiten vergleichsweise überrepräsentiert. In der Gesamtbetrachtung entstehen dadurch Verzerrungen, die nicht dem tatsächlichen Verhalten der Probanden entsprechen. Aus diesem Grund werden Abschnitte mit großen Sichtweiten getrennt betrachtet.

Eine weitere zusätzliche Gruppe bilden Abschnitte, die kein eindeutig definiertes Sichtweitenminimum aufweisen. Solche Situationen entstehen, wenn die Sichtweite durch Kuppen mit großem Halbmesser (Ausnahme auf der Messstrecke) oder Kurven mit halbhochem Bewuchs (Standard) begrenzt wird. Die Sichtweite besitzt dann über eine längere Distanz einen nahezu konstanten Verlauf oder mehrere aufeinander folgende lokale Sichtweitenminima. Darüber hinaus variiert die vorhandene Sichtweite dort stark in Abhängigkeit von der Augpunkthöhe des Fahrers, so dass sie nicht einheitlich beschrieben werden kann.

Die in den folgenden Abschnitten aufgeführten Diagramme zeigen den Verlauf der ausgewerteten Blick- und Fahrverhaltensmaße beim Durchfahren der Abschnitte. Der Fahrer bewegt sich dabei stets von der großen Sichtweite zur kleinen, die Diagramme sind also in ihrem zeitlichen Verlauf von rechts nach links zu lesen. Dargestellt sind die Mittelwerte sowie die 95%-Konfidenzintervalle.

4.1.2 Geraden mit freiem Umfeld

Abschnitte der Kategorie „Gerade mit freiem Umfeld“ sind als aussagekräftigste Streckenabschnitte anzusehen. Der Fahrer kann seine Geschwindigkeit frei wählen und wird nicht durch Kurven zum Bremsen gezwungen, beobachtete Verzögerungen können daher in erster Linie als Reaktion auf veränderte Sichtweiten interpretiert werden. Die Position des Straßenfluchtpunktes im Blickfeld des Fahrers ist konstant, was die Genauigkeit der Blickmaße erhöht. Weiterhin bietet das freie Straßenumfeld alternative Blickziele, so dass für den Fahrer Anreize vorhanden sind, den Blick von der Straße abzuwenden, wenn die Fahrsituation es zulässt. Diese Abschnittskategorie ist auf der Untersuchungsstrecke am stärksten repräsentiert, es liegt daher hier auch die umfangreichste Datenbasis vor.

Zeitliche Blickbewegungsmaße

Die Entwicklung der zeitlichen Blickbewegungsmaße beim Durchfahren der geraden Abschnitte zeigt Veränderungen, die im Zusammenhang mit der vorhandenen Sichtweite stehen. Die mittlere Fixationsdauer, Indikator für die Beanspruchung des Fahrers und die Tiefe der Informationsverarbeitung, liegt bei Einfahrt in den Untersuchungsabschnitt im Mittel bei ca. 350 ms. Dies kann als kurze Orientierungsphase am Sichtweitenmaximum, wo der Blick auf den vorausliegenden Streckenabschnitt freigegeben wird, interpretiert werden. Der Zeitanteil der Fixationen und der Anteil der Blicke zum Straßenfluchtpunkt zeigen durchschnittliche Werte. Im weiteren Verlauf sinken Fixationsdauer und –zeitanteil zunächst kontinuierlich. Der Fahrer hat die Streckencharakteristik bereits erfasst und sich darauf eingestellt, er fühlt sich scheinbar sicher vor Überraschungen. Beim Erreichen einer vorhandenen Sichtweite von 200 m steigen alle Maße sprunghaft und weiterhin kontinuierlich an. Insbesondere der stetig ansteigende Fixationszeitanteil weist auf eine gesteigerte Aufmerksamkeit hin, der Blick liegt jetzt vorwiegend in der Nähe des Fluchtpunktes (Bild 4-2).

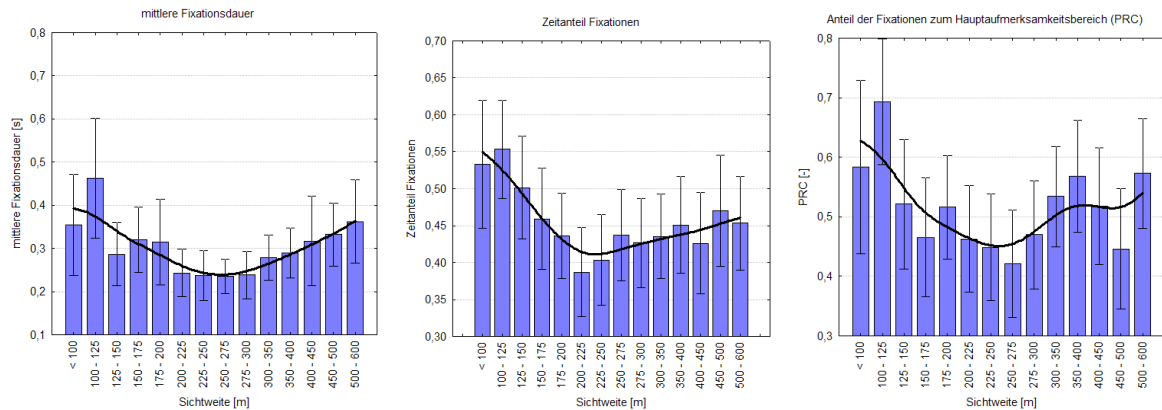


Bild 4-2: Zeitliche Blickbewegungsmaße in geraden Abschnitten mit freiem Umfeld

Erwartet worden war an dieser Stelle allerdings ein noch stärkerer Anstieg der PRC-Werte, bis hin zum fast ausschließlichen Blicken auf den Fluchtpunkt. Dieser Effekt zeigte sich beispielsweise in den vergleichenden Simulatoruntersuchungen. Die Ursache für die niedrigeren Werte hier liegt zum einen im gut einsehbaren Umfeld, von dem visuelle Reize ausgehen. Auch bei geringen Sichtweiten und erhöhter Beanspruchung sind kurze Blicke zu Objekten im Seitenraum, in die Rückspiegel oder generell in die Landschaft nicht ausgeschlossen. Zudem unterliegt das PRC-Maß als blickzielbezogene Größe durch die zusätzliche Szenerie-Kalibrierung höheren Abweichungen als die direkten Blickmaße, wodurch auch Blendwirkungen hier einen stärkeren Effekt ausüben. Blendung der Probanden erzeugt – abhängig von der Stärke der Probandenreaktion – eine stärkere Streuung des Blickvektors in vertikaler Richtung, wodurch eine zum Fluchtpunkt gerichtete Fixation oft oberhalb des PRC-Fensters registriert wird. Dieser Effekt entsteht generell und ist aus Vorversuchen bekannt. Es ist jedoch in der Auswertung nicht zu entscheiden, welche Fixation durch Blendung beeinflusst wurde und welche nicht. Die Tendenz zur stärkeren Konzentration auf den Fluchtpunkt unterhalb einer Sichtweite von 200 m ist dennoch sowohl in den Werten als auch bei Betrachtung der Szenerievideoaufnahmen klar erkennbar und kann durch die Betrachtung der räumlichen Blickmaße untermauert werden.

Räumliche Blickbewegungsmaße

Die Auswertung der räumlichen Blickbewegungsmaße in geraden Abschnitten mit freiem Umfeld zeigt eine zunehmende Konzentration des Blickes mit abnehmender Sichtweite. Der räumliche Abstand aufeinander folgender Fixationen (Scanpfadlänge) nimmt dabei um etwa 40% ab.

Der Feldindex verläuft parabelförmig. Viele angeblickte Felder am Beginn der Abschnitte (Sichtweitenmaximum) in Kombination mit langen Scanpfaden weisen auf die Orientierungsphase hin, in der der Fahrer sich einen weiträumigen Überblick verschafft. Anschließend sinkt die Zahl der angeblickten Felder im mittleren Sichtweitenbereich. Da gleichzeitig keine langen Fixationsdauern vorliegen, handelt es sich hier nicht um ein „Anstarren“, sondern um kurzes, wohl eher zielloses Umherblicken. Auch Blicke außerhalb des Frontscheibenbereichs, z.B. zum Tacho oder zu den Rückspiegeln werden in dieser Phase verstärkt durchgeführt. Diese können zwar im Messfahrzeug nicht direkt erfasst werden, doch deutet ein gleichzeitiges Abnehmen von Feldindex und Fixationsdauer in diese Richtung. Ab einer Sichtweite von 200 m steigt der Feldindex wieder an, die Scanpfadlänge wird jedoch weiterhin geringer. Das führt zu der Schlussfolgerung, dass sich der Blick innerhalb eines kleiner werdenden Bereichs sehr genau orientiert, dort also nahezu alle Felder abtastet. Das gleichzeitige Ansteigen der PRC-Werte lokalisiert diesen Bereich in der Nähe des Fluchtpunktes der Straße.

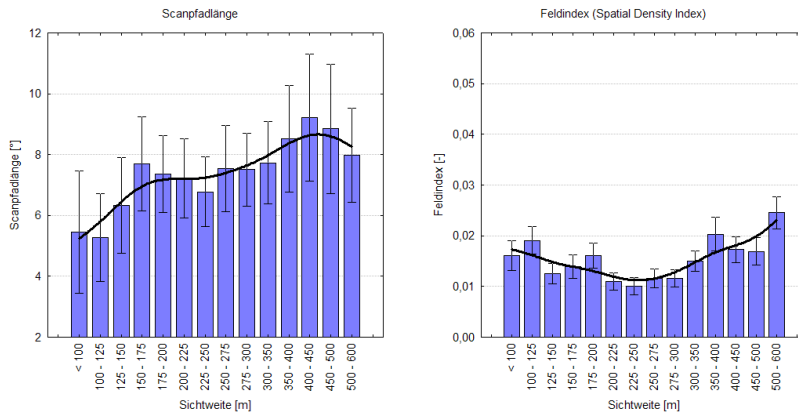


Bild 4-3: Räumliche Blickmaße auf Geraden mit freiem Umfeld

Bild 4-4 zeigt exemplarisch die Verteilung der Fixationsorte aller Probanden in einem Abschnitt dieser Kategorie, aufgeteilt nach Sichtweitenklassen. Die Einteilung der Achsen entspricht der Auflösung des Videobildes der Szenekamera, geht jedoch über dessen Erfassungsbereich hinaus. Die Lage der Abszisse gibt etwa die Unterkante der Frontscheibe an, die Ordinate die linke A-Säule. In allen Sichtweitenbereichen ist eine Konzentration der Blickpunkte auf die vorausliegende Straße in Höhe des Fluchtpunktes zu erkennen. Oberhalb von 175 m Sichtweite sind dabei nur geringe Unterschiede zwischen den einzelnen Sichtweitenklassen festzustellen. Blicke zum Tacho und zur Seite treten gelegentlich auf. Unterhalb von 175 m nimmt die Konzentration insbesondere in horizontaler Richtung zu. Blicke in den Seitenraum werden seltener und fallen unter 150 m beinahe gänzlich weg. Hingegen sind deutlich mehr Tachofixationen zu erkennen, was auf eine Überprüfung der Geschwindigkeit hindeutet. Tatsächlich wurde diese unterhalb von 150 m im Mittel um 5 km/h (von 97 km/h auf 92 km/h) gesenkt. Das Beispiel zeigt, dass Sichtweiten unterhalb eines bestimmten Niveaus beim Fahrer Unsicherheit hervorrufen, die sich auch im Fahrverhalten äußern.

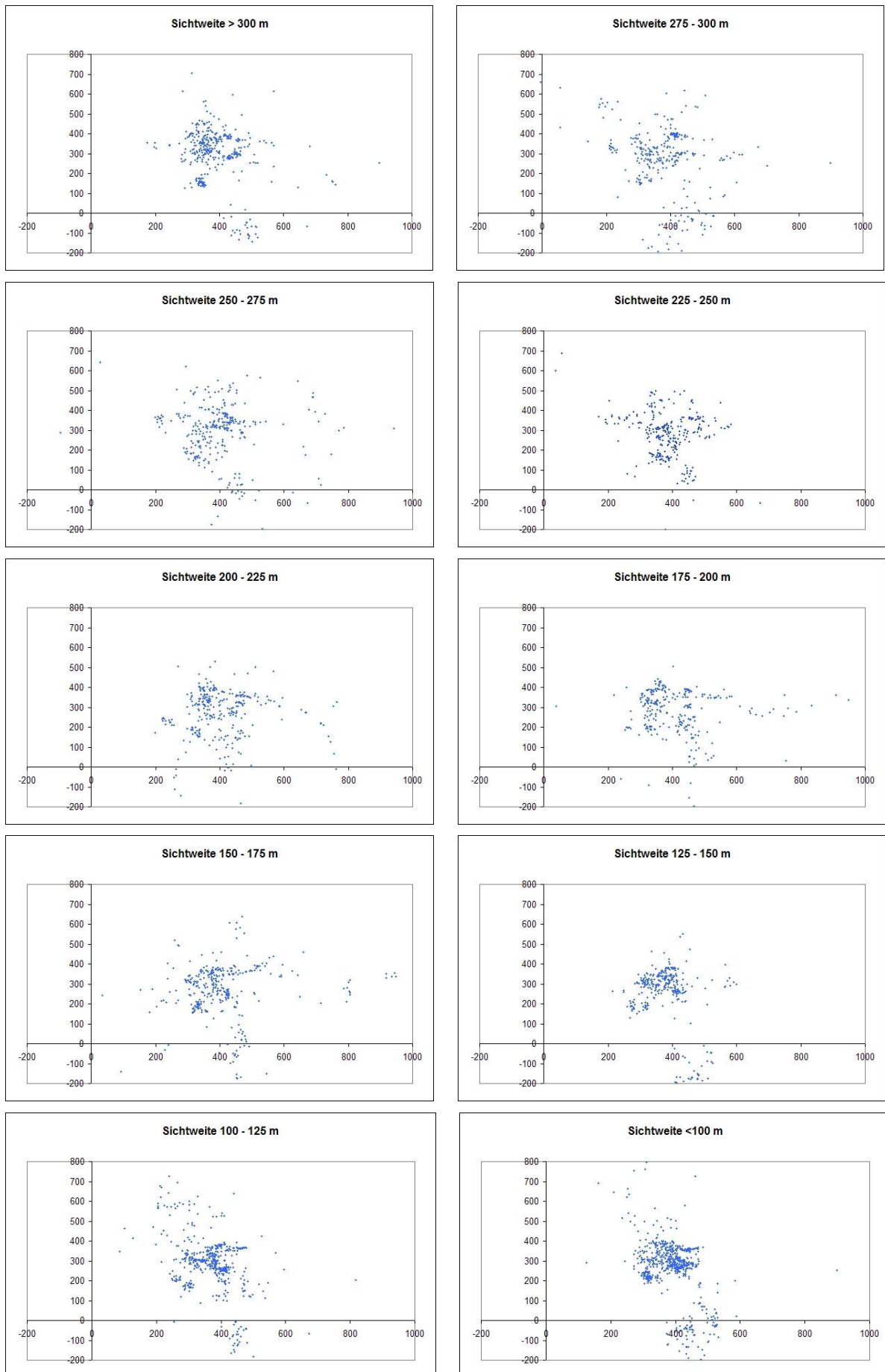


Bild 4-4: Verteilung der Fixationsorte in Abschnitt 15 bei der Zufahrt auf eine gerade Kuppe mit freiem Umfeld

Fahrverhalten

Das Fahrverhalten der Probanden zeigt große Übereinstimmungen untereinander. Generell orientieren sich die im Versuch gefahrenen Geschwindigkeiten in etwa an den aus Querschnittsmessungen vorliegenden streckentypischen V_{85} und liegen teilweise auch darüber. Unterschiede zwischen den Probanden bestehen hinsichtlich des Absolutbetrages der Geschwindigkeiten in einer Größenordnung von durchschnittlich etwa 15 km/h.

Die relativen Verläufe während des Durchfahrens eines Abschnitts unterscheiden sich nur minimal voneinander. Auf die Annäherung an ein Sichtweitenminimum wird durch Verzögerung reagiert. Durchschnittlich 50% der Probanden realisieren diese durch Gaswegnahme ohne Bremsbetätigung, 50% setzen die Bremse ein. Die dabei auftretenden maximalen Verzögerungen sind gering, der größte gemessene Wert beträgt 1,34 m/s². (Zur Einordnung: In den HAV (1999) wird für „sicheres und langsames Bremsen“ ein Berechnungswert von 2,0 m/s² angesetzt). Da sich in geraden Abschnitten durch Streckengeometrie oder Seitenraumgestaltung keine Notwendigkeit für ein Verzögern ergibt und Beeinflussungen durch Fremdverkehr anhand der Videoaufzeichnungen ausgeschlossen werden können, kann diese als Reaktion auf die geringer werdende Sichtweite interpretiert werden.

Die Geschwindigkeit beim Einfahren in einen geraden Abschnitt lag im Mittel zwischen 105 und 110 km/h. Bis zu einer vorhandenen Sichtweite von weniger als 100 m wurde auf durchschnittlich 93 km/h verzögert. Der Beginn der Verzögerung liegt im Mittel knapp unterhalb von 200 m Sichtweite. Eine genaue Lokalisierung des Verzögerungsbeginns im Einzelfall ist wegen des geringen Betrages der Verzögerung oft nur möglich, wenn die Bremse betätigt wurde. Jedoch besteht in diesen Fällen die Möglichkeit, dass die Verzögerung durch Gaswegnahme bereits vorher begann.

Der scheinbare Sprung im Geschwindigkeitsprofil bei einer Sichtweite von 350 m (Bild 4-5) ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass nur 8 der hier betrachteten 13 Abschnitte größere Sichtweiten aufweisen. In den anderen Fällen liegen jeweils kurvige Abschnitte oder eine Ortsdurchfahrt vor dem betrachteten Abschnitt, so dass in diesen (bei einer Sichtweite von 350 m) i.d.R. etwas langsamer eingefahren wird.

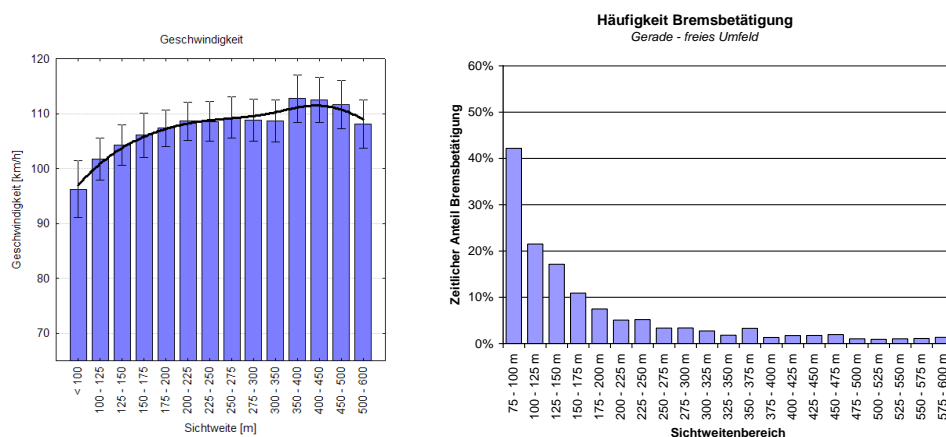


Bild 4-5: Geschwindigkeitsverlauf und Bremsengriffe in geraden Abschnitten mit freiem Umfeld

Die zweite Darstellung in Bild 4-5 zeigt den zeitlichen Anteil der Bremsbetätigungen (d.h. die Zeit, in der die Bremse betätigt wurde, im Verhältnis zur Gesamtfahrzeit durch den Sichtweitenbereich) in Abhängigkeit von der vorhandenen Sichtweite. Ab einer Sichtweite von 200 m steigt die Zahl der Bremsengriffe erkennbar an. Der Anstieg deutet auf den Bereich hin, an dem ein Teil der Probanden eine kritische Abnahme des zur Verfügung stehenden Reaktionsweges realisiert und daraufhin Bremsbereitschaft herstellt bzw. leicht bremst. Dabei ist das Ausmaß der Verzögerung bei weitem zu gering, als dass ein Anhalten im Sichtbereich möglich wäre.

Die zweite deutliche Steigerung der Bremsengriffe erfolgt bei 100 m Sichtweite. Die Hälfte der Probanden bremst hier, unabhängig von der gefahrenen Geschwindigkeit. Die mittlere Verzögerung steigt dadurch weiter an, bleibt aber unterhalb der in den HAV (1999) genannten Grenze für kontrolliertes Bremsen. Dennoch scheint hier eine weitere Schwelle vorzuliegen, an der die zur Verfügung stehende Sichtweite bzw. der verbleibende Reaktions- und Bremsweg von den meisten Probanden als unzureichend eingeschätzt werden.

Besonderheit - Abschnitt 34

Der insgesamt sehr kurze Abschnitt 34 beginnt unmittelbar im Anschluss an eine Ortsdurchfahrt. Die Strecke verläuft in einer gestreckten Kurve ($R = 357 \text{ m}$) auf eine Kuppe mit einer geringen Sichtweite von 80 m zu; die Straßenfläche ist dort ca. 50 m einsehbar. Aufgrund der geringen Ausgangsgeschwindigkeit ist eine Mittelwertbildung mit anderen Abschnitten dieser Gruppe nicht sinnvoll.

Dem Fahrer ist diese Stelle beim Durchfahren bereits bekannt, da sie in Rückrichtung durchfahren wird und durch eine markante, neu gestaltete Ortseinfahrt gekennzeichnet ist (Bild 4-6) Er kennt daher auch die weiterführende Linienführung (Lageplangerade) aus der Befahrung der Hinrichtung und konnte den Bereich zusätzlich vor der Ortsdurchfahrt einsehen.



Bild 4-6: Abschnitt 34 aus der Sicht des Fahrers – Beschleunigen nach Ortsdurchfahrt bei geringer Sichtweite

Das Fahrverhalten entspricht daher nicht dem typischen Erwartungsbild an eine Gerade mit freiem Umfeld im Außerortsbereich. Dafür kann dieser Abschnitt Aufschluss darüber geben, ob auch in der Beschleunigungsphase und bei geringeren Geschwindigkeiten eine ähnliche, auf die Sichtweite beziehbare Reaktion auftritt.

Blickbewegungsmaße

Der Verlauf sowohl der zeitlichen als auch der räumlichen Blickbewegungsmaße bestätigt den Trend der Geraden mit freiem Umfeld. Mit geringer werdender Sichtweite sind eine Zuwendung zum Fluchtpunkt sowie tendenziell längere Fixationen, also eine Erhöhung der Beanspruchung, zu verzeichnen. Eine Verringerung der Werte tritt zwischen 175 m und 125 m ein: Hier wird die Kurve durchfahren, das Blickverhalten konzentriert sich auf die Kurveninnenseite zur Spurhaltung. Der Zeitanteil der Fixationen bewegt sich unterhalb von 200 m Sichtweite auf einem höheren Niveau, die auf den übrigen Geraden verzeichnete Aufmerksamkeitserhöhung tritt also hier ebenfalls ein.

Ebenso ist eine stetige Verringerung der Scanpfadlänge zu verzeichnen, was auf eine zu-

nehmende Konzentration des Blickes schließen lässt. Eine Ausnahme bildet hier der Bereich zwischen 150 m und 125 m, in dem die Kurve endet und der Blick zum Fluchtpunkt springt. Der Ort der Konzentration befindet sich in Fluchtpunktnähe, die PRC-Werte steigen tendenziell an, streuen allerdings sehr stark. Bis zum Überfahren der Kuppe verharret der Blick dort innerhalb eines engen Bereichs, der Fahrer sucht darin intensiv nach Informationen.

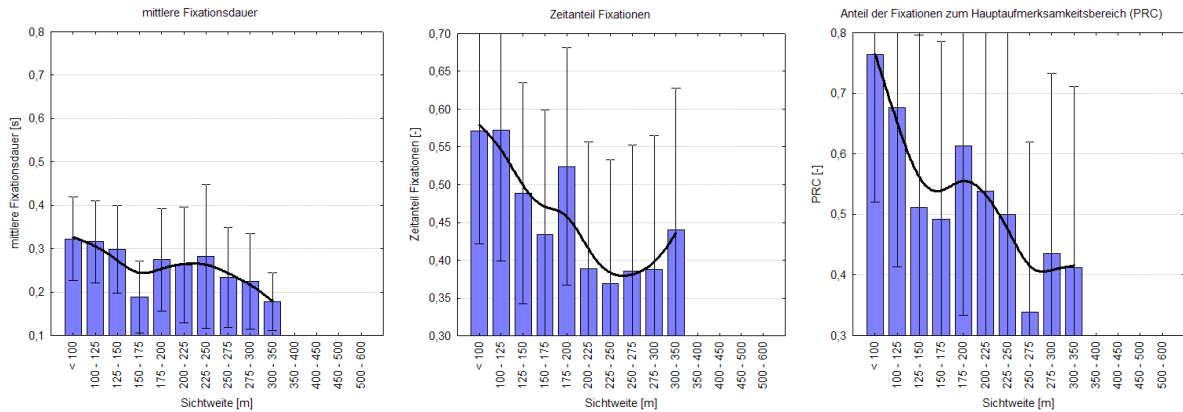


Bild 4-7: Zeitliche Blickbewegungsmaße in Abschnitt 34

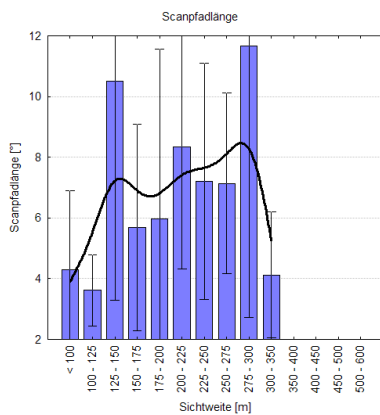


Bild 4-8: Räumliches Blickbewegungsmaß Scanpfadlänge in Abschnitt 34

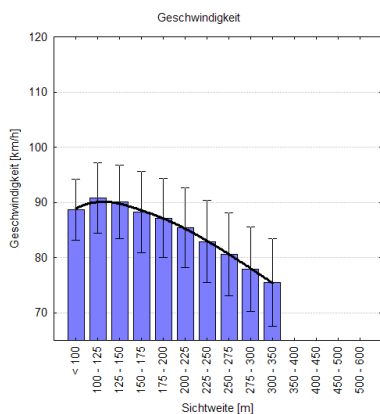


Bild 4-9: Geschwindigkeitsverlauf in Abschnitt 34

Die Geschwindigkeit wird vom Ortsausgang an stetig erhöht, erreicht jedoch innerhalb des kurzen Abschnitts nicht das auf den anderen Abschnitten dieser Kategorie gefahrene Niveau. Trotzdem verzögern die Fahrer kurz vor dem Überfahren der Kuppe. Dies geschieht ausschließlich durch Gaswegnahme, Bremsengriffe wurden hier nicht festgestellt. Die Sichtweite beträgt an dieser Stelle weniger als 100 m und wird offenbar als kritisch einge-

stuft.

Diskussion

Die Auswertung der erhobenen Maße in geraden Abschnitten mit freiem Umfeld ergibt ein kohärentes Bild. Wird ein solcher Abschnitt durchfahren, verschafft sich der Fahrer zunächst einen Überblick über den einsehbaren Streckenverlauf. Steht ihm eine ausreichende Sichtweite zur Verfügung, kann der Blick kurz von der Straße abgewendet werden. Die Geschwindigkeit wird konstant gehalten oder steigt moderat an.

Ab einer vorhandenen Sichtweite von 200 m treten deutliche Änderungen im Blickverhalten ein, die auch mit einer Änderung des Fahrverhaltens verbunden sind (vorausgesetzt, der Fahrer fährt bereits mit der Geschwindigkeit der freien Strecke und befindet sich nicht im Beschleunigungsvorgang nach einer Ortsdurchfahrt). Der Blick wendet sich verstärkt dem Fluchtpunkt zu, Aufmerksamkeit und Beanspruchung steigen. Es wird realisiert, dass zur Reaktion auf plötzlich auftauchende Gefahrenmomente nur noch eine begrenzte Reaktions- und Auswirkzeit zur Verfügung stehen. Im Ergebnis wird der Fuß vom Gaspedal genommen und Bremsbereitschaft hergestellt, auch leichte Bremsbetätigungen sind möglich. Da beide Reaktionen nicht nacheinander, sondern zeitgleich eintreten, ist die Geschwindigkeitsverringerng nicht als Folge der Blickkonzentration zu verstehen. Stattdessen sind beide Handlungen das gemeinsame Ergebnis der Erkenntnis, dass die vorhandene Sichtweite einen Punkt erreicht hat, ab dem der verbleibende Reaktions- und ggf. Bremsweg als grenzwertig angesehen wird. Der Fahrer versucht, dem durch erhöhte Aufmerksamkeit und Bremsbereitschaft entgegenzuwirken. Dieser Punkt entspricht der Definition der Orientierungssichtweite.

Eine weitere Schwelle des Fahrverhaltens liegt bei ca. 125 m vorhandener Sichtweite. Hier wird noch einmal stärker verzögert, die meisten Fahrer betätigen leicht die Bremse. Der Blick konzentriert sich noch stärker zum Fluchtpunkt, die Beanspruchung steigt weiter. Selbst bei geringeren Geschwindigkeiten und innerhalb der Beschleunigungsphase im Anschluss an eine Ortschaft wird der Fuß vom Gas genommen. Die Situation wird ab diesem Punkt vermutlich als nicht mehr sicher eingeschätzt, die verbleibende Reaktionszeit als zu kurz. Diese Sichtweite kann als subjektiv kritische Sichtweite bezeichnet werden.

4.1.3 Geraden mit blickdichtem Umfeld

Die Abschnitte dieser Kategorie unterscheiden sich von der vorangegangenen vor allem darin, dass aufgrund des blickdichten Straßenumfelds weniger alternative Blickziele im Straßenumfeld vorhanden sind. Entsprechend wird der Fahrer weniger Veranlassung sehen, den Blick von der Straße abzuwenden. Allerdings besteht die Möglichkeit, dass stattdessen häufiger Blicke zu Instrumenten oder Rückspiegeln stattfinden. Insgesamt ist eine Bestätigung der Ergebnisse der Geraden mit freiem Umfeld zu erwarten, die vermutlich aber weniger deutlich ausgeprägt sind, auch vor dem Hintergrund, dass der Anteil von Geraden mit blickdichtem Umfeld auf der Untersuchungsstrecke deutlich geringer ist und so eine schmalere Datenbasis zur Verfügung steht.

Zeitliche Blickbewegungsmaße

Die Betrachtung der zeitlichen Blickbewegungsmaße zeigt deutlich größere Streuungen und ein weniger klares Bild. In der Durchschnittsbildung sind die auf Geraden mit freiem Umfeld beobachteten Verläufe ansatzweise wiedererkennbar, die dort abgeleiteten Erkenntnisse gelten auch hier. Grenzbereiche in den zeitlichen Blickmaßen können jedoch wegen der starken Streuungen nicht klar abgegrenzt werden. Eine steigende Beanspruchung mit abnehmender Sichtweite ist erkennbar und drückt sich in einem höheren Fixationszeitanteil aus, unterhalb von 200 m ist ein weiterer Anstieg erkennbar. Der Anteil der Blicke zum Hauptaufmerksamkeitsbereich steigt ebenfalls ab einer Sichtweite von 200 m an; die erwartete Erhöhung des Anteils der Blicke zum Fluchtpunkt in allen Sichtweitenbereichen ist nicht eindeutig nachweisbar.

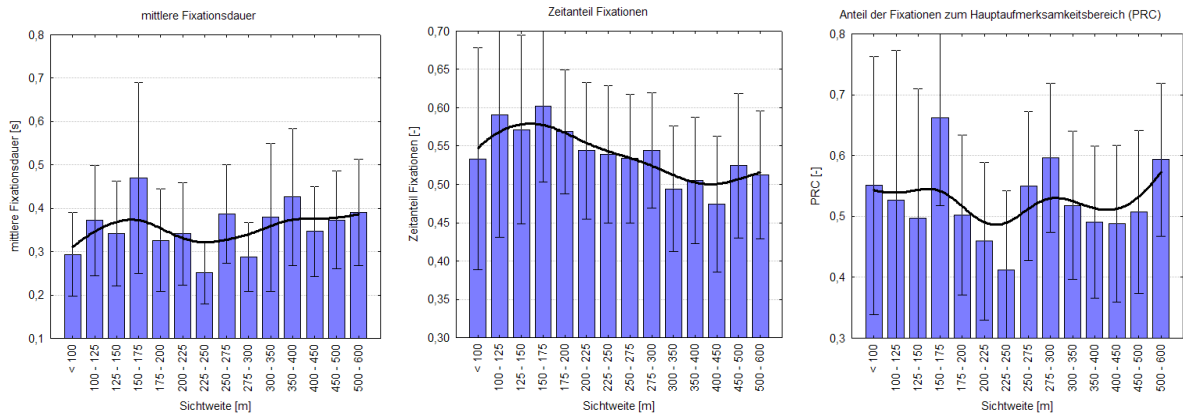


Bild 4-10: Zeitliche Blickbewegungsmaße in geraden Abschnitten mit blickdichtem Umfeld

Insgesamt liegen hier sehr große Streuungen vor, wofür es neben der schmaleren Datengrundlage eine technische Erklärung gibt: Die Kalibrierung des Blickbewegungsmesssystems fand in freiem Umfeld, meist unter Sonneneinstrahlung statt. Als Reaktion darauf waren die Augen der Probanden weniger weit geöffnet. In den hier ausgewerteten Walddurchfahrten hingegen war die Lichteinstrahlung geringer, woraufhin auch die Augen weiter geöffnet wurden. Dies stellt eine Veränderung zum Vergleichsprofil der Kalibrierung dar, so dass die Messgenauigkeit sinkt. Dieser Effekt ist anhand der aufgezeichneten Videos beobachtbar. Es sind deutlich häufiger Blicke auf die Fahrbahn nahe vor dem Fahrzeug zu erkennen, die aber weit unterhalb des Straßenfluchtpunktes und deshalb seltener innerhalb des PRC-Fensters liegen. Streckencharakteristik und Verkehr bieten dafür keine Erklärung.

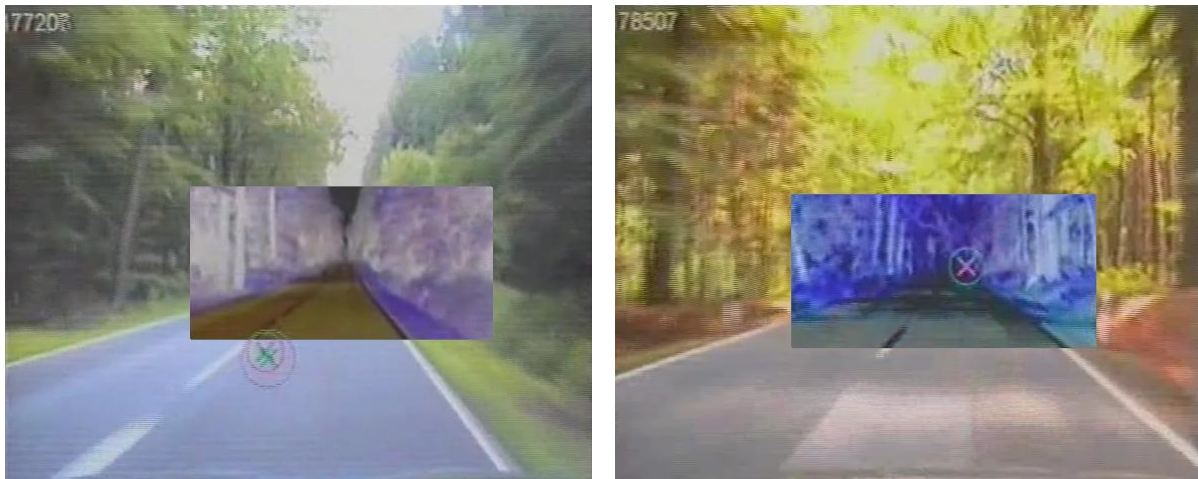


Bild 4-11: Typisches Videobild auf Geraden im Wald: Der Blickpunkt liegt deutlich unterhalb des PRC-Fensters um den Fluchtpunkt. Wird die Sonneneinstrahlung stärker, liegt der Blickpunkt wieder näher am Fluchtpunkt

Räumliche Blickbewegungsmaße

Der Verlauf der räumlichen Blickbewegungsmaße entspricht den Erwartungen und bestätigt die Ergebnisse der Geraden mit freiem Umfeld. Mit geringer werdender Sichtweite verengt sich das Blickfeld, innerhalb des engeren Bereiches wird aber intensiver nach Informationen gesucht. Die Erhöhung der Suchintensität beginnt auch hier bei 200 m. Die Unterschiede sind jedoch gering, von einer klar erkennbaren Konzentrationsgrenze kann hier nicht die Rede sein.

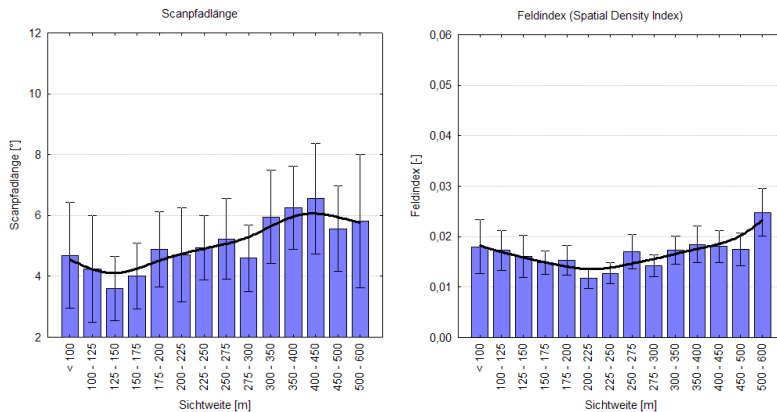


Bild 4-12: Räumliche Blickbewegungsmaße in geraden Abschnitten mit blickdichtem Umfeld

Fahrverhalten

Die gefahrenen Geschwindigkeiten in den betrachteten Abschnitten unterscheiden sich nur unwesentlich von denen der Geraden mit freiem Umfeld. Das Fahrverhalten der einzelnen Probanden ist auch hier durch hohe Übereinstimmungen gekennzeichnet und ordnet sich im oberen Bereich der streckentypischen Geschwindigkeiten ein. Absolut werden ca. 4 km/h langsamer gefahren als in freiem Umfeld, die ersten Verzögerungen beginnen hier knapp unterhalb von 175 m Sichtweite. Die Anzahl der Bremsengriffe steigt im Bereich von 300 – 150 m Sichtweite gleichmäßig und darunter sprunghaft an. Die dabei auftretenden Verzögerungen liegen aber stets im moderaten Bereich unterhalb von 2 m/s².

Streckengeometrie und Umfeldgestaltung erfordern auch in diesen Abschnitten keine Reduzierung der Geschwindigkeit. Die eintretenden Verzögerungen und Bremsengriffe sind daher als Reaktion auf die abnehmenden Sichtweiten zu interpretieren.

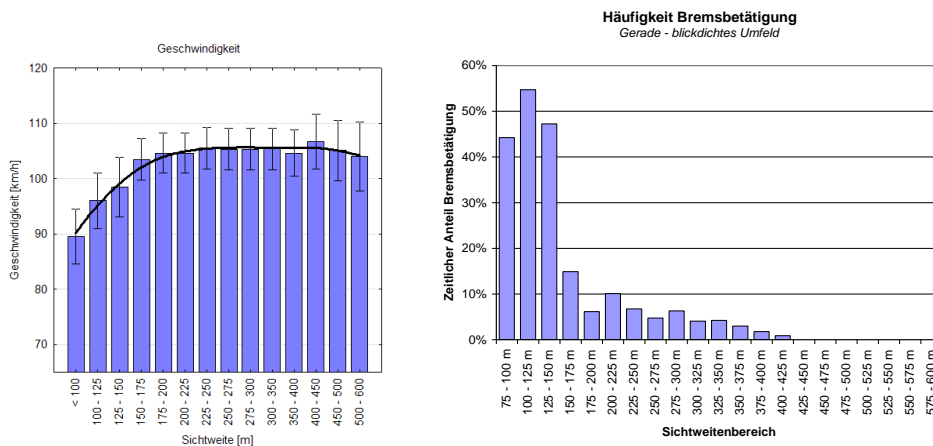


Bild 4-13: Geschwindigkeitsverlauf und Bremsengriffe in geraden Abschnitten mit blickdichtem Umfeld

Diskussion

Die Messergebnisse auf Geraden mit blickdichtem Umfeld spiegeln die Erwartungen wider. Trotz stärkerer Streuungen, die zum Teil auf veränderte Lichtverhältnisse zurückzuführen sind, sind die gleichen Tendenzen wie auf Geraden mit freiem Umfeld zu beobachten. Unterhalb von 200 m vorhandener Sichtweite tritt eine Veränderung des Blickverhaltens hin zu höherer Konzentration und Beanspruchung ein. Sie geht einher mit einer kurz darauf einsetzenden mäßigen Verringerung der Geschwindigkeit, die durch Gaswegnahme und teilweise Bremsbetätigung realisiert wird. Die Ursache dafür liegt auch hier mit hoher Wahrscheinlich-

keit in der zunehmenden Unsicherheit, die die geringer werdende Sichtweite beim Fahrer hervorruft. Als Reaktion erhöht er seine Aufmerksamkeit und wendet sie dem Fluchtpunkt der Straße zu, während er gleichzeitig Bremsbereitschaft herstellt bzw. bereits leicht bremst.

Unterhalb von 150 m Sichtweite steigt die Anzahl der Bremseingriffe sprunghaft an – die Sichtweite erreicht einen eindeutig kritischen Bereich. Warum diese Einschätzung hier im Mittel 25 m früher als auf Geraden mit freiem Umfeld getroffen wird kann nicht eindeutig geklärt werden – möglicherweise handelt es sich dabei um einen Effekt der Seitenraumgestaltung. (Die den Fahrraum umschließende Bepflanzung erzeugt eine tunnelartige Wirkung, wodurch sich die Situation für den Fahrer eventuell gefährlicher darstellt als bei freiem Umfeld).

4.1.4 Leicht kurvige Abschnitte mit freiem Umfeld

Kurvige Abschnitte unterscheiden sich hinsichtlich der Auswertung der Blickmaße dadurch von Geraden, dass der Fluchtpunkt innerhalb des Fahrerblickfeldes nicht ortsfest ist. Beim Durchfahren einer Kurve verschiebt sich der Fluchtpunkt in horizontaler Richtung, Betrag und Geschwindigkeit der Verschiebung sind dabei abhängig von Kurvenradius und Fahrgeschwindigkeit. Die Kurven innerhalb dieser Abschnittskategorie erfordern aufgrund ihrer relativ großen Radien bzw. geringen Richtungsänderungen keine Reduzierung der Geschwindigkeit, sofern diese im streckenüblichen und zulässigen Rahmen liegt. Bremsbetätigungen als Reaktion auf die Kurven sind dennoch stets möglich, wodurch eine ursächliche Zuordnung zur vorhandenen Sichtweite – wie bei geraden Abschnitten – nicht zweifelsfrei gegeben ist. Diese Auswertung entfällt daher für alle kurvigen Abschnitte.

Die Begrenzung der Sichtweite erfolgt bei diesen Abschnitten stets durch Kuppen, eine Überlagerung von Kurvigkeit und Sichtweite besteht also nicht. Es ist aber zu erwarten, dass das Durchfahren der Kurven eine Beanspruchung für den Kraftfahrer darstellt (die Spurhaltung erfordert Blicke zur Kurveninnenseite), die nicht durch Sichtweiteneinflüsse zu erklären ist.

Alternative Blickziele sind im freien Straßenumfeld vorhanden. Erwartet wird daher ein ähnlicher Verlauf der Blickbewegungs- und Fahrverhaltensmaße wie auf geraden Abschnitten. Sichtweiten unterhalb von 125 m gibt es nur in zwei der hier ausgewerteten Abschnitte, so dass eine entsprechend geringe Datenmenge mit großen Streubreiten vorliegt. Eine statistisch abgesicherte Aussage beschränkt sich daher hier auf die Sichtweitenbereiche oberhalb von 125 m.

Zeitliche Blickbewegungsmaße

Die zeitlichen Blickbewegungsmaße entsprechen grob dem erwarteten Verlauf. Mit geringer werdender Sichtweite sind eine geringfügige Erhöhung der Fixationsdauer sowie eine zunehmende Konzentration zum Straßenfluchtpunkt zu verzeichnen. Dieser Effekt wird durch die Verschiebung des Fluchtpunktes, der auch die Fixationen folgen, abgeschwächt, bleibt jedoch insgesamt erkennbar. Lange Fixationsdauern sind hier unwahrscheinlich, da die Berechnung einem statischen Modell folgt. Liegt eine bewegte Fixation vor, wie sie beim Anblicken des sich verschiebenden Fluchtpunktes entsteht, entfernt sich der Blick stetig vom geometrischen Anfangsort der Fixation. Bei einer Entfernung von $1,6^\circ$ wird ein Ende der Fixation registriert, obwohl der Proband weiterhin (räumlich) denselben Punkt anblickt. Insgesamt werden dadurch mehr und kürzere Fixationen registriert als auf Geraden mit unbewegtem Fluchtpunkt.

Wesentlich deutlicher ist die Erhöhung der Aufmerksamkeit daher am Zeitanteil der Fixationen erkennbar, der wenige lange und zahlreiche kurze Fixationen gleichermaßen berücksichtigt. Unterhalb von 175 m Sichtweite zeigt sich ein deutlicher Anstieg, der sich bis zum Sichtweitenminimum fortsetzt. Die vorhandenen Kurven liegen nicht überwiegend in diesen Bereichen, es scheint sich daher um eine Reaktion auf geringer werdende Sichtweiten zu handeln.

Im Sichtweitenbereich zwischen 300 m und 275 m liegt ein Minimum an Fluchtpunktzent-

ration (PRC) und Aufmerksamkeit vor, die Ursache dafür ist jedoch unklar. Anschließend konzentriert sich der Blick wieder mehr in Richtung Fluchtpunkt. Die drei unteren Sichtweitenklassen sind von starken Streuungen geprägt und lassen keine eindeutige Interpretation zu.

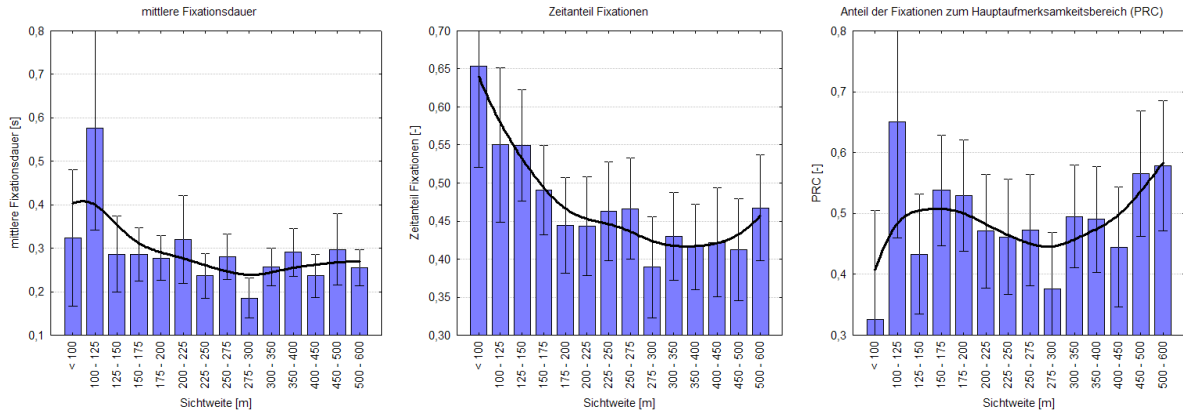


Bild 4-14: Zeitliche Blickbewegungsmaße in leicht kurvigen Abschnitten mit freiem Umfeld

Räumliche Blickbewegungsmaße

Die Untersuchung der räumlichen Blickbewegungsmaße zeigt eine zunehmende und kontinuierliche Verengung des Blickfeldes mit sinkender Sichtweite, wobei die Suchaktivität innerhalb des enger werdenden Bereiches unterhalb von 300 m Sichtweite leicht ansteigt. Diese Verläufe entsprechen insgesamt der Erwartungshaltung und bestätigen die Ergebnisse der Geraden. Die Konzentrationszunahme beginnt hier etwas eher.

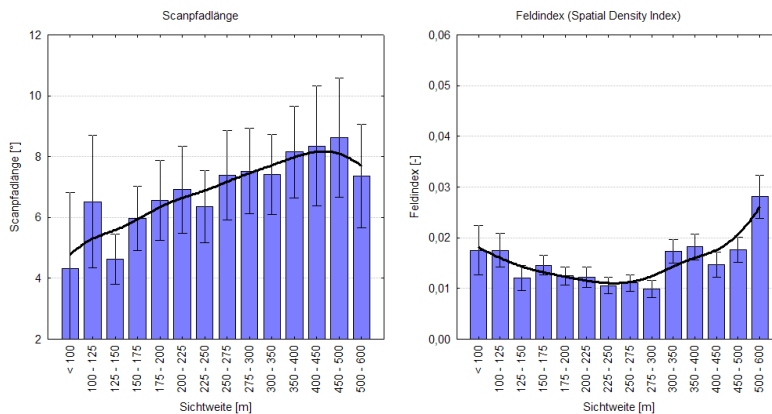


Bild 4-15: Räumliche Blickbewegungsmaße in leicht kurvigen Abschnitten mit freiem Umfeld

Fahrverhalten

Auch in leicht kurvigen Abschnitten gibt es eine Verringerung der Geschwindigkeit bei abnehmender Sichtweite. Die Geschwindigkeit, die bei großen Sichtweiten auf Geradenniveau bei ca. 105 km/h liegt, wird unterhalb von 225 m sukzessive reduziert. Die mittlere Verzögerung ist dabei geringer als auf Geraden und wird fast ausschließlich ohne Bremsengriffe realisiert. Die Endgeschwindigkeit am Sichtweitenminimum liegt dadurch um etwa 2 km/h höher als auf Geraden.

Die Erklärung dafür könnte in der Lage der Abschnitte zu finden sein: Der maßgebende Anteil der Abschnitte dieser Kategorie befindet sich im relationstrassierten Teil der Strecke, der sich durch eine großzügige und geschwungene Linienführung auszeichnet. Der weitere Stre-

ckenverlauf hinter dem Sichtweitenminimum ist stets anhand aufragender Seitenraumelemente erkennbar, und dank großzügiger Kuppenhalbmesser kann der Kraftfahrer auch Hindernisse auf der Fahrbahn weitestgehend ausschließen. Er fährt also weniger „ins Ungewisse“ als am Sichtweitenminimum der meisten geraden Abschnitte.

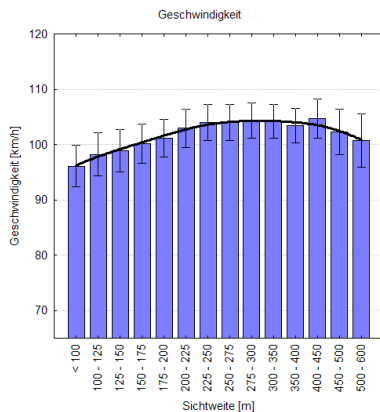


Bild 4-16: Geschwindigkeitsverlauf in leicht kurvigen Abschnitten mit freiem Umfeld

Diskussion

Die Auswertung der einzelnen Maße ergibt auch hier ein übereinstimmendes Bild. Mit geringer werdender Sichtweite konzentriert sich der Blick zunehmend zum Fluchtpunkt der Straße, während die Fixationszeitanteile ansteigen. Dieses Verhalten beginnt bereits ab einer Sichtweite von 300 m und setzt sich kontinuierlich bis zum Sichtweitenminimum fort. Bei 225 m Sichtweite beginnt eine Geschwindigkeitsreduzierung um durchschnittlich 8 km/h, die vorwiegend ohne Bremsengriffe realisiert wird. Dies entspricht dem Verhalten auf Geraden und unterstreicht, dass die hier vorhandenen Kurven aufgrund ihrer Radien kein Bremsen notwendig machen. Die Geschwindigkeitsabnahme kann daher wiederum als Effekt der Sichtweitenreduzierung gewertet werden.

Generell liegen die hier ausgewerteten Abschnitte im Bereich großzügiger, relationstrassierter Landstraßen. Der weitere Streckenverlauf auch hinter den Kuppen ist antizipierbar und entspricht der Charakteristik, die der Fahrer aus dem zurückliegenden Abschnitt kennt. Demzufolge steigt seine Konzentration eher linear und weniger sprunghaft als auf Geraden. Eine klare Grenze, ab wann die Sichtweite als unzureichend empfunden wird, kann aufgrund dieser linearen Verläufe nicht abgeleitet werden. Anhand des vergleichbaren Geschwindigkeitsprofils liegt jedoch die Vermutung nahe, dass die getroffenen Einschätzungen denen der Geraden sehr nahe kommen.

4.1.5 Stark kurvige Abschnitte mit freiem Umfeld

Abschnitte dieser und der folgenden Kategorie haben eine Kurvigkeit von mehr als 100 gon / km. In diesem Bereich bestehen starke Überlagerungen zwischen Sichtweite und Kurvigkeit, so dass die Ursachen von Veränderungen im Fahr- oder Blickverhalten nicht immer zweifelsfrei zuzuordnen sind. Zur Spurhaltung sind Blicke in den Nahbereich vor dem Fahrzeug notwendig, während der weitere Verlauf der Strecke sowie mögliche Hindernisse durch Blicke zum Fluchtpunktbereich wahrgenommen werden müssen. Welcher Faktor stärker wirkt, ist in der Literatur umstritten (vgl. Kap. 2.4) und wohl auch situations- sowie fahrerabhängig.

Die Untersuchungsstrecke beinhaltet zwei Abschnitte dieser Kategorie, die einen Sichtweitenbereich von 150 bis 450 m abdecken. Da die unterschiedliche Lage der Kurven in diesen Abschnitten die Zusammenfassung erschweren und die Auswirkungen der Einzelradien verwischen würde, werden beide Abschnitte getrennt und unter Berücksichtigung der Kurvenlage ausgewertet.



Bild 4-17: Typische Fixationsorte beim Durchfahren von Kurven

Bei der Beurteilung der Blickmaße ist zusätzlich zu beachten, dass eine starke Verschiebung des Fluchtpunktes im Fahrerblickfeld sowohl räumliche als auch zeitliche Blickmaße beeinträchtigt. Räumliche Maße werden verzerrt, wenn der Blick beim Durchfahren von Kurven zwischen Nah- und Fernbereich springt, während die Verfolgung der Kurveninnenseite die Erkennung von Fixationen unterbricht (vgl. Kap. 4.1.4).

Blickbewegungsmaße

Die Veränderungen des Blickverhaltens beim Durchfahren von Kurven sind hier deutlich erkennbar. Fixationsdauer, -zeitanteil und PRC reagieren stark auf enge Radien: die mittlere Fixationsdauer verringert sich, da der Blick der Relativbewegung des Kurventangentenpunktes folgt und sich stetig verschiebt. Auch der zeitliche Anteil der Fixationen nimmt ab, da mehr Blicksprünge notwendig sind. Beim Ausfahren aus einer Kurve ist hingegen ein deutliches Ansteigen der Fixationsanteile erkennbar sowie eine Zunahme der Blicke zum Fluchtpunkt – hier wird die Vorausorientierung nachgeholt, die in der Kurve vernachlässigt werden musste. Daran zeigt sich, dass die Kurvendurchfahrt den Sichtweiteneinfluss verdrängt: Das Spurhalten wird gegenüber der Fluchtpunktbeobachtung als die zeitlich nähere, anspruchsvollere und damit wichtigere Aufgabe angesehen. Je näher Kurventangentenpunkt und Fluchtpunkt im Blickfeld des Fahrers beieinander liegen (also bei geringen Sichtweiten), desto leichter wird deren gleichzeitige Beobachtung und desto seltener sind Blicksprünge notwendig. Dies zeigt sich in der linear abnehmenden Scanfadlänge, die den räumlichen Abstand aufeinander folgender Fixationen darstellt.

Beim Ausfahren aus Kurven und auf Zwischengeraden steigen PRC und Fixationszeitanteil mit abnehmender Sichtweite. Dies kann sowohl eine Auswirkung der Kurvenausfahrt (eben das Nachholen der Vorausorientierung, dafür spricht der frühe Beginn der Fluchtpunktblicke schon bei 225 m Sichtweite) als auch ein Sichtweiteneffekt sein (der gleichmäßige Anstieg und die Ähnlichkeit zum Verhalten auf Geraden deuten darauf hin). Insgesamt kann vermutet werden, dass das Blickverhalten in Kurven in stärkerem Maße durch die Spurhaltungsaufgabe als durch die vorhandene Sichtweite beeinflusst wird. Klare, auf die Sichtweite bezogene Grenzbereiche steigender Anspannung können hieraus nicht abgeleitet werden.

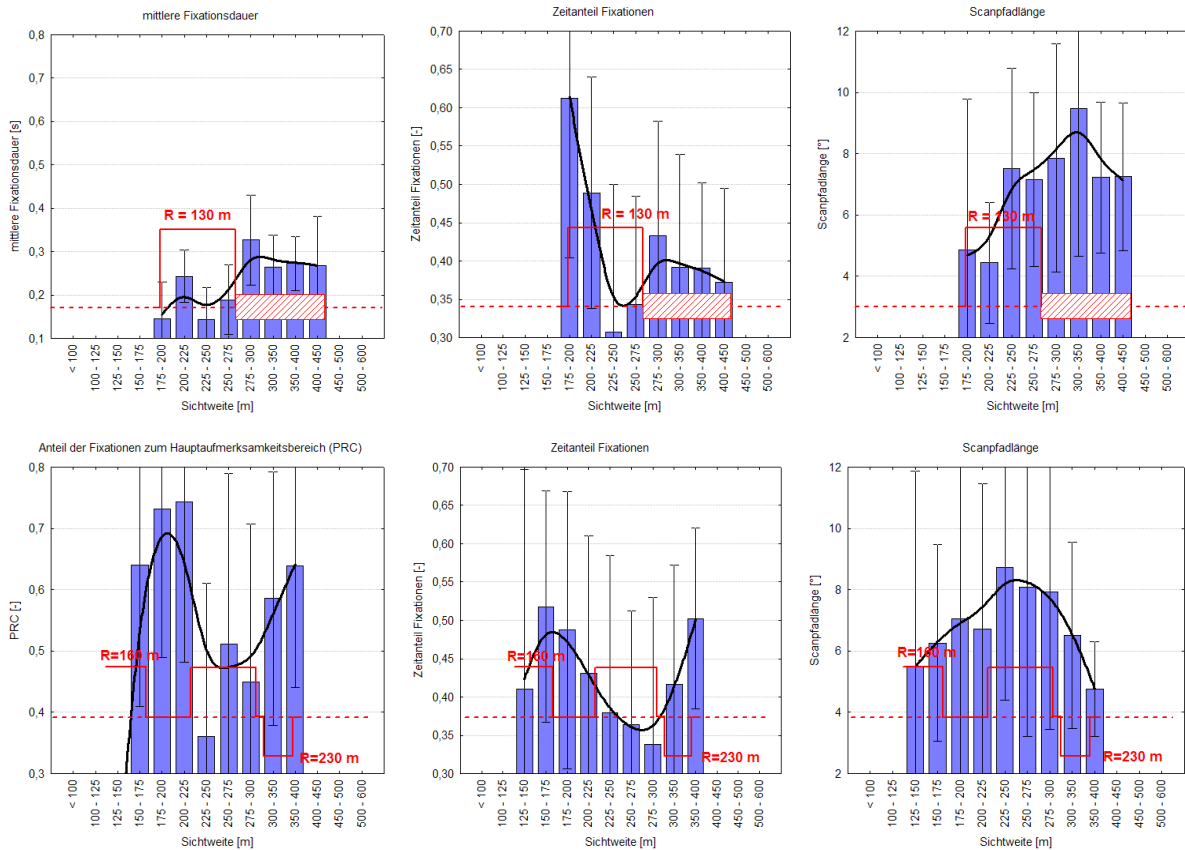


Bild 4-18: Ausgewählte Blickbewegungsmaße in beiden stark kurvigem Einzelabschnitten mit freiem Umfeld

Fahrverhalten

Das Geschwindigkeitsverhalten ist in beiden Abschnitten vorrangig durch die engen Kurvenradien geprägt. Durchschnittlich wird auf ca. 80 km/h abgebremst und am Kurvenausgang wieder beschleunigt. Der Vergleich mit den geraden und leicht kurvigem Abschnitten zeigt, dass im Kurvenbereich deutlich langsamer gefahren wird als in geraden oder leicht kurvigem Abschnitten mit gleicher Sichtweite.

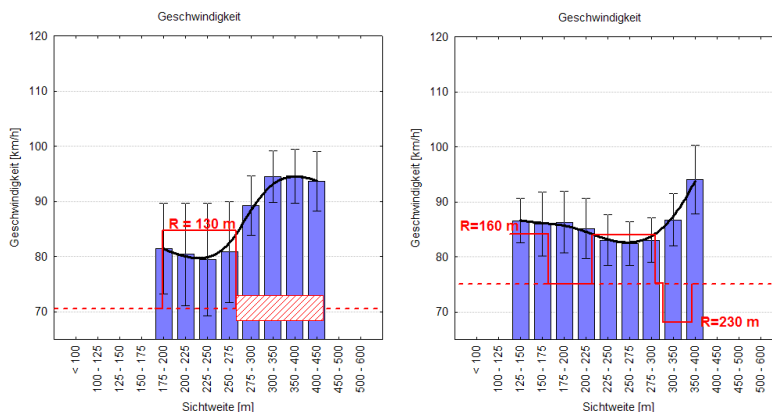


Bild 4-19: Geschwindigkeitsverlauf in beiden stark kurvigem Einzelabschnitten mit freiem Umfeld

Diskussion

In den hier betrachteten Abschnitten zeigt sich der oft gemeinsam wirkende Einfluss der Parameter Sichtweite und Kurvenradius. Der Kurvenradius beeinflusst sowohl das Blickverhalten

ten als auch die Geschwindigkeitswahl in stärkerem Maße als die vorhandene Sichtweite. Das Blickverhalten dient beim Durchfahren von Kurven der Spurhaltung und bleibt daher größtenteils auf den Nahbereich vor dem Fahrzeug beschränkt. Nur gelegentlich treten kurze Blicke zum Fluchtpunkt der Straße auf. Beim Ausfahren aus Kurven und auf Zwischengeraden ist eine ähnliche Veränderung des Blickverhaltens mit abnehmender Sichtweite zu beobachten, wie sie bei geraden oder leicht kurvigen Abschnitten beschrieben wurde.

Die Geschwindigkeit wird an die zu durchzufahrenden Kurvenradien angepasst und liegt dadurch ca. 20 km/h unter dem Niveau von Lageplangeraden. Auch bei geringer werdender Sichtweite wird am Kurvenausgang beschleunigt, ohne dabei jedoch die Geschwindigkeit zu erreichen, auf die in kurvenarmen Streckenabschnitten heruntergebremst wird. Insofern stellt diese Beschleunigung keinen Widerspruch zu der auf Geraden beobachteten sichtweitenbedingten Verzögerung dar.

4.1.6 Stark kurvige Abschnitte mit blickdichtem Umfeld

Diese Kategorie wird auf der Messstrecke durch eine lange, kurvenreiche Walddurchfahrt repräsentiert, die in Hin- und Rückrichtung befahren wird. Die Sichtweite schwankt in sehr kurzen Intervallen zwischen 350 m und 76 m. Anders als bei den anderen Abschnitten fällt die Sichtweite nicht konstant von einem Sichtweitenmaximum zu einem –minimum ab. Von dieser ansonsten üblichen Einteilung wurde hier abgesehen, da sie zu sehr kurzen Abschnitten mit entsprechend geringer Datengrundlage und sehr unterschiedlichen Kurvenanteilen führen würde. Eine Zuordnung von Kurvenradien zu den Sichtweitenklassen ist dadurch aber nicht möglich.

Die Abschnitte befinden sich auf einer Staatsstraße, die einem historisch gewachsenen Verlauf folgt und nicht den modernen Anforderungen der Relationstrassierung entspricht. Die zulässige Geschwindigkeit ist durchgängig auf 80 km/h begrenzt.

Blickbewegungsmaße

Die zeitlichen und räumlichen Blickbewegungsmaße lassen keinen Zusammenhang mit der vorhandenen Sichtweite erkennen. Nach den Erkenntnissen der ausgewerteten Einzelkurven mit freiem Umfeld wird auch hier der Sichtweitereinfluss von dem der Kurvenradien überlagert. Da sich zahlreiche verschiedene Kurvenradien über alle Sichtweitenbereiche verteilen, ergibt sich im Hinblick auf Sichtweitenklassen nahezu eine Gleichverteilung der Blickmaße. Dies lässt auch hier den Schluss zu, dass das Blickverhalten überwiegend der Spurhaltung dient und das Verkehrsgeschehen sowie der weitere Streckenverlauf nur durch gelegentliche Blicke zum Fluchtpunkt bzw. über das periphere Sehen erfasst werden.

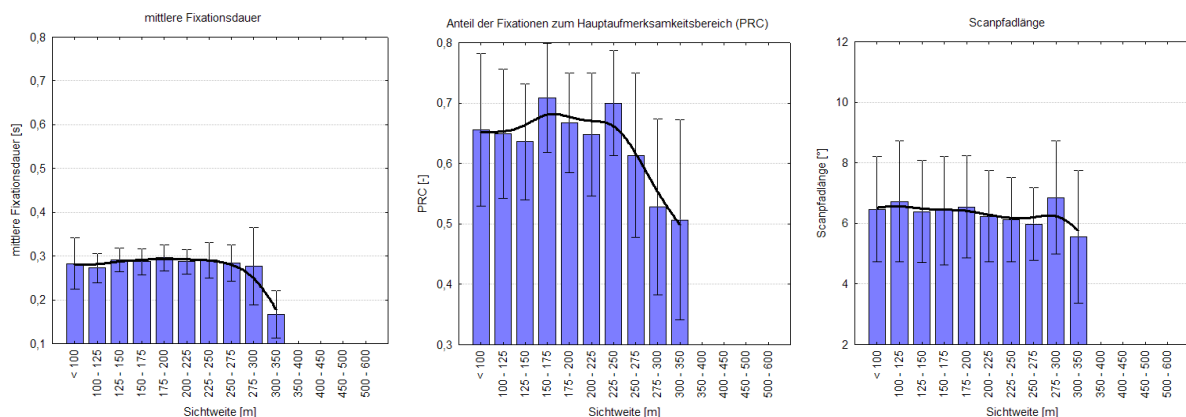


Bild 4-20: Blickbewegungsmaße in stark kurvig Abschnitten mit blickdichtem Umfeld

Fahrverhalten

Die gefahrenen Geschwindigkeiten liegen in diesen Abschnitten auf einem vergleichsweise niedrigeren Niveau. Ursachen dafür sind der kurvige Streckenverlauf und die Beschränkung der zulässigen Geschwindigkeit auf 80 km/h. Im Verlauf ist eine deutliche Abnahme der Geschwindigkeit bei Sichtweiten unterhalb von 150 m erkennbar. Dies kann jedoch aufgrund der vorhandenen Kurvenradien nicht als ausschließlicher Effekt der Sichtweite gewertet werden.

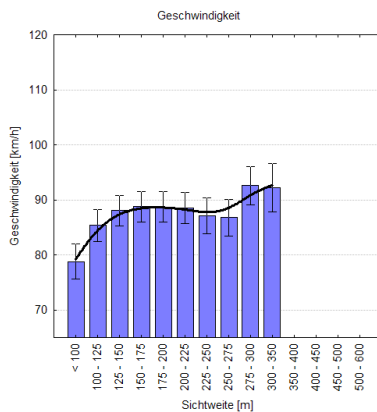


Bild 4-21: Geschwindigkeitsverlauf in stark kurvigen Abschnitten mit blickdichtem Umfeld

Diskussion

In stark kurvigen Streckenabschnitten dominiert die Spurhaltung das Blickverhalten, welches sich auf den Nahbereich vor dem Fahrzeug konzentriert. Signifikante Veränderungen, die im Zusammenhang mit der vorhandenen Sichtweite stehen, konnten nicht festgestellt werden. Der vorausliegende Streckenabschnitt wird durch kurze Blicke zum Fluchtpunkt oder durch peripheres Sehen wahrgenommen.

Wird die Sichtweite durch Kurven begrenzt, ist der Kurvenradius selbst die maßgebende Einflussgröße auf die Geschwindigkeitswahl – eine solch starke Reduzierung würde aufgrund der geringen Sichtweite allein nicht stattfinden.

Sinngemäß gelten dieselben Schlussfolgerungen wie für stark kurvige Abschnitte mit freiem Umfeld, da die Konzentration auf die Kurvenverläufe Blicke in die Umgebung weitgehend ausschließt.



Bild 4-22: Geringer Radius und geringe Sichtweite – Spurhaltung und Fluchtpunktbeobachtung werden gemeinsam bewältigt

4.1.7 Abschnitte mit Singularitäten und freiem Umfeld

Die Abschnitte dieser Kategorie sind durch eine gestreckte Linienführung gekennzeichnet, die durch eine oder zwei aufeinander folgende enge Kurven unterbrochen wird. Insgesamt gibt es fünf solcher Abschnitte auf der Untersuchungsstrecke, die sich über alle vorkommenden Straßenklassen (Bundes-, Staats- und Kreisstraße) verteilen. Das freie Straßenumfeld ermöglicht die Sicht auf die Singularitäten, die eine deutliche Geschwindigkeitsreduzierung erfordern. Die Sichtweite verläuft annähernd linear von Maximum zu Minimum, durch Einzelkurven bedingte Zwischenanstiege kommen nur bei Sichtweiten größer 300 m vor. Die geringste vorkommende Sichtweite beträgt 99 m, innerhalb der untersten Sichtweitenklasse liegen daher nur sehr wenige Daten vor.

Blickbewegungsmaße

Die Blickmaße in dieser Abschnittskategorie verhalten sich uneinheitlich. Wie in den vorangegangenen kurvenreichen Abschnitten besteht eine Überlagerung der Einflüsse von Kurvenfahrt und Sichtweite, wobei die Spurhaltung in den Kurven das Blickverhalten dominiert. Dennoch zeigt der bei geringen Sichtweiten zunehmende Fixationszeitanteil einen Anstieg der Aufmerksamkeit, der im Mittel bereits bei 250 m Sichtweite beginnt. Der Effekt ist jedoch nur schwach ausgeprägt und lässt sich nicht durch verstärkte Zuwendung zum Straßenfluchtpunkt (PRC-Maß) belegen.

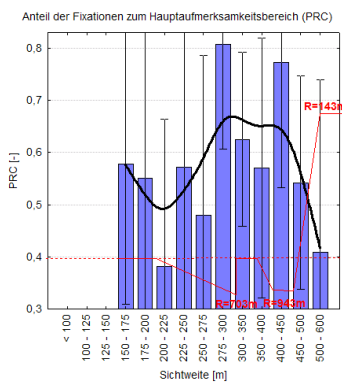


Bild 4-23: PRC eines Einzelabschnitts mit Singularität

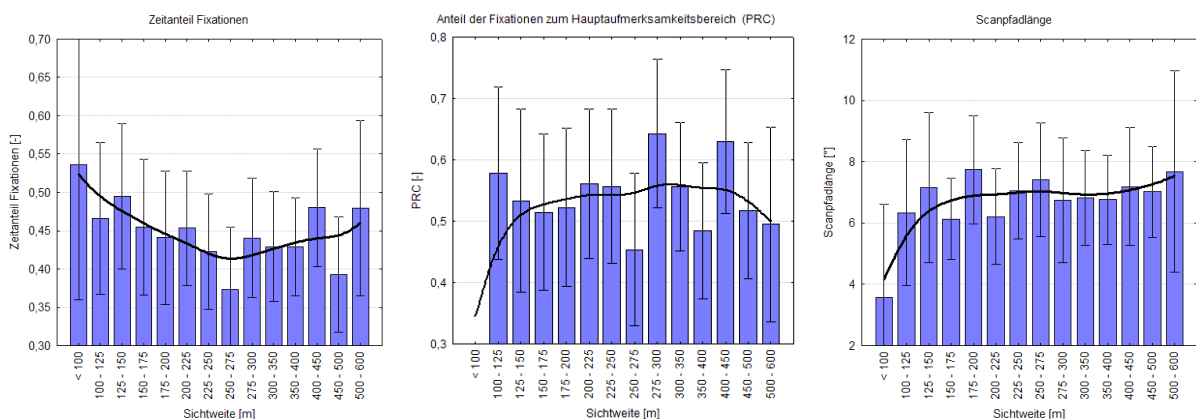


Bild 4-24: Blickbewegungsmaße in Abschnitten mit Singularität

Insgesamt ist die Spurhaltung in der Kurve der maßgebende Faktor, Sichtweiteneinflüsse werden dadurch weitgehend verdrängt. Da die Kurven in den verschiedenen Abschnitten an unterschiedlichen Stellen liegen, ergibt die Überlagerung aller Abschnitte annähernd eine Gleichverteilung der Blickmaße. Eine schwache Tendenz ansteigender Fixationszeitanteile bei geringer werdender Sichtweite bleibt erkennbar, wird jedoch von starken Streuungen

überlagert. Bild 4-23 zeigt beispielhaft für einen Abschnitt, wie die Maße auf Kurven reagieren.

Fahrverhalten

Auch das Geschwindigkeitsverhalten wird maßgeblich durch die engen Kurvenradien beeinflusst. Im Durchschnitt wird am Kurveneingang auf 90 km/h verzögert und nach dem Durchfahren der Kurve – trotz geringer werdender Sichtweite - wieder beschleunigt. Die Geschwindigkeit wird dabei in etwa auf das Niveau erhöht, auf das in geraden Abschnitten bei gleicher Sichtweite verzögert wurde. Erst wenn dieses Niveau erreicht wurde (hier bei ca. 100 m vorhandener Sichtweite, s. Bild 4-25), setzt die Verzögerung ein. Insofern bestätigt sich nach dem Durchfahren der Kurven das auf Geraden und in leicht kurvigen Abschnitten beobachtete, sichtweitenbezogene Verhalten.

Diskussion

Die Abschnitte mit Singularitäten unterstreichen die dominierende Bedeutung der Kurvenradien für das Blick- und Geschwindigkeitsverhalten. Der Sichtweite kommt demgegenüber eine deutlich geringere Bedeutung zu. Nach dem Durchfahren der Singularitäten wird trotz geringer werdender Sichtweite weiter beschleunigt, erst bei Sichtweiten unterhalb von 100 m wird reagiert und der Fuß vom Gas genommen. In der Beschleunigungsphase ziehen es die Fahrer offenbar bis zu einer kritischen (geschwindigkeits- oder sichtweitenbedingten) Grenze vor, die geringe Sichtweite zu ignorieren.

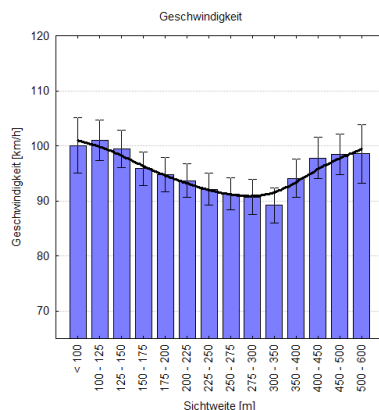


Bild 4-25: Geschwindigkeitsverlauf in Abschnitten mit Singularität

4.1.8 Abschnitte mit großen Sichtweiten

Diese Kategorie dient als Kontrollgruppe für die Entwicklung von Blick- und Fahrverhaltensmaßen bei großen Sichtweiten. Eine Unterteilung nach Kurvigkeit und Seitenraumgestaltung findet hier nicht statt, da nur sehr unzuverlässige Aussagen aufgrund geringer Datenmengen getroffen werden könnten. Sechs Abschnitte werden hier zusammengefasst, wovon einer eine Singularität enthält und die anderen der leicht kurvigen oder geraden Charakteristik zuzuordnen sind. Ein stark verzerrender Einfluss der Kurvigkeit ist daher nicht anzunehmen. Das Umfeld ist in allen Fällen frei.

Zeitliche Blickbewegungsmaße

Es zeigt sich eine Bestätigung der Verläufe, wie sie auf Geraden bei großen Sichtweiten auftreten. Nach einer Orientierungsphase beim Einfahren in den Abschnitt nehmen Fixationsdauern und die Blickzuwendung zum Straßenfluchtpunkt ab, erst unterhalb von 200 m ist wieder ein Ansteigen erkennbar. In diesem unteren Sichtweitenbereich treten allerdings starke Streuungen auf, da er nicht in jedem Abschnitt vertreten ist. Die Wertebereiche beider Maße entsprechen denen auf Geraden mit freiem Umfeld. Der Zeitanteil der Fixationen ist in großen Klassen gegenüber der Sichtweite indifferent, der zu verzeichnende Anstieg unterhalb von 200 m wird ebenfalls durch große Streuungen in seiner Aussagekraft abge-

schwächt.

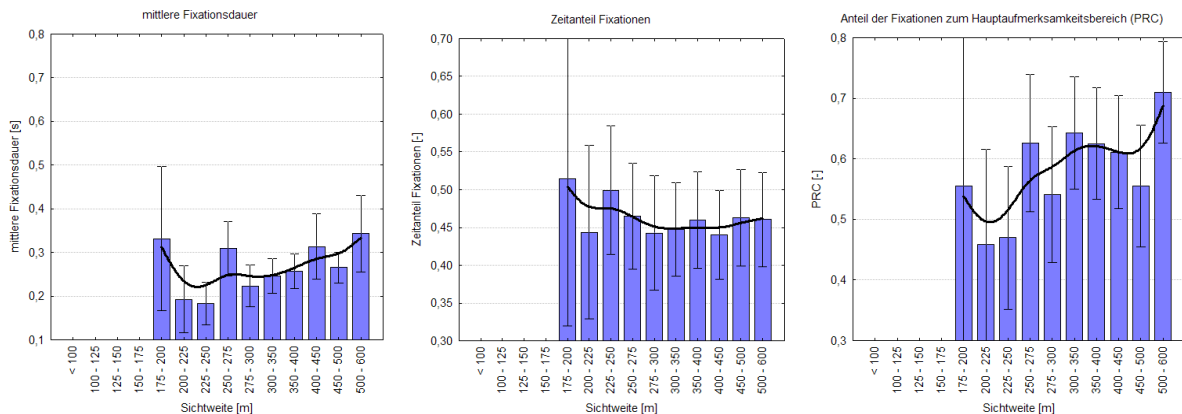


Bild 4-26: Zeitliche Blickbewegungsmaße in Abschnitten mit großen Sichtweiten

Räumliche Blickbewegungsmaße

Die Entwicklung der Scanfadlänge folgt keinem klaren Trend, eine Konzentration des Blickverhaltens mit abnehmender Sichtweite ist nicht zu erkennen. Dies führt zu dem Schluss, dass die hier vorhandenen Sichtweiten dem Fahrer als ausreichend erscheinen, er sieht keine Notwendigkeit, dem Fluchtpunkt erhöhte Aufmerksamkeit zu widmen und sich verstärkt dort hin zu konzentrieren.

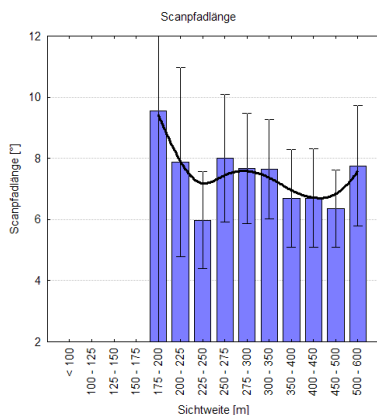


Bild 4-27: Räumliches Blickbewegungsmaß Scanfadlänge in Abschnitten mit großen Sichtweiten

Fahrverhalten

Der Geschwindigkeitsverlauf zeigt, dass eine sichtweitenbezogene Reaktion in diesen Bereichen nicht eintritt. Die Fahrer schätzen die verbleibenden Reaktionswege offenbar als ausreichend ein und beschleunigen durchgehend. Die Beschleunigung wird auch unterhalb von 200 m von den meisten Probanden fortgesetzt; in diesem Bereich erfolgt in Abschnitten mit einem geringeren Sichtweitenminimum bereits der Verzögerungsbeginn. Das unterschiedliche Verhalten ist erklärbar: Der Fahrer weiß oder nimmt an, dass sich nach dem Überfahren der Kuppe am Minimum die Sichtweite wieder vergrößert und behält seinen Fahrhythmus bei.

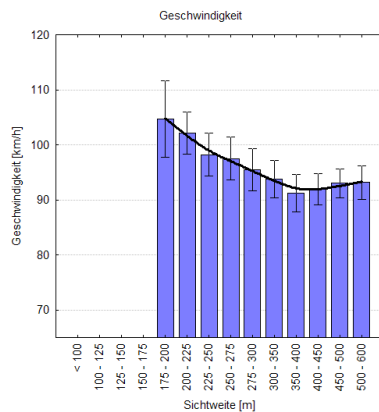


Bild 4-28: Geschwindigkeitsverlauf in Abschnitten mit großen Sichtweiten

Diskussion

Eine minimale Sichtweite von etwa 200 m erscheint den meisten Fahrern noch als ausreichend. Sinkt die Sichtweite nicht weiter ab, erfolgt weder eine Reaktion des Blick- noch des Fahrverhaltens.

4.1.9 Abschnitte mit mehreren Sichtweitenminima

In dieser Kategorie sind alle Abschnitte zusammengefasst, die nicht über ein klar definiertes Sichtweitenminimum verfügen. Es zeigte sich, dass der Verlauf einiger Blickmaße dieser Abschnitte nicht dem durchschnittlichen entspricht, den andere Abschnitte vergleichbarer Kurvigkeit und Seitenraumgestaltung aufweisen. Daher wurden sie zu einer gesonderten Gruppe zusammengefasst. Wird die Sichtweite durch eine Kuppe mit großem Halbmesser oder durch eine Kurve mit halbhoher Seitenraumbepflanzung begrenzt, ist für jeden Probanden abhängig von seiner Augpunkthöhe die Straße in unterschiedlichem Maße einsehbar. Die spezifisch wahrgenommene Sichtweite muss daher nicht der standardisiert aufgemessenen entsprechen. Im Falle von großen Kuppenhalbmessern besteht zudem eine größere Diskrepanz zwischen der mit einer Zielpunkthöhe von 1 m gemessenen Sichtweite und der einsehbaren Straßenfläche als in Abschnitten mit klar definiertem Sichtweitenminimum. Eine Auswirkung geringer Sichtweiten sollte dennoch erkennbar sein.

Blickbewegungsmaße

Das stabilste Maß, welches einen Einfluss der Sichtweite auf das Blickverhalten anzeigt, ist wiederum der Zeitanteil der Fixationen. Dies ist wenig überraschend, da das unterschiedliche Suchverhalten verschiedener Probanden dadurch am besten abgebildet wird. Unterhalb von 175 m vorhandener Sichtweite ist eine deutliche Aufmerksamkeitssteigerung zu verzeichnen.

Der Anteil der Fixationen zum Hauptaufmerksamkeitsbereich geht hingegen kontinuierlich zurück, was auf die Abhängigkeit der Lage des Fluchtpunktes von der Augpunkthöhe zurückzuführen sein dürfte: Der in der Auswertung der Videos erkannte Fluchtpunkt, der als Berechnungsgrundlage dient, kann hier wesentlich stärker von dem für den Fahrer sichtbaren Fluchtpunkt abweichen als in Abschnitten mit klar definiertem Sichtweitenminimum. Die übrigen Maße zeigen keinen Zusammenhang mit der Sichtweite.

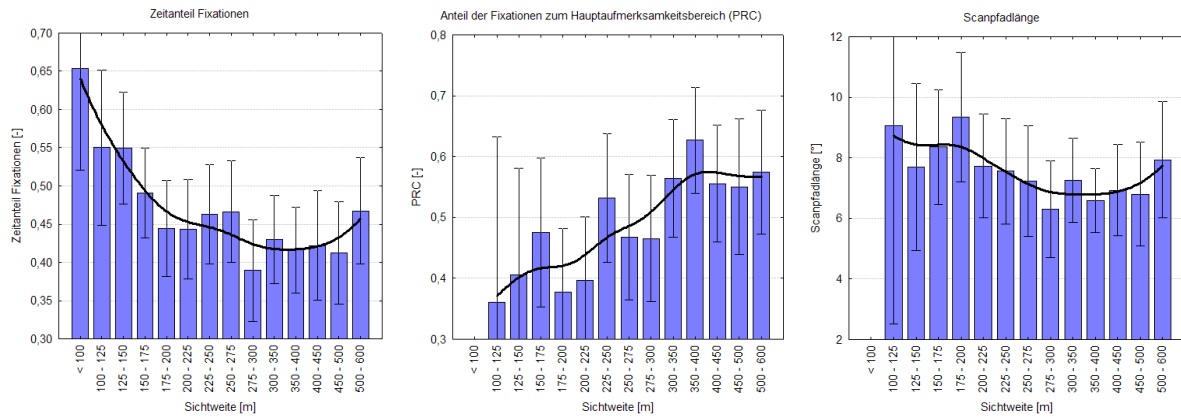


Bild 4-29: Blickverhaltensmaße in Abschnitten mit mehreren Sichtweitenminima

Fahrverhalten

Die Auswertung des Fahrverhaltens zeigt eine frühzeitige Verringerung der Geschwindigkeit (Beginn ca. bei 400 m), mit der auf die ersten lokalen Sichtweitenminima reagiert wird. Unterhalb des auf Geraden üblichen und zulässigen Niveaus bleibt die Geschwindigkeit im Mittel konstant bis zu einer Sichtweite von 175 m und wird darunter sukzessive weiter verringert. Der konstante Verlauf ist hier ein Effekt der Mittelwertbildung, im Einzelfall wird je nach Lage und Betrag der lokalen Sichtweitenminima leicht beschleunigt oder verzögert. Das Verhalten unterhalb von 175 m entspricht exakt dem auf geraden Abschnitten mit einem klar erkennbaren Sichtweitenminimum und bestätigt dadurch die dort erhobenen Ergebnisse.

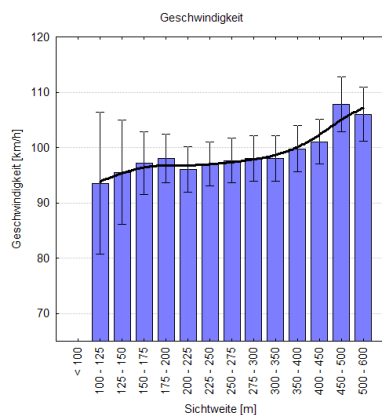


Bild 4-30: Geschwindigkeitsverlauf in Abschnitten mit mehreren Sichtweitenminima

Diskussion

Das Verhalten in Abschnitten mit mehreren oder gestreckten Sichtweitenminima ist schwieriger messbar, entspricht aber im Wesentlichen den Erkenntnissen der anderen Abschnittskategorien. Insbesondere der nahezu identische Geschwindigkeitsverlauf zeigt, dass das Ergebnis der Informationsaufnahme und -verarbeitung im Bereich geringerer Sichtweiten unabhängig von der Art des Sichtweitenminimums ist.

4.1.10 Zusammenfassung Realfahrten

Die Auswertung der Versuchsfahrten zeigt, dass die vorhandene Sichtweite einen Einfluss auf das Blick- und Fahrverhalten von Kraftfahrern ausübt. Dies wird insbesondere in den geraden Abschnitten deutlich, in denen es keine andere Begründung für die beobachteten Verhaltensänderungen gibt.

Im Bereich von Lageplangeraden wurden deutliche Veränderungen im Blickverhalten bei einer Sichtweite von 200 m festgestellt. Der Blick konzentriert sich stärker zum Straßenfluchtpunkt, gleichzeitig wird die Geschwindigkeit moderat reduziert. Dies geschieht durch Gaswegnahme oder leichte Bremsbetätigung. Da beide Reaktionen gleichzeitig eintreten, sind sie als gemeinsames Ergebnis der Erkenntnis der Fahrer zu werten, dass die Sichtweite von hier an als unsicher und der verbleibende Reaktionsweg als grenzwertig angesehen werden. Der auf Fixationen entfallende Zeitanteil, der als Indikator für Aufmerksamkeit interpretiert wird, beginnt bei Sichtweiten zwischen 200 und 175 m zu steigen.

Im Bereich einer Sichtweite von 125 m (Mittelwert) wurde nochmals ein sprunghafter Anstieg der Bremseneingriffe festgestellt. Selbst Beschleunigungsvorgänge nach Ortsdurchfahrten, die an diesem Punkt noch nicht die ansonsten außerorts gefahrene Geschwindigkeit erreicht haben, werden abgebrochen, während die Konzentration weiter ansteigt. Hier gibt es offenbar eine kritische Grenze, die den Fahrer unsicher werden lässt. Er kommt zu dem Schluss, dass hier selbst die Reaktionsmöglichkeiten auf plötzliche Hindernisse – im Sinne der Haltesichtweite – stark eingeschränkt sind.

In kurvigen Streckenabschnitten übt der Kurvenradius einen zusätzlichen, überlagernden Einfluss auf das Blick- und Fahrverhalten aus. Sind die Radien groß genug, um sie ohne Geschwindigkeitsreduzierung durchfahren zu können, treten die gleichen sichtweitenbedingten Verzögerungen wie auf Geraden auf. Das Blickverhalten dient beim Durchfahren von Kurven vorrangig der Spurhaltung, die Sichtweite als Einflussfaktor wird stark zurückgedrängt. In engen Kurven wird auch die Geschwindigkeit maßgebend vom Radius beeinflusst.

In Abschnitten mit Singularitäten wurde nach dem Durchfahren der Singularität eine Beschleunigung festgestellt, die sich auch bei geringen Sichtweiten fortsetzt. Gleichzeitig ist jedoch anhand des Blickverhaltens eine gesteigerte Beanspruchung erkennbar. Der Fahrer ist sich der nicht ausreichenden Sichtweite offenbar bewusst, möchte aber den Beschleunigungsvorgang trotzdem nicht unterbrechen. Erst unterhalb von 100 m Sichtweite wird hier eine kritische Grenze erreicht, an der der Fuß vom Gas genommen wird.

4.2 Realfahrten mit Nebenaufgabe

Für die Fahrten mit Nebenaufgabe wurden aus den Probanden der ersten Messreihe diejenigen 15 ausgewählt, bei denen in der Blickbewegungsmessung die höchsten Genauigkeiten vorlagen. Dadurch sollte eine Verbesserung der Messgenauigkeit erreicht werden.

Die Beanspruchung durch die Nebenaufgabe wurde durchgängig als hoch bewertet, alle Probanden gaben nach der ca. 75minütigen Fahrt an, erschöpft zu sein. Die Voraussetzungen für die Interpretation der Zuwendungszeit zur Nebenaufgabe als Maß für die verfügbare Restaufmerksamkeit sind damit erfüllt: Fahraufgabe und Nebenaufgabe zusammen beanspruchen den Fahrer vollständig, eine darüber hinaus verfügbare Restkapazität bleibt nicht.

4.2.1 Geraden mit freiem Umfeld

Die Auswertung der Fixationsanteile zur Nebenaufgabe zeigt generell ein überraschend geringes Niveau. Auch bei großen Sichtweiten wurden lediglich etwa 10% aller Fixationen zur Nebenaufgabe gerichtet. Aufgrund der Beobachtungen während der Messfahrten, wo eine kontinuierliche Bearbeitung festgestellt wurde, wurde mit höheren Anteilen gerechnet. Die Aufgabe war so angelegt, dass etwa ein Blick pro Sekunde zum Touchscreen gerichtet sein musste, um eine lückenlose Beobachtung des durchlaufenden Textes zu gewährleisten. Bei einer durchschnittlichen Fixationsdauer von etwa 0,3 s wurde bei nicht erhöhter Beanspruchung der Anteil der zur Nebenaufgabe gerichteten Blicke deswegen auf etwa 1/3 geschätzt. Der deutlich geringere Anteil muss als Auswirkung der Erfassungsverluste durch die Kopfdrehung zum Touchscreen angesehen werden. Dreht der Proband den Kopf zu weit nach rechts oder links, so sind seine Augen für die Kameras verdeckt und eine Berechnung der Blickrichtung nicht mehr möglich. Ob dieser Effekt auftritt und ab welcher Drehung, wird von

den physiognomischen Eigenschaften jedes Probanden bestimmt. Der Effekt tritt deshalb innerhalb jeder Einzelfahrt stetig auf und kann daher über die Sichtweitenbereiche als gleichverteilt angenommen werden. Es ist somit legitim, aus dem relativen Verlauf der Fixationsanteile Rückschlüsse auf die Aufmerksamkeitsverteilung unter verschiedenen Sichtweiten zu ziehen, auch wenn über absolute Anteile keine Aussage möglich ist.

Bei Sichtweiten oberhalb von 400 m ist der Anteil der Fixationen zur Nebenaufgabe verhältnismäßig hoch. Dem Fahrer steht offenbar genügend Sicht zur Verfügung, ihm bleibt ausreichend Zeit, um sich der Nebenaufgabe zu widmen. Anschließend fällt die Beobachtungszeit merklich ab. Hier kann der Betrag der Sichtweitenmaxima eine Rolle spielen: In den meisten Abschnitten dieser Kategorie liegt dieser im Bereich zwischen 400 und 600 m. Davor befindet sich naturgemäß ein Minimum der Sichtweite, an dem der Fahrer meist die Nebenaufgabe weitgehend ignorierte. Fährt er in den Abschnitt ein, versucht er so schnell wie möglich wieder in die Bearbeitung der Nebenaufgabe einzusteigen. Die Bearbeitungszeit ist dann besonders hoch, da intuitiv versucht wird, Verlorenes aufzuholen. Im Ergebnis werden nicht nur der aktuell durchlaufende Begriff, sondern auch die nachfolgenden, bereits einsehbaren Kombinationen betrachtet, so dass anschließend der Blick wieder länger auf die Straße gerichtet werden kann. Infolgedessen sind in den anschließend durchfahrenen Sichtweitenklassen etwas weniger Blicke zur Nebenaufgabe notwendig, ein Teil des Bildschirminhalts ist ja bereits bekannt. Nach einer gewissen Zeit klingt dieser Effekt jedoch ab, die Bearbeitungsdauer steigt wieder auf ein höheres Niveau. Unterhalb einer Sichtweite von 150 m fällt der Anteil der Fixationen zur Nebenaufgabe dann sprunghaft auf ein Niveau nahe Null. Hier erscheint es den Fahrern offenbar übereinstimmend nicht mehr sicher, den Blick von der Straße abzuwenden.

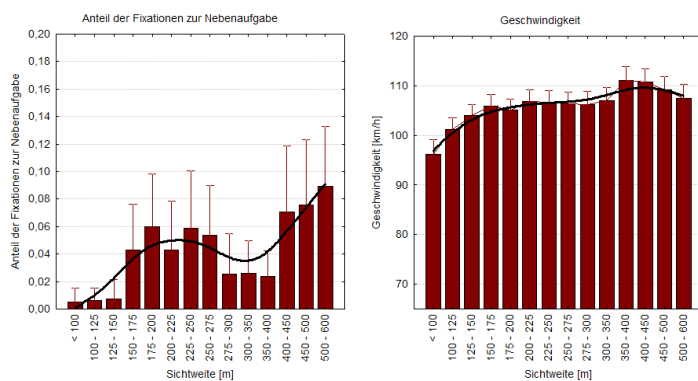


Bild 4-31: Nebenaufgabenbearbeitung und Geschwindigkeit in geraden Abschnitten mit freiem Umfeld

Der Geschwindigkeitsverlauf ist nahezu identisch mit dem der Fahrten ohne Nebenaufgabe. Von einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 106 km/h beginnt die Verzögerung bei einer Sichtweite von 200 m und setzt sich kontinuierlich fort. Unterhalb von 100 m Sichtweite werden durchschnittlich 96 km/h gemessen. Die Übereinstimmung zeigt, dass die Nebenaufgabe in ihrem Sinn als solche wahrgenommen und befolgt wurde, anstelle die Geschwindigkeit zugunsten einer höheren Bearbeitungsleistung herabzusetzen. Weiterhin zeigt sich die Wiederholbarkeit der sichtweitenbedingten Geschwindigkeitsreduzierung, die somit kein zufälliges Ergebnis darstellen kann. Das scheinbare sprunghafte Absinken der Geschwindigkeit bei einer Sichtweite von 350 m entsteht dadurch, dass einige Abschnitte nur Sichtweiten bis zu dieser Größenordnung aufweisen (vgl. Kapitel 4.1.2).

4.2.2 Geraden mit blickdichtem Umfeld

Wie bereits in der ersten Messreihe sind die Daten dieser Abschnittskategorie mit hohen Streuungen behaftet. Verursacht wird dies durch die geringere Abschnittszahl, die veränderte Lichtintensität gegenüber der Kalibrierung des Messsystems und die Erfassungsverluste.

te durch notwendige Kopfdrehungen. Eine Beurteilung der absoluten Höhe der Fixationsanteile ist daher auch hier nicht möglich. Dennoch zeigt sich zumindest ein klares Ergebnis: wie auf Geraden mit freiem Umfeld fällt der Anteil der Fixationen zur Nebenaufgabe bei Sichtweiten unterhalb von 150 m sprunghaft auf Null. Der Blick bleibt von da an auf der Straße, Nebentätigkeiten werden vorübergehend eingestellt.

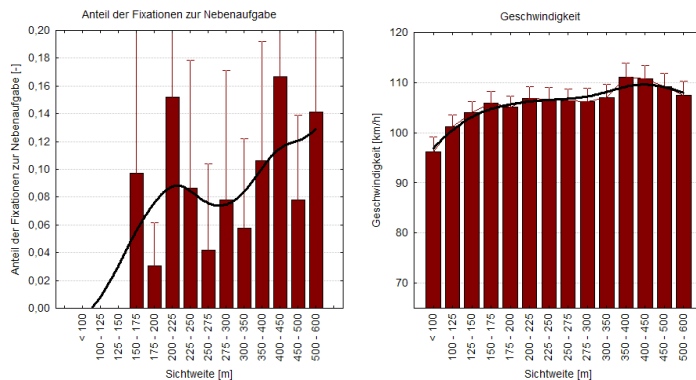


Bild 4-32: Nebenaufgabenbearbeitung und Geschwindigkeit in geraden Abschnitten mit blickdichtem Umfeld

Auch auf Geraden mit blickdichtem Umfeld entspricht der Geschwindigkeitsverlauf dieser Messreihe mit hoher Übereinstimmung dem der Fahrten ohne Nebenaufgabe und beweist damit die Reproduzierbarkeit des Fahrverhaltens. Der Einfluss der vorhandenen Sichtweite ist klar erkennbar, die Verzögerung beginnt bei ca. 175 m.

4.2.3 Leicht kurvige Abschnitte mit freiem Umfeld

Die bereits in den geraden Abschnitten angeführten Messbeeinträchtigungen führen auch hier zu großen Schwankungen in der Genauigkeit der Blickbewegungsmessung. Ein straffer Zusammenhang zwischen Nebenaufgabe und vorhandener Sichtweite ist nicht erkennbar, erst unterhalb von 100 m findet keine Abwendung von der Straße mehr statt. Im Bereich zwischen 100 und 150 m ist sogar ein Anstieg der Fixationen zum Touchscreen zu verzeichnen, insofern besteht hier ein Widerspruch zu den Ergebnissen der geraden Abschnitte. Der Versuch einer Interpretation: Ist das Blickverhalten mehr mit der Spurhaltung als mit der Beobachtung des Fluchtpunktes beschäftigt, ermöglichen zwei Effekte einen schnelleren Blicksprung zum Touchscreen und zurück: Zum einen ist die räumliche Distanz zwischen dem Fixationsort auf der Straße und dem Touchscreen zumindest in Rechtskurven geringer, zum anderen die Differenz der Zielpunktentfernung. Das Auge muss daher eine geringere Anpassungsleistung vollbringen, wodurch auch bei geringeren Sichtweiten noch kurze Blicksprünge zur Nebenaufgabe möglich sind.

Eine weitere Erklärung könnte in der Lage der leicht kurvigen Abschnitte zu finden sein. Sie befinden sich ausschließlich im relationstrassierten Teil der Untersuchungsstrecke; die weitere Linienführung hinter der die Sicht beschränkenden Kuppe ist anhand aufragender Seitenraumelemente stets erkennbar (vgl. Kap. 4.1.4). Möglicherweise fühlen sich die Probanden dadurch sicherer vor unerwarteten Änderungen der Linienführung und sind eher bereit, auch bei geringen Sichtweiten den Blick kurz von der Straße abzuwenden. Ein Beweis dieser Hypothesen kann wegen der großen Streubreite der vorliegenden Daten jedoch an dieser Stelle nicht überzeugend geführt werden.

Das Geschwindigkeitsverhalten bestätigt wiederum die Ergebnisse der Fahrten ohne Nebenaufgabe. Eine Verzögerung (die wegen der hier vorliegenden großen Lageplanradien nicht notwendig wäre) beginnt bei 225 m vorhandener Sichtweite und setzt sich kontinuierlich bis zum Sichtweitenminimum fort. Die dort erreichte Geschwindigkeit beträgt 96 km/h. Der Verlauf ist wie in den vorangegangenen Abschnitten reproduzierbar und zeigt die korrekte Umsetzung und damit Interpretierbarkeit der Nebenaufgabe.

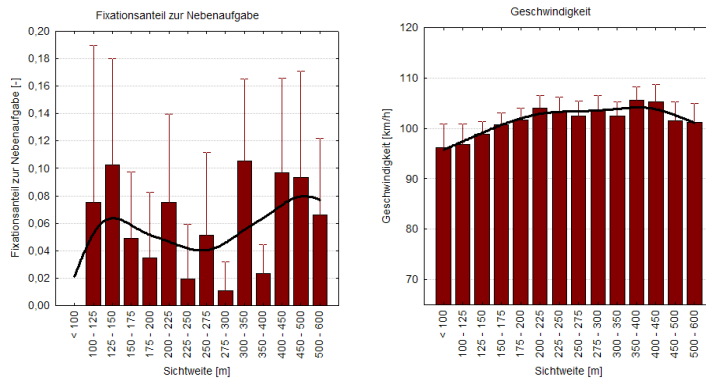


Bild 4-33: Nebenaufgabenbearbeitung und Geschwindigkeit in leicht kurvigen Abschnitten mit freiem Umfeld

4.2.4 Zusammenfassung Nebenaufgabe

Die Ergebnisse der Fahrten mit Nebenaufgabe zeigen, dass ein Einfluss der vorhandenen Sichtweite auf die Verarbeitungskapazität von Fahrern besteht. Mit geringer werdender Sichtweite werden Nebenaufgaben zunehmend eingestellt, unterhalb von 150 m wird auf Geraden der Blick nicht mehr von der Straße abgewandt. In weiten Kurven, in denen der weitere Streckenverlauf auch hinter Kuppen antizipierbar ist, können unterhalb dieser Grenze vereinzelte Blicke zu Nebenaufgaben auftreten.

Die nahezu vollständige Einstellung von Nebentätigkeiten deutet darauf hin, dass der Fahrer seine Aufmerksamkeit jetzt ausschließlich der Suche nach Informationen über den weiteren Streckenverlauf und Verkehrszustand widmet. Der Wert von 150 m Sichtweite kann daher als eine Untergrenze für ein entspanntes Fahren betrachtet werden.

Die Geschwindigkeitsprofile zeigen ebenfalls einen Einfluss der vorhandenen Sichtweite unterhalb von 200 m, in Kurven etwas früher. Sie bestätigen damit das in der ersten Messreihe beobachtete Fahrverhalten und zeigen dessen Reproduzierbarkeit.

4.3 Unfallgeschehen auf der Untersuchungsstrecke

Zur Beschreibung von Zusammenhängen zwischen der vorhandenen Sichtweite und der Verkehrssicherheit wurden alle Unfälle des Dreijahreszeitraumes 2002 bis 2004 auf der Untersuchungsstrecke ausgewertet. Insgesamt ereigneten sich in dieser Zeit 51 nach den in Kap. 2.6 erarbeiteten Kriterien möglicherweise relevante Unfälle. Aus den polizeilichen Unfallberichten ließen sich keine Hinweise zum Einfluss der Sichtweite auf die Unfallentstehung entnehmen. Es wurden weder punkt- noch linienförmige Unfallhäufungsstellen festgestellt. Aufgrund der geringen Unfallanzahl lassen sich weder abgesicherte Aussagen noch Trends zum Einfluss von Streckenparametern auf das Unfallgeschehen ableiten, auf eine Auswertung der Unfallkenngrößen wurde deshalb verzichtet.

In Anhang 1 sind die erfassten Unfälle dem Streckenprofil zugeordnet. Auch anhand dieser Zuordnung lässt sich kein Zusammenhang zwischen Unfallort und vorhandener Sichtweite erkennen. Ein direkter Einfluss der vorhandenen Sichtweite auf das Unfallgeschehen kann somit für die hier untersuchten Strecken nicht nachgewiesen werden.

4.4 Simulatorversuch zu abrupten Reaktionen

Das Verhalten der Probanden in den Realversuchen hat gezeigt, dass eine Verringerung der vorhandenen Sichtweite wahrgenommen wird und dass ab bestimmten Werten eine Reaktion erfolgt. Das Blickverhalten konzentriert sich zum Fluchtpunkt, die Anspannung steigt und es wird Bremsbereitschaft hergestellt bzw. leicht verzögert. Dem Fahrer wird also bewusst, dass sich die verbleibende Reaktionszeit verkürzt, und er versucht dies mit erhöhter Auf-

merksamkeit und Bereitschaft zu kompensieren. Die Erfahrung zeigt, dass solche Reaktionen meist nicht in ausreichendem Maße erfolgen, um im Falle einer überraschenden Gefahrensituation noch adäquat reagieren zu können. Im Simulatorversuch am IZVW Würzburg wurde untersucht, bei welcher Sichtweite ein aufmerksamer Fahrer noch kontrolliert (im Gegensatz zu abrupt) auf eine bestimmte Verkehrssituation reagieren kann.

Die 13 Fahrer trafen bei unterschiedlichen Sichtweiten auf eine Situation, die eine Reaktion erforderte (s. Kap. 3.6). Sie mussten entweder eine sehr enge Kurve ($R = 80\text{ m}$) durchfahren, die eine deutliche Reduzierung der Geschwindigkeit erforderte, oder vor einem Pannenzug anhalten bzw. stark bremsen (Vorbeifahren wurde durch eingespielten Gegenverkehr verhindert). Die vorhandene Sichtweite beim erstmaligen Auftauchen dieser Situationen wurde über den Kuppenhalbmesser manipuliert; Bild 4-34 zeigt die prinzipielle Gestaltung der Streckenabschnitte im Höhenprofil. Vorgegeben wurden Sichtweiten zwischen 70 und 220 m.

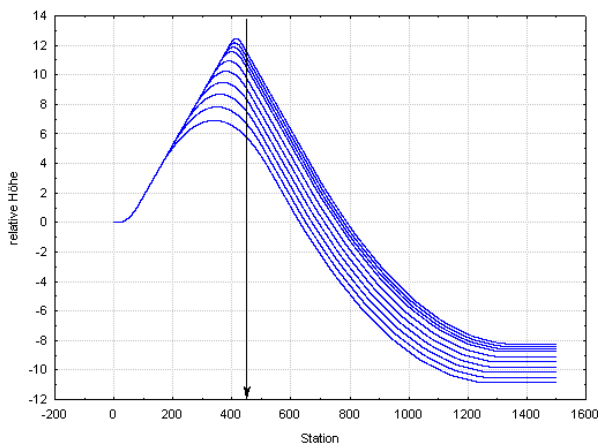


Bild 4-34: Höhenprofil der Streckenabschnitte. Der Pfeil markiert die Position des Hindernisses (Kurveneingang einer Singularität oder Pannenzug, stets bei Station 0+450m)

Von Interesse für die Fragestellung ist nun, ob die Fahrerreaktion in Abhängigkeit von der verfügbaren Sichtweite als abrupt eingestuft werden soll oder nicht. Dazu wurden verschiedene Indikatoren des Fahrerverhaltens untersucht.

4.4.1 Bremsbetätigung

Maximaler Bremsdruck

Beide Hindernisarten waren nur zu bewältigen, wenn die Bremse betätigt wird. Ein Indikator für die Heftigkeit der Reaktion ist der maximale Bremsdruck, der vor der kritischen Situation auftritt. Bild 4-35 zeigt die Mittelwerte und 95%-Konfidenzintervalle dieser Kenngröße für Kurven- und Pannensituationen.

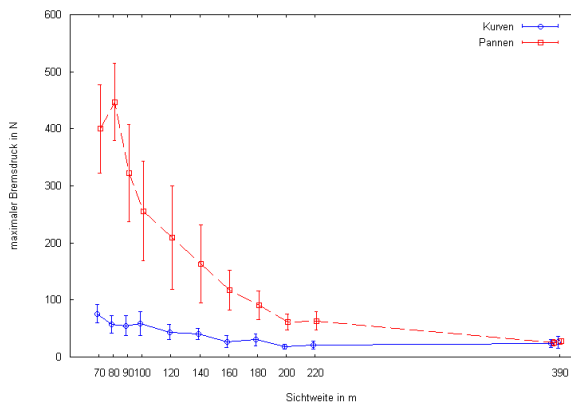


Bild 4-35: Mittelwerte des maximalen Bremsdrucks vor einem Hindernis

Generell erfordern die Pannensituationen ein deutlich stärkeres Bremsen als die Kurven. In beiden Situationen ist ein Anstieg des maximal ausgeübten Bremsdrucks bei einer Sichtweite von weniger als 200 m zu erkennen. Zwischen 120 m (Kurven) und 100 m (Pannen) erhöht sich der Anstieg nochmals. Wie in Kap. 3.6.2 dargelegt, existiert kein Grenzwert für den maximalen Bremswert, der abrupte Reaktionen von normalem Fahrverhalten abgrenzt. Um dies zu unterscheiden, müssen deshalb weitere Parameter herangezogen werden.

Mittlerer Bremsdruck

Die erforderliche Geschwindigkeitsreduzierung kann durch einmalig kurzes, heftiges Betätigen der Bremse oder durch längeres, konstanteres Bremsen erfolgen. Von daher scheint es sinnvoll, zusätzlich zum maximalen den mittleren Bremsdruck vor der kritischen Situation zu betrachten. Bild 4-36 zeigt die Vorgehensweise bei der Berechnung und die Ergebnisse zum mittleren Bremsdruck.

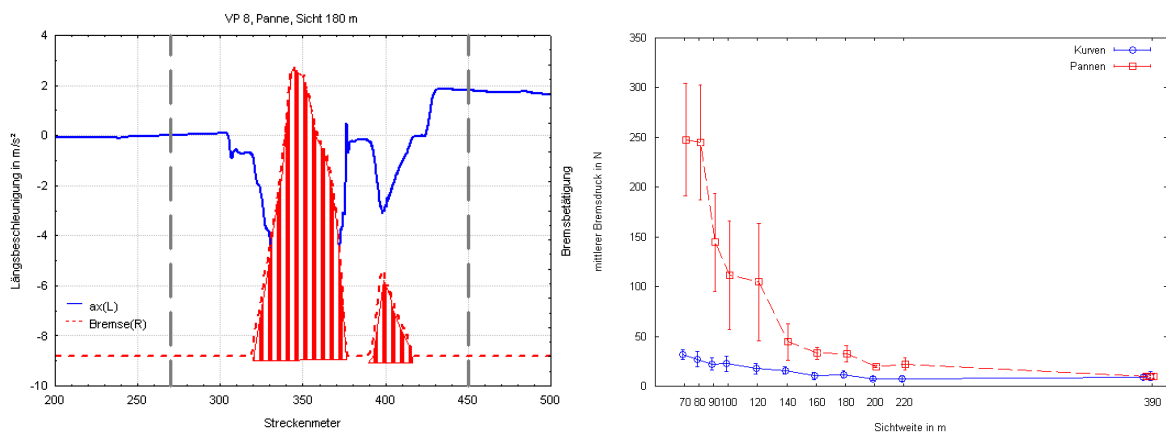


Bild 4-36: Berechnung und Ergebnisse des mittleren Bremsdrucks

Die mittleren Bremsdrücke steigen mit geringer werdender Sicht auf das Hindernis an. Deutliche Sprünge zeigen sich in den Pannensituationen bei Sichtweiten von 200 m, 140 m und 100 m; bei Kuppen beginnt ab Sichtweiten von 200 m ein nahezu monotoner Anstieg des Bremsdrucks.

Zeitpunkt des Bremsens

Betrachtet man das Bremsverhalten der Versuchspersonen näher, so fällt auf, dass bei größeren Sichtweiten die Bremse erst deutlich nach der Sichtgrenze betätigt wird. Der Fahrer scheint also zu warten, bis er einen bestimmten Abstand zum Hindernis erreicht hat, bevor er bremst. Diese Verhaltensweise deutet auf ein Ausreichen der zur Verfügung stehenden

Reaktionszeit hin.

In beiden Fällen tritt der erste messbare Bremsdruck in umso größerem Abstand vom Hindernis auf, je früher dieses Hindernis erkennbar ist. Der Anstieg ist nahezu linear. Setzt man für eine kontrollierte Reaktion eine Reaktionszeit von 2 s an (entspricht bei etwa 100 km/h einer zurückgelegten Strecke von etwa 50 m, grüne Linie in Bild 4-37), so ergeben sich Grenzen von 130 m für die Kurvensituationen und 180 – 200 m für die Pannen. Unterhalb dieser Werte stehen dem Fahrer geringere Reaktionszeiten zur Verfügung.

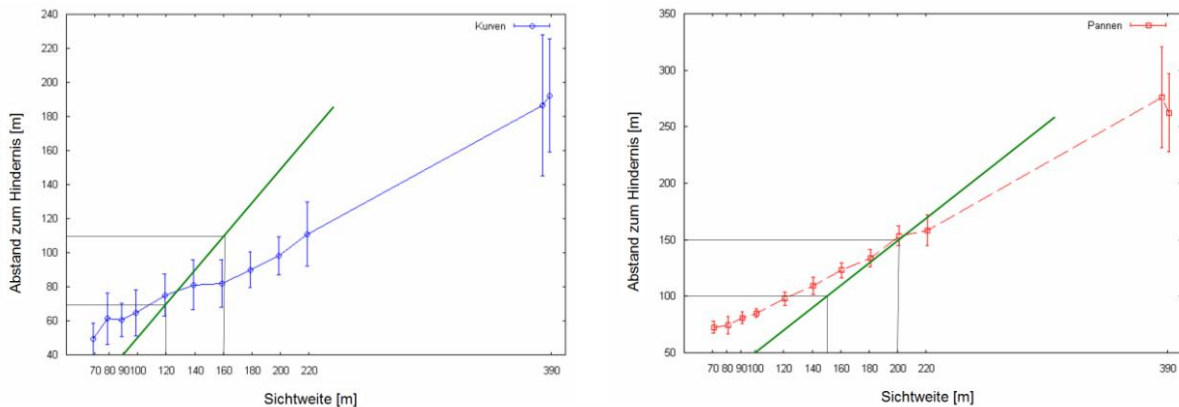


Bild 4-37: Abstand zur Hindernisposition in Metern beim ersten Bremsdruck. Die grüne Linie entspricht einem zurückgelegten Weg von 50 m (etwa 2 s) zwischen dem Erkennen der Situation und dem ersten Betätigen der Bremse.

4.4.2 Verzögerung

Für die beschriebene Betätigung des Bremspedals kann kein Grenzwert einer abrupten Reaktion angegeben werden. Für die fahrdynamische Folge, die Längsverzögerung, ist dies aber möglich. Wie in Kap. 3.6.2 beschrieben, kann man bei Verzögerungen, die stärker als 3 m/s^2 sind, von abruptem Fahren sprechen.

(Eine Betrachtung der Geschwindigkeit selbst ist für keine der Situationen zielführend: Die Pannensituationen erfordern praktisch ein Anhalten, das sichere Durchfahren der Kurven hängt stärker vom Simulator-Geschick des Probanden ab als von der Geschwindigkeit).

Maximale Verzögerung

Bild 4-38 zeigt die Mittelwerte der von den Versuchspersonen erzeugten maximalen Verzögerungswerte vor den Hindernissen. Vor Kurven treten bereits bei Sichtweiten unter 180 m teilweise abrupte Reaktionen auf, ab 140 m enthalten die Konfidenzintervalle den Grenzwert von 3 m/s^2 nicht mehr. Hier liegt eine abrupte Fahrweise vor.

In den Pannensituationen werden stets deutlich abrupte Verzögerungen durchgeführt. Unterhalb von 200 m ist nochmals ein deutlicher Anstieg der maximalen Verzögerung zu verzeichnen.

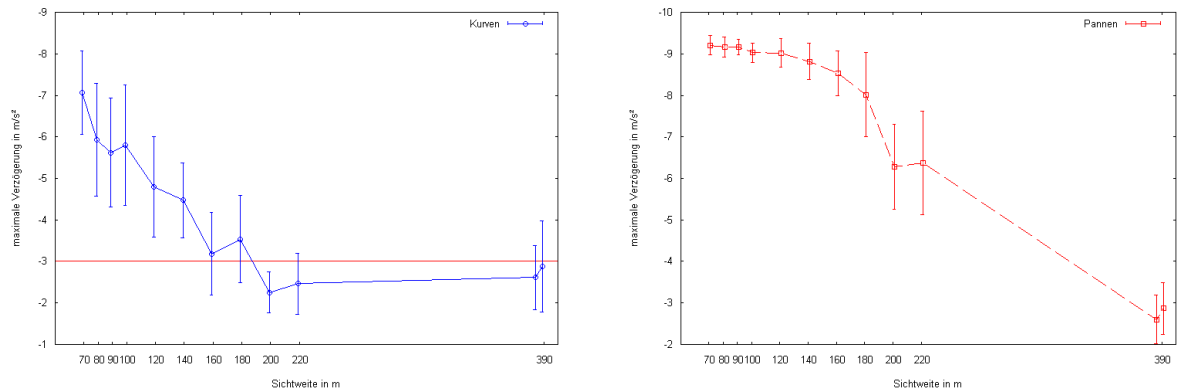


Bild 4-38: Maximale Verzögerungen in Abhängigkeit von der verfügbaren Sichtweite. Die Grenze für unkomfortable Verzögerungen (-3m/s^2) ist als rote Linie eingetragen.

Mittlere Verzögerung

Wie in Kap. 4.4.1 geschildert, kann es sinnvoll sein, neben dem Spitzenwert auch die mittlere Verzögerung heran zu ziehen, um unterschiedlichen Verhaltensweisen gerecht zu werden (kurzes starkes Bremsen vs. längeres moderates). Der Blick gilt hier in erster Linie den Unterschieden in der Verhaltensweise.

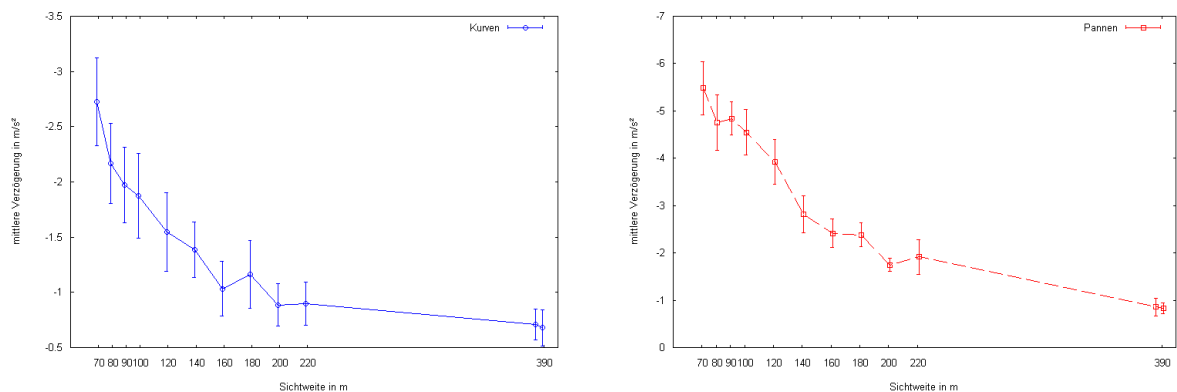


Bild 4-39: Mittlere Verzögerung vor einem Hindernis

Ab 200 m Sichtweite steigen die mittleren Verzögerungen vor den Kurvensituationen kontinuierlich an, ab 140 m verstärkt sich der Anstieg. Im Mittel bleibt die Verzögerung unterhalb des Grenzwertes von 3 m/s^2 . In den Pannensituationen ist der Verlauf prinzipiell gleich, findet aber auf einem höheren Niveau statt. Bei Sichtweiten von unter 140 m wird auch im Mittel die Grenze für abruptes Verhalten überschritten.

4.4.3 Maximale Querschleunigung

Dieser Analyse liegt die Annahme zugrunde, dass hohe Querschleunigungen als Indikator für nicht mehr komfortables oder kontrolliertes Fahren verwendet werden können. Auf der Basis von Kurvenfahrten auf Teststrecken sowie aus Nachberechnungen aus Verfolgungsfahrten wurde ein Grenzwert von 4 m/s^2 für akzeptable Querschleunigungen in Realmessungen festgelegt (s. Kap. 3.6.2). Sinnvoll auswertbar ist diese Kenngröße hier allerdings nur für die Fahrt durch Kurven. Beim Anhalten vor dem Pannefahrzeug treten in der Regel keine Querschleunigungen auf.

Für alle Fahrer wurden die Maxima der Querschleunigung bei der Kurvenfahrt bestimmt. Dabei zeigt sich, dass generell bei jeder Kurvenfahrt sehr hohe Querschleunigungen akzeptiert werden: Bei den 130 Kurvenfahrten im Versuch (13 Probanden x 10 Sichtweiten)

kommt nur einmal ein Querschleunigungsmaximum vor, das unter der Schwelle von 4 m/s^2 liegt; in allen anderen Fällen wird also abrupt gefahren.

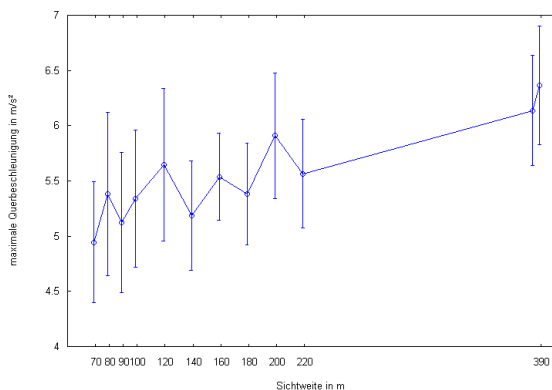


Bild 4-40: Maximale Querschleunigung in Kurven.

Eine mögliche Erklärung ist die nur geringfügige spürbare Rückmeldung der berechneten Querschleunigung durch das Bewegungssystem des Simulators. Während bei Längsbeschleunigungen kurzzeitige Spitzen durch ein Rucken des Systems bemerkbar gemacht werden, können längerdauernde Querschleunigungen nur zum Teil nachgebildet werden. Das Fahrzeugmodell und die Eigenschaften der simulierten Strecke (optimale Reibbeiwerte) erlauben diese Fahrmanöver, ohne dass das Fahrzeug ins Schleudern kommt. Visuell erlebt der Fahrer daher das Fahrmanöver als erfolgreich.

Erstaunlicherweise scheint die maximal akzeptierte Querschleunigung in Kurven sogar etwas anzusteigen, wenn die Sicht auf die Kurve größer ist. Das bedeutet, dass bei früherer Erkennbarkeit der Kurve diese mit tendenziell höherer Geschwindigkeit durchfahren wurde. Hinsichtlich der erheblichen Streuungen und des beschriebenen Simulatoreffektes ist dieses Ergebnis aber nicht überzubewerten. Ähnliche Ergebnisse zeigen sich für die erste Ableitung der Querschleunigung, den Querruck, auf dessen Darstellung hier verzichtet wurde.

4.4.4 Time-To-Collision (TTC) mit stehendem Objekt

Für die Bewertung der Qualität der Reaktion auf plötzliche Hindernisse bietet sich hier ein Parameter an, der in der Verkehrspsychologie in verschiedenen Modellen als Basis für Fahrverhaltensentscheidungen verwendet wird: Die Zeit bis zum Erreichen eines potentiellen Kollisionsobjekts, wenn die Momentangeschwindigkeit beibehalten würde, wird in der Literatur TTC (time-to-collision) genannt. Im Normalfall sinkt diese Zeit bei der Anfahrt auf ein stehendes Hindernis kontinuierlich bis zu einem Minimum ab, an dem der Fahrer bremst. Die Reduktion der Geschwindigkeit führt dann zu einer Erhöhung der TTC. Interessant sind dabei die Beträge der Minima (kleinere TTC-Minima bedeuten einen geringeren Sicherheitsabstand zum Hindernis).

Bild 4-41 zeigt die Beträge der TTC-Minima in Abhängigkeit von der verfügbaren Sichtweite. Große Beträge der Minima weisen auf eine frühzeitige Reaktion mit ausreichender Sicherheitsreserve hin, deuten also auf eine gute Orientiertheit des Fahrers hin. In der Literatur wurden verschiedene Schwellen für die TTC angegeben; Fahrerassistenzsysteme, die vor drohenden Kollisionen warnen, tun dies beispielsweise bei einer TTC von 4-5 s (VOGEL, 2003). Diese Grenzen sind in der Abbildung eingetragen. Danach kann das Fahrerverhalten bei Sichtweiten über 200 m noch als eher unkritisch bezeichnet werden. Bei Sichtweiten kleiner 140 m liegen die TTC-Minima schon unter dem aus der Literatur bekannten Wert von 4 s.

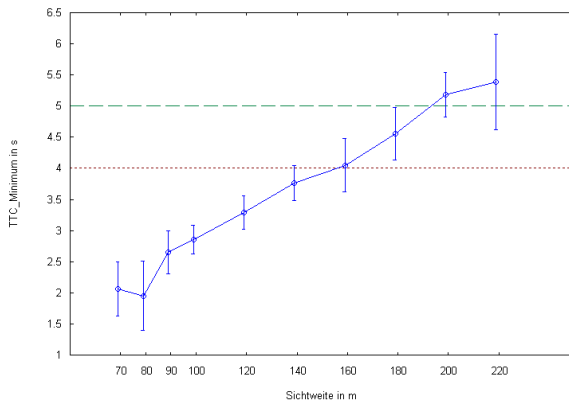


Bild 4-41: Beträge der lokalen Minima der Time-to-Collision TTC bei der Anfahrt auf Pannenfahrzeuge. Die horizontalen Linien zeigen die Ober- und Untergrenze für TTCs für die Warnstufe technischer Kollisionswarnsysteme.

4.4.5 Subjektive Urteile

In den bisherigen Analysen dieser Versuchsreihe wurde die Frage, ob der Fahrer über die Streckenanforderungen orientiert ist, durch die Beobachtung von Fahrverhaltensparametern in Abhängigkeit von der vorhandenen Sichtweite untersucht. Fehlende Orientierung äußerte sich – in einigen Parametern deutlich – in abruptem Fahrverhalten. Neben der objektiven Beobachtung des Verhaltens steht bei Probandenfahrten aber auch der Zugang zur subjektiven Einschätzung der Orientiertheit zur Verfügung – man befragt den Fahrer, ob er die Sichtweite als ausreichend empfunden habe. Beobachtungen während des Versuchs zeigen, dass die Fahrer anscheinend sehr früh vor dem Hindernis bewerten können, ob die noch verfügbare Strecke eine kontrollierte Reaktion erlaubt oder nicht – wenn das nicht der Fall war, kam es häufig zu Spontanäußerungen während der Verzögerungsphase („Oh je...“). Von daher wurde die subjektive Einschätzung der Orientiertheit, hier definiert als das Gefühl, ausreichend über die Situation informiert zu sein, im Rahmen des Versuchs mit erhoben. Dazu wurden die Fahrer nach Passieren des Hindernisses und Erreichen der streckentypischen Geschwindigkeit mündlich befragt.

Die erste Frage zielte auf eine subjektive Abschätzung der eigenen Orientiertheit. Wenn die Fahrer auf die Frage „Konnten Sie sich rechtzeitig auf die Situation einstellen“ mit „Nein“ antworten, dann empfinden Sie die verfügbare Sichtweite als zu gering, da aufgrund des Versuchsdesigns andere Ursachen für fehlende Vorbereitung wie mangelnde Aufmerksamkeit wohl ausgeschlossen werden können. In Bild 4-42 ist erkennbar, dass je nach Hindernistyp ein erster Anstieg bei Sichtweiten kleiner 180 m oder kleiner 200 m erkennbar ist. Ab Sichtweiten kleiner 140 m steigt die Häufigkeit, mit der Fahrer sich nicht ausreichend informiert fühlen, stark an.

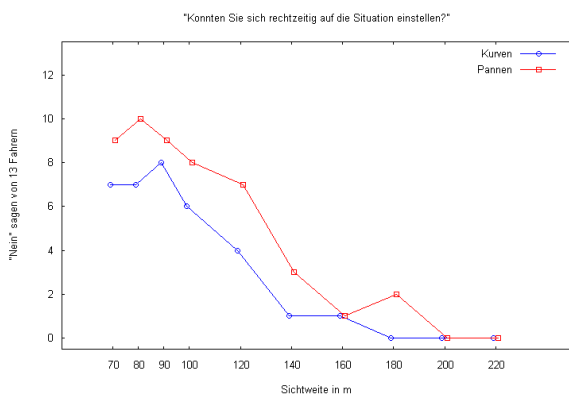


Bild 4-42: Häufigkeit, mit der Fahrer die verfügbare Sichtweite als zu gering einschätzen

Die weiteren Fragen erhoben die subjektive Empfindung der Aufgabenschwierigkeit und Aufgabenbewältigung. Die Probanden gaben nach dem Durchfahren der jeweiligen Situation mündlich ein Urteil bezogen auf eine siebenstufige Skala ab. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt wieder getrennt für Kurven und Pannensituationen.

Generell zeigt sich eine hohe Streuung der subjektiven Urteile (in Bild 4-43 sind die Bewertungen aller Fahrer als Punkte dargestellt). Betrachtet man die für jede Sichtweite gemittelten Schwierigkeitsurteile für Kurven (linkes Bild), so zeigt sich ein erster Anstieg der Aufgabenschwierigkeit bei Sichtweiten kleiner 200 m und ein zweiter, etwas deutlicherer Anstieg bei Sichtweiten kleiner 160 m.

Pannensituationen werden generell als schwieriger empfunden (Bild 4-43, rechtes Bild). Hier ist ein erster Anstieg der Schwierigkeitsbewertung bei Sichtweiten kleiner 200 m und ein zweiter, etwas deutlicherer Anstieg bei Sichtweiten kleiner 160 m erkennbar.

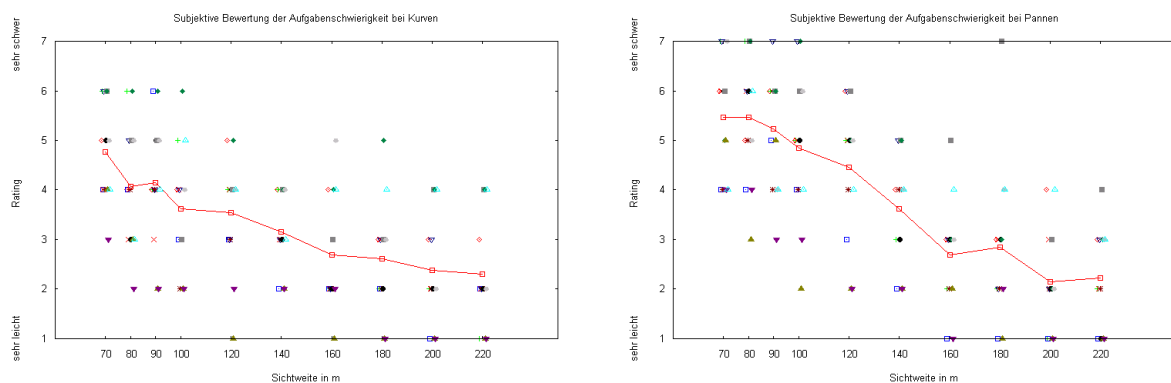


Bild 4-43: Subjektive Bewertung der Aufgabenschwierigkeit bei Kurven (links) und Pannen (rechts)

Befragt man die Fahrer, wie gut sie ihrer Meinung nach die Fahraufgabe gelöst hätten, ergeben sich die Bewertungen in Bild 4-44. Die Antworten auf diese Frage hängen nicht von der verfügbaren Sichtweite ab. Mehrere Versuchspersonen gaben während des Versuchs spontan an, ihr Kriterium für die Bewertung der Aufgabenlösung an die verfügbare Sichtweite anzupassen („Dafür, dass es so knapp war, hab ich es noch ganz gut gelöst“). Die Analyse dieser Antworten wird daher nicht weiter vertieft.

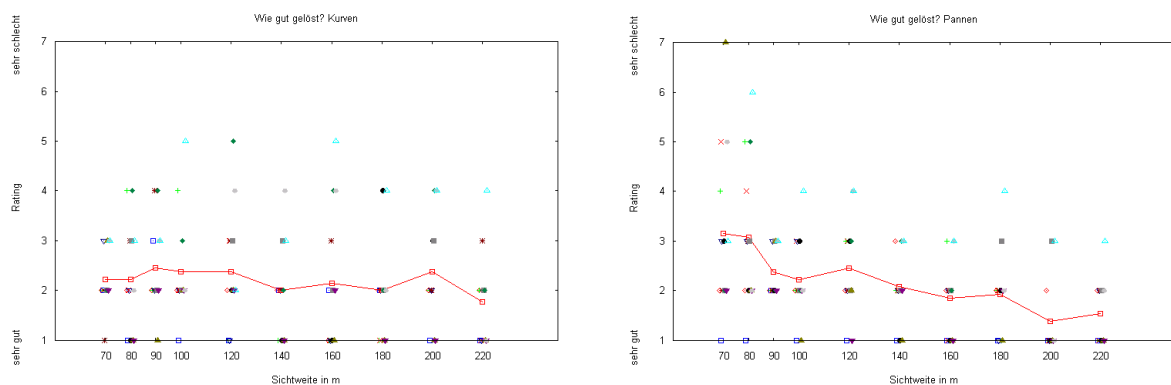


Bild 4-44: Subjektive Bewertung der Güte der Aufgabenlösung bei Kurven (links) und Pannen (rechts)

4.4.6 Geschwindigkeiten vor der Kuppe

Der Aufbau der Simulatorversuche lässt auch den Vergleich zu den Geschwindigkeiten der

Realfahrten zu. Ein geringfügiger, aber durchaus bemerkenswerter Unterschied besteht hinsichtlich der Vorgaben für die Probanden: Während in den Realfahrten lediglich „normales Fahrverhalten, so wie sonst auch“ gefordert war, wurden die Fahrer im Simulator instruiert, eine Geschwindigkeit um 100 km/h einzuhalten. Aufgrund fehlender Restriktionen bei Überschreitungen (mögliche Geschwindigkeitsüberwachungen und deren Konsequenzen in der Realität) und geringerer kinästhetischer Rückmeldungen ist diese Zusatzanweisung im Simulator notwendig. Fuhr eine Versuchsperson trotz angezeigter Geschwindigkeitsbeschränkung in der Kuppensteigung deutlich mehr als 100 km/h, wurde sie an die Einhaltung der Straßenverkehrsordnung erinnert.

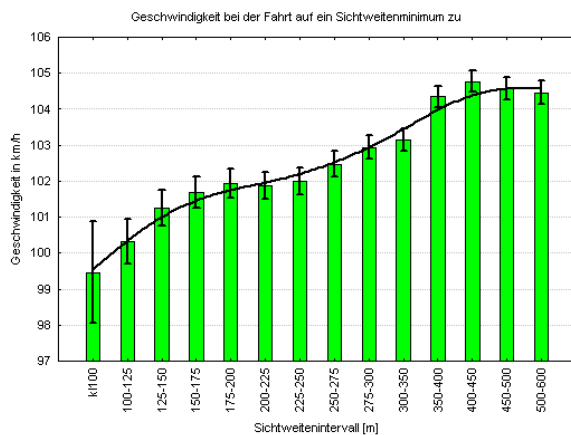


Bild 4-45: Mittlere Geschwindigkeiten bei unterschiedlichen Sichtweiten bei Anfahrt auf ein Sichtweitenminimum (gerade Kuppe).

Die vergleichbaren Situationen bei den Realfahrten sind Geraden mit freiem Umfeld. Die Verläufe ähneln sich stark; so wird in den Bereichen mit Sichtweiten > 400 m besonders schnell gefahren, worauf ein Geschwindigkeitsplateau bei Sichtweiten zwischen 175 und 400 m folgt. Deutlich kleinere Sichtweiten führen dann zu einer weiteren Geschwindigkeitsreduktion. Absolut gesehen fuhren die Probanden im Simulator allerdings mit einer geringeren Gesamtvariation, was als Folge der Eingriffe des Versuchsleiters angesehen werden kann. Die sichtweitenbedingte Geschwindigkeitsreduzierung ist dennoch unverkennbar. Eine Anpassung des Verhaltens im Laufe des Versuchs (z.B. vorsichtigeres Anfahren der Kuppen mit zunehmender Versuchsdauer) wurde bei keinem der Probanden festgestellt.

4.4.7 Zusammenfassung Simulatorversuch

Im Simulatorversuch wurde die dem Fahrer zur Verfügung stehende Sichtweite kontrolliert über Änderungen im Höhenplan der Strecke manipuliert. Die Auswirkungen dieser Manipulation auf das Fahrverhalten wurden untersucht, indem durch Hindernisse im Streckenverlauf (enge Rechtskurve, Pannenfahrzeug) Fahrerreaktionen provoziert wurden.

Für einen Teil der Reaktionsparameter konnten aus der Literatur Grenzwerte für normales, kontrolliertes Fahren angegeben werden. Eine unzureichende Orientierung des Fahrers sollte sich durch eine zunehmend abruptere Fahrweise erkennen lassen. Insgesamt lassen sich in Maßen, die mit der Längsregulation des Fahrzeugs zu tun haben, deutliche und sehr einheitliche Effekte der verfügbaren Sichtweite erkennen. So zeigen sich in Maßen des Bremsdrucks, der Längsverzögerung und der Time-to-Collision deutliche Veränderungen der Parameter in Abhängigkeit von der verfügbaren Sichtweite. Reduziert man die verfügbare Sicht auf enge Kurven unter 200 m, so sind bei allen Parametern erste Veränderungen in den Reaktionsparametern zu beobachten. Auch in der Pannensituation veränderten sich die Parameter ab 200 m vorhandener Sichtweite.

Für Parameter der Längsregulation, das Maximum der Verzögerung und die Time-To-

Collision zeigt sich außerdem, dass aus der Literatur bekannte Werte für abruptes Fahrverhalten bei einer Sichtweite von 140 m oder kleiner überschritten werden. Diese Grenze findet sich auch in den subjektiven Daten zu Orientiertheit und Aufgabenschwierigkeit wieder: Ab Sichtweite 140 m oder kleiner werden beide Fahraufgaben als deutlich schwieriger empfunden; ab Sichtweiten von 120 m oder kleiner wird deutlich häufiger von fehlender Orientierung gesprochen.

Für die Maße der Querregulation lassen sich in diesem Versuch keine systematischen Zusammenhänge mit der vorhandenen Sichtweite finden. Dies wurde durch das Geschwindigkeitsverhalten der Fahrer verursacht, die bei einer früheren Erkennbarkeit der Kurve diese mit einer höheren Geschwindigkeit befuhren. Dies führt zu sehr hohen Querbeschleunigungsmaxima bei der Kurvendurchfahrt. Aufgrund von Simulatoreinflüssen, die bei der schnellen Fahrt durch eine so enge Kurve wie hier verwendet besonders deutlich zu Tage treten, kommt es während der Kurvendurchfahrt zu schnellen Lenkausgleichsbewegungen. Prinzipiell scheinen die Fahrer die Kurven also sehr ähnlich (schlecht) zu durchfahren, unabhängig davon, ob sie rechtzeitig über das Auftauchen der Kurve informiert waren und auch beobachtbar darauf reagiert hatten.

Insgesamt lassen sich also in der Längsregulation deutliche Effekte der verfügbaren Sichtweite auf das Fahrerverhalten nachweisen, die eine Mindestgröße für die Orientierungssichtweite von etwa 200 m nahe legen. Die bessere Orientierung über den Streckenverlauf wurde allerdings in diesem Versuch nicht in eine bessere Querführung des Fahrzeugs in den Singularitäten umgesetzt.

Es ist davon auszugehen, dass in diesem Versuch alle Fahrer beim Überfahren des Sichtweitenminimums aufmerksam waren, da sie aufgrund des Trainings, der Instruktion und vorangegangener Situationen mit Hindernissen rechnen mussten. Dennoch zeigten sich deutliche Effekte der verfügbaren Sichtweite auch bei diesen optimal aufmerksamen Fahrern, die konsistent mit den Blickverhaltensbefunden aus den Realfahrten sind.

5 Neue Erkenntnisse zum Blickverhalten beim Fahren

Es bietet sich an, das umfangreiche Datenmaterial der Blickbewegungsmessungen im realen Verkehrsablauf auch im Hinblick auf andere Streckenparameter als die vorhandene Sichtweite zu analysieren. In der Fachliteratur finden sich zahlreiche Aussagen, die z.T. nur auf geringen Untersuchungskollektiven beruhen, mittlerweile als überholt gelten oder durch andere Ergebnisse in Zweifel gezogen wurden. Die hier durchgeführten Versuchsfahrten ermöglichen eine Überprüfung einiger Ergebnisse auf der Grundlage einer größeren Grundgesamtheit an Fahrern und einer breiten Auswahl an Streckenmerkmalen und Trassierungsparametern.

Ausgehend von den Vorgaben der Messfahrten zur Sichtweitenuntersuchung stehen dafür hier die Daten der 18 Probandenfahrten mit Blickbewegungsmessung zur Verfügung, die

- unbeeinflusstes Fahren und ein freies Blickfeld (kein Gegenverkehr) repräsentieren sowie
- ausschließlich knotenpunktfreie Abschnitte einbahniger Außerortsstraßen enthalten.

Aus der Literaturanalyse wurden die folgenden Fragestellungen übernommen, die mit Hilfe dieser Daten überprüft werden können:

- Können die folgenden, als allgemeingültig akzeptierten Aussagen zu grundlegenden Blickbewegungsparametern hier bestätigt werden?
 - Der Wertebereich von Fixationsdauern beim Autofahren wird von mehreren Autoren mit 0,1 s bis maximal etwa 2 s angegeben (z.B. KARSH, BREITENBACH (1983), SCHWEIGERT (2003); PANNASCH, (2003)), typisch und am häufigsten vertreten sind Werte zwischen 0,2 und 0,6 s.
 - Die Spurführung als permanent bestehende Fahraufgabe erfolgt bei erfahrenen Fahrern großteils mit Hilfe peripheren Sehens bei Blicken zum Fluchtpunkt der Straße. In Kurven kommt es zu häufigen Blickwechselln zwischen Nah- und Fernbereich (SHINAR, MCDOWELL, ROCKWELL (1977), FRIEDINGER (1982), BERGER (1996)).
- Unterscheidet sich das Blickverhalten bei verschiedenen Streckencharakteristiken?
 - Neben einer Beschreibung der unterschiedlichen Blickstrategien auf Geraden und in Kurven erscheinen hier besonders die Ergebnisse von SHINAR, MCDOWELL und ROCKWELL (1977) interessant, die eine signifikante Verlängerung der Fixationsdauern in stark unfallbelasteten Kurven feststellten, welche nicht durch Streckenparameter erklärt werden konnte.
- Ändert sich das Blickverhalten in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit, wird insbesondere das Blickfeld bei höheren Geschwindigkeiten kleiner („Tunnelblick“)?
 - Diese These wurde von MACKWORTH (1965) sowie BABKOV (1983) auf der Grundlage von Blickbewegungsmessungen aufgestellt und gilt bis heute als populär, wurde aber durch neuere Ergebnisse von MIURA (1985) und COHEN (1987) widerlegt. Man geht inzwischen nicht mehr von einer Einengung des Blickfelds aus, sondern von einer Aufmerksamkeitsverlagerung innerhalb desselben.

Der Beantwortung dieser Fragen wird in den folgenden Kapiteln nachgegangen. Zusätzlich zu diesen Punkten stellt sich die Frage, ob sich speziell aus einer Videoanalyse weitere, neue Erkenntnisse ergeben, die qualitativ oder quantitativ wiedergegeben werden können.

5.1 Grundlegende Parameter der Blickbewegung

Zur Überprüfung der in der Literatur gefundenen Erkenntnisse und zur Einordnung der eigenen Messergebnisse wurde die Häufigkeitsverteilung der ermittelten Fixationsdauern herangezogen. Aus der Grundgesamtheit von 22.907 Fixationen wurden Klassen mit einer Breite von 0,1 s gebildet. Es ergibt sich eine linkssteile, eingipflige Häufigkeitsverteilung mit einem Maximum bei 0,3 s (Bild 5-1). Diese Verteilung spiegelt die aus der Literatur bekannten Ergebnisse für das Fahren auf Außerortsstraßen wider (z.B. SCHWEIGERT, 2003).

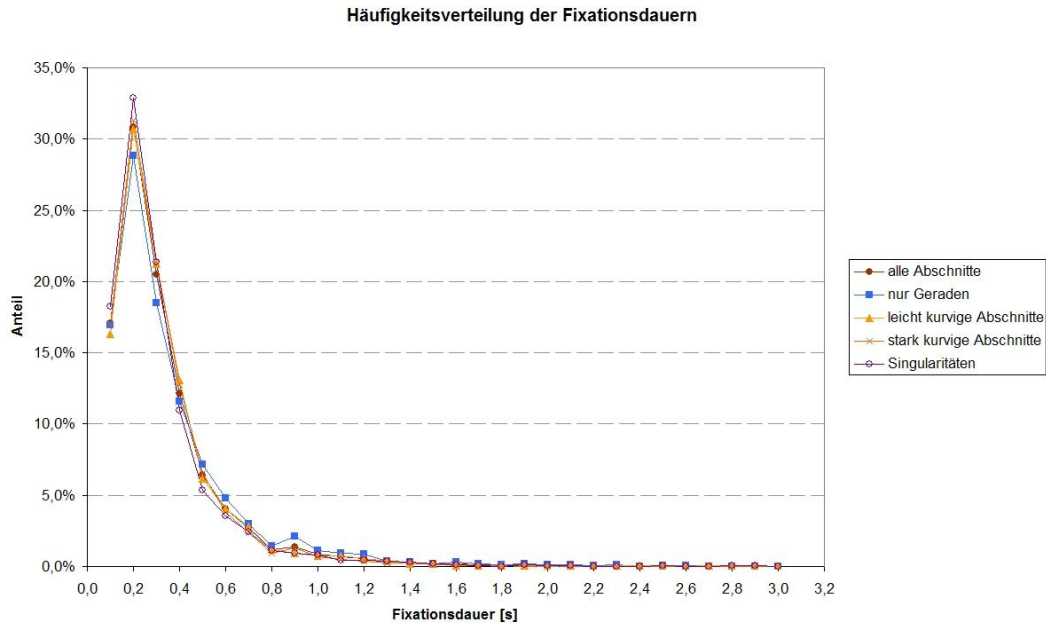


Bild 5-1: Häufigkeitsverteilung der Fixationen beim Fahren im ungebundenen Verkehr

Ordnet man die Fixationen den nach ihrer Kurvigkeit abgegrenzten Abschnitten zu, so zeigen sich geringfügige Unterschiede zwischen kurvigen und geraden Abschnitten: Kurvige Abschnitte, unabhängig von der Stärke der Kurvigkeit, weisen mehr kürzere und weniger längere Fixationen auf. Deutlicher wird dies bei der Betrachtung der Summenhäufigkeiten (Bild 5-2): Das 80%-Perzentil der Fixationsdauern liegt auf Geraden bei 0,46 s, in kurvigen Abschnitten bei 0,38 s. Das belegt die Erkenntnis der Videoanalyse (s. Kap. 5.4), dass die Fluchtpunktverschiebung in Kurven und der höhere Aufwand für die Spurhaltung zu kurzen Blicksprüngen führt. Eine Führungslinie (meist die innere Fahrstreifenbegrenzung) wird dabei zur Spurführung genutzt und mit dem Blick in konstanter Entfernung vor dem Fahrzeug abgetastet. Dafür sind viele kurze Fixationen notwendig. In Einzelkurven lässt sich dies auch anhand geringerer Scanpfadlängen nachweisen (vgl. Kap. 4.1.5 und 4.1.6). Beim Befahren von Geraden ist die Spurhaltung weit weniger aufwändig, peripheres Sehen und wesentlich seltenere Kontrollblicke in den Nahbereich reichen hier aus.

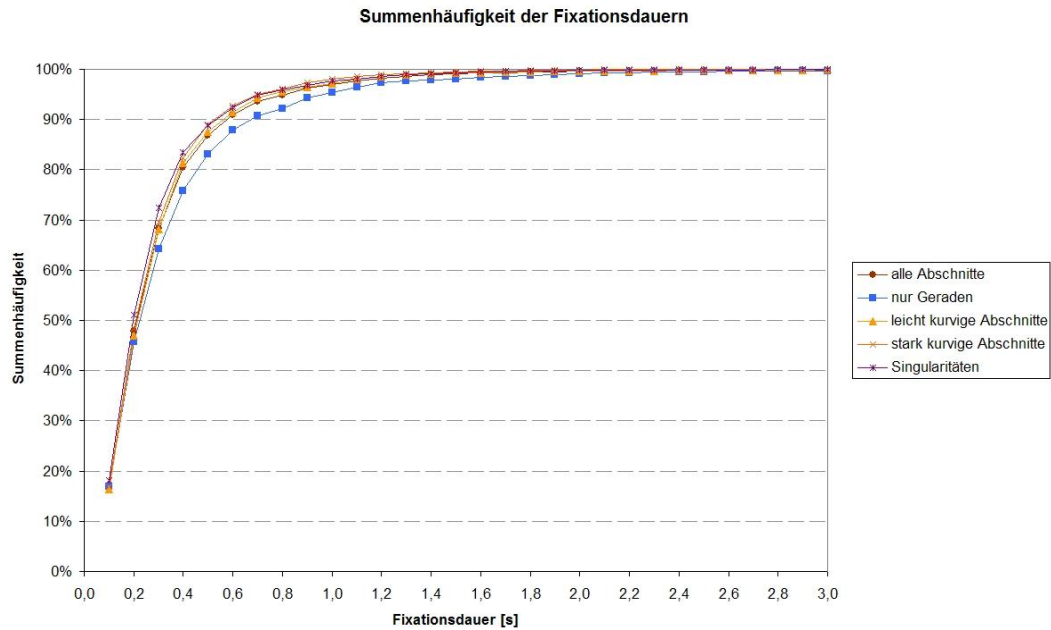


Bild 5-2: Summenhäufigkeit der Fixationen beim Fahren im ungebundenen Verkehr

Auch die Ergebnisse von UNDERWOOD U.A. (2002), nach denen etwa 2/3 aller Fixationen beim Fahren zum Fluchtpunkt gerichtet sind, können in dieser Größenordnung bestätigt werden. Über alle ausgewerteten Abschnitte gesehen beträgt der Anteil der Blicke zum Fluchtpunkt (PRC-Wert) 61,13%. Werden gerade oder leicht kurvige Abschnitte befahren, so ist dieser Anteil etwas höher (64,80% bzw. 64,93%), in stark kurvigen Abschnitten etwas (60,10%) und in Singularitäten deutlich geringer (51,71%). Die Begründung für die geringeren Werte mit steigender Kurvigkeit liegt auch hier offenbar im höheren Anteil der für die Spurhaltung notwendigen Fixationen auf den Nahbereich, insgesamt ergibt sich ein konsistentes Bild.

5.2 Blickverhalten bei verschiedenen Geschwindigkeiten

Bild 5-3 zeigt die Fixationsdauern aller ausgewerteten Abschnitte, in denen unbeeinflusst gefahren wurde und sich keine anderen Fahrzeuge im Blickfeld der Probanden befanden. Im linken Bild sind diese über der gefahrenen Geschwindigkeit aufgetragen, im rechten über der vorhandenen Sichtweite. Es bestätigt sich, dass ein einfacher Zusammenhang zwischen Fixationsdauer und Geschwindigkeit nicht besteht, ebensowenig wie zwischen Fixationsdauer und Sichtweite. Eine tiefer gehende Betrachtung der Streckencharakteristik ist bei Blickverhaltensuntersuchungen deshalb unverzichtbar.

Längere wie kürzere Fixationen können generell bei jeder Geschwindigkeit auftreten, verschiedene Teilaufgaben des Fahrens erfordern stets unterschiedliches Blickverhalten. Zudem gibt es individuell unterschiedliche Blickstrategien. Es kann nach den bisherigen Erkenntnissen davon ausgegangen werden, dass sich insbesondere die Spurführung in Kurven auf die Dauer von Fixationen auswirkt. Diese können je nach Radius zwar auch die Geschwindigkeit beeinflussen, die Vielzahl unterschiedlich schnell befahrbarer Kurven auf der Untersuchungsstrecke sorgt jedoch hier für eine breite Streuung.

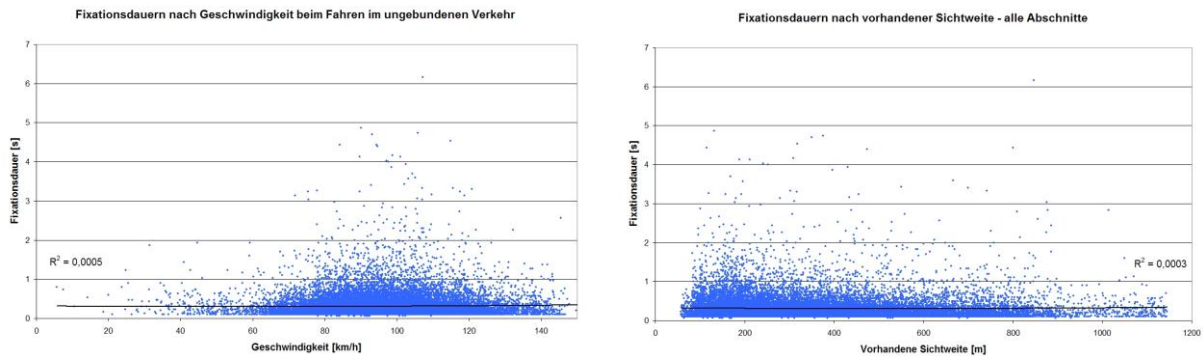


Bild 5-3: Fixationsdauern nach Geschwindigkeit und nach Sichtweite beim Fahren im ungebundenen Verkehr

Für eine genauere Analyse wurden deshalb längere, vorwiegend gerade Abschnitte ausgewählt, um mögliche Auswirkungen unterschiedlicher Geschwindigkeiten auf das Blickverhalten herauszuarbeiten. Dafür wurden die Blickmaße für alle Abschnitte der Teilstrecken 1, 3, 4 (Hinrichtung) sowie 9, 10 und 12 (Rückrichtung, vgl. Anhang 1) bestimmt. Diese Abschnitte können aufgrund ihrer gestreckten Linienführung schnell befahren werden. Dazwischen liegende engere Kurven, Kuppen sowie vorausliegende Ortsdurchfahrten sorgen dafür, dass hin und wieder auch geringere Geschwindigkeiten gefahren werden müssen. Für ein breites Spektrum zwischen 60 km/h und mehr als 120 km/h liegen daher ausreichende Datenkollektive vor, für Geschwindigkeiten < 60 km/h hingegen stets nur sehr kurze Zeiträume. Sie sind der Vollständigkeit halber trotzdem in den folgenden Darstellungen enthalten.

Ordnet man die Fixationen Geschwindigkeitsklassen zu (analog zu vorangegangenen Studien und in Anlehnung an die Vorgaben der neuen Entwurfsklassen wurde eine einheitliche Klassenbreite von 20 km/h gewählt), so zeigt sich ein stetiger Anstieg der Fixationsdauern und –zeitanteile im Bereich zwischen 60 km/h und 120 km/h. Oberhalb von 120 km/h ist diese Tendenz allerdings wieder rückläufig (Bild 5-4). Ebenso verhält es sich mit dem Anteil der Blicke zum Fluchtpunkt der Straße, dieser steigt kontinuierlich mit der Geschwindigkeit bis 120 km/h, fällt anschließend aber wieder leicht ab.

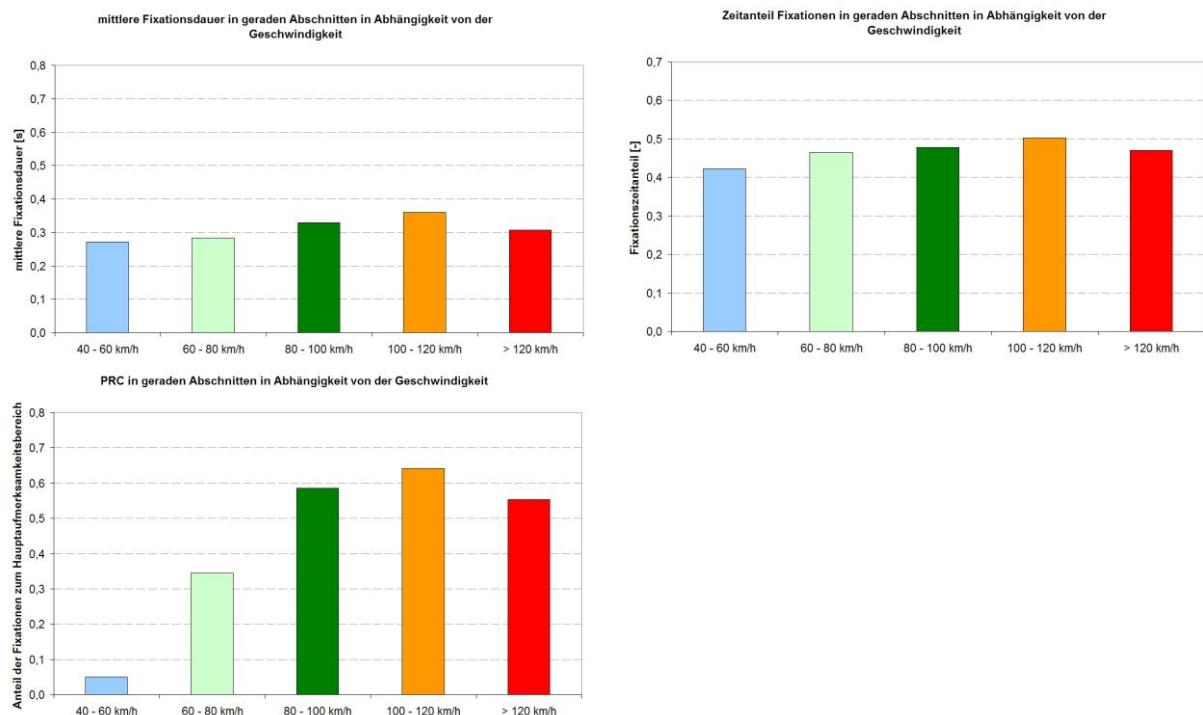


Bild 5-4: Zeitliche Blickbewegungsmaße in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit in geraden Abschnitten

Die zunehmend erhöhte Beanspruchung der Fahrer mit steigender Geschwindigkeit, die sich in mehr und längeren Fixationen zur Straße äußert, erscheint einleuchtend. Um so überraschender ist der, allerdings moderate, Abfall der Werte bei sehr hohen Geschwindigkeiten. Eine Erklärung dafür könnte in der Streckencharakteristik liegen – während Werte knapp über 100 km/h auf den hier bewerteten Straßenabschnitten normal sind, werden deutliche Überschreitungen > 120 km/h nur auf sehr großzügig trassierten, weithin einsehbaren Streckenabschnitten erreicht. Der subjektive Anspruch an den Fahrer ist dann trotz hoher Geschwindigkeiten vergleichsweise gering.

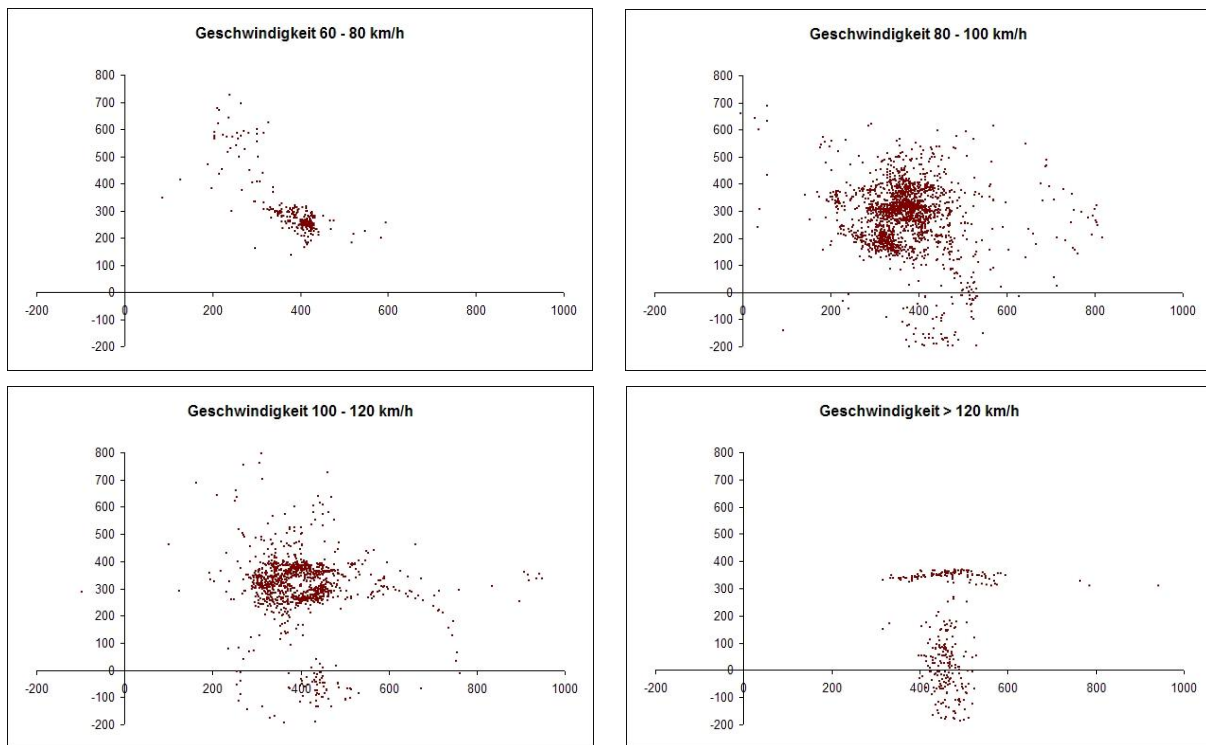


Bild 5-5: Verteilung der Blickpunkte in Abschnitt 15 bei verschiedenen Geschwindigkeiten. Die Diagrammfläche entspricht dem erfassbaren Blickfeld des Fahrers in Pixel des Videobildes. Die Abszisse entspricht etwa der Unterkante der Frontscheibe, die Ordinate der linken A-Säule.

Anhand der Verteilung der Blickpunkte in den einzelnen Abschnitten der hier betrachteten Kategorie wurde diese Vermutung überprüft. Bild 5-5 zeigt dies beispielhaft für Abschnitt 15. Die Darstellung entspricht der häufig verwendeten von BABKOV (1983). Die von ihm beobachtete Einengung des Blickfeldes mit steigender Geschwindigkeit ist hier jedoch nicht zu erkennen. Geschwindigkeiten unterhalb von 80 km/h traten in den Versuchen nur selten und meist verkehrsbedingt auf. Typisch sind hingegen Geschwindigkeiten zwischen 80 und 100 km/h sowie zwischen 100 und 120 km/h. In beiden Bereichen ist ein hoher Anteil an Blicken zum Fluchtpunkt, darüber hinaus aber auch ein weiträumig verteiltes Blickverhalten zu erkennen. Erst oberhalb von 120 km/h ist eine Veränderung erkennbar; es treten hier deutlich mehr Blicke zum Tacho auf. Dies liefert die Erklärung für geringfügig sinkende Fixationsdauern und PRC-Werte: Der Fahrer ist sich seiner Geschwindigkeit und der deutlichen Überschreitung der V_{zul} bewusst und kontrolliert diese durch häufige Tachoblicke. Das Blickverhalten ist demnach durch ein Springen zwischen Fluchtpunkt und Armaturen gekennzeichnet, nicht jedoch von einer durch Überbeanspruchung hervorgerufenen Einengung des Blickfeldes.

Betrachtet man die räumlichen Blickmaße über alle geraden, freien Abschnitte (Bild 5-6), so zeigen sich zunächst nur geringe Unterschiede und keine durchgängige Tendenz in den bisher betrachteten Maßen Feldindex und Scanpfadlänge. Aufbauend auf der Rasterung des Blickfelds, auf dem die Berechnung des Feldindex beruht, wurde hier zusätzlich der Anteil

der Blicke ermittelt, der auf das am häufigsten angeblickte Feld entfiel. Dies erfolgte für die Standardfeldgröße von 3° sowie, um das in den Videos häufig beobachtete „Zittern“ des Blickpunktes um ein eigentlich festliegendes Blickziel besser zu kompensieren, mit einer Feldgröße von 9°. Die Ergebnisse zeigen, dass sich mit zunehmender Geschwindigkeit eine stärkere Konzentration des Blickes in bestimmte Regionen des Blickfelds ergibt. (Im Hinblick auf die Sichtweite erwiesen sich diese Maße als nicht sensitiv).

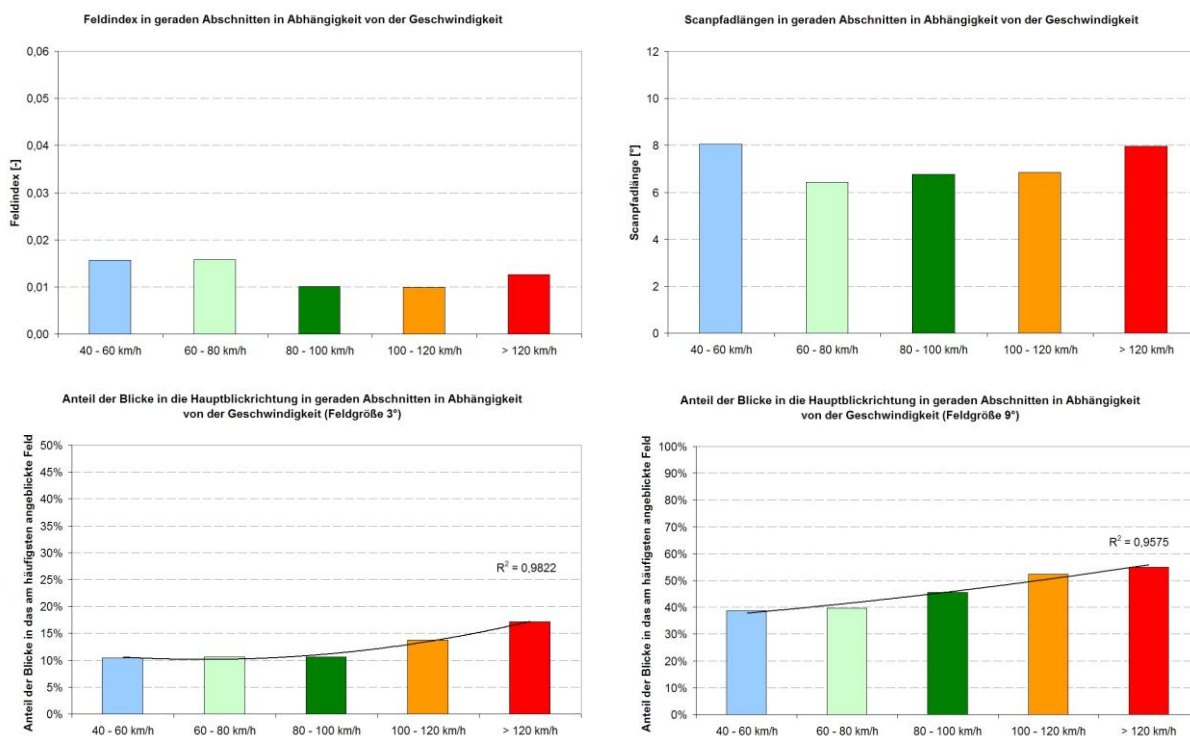


Bild 5-6: räumliche Blickbewegungsmaße in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit in geraden Abschnitten

Obwohl also die Weiträumigkeit des Blickfeldes mit steigender Geschwindigkeit insgesamt nicht abnimmt, erfolgt innerhalb dieses Bereiches eine stärkere Konzentration auf bestimmte Bereiche. Dies entspricht den Aussagen von MIURA (1985) und COHEN (1987), die von einer Aufmerksamkeitsverschiebung innerhalb des Blickfeldes ausgehen. Der Fahrer erfährt also bei höheren Geschwindigkeiten keine Einengung des Bereiches, aus dem er Informationen aufnehmen kann, er hat aber weniger Zeit dafür. Mit zunehmender Geschwindigkeit muss er der vorausliegenden Strecke, aber auch der Kontrolle seiner Geschwindigkeit mehr Aufmerksamkeit widmen und konzentriert sich deswegen verstärkt zum Fluchtpunkt sowie zum Tacho. Die dabei erreichten Werte der Blickverhaltensmaße bleiben aber unterhalb dessen, was an und kurz vor Sichtweitenminima gemessen wurde. Die Beanspruchung bei hohen Geschwindigkeiten ist also geringer als bei geringen Sichtweiten.

5.3 Blickverhalten bei verschiedenen Streckencharakteristika

Im Hinblick auf die künftige Nutzbarkeit von Blickbewegungsmessungen für die Verbesserung der Verkehrssicherheit ist neben den hier vorgestellten Ergebnissen zu Sichtweiten aus der Literatur besonders das Ergebnis von SHINAR, MCDOWELL und ROCKWELL (1977) interessant: Sie bemerkten bei ihren Untersuchungen auf Landstraßen eine signifikante Verlängerung der Fixationsdauern in stark unfallbelasteten Kurven, die sich nicht durch Trassierungsparameter erklären ließ. Der damals begrenzte Untersuchungsumfang ermöglichte keine weiterführenden Schlüsse dazu, bisher ist auch keine ähnliche Untersuchung bekannt. Sollte es aber eine Möglichkeit geben, aufgrund von Blickbewegungsparametern Strecken-

abschnitte zu identifizieren, die für den Fahrer schwierig einzuschätzen und damit angemessen zu befahren sind, kann dort möglicherweise vorbeugend reagiert werden.

Um dies anhand der zur Verfügung stehenden Daten zu überprüfen, wurden zwei Bereiche der Untersuchungsstrecke herangezogen, in denen sich im betrachteten Dreijahreszeitraum mehrere Fahrurfälle mit Personenschaden ereignet hatten (s. Tab. 5-1). Beide weisen allerdings – im Unterschied zur Untersuchung von SHINAR, MCDOWELL und ROCKWELL (1977) – bereits hinsichtlich ihrer Trassierung Auffälligkeiten auf: Es handelt sich um Wendelinien mit relativ engen Radien, die innerhalb einer ansonsten großzügigen Linienführung liegen. Beide Abschnitte weisen Sichtweitenminima von etwa 150 m auf, aufgrund der Streckencharakteristik ist bezüglich der Unfälle aber eher ein Zusammenhang mit den Kurvenradien und der erforderlichen Geschwindigkeitsreduzierung wahrscheinlich. Tab. 5-1 zeigt die Parameter dieser Abschnitte, die in beiden Fahrtrichtungen betrachtet werden.

Ab-schnitt	Art	Achse, Bereich	Länge [m]	R 1 [m]	R 2 [m]	U (P) (3-Jahreszeitraum)	Besonderheiten
3	Wendelinie	Teilstrecke 1, 5248,393 – 5564,778	316,385	-143	241	3	$V_{zul} = 100 \text{ km/h}$
48	Wendelinie	Teilstrecke 12, 1107,615 – 1424,333	316,718	-241	143	2	$V_{zul} = 100 \text{ km/h}$
21	Wendelinie	Teilstrecke 6, 5147,069 – 5472,996	325,927	182	-311	-	$V_{zul} = 100 \text{ km/h}$, 400m nach Ortsdurchfahrt
27	Wendelinie	Teilstrecke 7, 2399,004 – 2724,931	325,927	311	-182	2	$V_{zul} = 100 \text{ km/h}$, nach längerem, schnell zu befahrendem Abschnitt

Tab. 5-1: Unfallauffällige Bereiche der Untersuchungsstrecke (2 Bereiche, jeweils in Hin- und Rückrichtung)

In diesen beiden Abschnitten wurden die Parameter des Blickverhaltens analysiert. Als Vergleichsgrundlage dienten Abschnitte verschiedener Kategorien. Ausgewählt wurden zum einen Geraden mit freiem sowie mit blickdichtem Umfeld, da für diese Abschnitte die Datengrundlage am größten ist, sowie zwei längere, stark kurvige Abschnitte. Diese verfügen ebenfalls über eine breite Datenbasis und sind aufgrund ihrer Kurvigkeit den zu untersuchenden Singularitäten geometrisch ähnlicher als Geraden, was sich im Blickverhalten normalerweise auswirkt. Zur vierten Kontrollgruppe gehören alle Singularitäten der Untersuchungsstrecke, die kein auffälliges Unfallgeschehen aufweisen. Sie verfügen hinsichtlich der Streckencharakteristik und Geometrie über die größtmögliche Ähnlichkeit zu den untersuchten Unfallkurven. Bei dieser Gruppe handelt es sich um die Abschnitte 13, 14 und 36 sowie die beiden Einzelkurven in Abschnitt 10 der Untersuchungsstrecke.

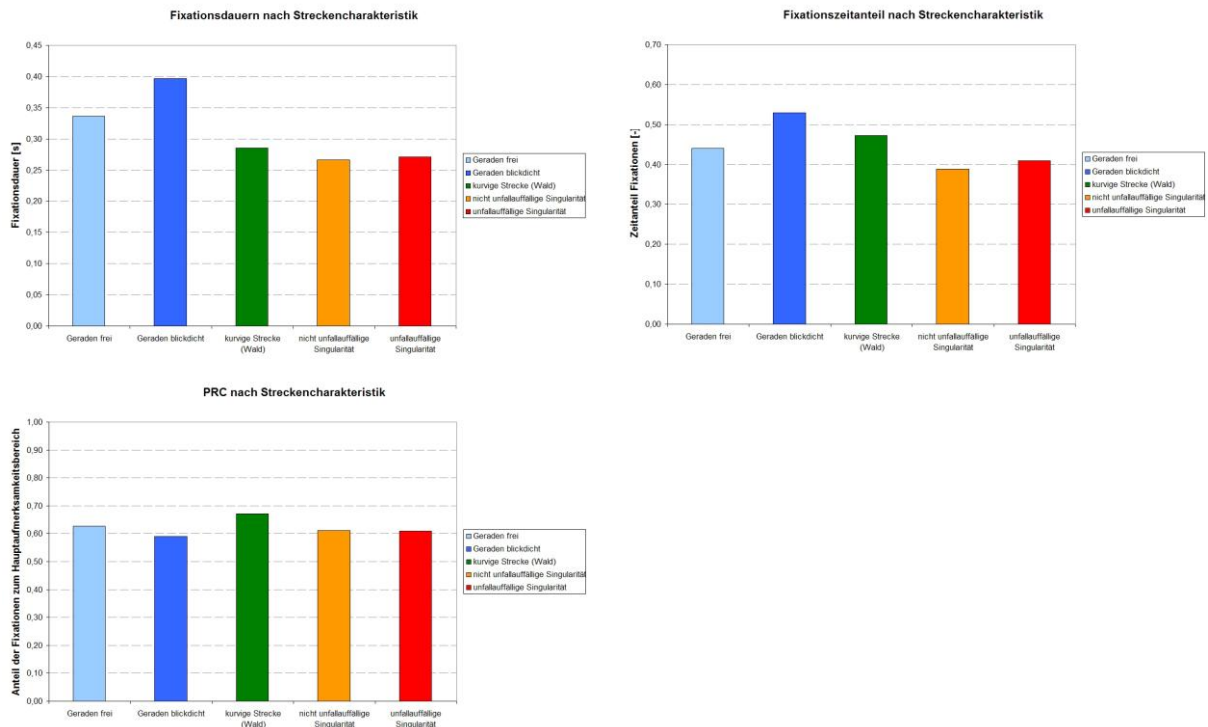


Bild 5-7: Zeitliche Blickbewegungsmaße in unfallauffälligen Abschnitten und Vergleichsabschnitten

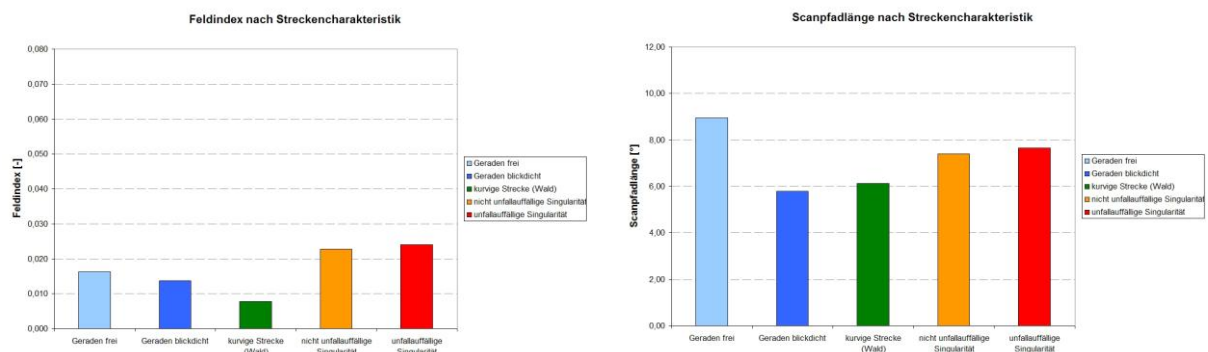


Bild 5-8: Zeitliche Blickbewegungsmaße in unfallauffälligen Abschnitten und Vergleichsabschnitten

Bild 5-7 und Bild 5-8 zeigen die zeitlichen sowie räumlichen Maße der Blickbewegung innerhalb dieser Kategorien. Es sind die bereits beschriebenen, geometrieabhängigen Unterschiede (geringere Fixationsdauern und größerer Feldindex in Kurven) zu erkennen, darüber hinaus jedoch kein Merkmal, welches speziell die unfallauffälligen Abschnitte heraushebt. Insbesondere der Vergleich der unfallauffälligen Singularitäten mit den geometrisch ähnlichen, aber nicht unfallbelasteten Einzelkurven fällt ergebnislos aus: Es zeigen sich so gut wie keine Unterschiede. Ein besonderes bzw. auffälliges Blickverhalten in unfallauffälligen Bereichen liegt hier nicht vor, ein Einsatz von Blickbewegungsmessungen zur Erkennung solcher Bereiche ist so einfach also nicht möglich. Unstetigkeiten in der Linienführung spiegeln sich zwar im Blickverhalten wider, sind jedoch bereits aufgrund der Kenntnis der Trassierungsparameter zu identifizieren. Zusätzliche Erkenntnisse über ein möglicherweise höheres Unfallrisiko kann die Blickverhaltensanalyse derzeit nicht liefern.

5.4 Videoanalyse

Nicht alle Erkenntnisse und Fahrerlebnisse während des im Rahmen dieser Forschungsarbeit durchgeführten Messprogramms lassen sich anhand abgesicherter Zahlenwerte wieder-

geben. Dies liegt in der Natur des Blickverhaltens: Es ist generell unstetig und zahlreichen äußeren und individuellen Einflüssen unterworfen. Dennoch ergeben sich insbesondere aus der Betrachtung der aufgezeichneten Videos einige Eindrücke, die zumindest verbal beschrieben werden können und so zum Verständnis des Fahrer(blick-)verhaltens in bestimmten Situationen beitragen können.

Die Einspielung des Blickpunktes in das Szenerievideo, welches die Fahrersicht auf die Strecke zeigt, erforderte eine zusätzliche Kalibrierung mit Hilfe entfernter Blickziele (s. Kap. 3.3). Im Gegensatz zur internen Kalibrierung des Messsystems für die Erfassung der Fixations- und Streuungsmaße ist die Videokalibrierung stark entfernungsabhängig. Das bedeutet, dass der „Sehstrahl“, berechnet aus den Positionen von Pupille und dem errechneten Mittelpunkt des Augapfels, über längere Entfernungen bis hin zu mehreren hundert Metern extrapoliert wird. Selbst bei äußerst genauer Kalibrierung sind dabei Abweichungen unvermeidlich, zumal äußere Faktoren wie der Lichteinfall ins Auge der Probanden unweigerlich zu Veränderungen gegenüber der Kalibrierungssituation führen. Es gibt zudem keine Möglichkeit, die Genauigkeit der Videokalibrierung quantitativ zu überprüfen.

Trotz solcher systemimmanenter Abweichungen sind fast alle Videoaufzeichnungen von sehr guter Qualität. Beim Betrachten der Videos lässt sich sehr gut nachvollziehen, wohin der Proband in bestimmten Situationen blickt, auch wenn der errechnete Blickpunkt das eigentliche Ziel knapp verfehlt. Versucht man jedoch, für eine quantitative Analyse über längere Abschnitte den Anteil der Blicke auf bestimmte Ziele (Fahrstreifenmarkierungen, Verkehrsschilder, Gegenverkehr etc.) zu bestimmen und dabei diese knappen Abweichungen zu korrigieren, so entsteht die Gefahr der Beliebigkeit – man ordnet die Blickziele entsprechend der eigenen Erwartungshaltung zu. Im Ergebnis würde dann ein Bild entstehen, welches eher dem erwarteten als dem realen Geschehen entspricht und eine Präzision vorgeben, die es im Blickverhalten nicht gibt.

Aus diesem Grund wurde in den voranstehenden Auswertungen auf eine hochauflösende Blickzielauswertung verzichtet und stattdessen das PRC-Maß verwendet, welches das Auftreten knapper Abweichungen durch ein entsprechendes Zielfenster ausgleicht. Anhand exemplarisch ausgewählter Sequenzen sollen dennoch einige typische Verhaltensmuster beschrieben werden, die bei allen Probanden zu beobachten sind und somit als verallgemeinerungsfähig gelten können. Die entsprechenden Videosequenzen sind als Einzelbildfolgen in Anhang 3 dargestellt.

5.4.1 Kurven

Für die Beschreibung des Blickverhaltens beim Kurvenfahren wurde eine lange Linkskurve mit blickdichtem Umfeld ausgewählt, für die Videoaufnahmen in besonders hoher Qualität vorlagen. Nähert sich der Fahrer dieser Linkskurve, so orientiert sich der Blick zunächst am Beginn der Krümmung der Mittelmarkierung. Dies erfolgt etwa 1 s vor dem Einlenken; die Abschätzung des Kurvenradius hat zu diesem Zeitpunkt bereits aus größerer Entfernung stattgefunden (dieser Vorgang ist aus den Videos aber nicht abzugrenzen). Ab dem Beginn des Übergangsbogens, wo erste Lenkbewegungen notwendig werden, ruht der Blick in konstanter Entfernung vor dem Fahrzeug auf der inneren Fahrstreifenbegrenzung. Dies setzt sich etwa bis zur Mitte des Übergangsbogens fort. An dieser Stelle ist die maximale Krümmung, d.h. der eigentliche Kreisbogen, erkenn- und abschätzbar. Häufig löst sich hier der Blick erstmals von der Markierung und wechselt kurzzeitig vom Nahbereich in größere Entfernung. Dies kann als Zeichen gewertet werden, dass sich der Fahrer über den Einleitungsbereich ausreichend informiert fühlt und seine Fahrweise darauf abgestimmt hat. Er nutzt dies, um den weiteren Streckenverlauf wahrzunehmen. Im exemplarischen Beispiel in Anhang 3 ist gut zu erkennen, dass dabei ein Parkplatz kurz fixiert wird, der sich neben der Strecke im Wald befindet. Vermutlich erfolgt die nahräumige Spurführung zwischenzeitlich über peripheres Sehen. Anschließend kehrt der Blick zurück auf die Markierung, liegt aber nun etwas weiter vor dem Fahrzeug. Der weitere Bereich bis zum Erreichen der vollen Krümmung ist von solchen kurzen Blicksprüngen zwischen Nah- und Fernbereich gekennzeichnet.

Am Beginn des Kreisbogens rücken bereits das Kurvenende und die vorausliegende Strecke ins Blickfeld des Fahrers. Der Blick springt etwas weiter vor das Fahrzeug, in etwa auf das Ende des Kreisbogens und den Beginn des ausleitenden Übergangsbogens. Anscheinend versucht der Fahrer, den Punkt zu finden, an dem das Rücklenken beginnen muss. Etwa am Scheitelpunkt der Kurve rückt der Blickpunkt wieder näher vor das Fahrzeug und folgt anschließend in konstanter Entfernung dem innenliegenden Fahrstreifen. Dies deutet darauf hin, dass der Fahrer den Bewegungsablauf für die Rücklenkbewegung plant. Blicke in größere Entfernung wurden hier nicht beobachtet, horizontal wechselt der Blick zwischen Mittelmarkierung und innerem Fahrbahnrand. Auch bei Erreichen des ausleitenden Übergangsbogens bleibt der Blick nah vor dem Fahrzeug, verschiebt sich aber zunehmend vom linken Fahrbahnrand hin zur Fahrbahnmitte. Erst kurz vor dem Kurvenende verlässt der Blick den Nahbereich und springt weiter voraus, hier wird sofort die Innenseite der nächsten Kurve fixiert.

Das Blickverhalten in Rechtskurven ist von den gleichen Wechsels zwischen Nahbereich und Vorausorientierung geprägt. Auch hier ist in der ersten Hälfte des einleitenden Übergangsbogens ein Verharren des Blickes im Nahbereich zu verzeichnen, meist auf dem rechten Fahrbahnrand. Allerdings wird auch die Mittelmarkierung häufig fixiert, was nach den Erkenntnissen der Literatur (Orientierung immer an der inneren Fahrstreifenbegrenzung) so nicht erwartet worden war. Besonders auffällig ist dies, wenn Gegenverkehr auftritt. Die Orientierung erfolgt dann im Nahbereich fast ausschließlich an der Mittelmarkierung, unterbrochen von häufigen kurzen Fixierungen des entgegenkommenden Fahrzeugs.

5.4.2 Geraden

Befährt ein Proband eine längere Gerade mit ausreichender Sichtweite und ohne Gegenverkehr, so sind häufiges Umherblicken und die Fixierung von Objekten im Seitenraum zu beobachten. Die Orientierung erfolgt vorwiegend in der Ferne, wobei die Fahrbahn in Fluchtpunktnähe eher mit dem Blick gestreift als konzentriert angeblickt wird. Häufig liegt der Blick oberhalb des Fluchtpunktes bzw. der Linie des Horizonts. Der Fahrer ist sich hier offenbar bewusst, dass auch bei Auftreten von Gegenverkehr oder Hindernissen auf der Fahrbahn noch genügend Reaktionszeit zur Verfügung steht. Gleichzeitig erfordert die Spurführung keine verstärkte Konzentration, sie kann durch das periphere Sehen quasi nebenbei bewältigt werden. Dass dieses durchaus Anwendung findet, ist an nur gelegentlich notwendigen, dann aber durchaus zuverlässigen Fixationen auf Fahrbahnunebenheiten zu erkennen.

5.4.3 Gegenverkehr

Wie sich das Blickverhalten bei Gegenverkehr ändert, zeigt das folgende Beispiel (vgl. Anhang 3). Am Beginn der Videosequenz ist die Fahrbahn frei, eine lange Gerade und eine Kuppe liegen voraus (Abschnitt 47 der Messstrecke). Beim Befahren der Geraden bewegt sich der Blick zwischen dem Nahbereich vor dem Fahrzeug, dem Fluchtpunkt der Straße und Objekten am Straßenrand umher. Auch Blicke zum Rückspiegel sind mehrfach zu sehen. Anschließend nähert sich der Proband der Kuppe, der Anteil der Blicke zum Fluchtpunkt steigt an, auch der Nahbereich wird immer wieder fixiert. Die Sichtweite beträgt jetzt weniger als 200 m, der Blick bleibt nahezu ausschließlich auf die Straße gerichtet. Der Fixationspunkt liegt im Bild etwa mittig zwischen der Fahrzeugfront und dem Horizont und verbleibt in konstanter Entfernung vor dem Fahrzeug, was darauf schließen lässt, dass so auch mit Hilfe peripheren Sehens die gesamte sichtbare Fahrbahn wahrgenommen werden kann.

Auf der Kuppe taucht Gegenverkehr auf und wird sofort kurz fixiert. Direkt im Anschluss springt der Blick in den Nahbereich vor das Fahrzeug auf beide Fahrstreifenrandmarkierungen – offenbar wird sofort die eigene Spurlage überprüft. Nach einer erneuten Fixation des Gegenverkehrsfahrzeugs (vermutlich zum Überprüfen von dessen Spurlage), orientiert sich der Blick an der Mittelmarkierung und verbleibt auf dieser Linie, bis der Gegenverkehr passiert ist. Sobald das geschehen ist, springt der Blick zum Fluchtpunkt der Straße. Man kann dies als Nachholen der kurzzeitig vernachlässigten (Fern-)Wahrnehmung der vorausliegen-

den Strecke interpretieren. Als kurz darauf erneut Gegenverkehr im Blickfeld auftaucht, wiederholt sich das beschriebene Verhalten. Es wird deutlich, dass die Mittelmarkierung für den Fahrer eine wichtige Hilfe bei der Bewertung des seitlichen Abstands zum Gegenverkehr darstellt.

5.4.4 Zusammenfassung

Die Videoanalyse des Blickverhaltens in bestimmten Fahrsituationen bestätigt weitgehend bereits vorhandene Kenntnisse. Bei Geradeausfahrt ohne besondere Beanspruchung durch Streckengeometrie oder Verkehrsgeschehen reichen gelegentliche Blicke in Fluchtpunktweite aus, um die Fahraufgabe zu bewältigen. Anhand der zuverlässigen Erkennung von Fahrbahnunebenheiten, ohne dass die vorausliegende Fahrbahn kontinuierlich überwacht wird, sowie der sofortigen Reaktion beim Auftauchen neuer Objekte im Blickfeld wird die bedeutende Rolle des peripheren Sehens deutlich. Die häufigen Fixationen oberhalb des Horizonts deuten darauf hin, dass diese Fähigkeit im unteren Teil des Sehfeldes besonders gut ausgeprägt ist.

In Kurven werden die Fahrbahnmarkierung zur Orientierung für die Spurführung genutzt. Während in Linkskurven die Orientierung fast ausschließlich an der Innenseite der Kurve erfolgt (Mittelmarkierung und innerer Fahrbahnrand), ist in Rechtskurven auch die hier außenliegende Mittelmarkierung von Bedeutung. Tritt in Rechtskurven Gegenverkehr auf, wird diese sogar ausschließlich verfolgt. Für den Fahrer bietet dies den Vorteil, dass zugleich die eigene Spurlage und der seitliche Abstand zum entgegenkommenden Fahrzeug überwacht werden können. Bleiben beide Fahrzeuge auf ihrer Seite der Markierung, besteht keine Kollisionsgefahr.

Generell wird im Blickfeld auftauchender Gegenverkehr sofort bemerkt und fixiert. Daraufhin erfolgt die Überprüfung der eigenen Spurlage und im Anschluss der fortwährende Wechsel des Blickes zwischen Gegenverkehr und Nahbereich vor dem Fahrzeug. Erst nach dem Passieren des anderen Fahrzeugs wird die Fernorientierung wieder aufgenommen, gleiches gilt auch für Tachoblicke. Dies zeigt, dass der Fahrer bestrebt ist, sein Blickverhalten auf die größte (subjektiv) vorhandene Gefahrenquelle zu konzentrieren, um im Notfall schnell reagieren zu können.

Im Hinblick auf geringe Sichtweiten ist in den Videos das Verhalten zu erkennen, auf welches die Auswertung der Blickparameter hindeutet: Auf geringer werdende Sichtweiten reagiert der Fahrer mit einer stärker werdenden Konzentration des Blickes hin zum Fluchtpunkt bzw. kurz oberhalb des Fluchtpunktes der Straße. Auch hier erkennt er demzufolge ein Gefahrenmoment und versucht seine Reaktionsfähigkeit zu optimieren. Eine Festlegung abgesicherter Grenzwerte für eine als ausreichend betrachtete Sichtweite ist aus dieser qualitativen Analyse jedoch nicht möglich.

6 Zusammenführung der Ergebnisse und Empfehlungen für die Gewährleistung der Fahrerorientierung auf Landstraßen

6.1 Zusammenführung der Ergebnisse

In drei unabhängig voneinander durchgeführten, aufeinander aufbauenden Versuchsreihen wurden das Blickverhalten, das Fahrverhalten und die Reaktionsparameter von Fahrern auf Landstraßen in Abhängigkeit von der vorhandenen Sichtweite untersucht. Das Ziel der Untersuchung war es, Indikatoren für eine ausreichende Fahrerorientierung zu finden. Diese sollte sich darin äußern, dass der Fahrer in der Lage ist, den Charakter der vorausliegenden Strecke zu erfassen und sein Fahrverhalten darauf auszurichten, ohne auf abrupte Reaktionen angewiesen zu sein. Das Versuchsprogramm umfasste

- Probandenfahrten mit Blickbewegungsmessung,
- Fahren mit Nebenaufgabe und
- die Messung von Reaktionsparametern an plötzlich auftretenden Hindernissen im Simulator.

Die Blickbewegungen beim unbeeinflussten Fahren wurden auf einem realen Rundkurs und auf der nachgebildeten Strecke im Simulator erfasst und ausgewertet. Die Parameter dienten dabei als Indikatoren für den Informationsbedarf der Fahrer und die Beanspruchung beim Fahren durch die Linienführung der Strecke. Es zeigte sich, dass ein Einfluss der vorhandenen Sichtweite auf das Blick- und Fahrverhalten besteht.

Auf der Realstrecke wurden weitgehend von der Streckencharakteristik unabhängige Steigerungen der Konzentration und Aufmerksamkeit bei Sichtweiten unterhalb von 200 m festgestellt, die sich bei geringer werdender Sichtweite immer weiter fortsetzten. Gleichzeitig wurde die Geschwindigkeit zunächst moderat, später deutlich reduziert. Bei Sichtweiten um 100 m reagierten die Fahrer deutlich durch Bremsengriffe und den Abbruch von Beschleunigungsvorgängen nach Kurven oder Ortsdurchfahrten, unabhängig von der bis dahin erreichten Geschwindigkeit.

Die Simulatorfahrten bestätigten diese Ergebnisse. Abweichend wurde hier eine etwas frühere, allerdings nur leichte Zunahme der Blickkonzentration auf den Fahrraum bei etwa 250 m Sichtweite festgestellt. Ab 200 m nahm die Häufigkeit von Bremsengriffen zu. Die Abwendungshäufigkeit vom Fahrraum sank bei 150 m erstmals und bei 125 m nochmals deutlich. Ebenfalls bei 125 m nahm auch die Blickkonzentration auf den Fahrraum nochmals deutlich zu. Bremsengriffe wurden am häufigsten zwischen 125 und 75 m beobachtet.

Eine intensive Überlagerung der realen und Simulatormessreihen gleicher Methodik (LIPOLD, KRÜGER U.A., 2007) ergab im Hinblick auf Blick- und Fahrverhalten qualitativ vergleichbare Verläufe der einzelnen Messgrößen, die sich nur in ihrer absoluten Ausprägung unterschieden. Diese Unterschiede konnten auf bereits bekannte Simulatoreffekte wie konstante Lichtverhältnisse, weniger äußere Reize, eine weniger ausgeprägte Geschwindigkeits- und Beschleunigungswahrnehmung sowie die Folgenlosigkeit bei Fehlverhalten (Unfälle, Verkehrsrechtsverstöße) zurückgeführt werden. Anstiege der Blickverhaltensparameter bei geringer werdenden Sichtweiten fielen so im Simulator etwas deutlicher und stetiger aus, setzten aber jeweils auf dem gleichen Sichtweitenniveau ein. Die gemittelten Geschwindigkeitsprofile lagen bei qualitativ gleichem Verlauf im Simulatorversuch 3 – 5 km/h unterhalb der auf realen Strecken gefahrenen Geschwindigkeiten.

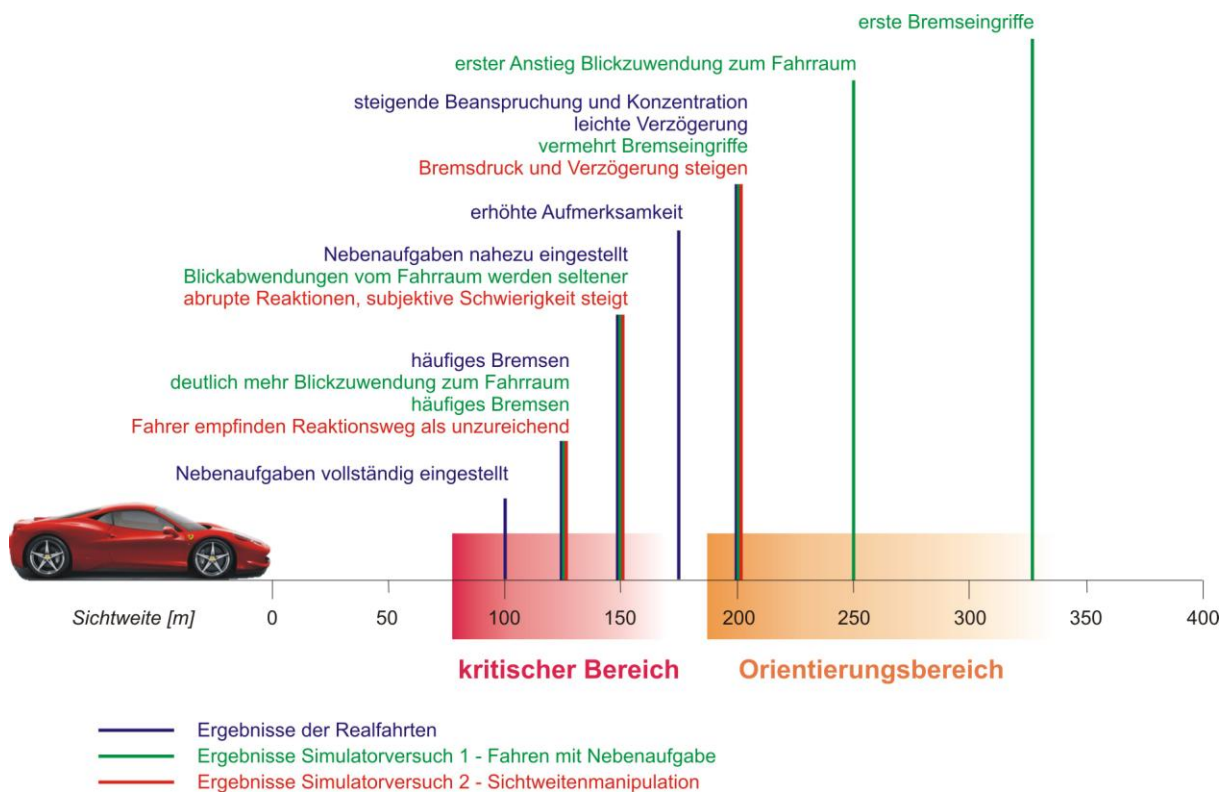


Bild 6-1: Fahrerreaktionen in allen Versuchsreihen

Die Veränderungen in Blick- und Fahrverhaltensparametern im Zusammenhang mit der Sichtweite traten auf geraden Abschnitten am deutlichsten hervor. Kurven beeinflussen aufgrund der veränderten Anforderungen durch die Spurhaltung das Blickverhalten und je nach Radius und Richtungsänderung die Geschwindigkeit. Dadurch wird der Einfluss der Sichtweite überlagert. Die in Kurven notwendigerweise vorgenommenen Verzögerungen sind meist größer als die durch die Sichtweite bedingten.

Beim Fahren mit Nebenaufgabe wurde das gleiche Fahrverhalten festgestellt wie beim unbeeinflussten Fahren. So konnte gezeigt werden, dass diese Methode von Fahrern als Sekundäraufgabe verstanden wurde und somit auf das freie Fahren übertragbare Ergebnisse erzielt. Auch bei mehrmaligem Fahren auf derselben Strecke wurden also sehr ähnliche Verhaltensweisen beobachtet. Dies unterstreicht, dass die Streckencharakteristik den maßgebenden Faktor für die Wahl der Geschwindigkeit darstellt. Im Hinblick auf die Sichtweite zeigte sich, dass unterhalb von 150 m Sichtweite praktisch keine Nebenaufgaben mehr durchgeführt werden, da der Blick dann fast ausschließlich auf der Straße ruht.

Im zweiten Simulatorversuch, in dem auf plötzlich auftauchende Kurven oder stehende Hindernisse reagiert werden musste, zeigten sich in Kenngrößen der Längsregulation wie dem Bremsverhalten, den akzeptierten Verzögerungswerten und der Time-To-Collision erste Einflüsse der verfügbaren Sichtweite bei Werten unter 200 m. Bei Sichtweiten unter 140 m wurden bei Verzögerung und Time-to-Collision Werte realisiert, die über der Schwelle für abrupte Fahrerreaktionen lagen. Die Fahrer gaben dann an, solche Situationen seien schwierig zu bewältigen.

Alle Aussagen beziehen sich auf die in den Versuchen gefahrenen Geschwindigkeiten. Diese lagen in allen Versuchsreihen bei etwa 100 km/h, zum Teil basierend auf frei gewähltem Fahrverhalten (Realfahrten, Simulatorversuch 1), zum Teil durch Vorgaben (Simulatorversuch 2). Aus den verschiedenen Herangehensweisen und Versuchsumgebungen ergeben sich somit konsistente Erkenntnisse zur Sichtweite, bei der sich der Fahrer noch ausreichend über den Streckenverlauf orientiert fühlt.

Die Ergebnisse zu verschiedenen Indikatoren aus den Versuchen sind in Bild 6-1 dargestellt.

Die Grafik enthält die Sichtweitenwerte, ab denen erstmals ein Verhalten des Fahrers erkennbar war, das auf höheren Informationsbedarf hindeutete (mehr Zuwendung zum Straßenraum, höhere Aufmerksamkeit, erste Geschwindigkeitsanpassungen, abrupte Reaktionen auf Hindernisse). Aus der Überlagerung ergeben sich zwei Bereiche, in denen sich der Informationsbedarf des Fahrers mit unterschiedlicher Intensität äußert: Ab einer vorhandenen Sichtweite von etwa 200 m beginnt der Fahrer, sich vermehrt aufmerksam der Straße zuzuwenden. Treten im Streckenverlauf Hindernisse auf, so bemerkt man ab dieser Sichtweite Veränderungen gegenüber „normalem“ Verhalten. Erste Verzögerungen lassen auf Unsicherheit schließen. In diesem Bereich ist daher die Grenze anzusiedeln, bis zu der das Fahren ohne erhöhte Anspannung möglich ist.

Bei etwa 150 m ist ein zweiter, nochmals deutlich gesteigerter Informationsbedarf erkennbar: Hier wird häufig die Bremse betätigt, die Aufmerksamkeit wird nochmals verstärkt und Nebenaufgaben werden vernachlässigt. Treten Hindernisse auf, kommt es zu abrupten Reaktionen, und die Fahraufgabe wird als schwierig empfunden. Dies setzt sich bei weiter sinkenden Sichtweiten stetig fort, bis hin zur Nichtbewältigung von Hindernissen, was im realen Verkehrsablauf Unfälle bedeuten würde. Sichtweiten unterhalb dieser Größenordnung sind deshalb als problematisch einzustufen, da eine Anpassung des Fahrverhaltens zwar stattfindet, jedoch nicht in ausreichendem Maße.

Insgesamt weisen die Versuche also auf einen erhöhten Orientierungsbedarf des Fahrers bei Sichtweiten unter 200 m hin, der sich bei Sichtweiten unter 150 m noch deutlich verstärkt und ein kritisches Maß erreicht. Die Einordnung dieser Bereiche in die in der Literatur diskutierten und im Regelwerk festgeschriebenen Sichtweitenmodelle zeigt Bild 6-2.

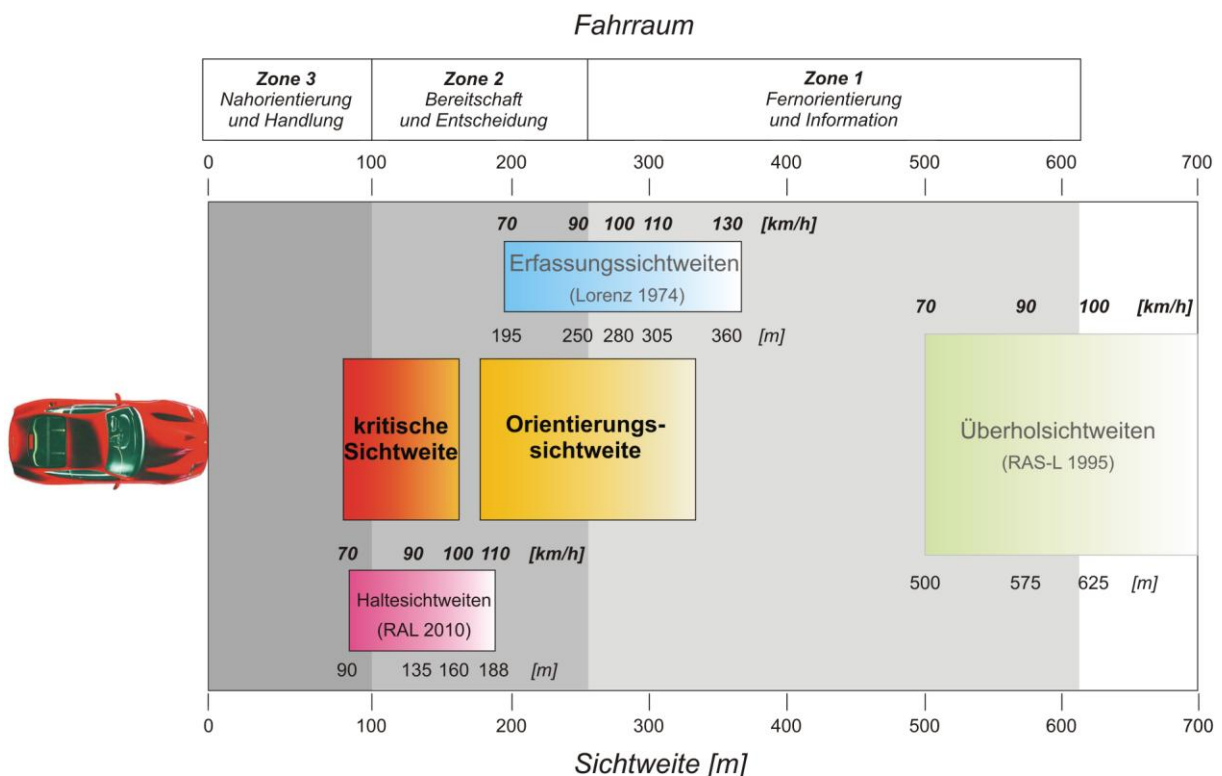


Bild 6-2: Zuordnung der Orientierungssichtweite zu bekannten Sichtweitenmodellen

6.2 Ableitung von Empfehlungen für die Berücksichtigung der Fahrerorientierung auf Landstraßen

Auf der Grundlage der vorliegenden Ergebnisse lassen sich hinsichtlich des Orientierungsbedarfs von Fahrern auf Landstraßen die folgenden Schlussfolgerungen ziehen:

- Die Messfahrten decken ein Geschwindigkeitsspektrum zwischen 80 km/h und 110 km/h ab, welches dem unbeeinflussten Fahren ohne spezielle Vorgaben entspricht. Für diesen Bereich können Empfehlungen direkt abgeleitet werden.
- Um auf längeren Strecken ein Fahren mit einer Geschwindigkeit von 100 km/h ohne erhöhte Beanspruchung zu ermöglichen, sollte die vorhandene Sichtweite nach Möglichkeit nicht unter 200 m fallen.
- Zur Vermeidung unsicheren Fahrens und abrupter Reaktionen an überraschenden Hindernissen sollte die vorhandene Sichtweite generell nicht weniger als 150 m betragen.
- Die obere Grenze sichtweitenbezogener Reaktionen liegt bei 250 m bei Geschwindigkeiten von bis zu 110 km/h auf Landstraßen.
- Die Probanden in den Fahrversuchen repräsentieren aufgrund ihrer Altersstruktur und Fahrerfahrung einen überdurchschnittlich leistungsfähigen Teil des Gesamtkollektivs. Für die Festlegung von Modellvorgaben wird deshalb ein zusätzlicher Sicherheitszuschlag von 10% empfohlen.

Die maßgebende Grundlage für die Gewährleistung ausreichender Sichtverhältnisse in den Entwurfsrichtlinien RAS-L (FGSV 1995) und RAL (FGSV, Entwurf 2010) ist die Haltesichtweite. Mit ihr erfolgen der Sichtweitennachweis und die Dimensionierung von der Sichtweite abgeleiteter Entwurfs-elemente, insbesondere der Kuppenhalbmesser. Im Entwurf der RAL ist sie die einzige Vorgabe und stellt das rechtlich verbindliche Mindestmaß für die Gewährleistung der Verkehrssicherheit dar.

Vergleicht man die Ergebnisse dieser Untersuchung mit der Größenordnung der Haltesichtweite im Entwurf der RAL (FGSV 2010, $s_H = 160$ m bei 100 km/h), so zeigt sich, dass die Fahrerorientierung darüber nicht abgedeckt wird. Dies war in den RAS-L (FGSV 1995) noch gefordert worden, mit $s_H = 171$ m bei 100 km/h aber ebenfalls nicht vollständig gewährleistet.

Zur Sicherstellung der frühzeitigen Fahrerinformation wird eine Orientierungssichtweite vorgeschlagen, die es dem Fahrer ermöglicht, die Streckencharakteristik zu erfassen und sein Fahrverhalten darauf auszurichten, ohne dafür auf abrupte Reaktionen angewiesen zu sein (vgl. Kap. 3.1). Die Abstufung erfolgt in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit zunächst für den untersuchten Bereich zwischen 80 und 110 km/h. Als Bewertungsgrundlage dafür ist die tatsächlich gefahrene Streckengeschwindigkeit maßgebend, die durch die V_{85} repräsentiert wird. Die Empfehlungen sind in Tab. 6-1 dargestellt.

Geschwindigkeit V_{85} [km/h]	70	80	90	100	110
Orientierungssichtweite S_O [m]	nicht erforderlich	180	200	220	250

Tab. 6-1: Vorschlag für die Orientierungssichtweite

Zur Begründung: Für die höchsten im Versuch gefahrenen Geschwindigkeiten (110 km/h) wurde die Obergrenze sichtweitenbezogener Reaktionen angesetzt. Dies sind 250 m. Auf einen zusätzlichen Sicherheitszuschlag (der sich aus unterschiedlich leistungsfähigen Fahrerkollektiven in Versuch und Gesamtheit begründet) wurde hier verzichtet, da eine darüber

hinaus gehende Forderung keine weitere Verbesserung der Orientierung zur Folge hätte. Zudem würde damit der Bereich zwischen halber und voller Überholsichtweite erreicht, der Fahrer zu gefährlichen Überholmanövern verleiten kann.

Bei Geschwindigkeiten von 100 km/h wurden Anzeichen unzureichender Orientierung und Veränderungen im Fahrverhalten unterhalb von 200 m Sichtweite festgestellt. Unter Berücksichtigung des 10%igen Sicherheitszuschlages ergibt sich eine Orientierungssichtweite von 220 m.

Für Geschwindigkeiten zwischen 80 km/h und 90 km/h liegt die Empfehlung in einem Bereich, in dem die Versuchsreaktionen eine kontinuierliche Zunahme der Beanspruchung und erste Reaktionen im Fahrverhalten zeigen. Dies ist unterhalb von 200 m der Fall, die Grenze zum stark unsicheren Fahrverhalten mit abrupten Reaktionen verläuft dann zwischen 175 m und 150 m vorhandener Sichtweite. Die Orientierungssichtweite wird oberhalb dieser Grenze festgelegt, mit Berücksichtigung des Sicherheitszuschlages ergibt sich ein Bereich von 180 – 200 m.

Geschwindigkeiten unterhalb von 80 km/h wurden in den Versuchen nur sehr selten gefahren. Für diesen Bereich liegt deshalb keine aussagekräftige Datenbasis vor. Es kann davon ausgegangen werden, dass solche Geschwindigkeiten vom Großteil des Fahrerkollektivs nur dann gefahren werden, wenn

- Linienführung, Querschnitt oder Fahrbahnzustand dies erzwingen oder
- Geschwindigkeitsbeschränkungen und Maßnahmen zur Durchsetzung vorhanden sind.

In beiden Fällen wird die Geschwindigkeit nicht von der Wahrnehmungsleistung des Fahrers bestimmt. Die Vorgabe der Orientierungssichtweite ist deshalb nicht notwendig, die Einhaltung der erforderlichen Haltesichtweite wird unter solchen Umständen als ausreichend angesehen.

Eine Anpassung der Orientierungssichtweite an die Längsneigung, wie im Modell der Haltesichtweite, erfolgt nicht. Dies wäre weder aus den Untersuchungsergebnissen noch aus dem psycho-physiologischen Ansatz zu begründen, der dem Modell zugrunde liegt.

6.3 Umgang mit der Orientierungssichtweite im Straßenentwurf

Für das im Entwurf der RAL (FGSV 2010) vorgesehene Geschwindigkeitsspektrum können messtechnisch abgesicherte Empfehlungen für die Orientierungssichtweite vorgelegt werden. Höhere Geschwindigkeiten wurden in den Versuchen nicht in ausreichender Anzahl gefahren, um direkt Aussagen ableiten zu können. Es erscheint aber legitim, Werte für höhere Geschwindigkeiten durch lineare Extrapolation abzuleiten. Richtet sich der Blick weit voraus, so ist von einer längeren Dauer der visuellen Verarbeitung auszugehen, da die Erkennbarkeit von Objekten und das Einschätzen von Bewegungen mit zunehmender Distanz schwieriger werden. Die Begrenzung der Wahrnehmungsleistung sollte daher durch einen verlängerten Reaktionsweg bei höheren Geschwindigkeiten berücksichtigt werden.

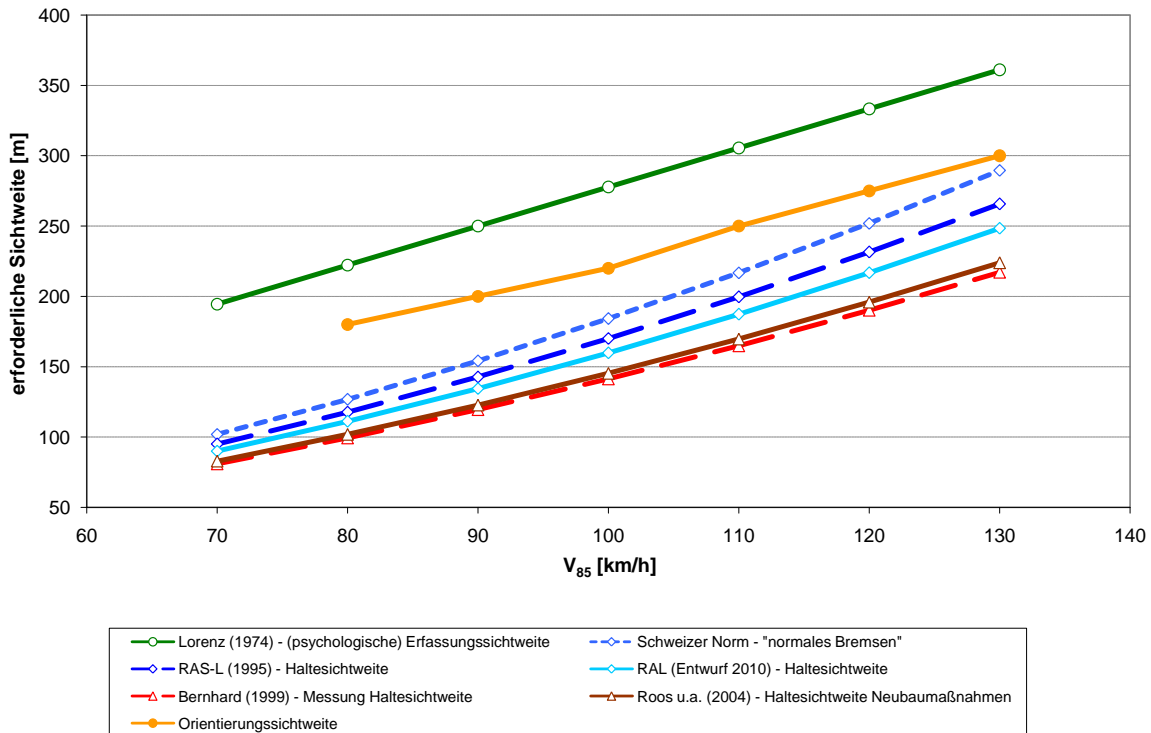


Bild 6-3: Einordnung des Modellvorschlags für die Orientierungssichtweite

Bild 6-3 zeigt die Einordnung der Größenordnung im Vergleich zu bestehenden Sichtweitenmodellen. Die Orientierungssichtweite liegt deutlich oberhalb der in verschiedenen Richtlinien geforderten Haltesichtweiten, andererseits aber weit unterhalb der auf der 10s-Regel basierenden Erfassungssichtweite. Bei hohen Geschwindigkeiten liegt sie im Bereich dessen, was die Schweizer Norm SN 640090b für „normales Bremsen“ ansetzt. Dies entspricht dem Gedanken des „entspannten Fahrens“, der der Orientierungssichtweite zugrunde liegt. Bezogen auf die in Kap. 2.3.3 beschriebene neue Entwurfsphilosophie der RAL und die damit verbundene Einführung der Entwurfsklassen können nachstehende Empfehlungen für eine Berücksichtigung der Orientierungssichtweite formuliert werden:

- Straßen der EKL 1 erhalten eine sehr gestreckte Linienführung, wodurch sich auch großzügige Sichtweiten ergeben. Für diese leistungsfähigen Landstraßen sind hinsichtlich der Sichtweiten auch die höchsten Anforderungen zu stellen, um einen behinderungsfreien Verkehrsablauf zu gewährleisten. Die Einhaltung der Orientierungssichtweite sollte hier der Normalfall sein.
- Straßen der EKL 2 sind zweistreifige Straßen des RQ 11,5+, die abschnittsweise durch wechselseitige Überholfahrstreifen aufgeweitet werden. In zweistreifigen Abschnitten besteht überwiegend Überholverbot. Auch hier handelt es sich um leistungsfähige Straßen, die einen hohen Anspruch an die Sichtweiten haben. Die planerisch maßgebende Geschwindigkeit entspricht – bei ähnlicher Linienführung und Querschnittsgestaltung – der der Versuchsfahrten, so dass im Sinne des Fahrens ohne erhöhte Aufmerksamkeitsanforderungen die Orientierungssichtweite in der Regel gewährleistet sein sollte, sofern keine unangemessene Kostenerhöhung dagegen spricht.
- Auf Straßen der EKL 3 muss der Fahrer mit Gegenverkehr im eigenen Fahrstreifen rechnen. Querschnittsgestaltung und Linienführung entsprechen in weiten Teilen denen der Versuchsstrecken. Trotz der geringeren planerisch angemessenen Geschwindigkeit (90 km/h) ist daher von einem Fahrverhalten im Bereich der zulässigen Geschwindigkeit von 100 km/h auszugehen. Die Ergebnisse der Messungen sind demnach auf Straßen dieses Typs übertragbar. Im Sinne der angestrebten gelände-

angepassten Trassierung ist jedoch hier ein geringerer Standard möglich. Ein Fahren ohne abrupte Reaktionen soll dennoch stets möglich sein. Es sollte deshalb angestrebt werden, auch bei wirtschaftlich bedingten Unterschreitungen der empfohlenen Orientierungssichtweite ein Mindestsichtniveau von 180 m zu gewährleisten.

- Für die EKL 4 können die Ergebnisse nicht ohne weiteres übertragen werden, da die Differenz zwischen in den Versuchen gefahrener und planerisch angemessener Geschwindigkeit zu groß ist. Geschwindigkeiten um 70 km/h traten nur radienbedingt in stark kurvigen Abschnitten auf und konnten nicht durch den Einfluss der Sichtweite begründet werden. Angesichts des Anspruchs der EKL 4, deren Gestaltung darauf ausgelegt ist, dem Kraftfahrer die Notwendigkeit einer langsameren und der Streckencharakteristik angemessenen Geschwindigkeit zu verdeutlichen, erscheint hier die Einhaltung der Haltesichtweite ausreichend. Eine deutlich größere Orientierungssichtweite könnte ansonsten dem gewünschten Eindruck der Straße widersprechen. Vor dem Hintergrund, dass die RAL für den Neubau ausgelegt sein werden, sind aber auch bei Straßen der EKL 4 Betriebsgeschwindigkeiten deutlich unter 80 km/h nicht zu erwarten. Eine ausreichende Fahrerorientierung wäre dann durch Sichtweiten ≥ 150 m gewährleistet. Aufgrund der verhältnismäßig geringen verkehrlichen Bedeutung dieser Straßen kann dieser Anspruch aber ggf. wirtschaftlichen Aspekten untergeordnet werden.

Besondere Bedeutung hat die erforderliche Sichtweite für die Gestaltung von Kuppenhalbmessern. In der Diskussion der zukünftigen Entwurfsstandards zeichnete sich während der Untersuchungen folgende Entwicklung ab: Die Haltesichtweite wird nicht verringert, sondern bleibt in ihren Werten unverändert. Es erfolgt aber eine Anpassung des Modellhintergrundes, indem die Zielpunkthöhe mit 1,00 m angenommen wird (bisher: 0,50 m). Damit ist die Erkennbarkeit eines stehenden Fahrzeugs gewährleistet, gleichzeitig erfolgt eine Angleichung der Modellvorgaben für die Haltesichtweite auf Autobahnen und Landstraßen. Dies entspricht auch der Vorgehensweise bei der Bestimmung der Sichtweiten für diese Versuche, also dem Bemessungshintergrund der Orientierungssichtweite. Die erforderlichen Mindestkuppenhalbmesser ergeben sich jedoch nicht – wie bisher – direkt aus der Berechnung nach den erforderlichen Sichtweiten, sondern werden entwurfsklassenabhängig festgelegt.

Im zuständigen Arbeitskreis 2.2.1 „Landstraßen“ der FGSV wurden diese Ergebnisse und Vorschläge vorgestellt und diskutiert. Ein Vergleich der bisherigen Richtlinien und weiterentwickelten Ansätze ergab folgendes Bild:

- Die Orientierungssichtweite ist im Entwurf der RAL über die Haltesichtweite nicht abgedeckt.
- Die Kuppenhalbmesser sind mit der Zielpunkthöhe 1,00 m in den Mindestwerten so festgelegt, dass die Fahrerorientierung nicht in jedem Fall gewährleistet ist.
- Die Differenzierung nach unteren Grenzwerten in Abhängigkeit von der Haltesichtweite, nach empfohlenen Richtwerten in Abhängigkeit von der Orientierungssichtweite und nach empfohlenen oberen Werten führt zu einer wenig praxisnahen Intervallbildung.
- Die Forderung nach einem (nicht durchgängigen, nur anteilig erforderlichen) Sichtweitenband für die Orientierungssichtweite kann in der Entwurfspraxis zu Unklarheiten im Umgang mit den Sichtweitenmodellen führen.

Im Ergebnis wurde empfohlen, im Regelwerk für den Entwurf von Landstraßen die Haltesichtweite als durchgängig zu gewährleistendes Entwurfselement beizubehalten. Die Belange der Fahrerorientierung sind darüber hinaus insbesondere bei der Bemessung von Kuppenhalbmessern zu berücksichtigen. Um diesem Ziel Rechnung zu tragen, wurde im Entwurf der RAL eine Anpassung der Mindestkuppenhalbmesser vorgenommen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die Gewährleistung ausreichender Sichtweiten für Fahrer ist eine Notwendigkeit für einen sicheren Verkehrsablauf und seit langem ein grundlegendes Anliegen der Richtlinien des Straßenentwurfs. Auf der freien Strecke sollen Fahrer in der Lage sein, die Linienführung der Straße frühzeitig richtig einzuschätzen, die Verkehrssituation wahrzunehmen und gegebenenfalls ihr Fahrverhalten anzupassen. Zur Umsetzung dieser Forderungen im Straßenentwurf stehen in den derzeit gültigen Entwurfsrichtlinien (RAS-L, FGSV 1995) zwei Sichtweitenmodelle zur Verfügung, die Haltesichtweite und die Überholsichtweite. Beide beruhen auf standardisierten Annahmen für eine bestimmte Verkehrssituation sowie empirisch abgesicherten Werten für Reaktionszeiten und fahrdynamisch-technische Parameter.

Im Zuge der Anpassung dieser Parameter an die Weiterentwicklungen der Fahrzeugtechnik (Verkürzung der Bremswege) stand bei der Fortschreibung der Entwurfsrichtlinien eine Verringerung der geforderten Mindestsichtweiten zur Diskussion. Es stellte sich jedoch die Frage, ob ein – technisch mögliches – geringeres Sichtweittenniveau dem Bedarf des Fahrers nach Orientierung noch ausreichend nachkommt oder möglicherweise zu erhöhter Beanspruchung und unsicherer Fahrweise führt.

In der Vergangenheit hatte es immer wieder Versuche gegeben, die psycho-physiologische Leistungsfähigkeit der Fahrer in Sichtweitenmodellen zu berücksichtigen. Diese standen aber stets vor der Schwierigkeit, dass sich (unzureichende) Orientierung bzw. Verunsicherung nicht messen und in Grenzwerte fassen lassen. Dementsprechend gründeten sich psychologische Sichtweitenmodelle vorrangig auf theoretische Überlegungen und konnten nicht in quantitative Vorgaben für das Entwurfsregelwerk umgesetzt werden.

Mit der Entwicklung von berührungslosen Blickbewegungsmesssystemen stand hier erstmals eine geeignete Methode zur Verfügung, um die Wahrnehmung und Beanspruchung von Fahrern im realen Verkehrsraum und ohne Beeinträchtigungen zu erfassen. Damit erschien es möglich, bestehende Erkenntnisse und Vermutungen zum Orientierungsbedarf von Fahrern zu überprüfen und die Ergebnisse mit Messdaten eines größeren Probandenkollektivs zu unterlegen.

Ziel der Untersuchungen war es, das Blick- und Fahrverhalten von Fahrern auf Landstraßen in Abhängigkeit von der vorhandenen Sichtweite zu untersuchen. Im Ergebnis waren Empfehlungen abzuleiten, wie die Fahrerorientierung in Sichtweitenmodellen des Straßenentwurfs berücksichtigt werden kann.

Eine umfangreiche Literaturanalyse ergab zunächst, dass die berührungslose Blickbewegungsmessung sehr gut geeignet ist, die Wahrnehmung und Reaktion von Fahrern zu untersuchen. Blickverhaltensänderungen und erhöhte Anspannung können so erfasst werden, bevor Reaktionen im Fahrverhalten nachweisbar sind. Durch die Kombination der Fahraufgabe mit einer Nebenaufgabe lassen sich Belastungsgrenzen feststellen, die der Fahrer selbst und teilweise unbewusst wählt und die somit zuverlässigere Aussagen liefern als beispielsweise Befragungen. Lassen sich diese Ergebnisse schlüssig mit Daten des Fahrverhaltens überlagern, so erhält man ein konsistentes Bild der Prozesskette Wahrnehmen – Entscheiden – Handeln, welches in seiner Aussagekraft über die reine Verhaltensbeobachtung hinausgeht.

In drei unabhängigen Versuchsreihen wurden das Blick- und Fahrverhalten, die Aufmerksamkeitsverteilung und die Reaktionsparameter von Fahrern auf Landstraßen mit dem maßgebenden Faktor Sichtweite untersucht. Ein 76 km langer Rundkurs mit Teilstrecken unterschiedlicher Charakteristik wurde von 20 Probanden befahren. Bei diesem „freien“ Fahren ohne besondere Anweisungen wurden Blick- und Fahrverhalten auf den Außerortsstreckenanteilen erfasst und ausgewertet. Die Parameter der Blickbewegung dienten dabei als Indikatoren für den Informationsbedarf der Fahrer und die Beanspruchung beim Fahren durch die Linienführung der Strecke.

Im zeitlichen Abstand von einigen Wochen wurde derselbe Kurs von denselben Personen erneut befahren, diesmal mit einer zusätzlichen Nebenaufgabe. Die Probanden mussten dafür den Blick regelmäßig von der Straße abwenden, um einen im Beifahrerraum angebrachten Bildschirm anzublicken. Damit wurde untersucht, ob bei geringer Sichtweite die Blickabwendungen von der Straße seltener werden und ob (bzw. bei welcher Sichtweite) eine Grenze existiert, ab der der Blick ausschließlich der Straße zugewandt bleibt.

Die dritte Versuchsreihe erfolgte im Fahrsimulator und zielte auf die Reaktionsparameter an überraschend auftauchenden Hindernissen. Dafür wurde die Strecke der Realversuche nachgebildet und testweise befahren, um ein vergleichbares Fahrverhalten sicherzustellen. Anschließend wurde die Simulatorstrecke so variiert, dass bei unterschiedlichen Sichtweiten Hindernisse zu bewältigen waren. Anhand von Parametern des Blickverhaltens, des Fahrverhaltens und von Befragungen der Probanden wurde untersucht, ab wann eine Bewältigung nur noch durch abrupte, heftige Reaktionen bzw. gar nicht mehr möglich ist.

In den Ergebnissen zeigte sich, dass ein Einfluss der vorhandenen Sichtweite auf das Blick- und Fahrverhalten besteht. Es wurden Steigerungen der Konzentration und Aufmerksamkeit bei Sichtweiten unterhalb von 200 m festgestellt, die sich bei geringer werdender Sichtweite immer weiter fortsetzten und nicht durch andere Parameter der Linienführung erklärt werden konnten. Gleichzeitig wurde eine zunächst moderate, später deutliche Reduzierung der Geschwindigkeit festgestellt. Unterhalb von 150 m Sichtweite konzentrierte sich der Blick der Fahrer fast ausschließlich auf die vorausliegende Strecke; Nebenaufgaben wurden eingestellt. Bei noch weiter sinkenden Sichtweiten wurde auch auf geraden Strecken häufig gebremst. Die Reaktionsparameter an überraschenden Hindernissen nahmen dann Werte an, die Notfallreaktionen kennzeichnen und im normalen Fahrtablauf nicht erreicht werden (sollten).

Es konnte damit gezeigt werden, dass unzureichende Sichtweiten zu Verunsicherung und erhöhter Beanspruchung bei Fahrern führen und so ein potenziell gefährliches Fahrverhalten zur Folge haben können. Darüber hinaus konnten bestehende Erkenntnisse über das Blickverhalten von Fahrern anhand einer breiten Datenbasis überprüft und weiterentwickelt werden. Die Ergebnisse der Untersuchung wurden in ein Modell der Orientierungssichtweite überführt, welches dem Informationsbedarf von Fahrern auf Landstraßen Rechnung trägt und bei der Fortschreibung der Entwurfsrichtlinien berücksichtigt wurde.

Aus den Erkenntnissen dieser Arbeit lassen sich für die Zukunft Anregungen in zwei Bereichen formulieren. Zum einen hat sich die Methode der Blickbewegungsmessung, die in Fahrsimulatoren bereits seit längerem eingesetzt wird, mit Hilfe der berührungsfreien Technologie auch für längere Realfahrten als nützlich und praktikabel erwiesen. Der Vergleich der Ergebnisse aus Real- und Simulatorversuchen hat gezeigt, dass die Kombination beider Methoden möglich und zielführend ist. Mit Hilfe der überlagernden Auswertung von Blick- und Fahrverhalten lassen sich Wahrnehmungsstrategien, psychologische Zustände und Reaktionen von Fahrern erfassen und in Zusammenhang bringen. Somit können Erkenntnisse über die Kausalität von Verhaltensweisen gewonnen werden, die deutlich über die reine Fahrverhaltensbeobachtung hinausgehen.

Von einer weiteren Verbesserung der Messgenauigkeit in der Zukunft ist auszugehen. Insbesondere eine Erhöhung der Erfassungsfrequenz, eine weitere Verbesserung der Datenqualität bei wechselnden äußeren Bedingungen (Lichtverhältnisse) und eine Vergrößerung des Erfassungsbereichs sind wünschenswert und werden voraussichtlich bald technisch möglich sein. Mit einer zunehmend leichterem Verfügbarkeit entsprechender Messsysteme bietet die Blick- und Fahrverhaltensmessung im realen Fahrraum durchaus das Potenzial, sich zu einer Standardmethode für Untersuchungen zum Verhalten im Straßenverkehr zu entwickeln. Die psychologisch-theoretischen Grundlagen, Parameter und Messgrößen dafür sind vorhanden. Vielversprechende Einsatzgebiete sind weitere Forschungen im Bereich des Straßenentwurfs (z.B. zur Wirkung bestimmter Kombinationen von Entwurfs-elementen oder zur Gestaltung und Ausstattung des Fahrraums), psychologische Fragestellungen (z.B. Verhaltensweisen und Leistungsfähigkeit bestimmter Fahrerkollektive wie ältere Fahrer oder Fahranfänger) sowie die Fahrzeugtechnik (z.B. Fahrerassistenzsysteme), wobei dies keine

vollständige Aufzählung sein soll.

Der zweite Bereich betrifft die Erkenntnisse zur Wirkung der vorhandenen Sichtweite auf das Fahrverhalten selbst. Durch den Entwurf eines psychologisch orientierten Sichtweitenmodells auf der Basis von Messdaten konnten die Belange der Fahrerorientierung im Entwurfsregelwerk berücksichtigt werden. Es stellte sich dabei heraus, dass bisherige theoretische Überlegungen und Beobachtungen in etwa im richtigen Bereich lagen, auch bevor sie empirisch quantifiziert werden konnten. Gleichzeitig zeigen die Ergebnisse deutlich, dass es nach wie vor nicht genügt, Entwurfselemente nach rein technischen Parametern zu bemessen. Bereits heute können technische Systeme im Fahrzeug Gefahrensituationen erkennen, und sie können schneller und präziser reagieren als der Mensch. Es ist sicher, dass sich diese Kluft mit der weiter voranschreitenden Entwicklung in der Fahrzeug- und Verkehrstechnik vergrößern wird. Dennoch liegt – bei aller Unterstützung des Fahrers durch Warn- und Assistenzsysteme – die Verantwortung für die Wahl des Fahrverhaltens schon allein aus rechtlichen Gründen absehbar immer beim Fahrer selbst. Es sollte daher auch zukünftig ein Grundsatz des Straßenentwurfs sein, den physiologischen und psychologischen Bedürfnissen sowie der Leistungsfähigkeit des Fahrerkollektivs Rechnung zu tragen. Nur so kann eine vorausschauende und sichere Fahrweise ermöglicht werden.

Literaturverzeichnis

- AL-KASSAR, B., HOFFMANN, G., ZMECK, D. (1981)
 Der Einfluss der Streckenmerkmale auf die Momentangeschwindigkeit freifahrender Pkw
 Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 323
 Bonn - Bad Godesberg
- ANDERSON, J.R. (2001)
 Kognitive Psychologie. 3. dt. Aufl.
 Heidelberg
- AULHORN (1971)
 Wahrnehmungsphysiologische Grenzen der Sichtweite
 Straßenbau, Verkehrstechnik und Verkehrssicherheit Heft 15/ 1971
- BALL, K. & OWSLEY, C. (1993)
 The useful field of view test: A new technique for evaluating age-related declines in visual function
 Journal of the American Optometric Association, Nr. 64,
- BALL, K., OWSLEY, C. U.A. (1993)
 Visual attention problems as a predictor of vehicle crashes in older drivers
 Investigative Ophthalmology & Visual Science, 34(11)
- BAUMANN, N. (1984)
 Zusammenhang zwischen Verkehrsunfällen und Verkehrsbedingungen auf zweispurigen Landstraßen
 Verkehrswege für die mobile Gesellschaft – Deutscher Straßenkongress 1984
 FGSV, Köln 1984
- BELT, B.L. (1969)
 Driver eye movement as a function of low alcohol concentrations
 The Ohio State University, Driving Res. Lab. Techn. Report June 1969
- BERGER, H. (1996)
 Informationsaufnahme im Straßenverkehr – Grundlagen und Konsequenzen für die Praxis
 Promotion an der Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Verkehrswesen
- BERNHARD, M. (1999)
 Zur Bemessung der Haltesichtweite im Straßenentwurf. Heft 400 der Schriftenreihe „Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik der Fortschritt-Berichte des VDI,
 VDI-Verlag GmbH Düsseldorf
- BIEDERMANN B. (1984)
 Straßentrassierung auf der Grundlage von Geschwindigkeiten aus Sehfelduntersuchungen
 Promotion an der TH Darmstadt
- BLAAUW, G.J., RIEMERSMA, J.B.J. (1975)
 Interpretation of roadway designs by an analysis of drivers' visual scanning and driving behavior on straight and curved roadway sections. Unveröffentlichter Bericht. Institut voor Zintuigfysiologie, TNO, IZF
- BOCK, H. (1968)
 Untersuchungen über Fahrgeschwindigkeiten außerhalb von Ortsdurchfahrten in Abhängigkeit von der Streckencharakteristik
 Referendararbeit, Straßenbauamt Neu-Ulm

- BOER, E.R. & MULDER, M. (2002)
To brake or not to brake: Scaling the curve.
In A.G. Gale et al. (Hrsg.),
Vision in Vehicles IX, Amsterdam: Elsevier.
- BUBB, H. (1977)
Analyse der Geschwindigkeitswahrnehmung in Fahrzeugen
Zeitschrift für Arbeitswissenschaft, 31
- BUCK, M. (1992)
Geschwindigkeitsverhalten auf einbahnigen Außerortsstraßen in Abhängigkeit von bau-
lichen, betrieblichen und verkehrlichen Randbedingungen
Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 621
Bonn - Bad Godesberg
- BUSWELL, G.T. (1935)
How People Look at Pictures. A Study of the Psychology of Perception in Art
The University of Chicago Press, Chicago, IL.
- CARSTEN, O., ZAKOWSKA, L. & JAMESON, H. (2004)
Driver's perception of self explained road infrastructure and architecture
3rd. International conference on traffic and transportation psychology
Nottingham, 2004
- CHATZIASTROS, A., WALLIS G. M., BÜLTHOFF H. H. (1999)
The effect of view and surface texture on driver steering performance
In A.G. Gale et al. (Hrsg.), Vision in Vehicles VII, (S. 253-259). Amsterdam: Elsevier.
- COHEN, A. (1976)
Augenbewegungen des Autofahrers beim Vorbeifahren an unvorhersehbaren Hinder-
nissen und auf freier Strecke.
Zeitschrift für Verkehrssicherheit, 22
- COHEN, A. S. (1987)
Blickverhalten und Informationsaufnahme von Kraftfahrern
Bericht zum Forschungsprojekt FE 8306/3 der BAST
ETH Zürich
- COHEN, A. & HIRSIG, R. (1990)
Zur Bedeutung des fovealen Sehens für die Informationsaufnahme bei hoher Beanspru-
chung.
In H. Derkum, Sicht und Sicherheit im Straßenverkehr.
Köln: TÜV Rheinland.
- CREMER, R., SNEL, J. & BROUWER, W.H. (1990)
Age-related differences in timing of position and velocity identification
Accident Analysis and Prevention, 22
- DESTATIS (2007)
Jahresbericht des statistischen Bundesamtes zur Verkehrssicherheit
Wiesbaden
- DILLING, J. (1973)
Fahrverhalten von Kraftfahrzeugen auf kurvigen Strecken
Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 151
Bonn - Bad Godesberg
- DE WAARD, D. (1996).
The measurement of drivers' mental workload
PhD Thesis, University of Groningen
Haren, Traffic Research Centre

- DIETRICH, K. (1965)
Dauergeschwindigkeiten von Personenkraftwagen auf Steigungen
Forschungsbericht des Instituts für Ort-, Regional- und Landesplanung an der ETH Zürich
- DIETRICH, K./ ROTACH, M./ BOPPART, E. (1993)
Straßenprojektierung
IVT ETH Zürich 1993 (8. Auflage)
- DODGE, R. (1900)
Visual perception during eye movement
Psychological Review, 7
- DUNNE, M., STYLES, D., WARDELL, P., STYLIANOU, L. & SPRAKES, R. (1998)
Driver vision screening: Pilot study.
In A.G. Gale et al. (Hrsg.), Vision in Vehicles VI,
Amsterdam: Elsevier.
- DURTH, W. (1974)
Ein Beitrag zur Erweiterung des Modells für Fahrer, Fahrzeug und Straße in der Straßenplanung
Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 163
Bonn - Bad Godesberg
- DURTH, W./ KÖRNER, G./ MANNS, K. (1982)
Überprüfung von fahrspezifischen Ausgangswerten der RAL-L
Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 365
Bonn - Bad Godesberg
- DURTH, W. / BIEDERMANN, B. / VIETH, B. (1983)
Einflüsse der Erhöhung der Geschwindigkeiten und Beschleunigungen von Fahrzeugen auf die Entwurfsgeschwindigkeit
Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 385
Bonn - Bad Godesberg
- DURTH, W. / BALD, S. (1987)
Untersuchungen zum Fahrverhalten auf Landstraßen
Fachgebiet Straßenentwurf und Straßenbetrieb der TH Darmstadt
- DURTH, W., BREUER, B., BACHMANN, TH., BERNHARD, M., BOEHLAU-GODAU, R., GOROL, TH., UNGER, S. (1998)
Überprüfung des Bemessungsmodells für die Haltesichtweite im Straßenentwurf
Forschungsauftrag FE 02.164 (BAST)
Fachgebiete Straßenwesen und Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt
- DURTH, W. & HABERMEHL, K. (1986).
Überholvorgänge auf einbahnigen Straßen
Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 489
Bonn - Bad Godesberg
- DURTH, W. & LEVIN, C. (1991)
Langfristige Entwicklung der Augen- und Zielhöhen
In: Straße und Autobahn, Heft 12/1991
Bonn-Bad Godesberg
- DURTH, W. / LIPPOLD, CH. (1993)
Anpassung der Entwurfsrichtlinien für die Linienführung (RAS-L-1 1984) an neuere Entwurfsrichtlinien
Forschungsauftrag G.2.2/91 des BMV
Darmstadt

- DURTH, W. & LIPPOLD, C. (1995)
Entwurf der neuen Richtlinien für die Anlage von Straßen; Teil: Linienführung
Straße und Autobahn 46 (1995), Heft 2
- EBERSBACH, D. (2006)
Entwurfstechnische Grundlagen für ein Fahrerassistenzsystem zur Unterstützung des
Fahrers bei der Wahl seiner Geschwindigkeit
Dissertation an der TU Dresden, Lehrstuhl Gestaltung von Straßenverkehrsanlagen
- EHMANN, D. & HOCHSTÄDTER, A. (2000)
Driver model of lane change maneuvers.
Proceedings of the 7th World Congress on Intelligent Transport Systems
Turin
- ENDSLEY, M.R. (1995)
Toward a theory of situation awareness in dynamic systems
Human Factors, 37
- ENDSLEY, M.R. & GARLAND, D.J. (2000)
Situation Analysis and Measurement
Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum.
- ERIKSON, W.E. & YEH, Y.-Y. (1985)
Allocation of attention in the visual field
Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 11(5)
- FÄRBER, B. (1986)
Abstandswahrnehmung und Bremsverhalten von Kraftfahrern im fließenden Verkehr.
Zeitschrift für Verkehrssicherheit, 32(1)
- FASTENMEIER, W. & GSTALTER, H. (1998)
Ablenkungskritische Situationen: Theoretische Konzepte und praktische Hinweise.
MOTIV/MMI AP 5 Projektbericht, unveröff.
- FINDLAY, J.M. (1981)
Spatial and temporal factors in predictive generation of saccadic eye movements
Vision Research, 21
- FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESSEN (FGSV, 1988)
Richtlinien für die Anlage von Straßen, Teil: Knotenpunkte, Abschnitt1: Plangleiche Kno-
tenpunkte (RAS-K-1)
FGSV Verlag, Köln
- FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESSEN (FGSV, 1995)
Richtlinien für die Anlage von Straßen, Teil: Linienführung (RAS-L)
FGSV Verlag, Köln
- FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESSEN (FGSV, 1996)
Richtlinien für die Anlage von Straßen, Teil: Querschnitte (RAS-Q)
FGSV Verlag, Köln
- FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESSEN (FGSV, 2008)
Richtlinien für die integrierte Netzgestaltung (RIN)
FGSV Verlag, Köln
- FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESSEN (FGSV, 2010)
Richtlinien für die Anlage von Landstraßen (RAL)
unveröffentlichter Entwurf, FGSV Arbeitsausschuss 2.2, 2010
- FRIEDINGER, CH. (1982)
Informationsaufnahme und Fahrverhalten.
Straße und Verkehr, Heft 10/1982

- GENGENBACH, R. (1997)
Fahrerverhalten im Pkw mit Head-Up-Display
Fortschritt-Berichte des VDI, Reihe 12
VDI-Verlag, Düsseldorf
- GIBSON, J.J. (1973)
The ecological approach to visual perception
Boston: Houghton Mifflin.
- GODTHELP, H. (1988)
Effects of vehicle handling characteristics on driving strategy
Human Factors, 30(2)
- GODTHELP, H., MILGRAM, P. & BLAAUW, G.J. (1984)
The development of a time-related measure to describe driving strategy
Human Factors 26
- GOLDBERG, J.H. & KOTVAL, X.P. (1999)
Computer interface evaluation using eye movements: methods and constructs.
International Journal of Industrial Ergonomics, 24
- GORDON, D.A. (1966)
Perceptual basis of vehicular guidance
Public Roads, 34
- GRÜSSER, O.-J. & GRÜSSER-CORNEHLS, U. (1985)
Physiologie des Sehens
In R.F. Schmidt (Hrsg.), Grundriss der Sinnesphysiologie, 5. Neubearb. u. erw. Aufl.
Berlin u.a.: Springer.
- HACKENBERG, U. & HEIßING, B. (1982)
Die fahrdynamischen Leistungen des Fahrer-Fahrzeug-Systems im Straßenverkehr
Automobiltechnische Zeitschrift, 84
- HABERMEHL, K. (1987)
Ein Beitrag zur Bemessung von Überholbereichen
Dissertation an der TH Darmstadt
- HAMMERSCHMIDT, A. (2008)
Einfluss ausgewählter Entwurfsparameter auf das Unfallgeschehen
Studienarbeit am Lehrstuhl Gestaltung von Straßenverkehrsanlagen der TU Dresden
- HARMS, L. (1993)
The influence of sight distance on subjects' lateral control: A study of simulated driving in fog. Vision in Vehicles IV
Leyden, 1993
- HASSAN, Y. & SAYED, T. (2002)
Effect of driver and road characteristics on required preview sight distance
Can. J. Civ. Eng./Rev. can. génie civ. 29
- HEGEWALD, A., WEBER, R. (2008)
Unfälle auf schmalen Landstraßenquerschnitten
Straßenverkehrstechnik, Heft 11/2008
- HIERSCHE, E.U. (1968)
Die Bedeutung und Ermittlung der Sichtweiten von Straßen
Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 67
Bonn – Bad Godesberg
- HILLS, B.L. (1980)
Vision, mobility and perception in driving
Perception, 9

- JACOB, R.J.K. (1995)
Eye tracking in advanced interface design.
In W. Barøeld & T. Furness (Hrsg.), *Advanced Interface Design and Virtual Environments*, Oxford: Oxford University Press.
- JANSSEN, W.H., MICHON, J.A. & HARVEY, L.O. (1976)
The perception of lead vehicle movement in darkness
Accident Analysis & Prevention, 8
- JUST, M.A. & CARPENTER, P.A. (1980)
A theory of reading: From eye fixations to comprehension
Psychological Review, 87
- KAYSER, SANDERS U.A. (1989)
Das Wahrnehmungsverhalten des Kraftfahrers in Abhängigkeit von der gefahrenen Geschwindigkeit und der Straßenraumgestaltung
Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 557
Bonn – Bad Godesberg
- KARSH, R. & BREITENBACH, F.W. (1983).
Looking at looking: The amorphous fixation measure
In R. Groner, C. Menz, D.F. Fisher & R.A. Monty (Hrsg.), *Eye Movements and Psychological Functions: International Views*, Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- KIRSCHBAUM VERLAG (HRSG.)(1999)
Hinweise für das Anbringen von Verkehrszeichen und Verkehrseinrichtungen – HAV – Verkehrstechnischer Kommentar. 11. Aufl.
Bonn
- KÖPPEL, G. / BOCK, H. (1970)
Kurvigkeit, Stetigkeit und Fahrgeschwindigkeit
Straße und Autobahn 8/1970
- KÖPPEL, G. / BOCK, H. (1979)
Fahrgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Kurvigkeit
Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 269
Bonn – Bad Godesberg
- KREBS, H.G. (1973)
Einfluss des Kurvenschneidens auf Bogengeschwindigkeit und Trassierungsgrundsätze
Straße und Autobahn 8/1973
- KRÜGER, D., WEINERT, R., WEISER, F. (2004)
Sicherheitswirkung geringer Sichtweiten in Linkskurven auf Autobahnen
Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 886
Bonn – Bad Godesberg
- LABERGE, D. (1983)
Spatial extension of attention to letters in words
Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 9
- LACEY, J.I. (1959)
Psychophysiological approaches to the evaluation of psychotherapeutic process and outcome
In E.A. Rubinstein & M.B. Parloff (Hrsg.). *Research in Psychotherapy*, Washington, DC: National Publishing Co.

-
- LAMM, R. (1973)
Fahrtechnik und Streckencharakteristik – Ein Beitrag zum Entwurf von Straßen unter besonderer Berücksichtigung der Geschwindigkeit
Veröffentlichungen des Instituts für Straßenbau und Eisenbahnwesen der Universität Karlsruhe, Heft 11
- LAND, M. (1992)
Predictable eye-head coordination during driving
Nature, 359
- LAND, M.F. & HOORWOOD, J. (1995)
Which parts of the road guide steering?
Nature, 277
- LAND, M.F. & LEE, D.N. (1994)
Where we look when we steer
Nature, 369
- LEUTNER, R. (1974)
Fahrraum und Fahrverhalten
Veröffentlichungen des Institutes für Straßenbau und Eisenbahnwesen der TH Karlsruhe, Heft 12
- LIPPOLD, CHR. (1997)
Weiterentwicklung ausgewählter Entwurfsgrundlagen von Landstraßen
Dissertation, TH Darmstadt
- LIPPOLD, CHR., KRÜGER, H.-P., SCHULZ, R., SCHEUCHENPFLUG, R., PIECHULLA, W. (2007)
Orientierungssichtweite – Definition und Beurteilung
Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 997
Bonn
- LIPPOLD, CHR., KRÜGER, H.-P., SCHULZ, R., SCHEUCHENPFLUG, R., LORENZ, C. (2009)
Einfluss der Straßenseitenraumbepflanzung auf Fahrverhalten und Verkehrssicherheit
Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 1018
Bonn
- LIU, A. (1999)
Towards predicting driver intentions from patterns of eye fixations
In A.G. Gale et al. (Hrsg.), Vision in Vehicles VII
Amsterdam: Elsevier.
- LONGUET-HIGGINS, H.C. & PRAZDNY, K. (1980)
The interpretation of moving retinal images
Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences, B 2008
- LORENZ, E.H.H. (1971)
Trassierung und Gestaltung von Straßen und Autobahnen
Bauverlag GmbH Wiesbaden und Berlin
- MACKWORTH, N.H. (1965)
Visual noise causes tunnel vision
Psychonomic Science, 3
- MANNS, K. (1985)
Querbeschleunigung und Querruck in der Übergangsbogenbemessung
Dissertation an der TH Darmstadt
- MIURA, T. (1986)
Coping with situational demands: A study of eye movements and peripheral vision performance
In A. G. Gale et al. (Hrsg.) Vision in Vehicles I, Amsterdam: Elsevier

- MORTIMER, R.G. & JORGESON, C.M. (1975)
Comparison of eye fixations of operators of motorcycles and automobiles
Proceedings of the Automotive Engineering Congress and Exposition
Detroit, Michigan.
- MOURANT, R.R. & ROCKWELL, T.H. (1970)
Mapping eye-movement pattern to the visual scene in driving: An exploratory study
Human Factors, 12
- MOURANT, R.R. & ROCKWELL T.H. (1972)
Strategies of visual search by novice and experienced drivers
Human Factors, 14
- NATZSCHKA, H. (2003)
Straßenbau - Entwurf und Bautechnik
2. Auflage
Stuttgart: Teubner
- NOTON, D. & STARK, L. (1971)
Scanpaths in saccadic eye movements while viewing and recognizing patterns.
Vision Research, 11(9)
- O`DONELL, C.R. & EGGEMEIER, F.T. (1996)
Workload assessment methodology
In K.R. Boff, L. Kaufman & J.P. Thomas (Hrsg.), Handbook of perception and human
performance: Vol. II. Cognitive processes and performance
New York: Wiley.
- PANNASCH, S. (2003)
Ereignisbezogene Veränderungen der visuellen Fixationsdauer
Dissertation, TU Dresden
- PIECHULLA, W. (2006)
Messung und Kontrolle mentaler Fahrerbeanspruchung. In U.W. Ebner-Priemer (Hrsg.).
Ambulantes psychophysiologisches Monitoring – neue Perspektiven und Anwendungen
Frankfurt a.M.: Lang.
- PIECHULLA, W., MAYSER, CH., GEHRKE, H. & KÖNIG, W. (2003)
Reducing drivers' mental workload by means of an adaptive man-machine interface
Transportation Research Part F, 6
- RAYNER, K. (1979)
Eye movements in reading and information processing
Psychological Bulletin, 85
- REICHART, G. (2000).
Menschliche Zuverlässigkeit beim Führen von Kraftfahrzeugen – Möglichkeiten der Ana-
lyse und Bewertung.
Dissertation, TU München.
- RIEMERSMA, J.B.J. (1991)
Perception of curve characteristics
In A.G. Gale et al. (Hrsg.), Vision in Vehicles III
Amsterdam: Elsevier.
- RÖTTING, M. (2001)
Parametersystematik der Augen- und Blickbewegungen für arbeitswissenschaftliche Un-
tersuchungen
Aachen: Shaker

- ROOS, R., ZIMMERMANN, M., v.LOEBEN, W. (2005)
Mögliche Bremsverzögerung in Abhängigkeit von der Straßengriffigkeit
Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 912
Bonn - Bad Godesberg
- SALVUCCI, D.D., & ANDERSON, J.R. (1998)
Tracing eye movement protocols with cognitive process models
In Proceedings of the Twentieth Annual Conference of the Cognitive Science Society
Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- SANDERS, A.F. (1970)
The selective process in the functional visual field
Ergonomics, 13
- SCHIMMELPFENNIG, K.H. & NACKENHORST, U. (1985)
Bedeutung der Querbesehleunigung in der Verkehrsunfallrekonstruktion -- Sicherheits-
grenze des Normalfahrers
Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 4
- SCHLICHTER, H.G. (1976)
Streckencharakteristik: Eine analytische Betrachtung
Straße und Autobahn 2/1976
- SCHMIDT, F., & TIFFIN, J. (1969)
Distortion of drivers' estimates of automobile Speed as a function of speed adaptation
Human Factors, 53
- SCHNÜLL, HALLER UND PARTNER (2002)
Zwischenbericht zum FE-Projekt 02.197.2000/AGB, Stand: 24.04.2002
Hannover
- SCHROIFF, H.-W. (1986)
Zum Stellenwert von Blickbewegungsdaten bei der Mikroanalyse kognitiver Prozesse
In L.J. Issing, H.D. Mickasch & J. Haack (Hrsg.)
Blickbewegung und Bildverarbeitung
Peter Lang, Frankfurt am Main
- SCHWEIGERT, M. (2003)
Fahrerblickverhalten und Nebenaufgaben
Dissertation TU München
- SHINAR, D., MCDOWELL, E.D. & ROCKWELL, T.H. (1977)
Eye movements in curve negotiation
Human Factors, 19(1)
- SMILEY, A. (1989)
Cognitieve vaardigheden van autobestuurders (cognitive abilities of drivers)
In C.W.F. van Knippenberg, J.A. Rothengatter & J.A. Michon (Hrsg.), Handboek sociale
verkeerskunde
Van Gorcum, Assen
- SNOWDEN, R. J., STIMPSON, N., & RUDDLE, R. A. (1998)
Speed perception fogs up as visibility drops. Nature, 392, 450.
- SPRENGER, A. (1997)
Nutzbares Sehfeld. Diskussionspapier zum Projekt „MoTiV“, AP5,
Betreuungs- und Vertriebsgesellschaft Auto-Sicht-Sicherheit mbH, Köln
- STEINAUER, B., KRÜGER, H.-P., BECHER, T., BAIER, M. M. & SCHEUCHENPFLUG, R. (2006)
Berücksichtigung psychologischer Aspekte beim Entwurf von Landstraßen – Grundla-
genstudie
Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, V 148
Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW

- STAGER, P. & ANGUS, R. (1978)
Locating crash sites in simulated air-to-ground visual search
Human Factors, 20
- THEEUWES, J. (2001)
The effects of road design on driving. In: *Traffic Psychology today*, P.E. Barjonet (Ed.),
Kluwer, Boston 2001
- THEOFANOY, D. (2002)
Maße zur Erfassung visueller Ablenkung bei verschiedenen komplexen Streckenabschnitten
Dissertation an der Universität Regensburg
- TRAPP, K.-H. (1971)
Untersuchungen über den Verkehrsablauf auf Landstraßen
Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 113
Bonn – Bad Godesberg
- TRAPP, K.-H.; OELLERS, F.-W. (1974)
Streckencharakteristik und Fahrverhalten auf zweispurigen Landstraßen
Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 176
Bonn - Bad Godesberg
- UCHIDA, N, FUJITA, K. & KATAYAMA, T. (1999)
Detection of vehicle crossing path at intersection
In A.G. Gale et al. (Hrsg.), *Vision in Vehicles VII* (S. 345-352),
Amsterdam: Elsevier.
- UNEMA, P. & RÖTTING, M. (1990)
Differences in Eye Movements and Mental Workload between Experienced and Inexperienced Drivers
In: D. Brogan (Ed.), *Visual Search*,
London, Taylor & Francis
- UNDERWOOD, G., CHAPMAN, P., CRUNDALL, D., COOPER, S. & WALLEN, R. (1999)
The visual control of steering and driving: Where do we look when negotiating curves?
In A.G. Gale et al. (Hrsg.), *Vision in Vehicles VII*,
Amsterdam: Elsevier
- UNDERWOOD, G., BROCKLEHURST, N., CRUNDALL, D., UNDERWOOD, J. & CHAPMAN, P. (2002)
Sequences of eye fixations while driving: effects of driving experience and sensitivity to types of roads
In A.G. Gale et al. (Hrsg.), *Vision in Vehicles IX*,
Amsterdam: Elsevier
- VAN DER HORST, R. (1991)
Time-to-collision as a cue for decision-making in braking
In A.G. Gale et al. (Hrsg.), *Vision in Vehicles III*
Amsterdam: Elsevier.
- VAN DER HORST, R., & HOGEMA, J. (1993)
Time-to-Collision and Collision Avoidance Systems
Proceedings of The 6th Workshop of the International Cooperation on Theories and Concepts in Traffic Safety
- VELICHKOVSKY, B.M., DORNHOEFER, S.M., KOPF, M., HELMERT, J. & JOOS, M. (2002)
Change detection and occlusion modes in static and dynamic road-traffic scenarios
Transportation Research, Part F. 5(2)
- VERWEY, W. B. (2000)
On-line driver workload estimation. Effects of road situation and age on secondary task measures, *Ergonomics*, 43

-
- VERWEY, W.B. & VELTMAN, J.A. (1996)
Detecting short periods of elevated workload. A comparison of nine common workload assessment techniques
Journal of Experimental Psychology: Applied, 2
- VICTOR, T.W., HARBLUK, J.L., & ENGSTRÖM, J.A. (2005)
Sensitivity of eye-movement measures to in-vehicle task difficulty
Transportation Research Part F, 8
- VOGEL, K (2003)
A comparison of headway and time to collision as safety indicators
Accident Analysis and Prevention, 35
- WARREN, W.H. (1995)
Self-motion: Visual perception and visual control
In W. Epstein & S. Rogers (Hrsg.), *Perception of Space and Motion* (S. 263–325),
San Diego, CA: Academic Press.
- WEICHERT, CH. (2005)
Möglichkeiten und Grenzen der Blickbewegungsmessung in Realfahrten
Studienarbeit an der TU Dresden
- WEICHERT, CH. (2006)
Einfluss der vorhandenen Sichtweite auf das Blickverhalten von Fahrern
Diplomarbeit an der TU Dresden
- WEISE, G., DURTH, W. U.A. (1997)
Straßenbau – Planung und Entwurf
Dresden
- WHO (2004): PEDEN, M., SCURFIELD, R., SLEET, D., MOHAN, D., HYDER, A.A., JARAWAN, E.,
MATHERS, C. (2004)
World Report on Road Traffic Injury Prevention
Online: http://www.who.int/world-health-day/2004/infomaterials/world_report/en/
- WICKENS, C.D. (1992)
Engineering psychology and human performance, 2. Auflage
New York: Harper Collins
- WICKENS, C.D. & CARSWELL, C.M. (1997)
Information Processing. In: Salvendy, G. (Hrsg.). *Handbook of Human Factors and Ergonomics*, 2. Auflage
New York: Wiley
- WIERDA, M. & AASMANN, J. (1992)
Seeing and driving: computation, algorithms and implementation.
Traffic Research Centre,
University of Groningen, The Netherlands.
- WINSUM, W.V. & GODTHELP, H. (1996)
Speed choice and steering behaviour in curve driving
Human Factors, 38
- WITT, H. & HOYOS, C.G. (1976)
Advance information on the road: A simulator study of the effect of road markings
Human Factors, 18
- YARBUS, A.L. (1967)
Eye Movements and Vision.
New York: Plenum.

YOUNG, L.R. & SHEENA, D. (1975)

Survey of eye movement recording methods.
Behavior Research Methods & Instrumentation, 7 (5)

ZWAHLEN, H.T., ADAMS, C.C., DEBALD, D.P. (1988)

Safety aspects of CRT touch panel controls in automobiles
Amsterdam, Elsevier

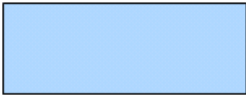
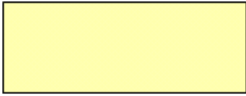


Anhang 1

- Streckenprofile und Unfallgeschehen -








Legende

Abschnittseinteilung und Unfalldarstellung








Abschnittskategorie

	Gerade
	leicht kurviger Abschnitt
	stark kurviger Abschnitt
	Abschnitt mit Singularität

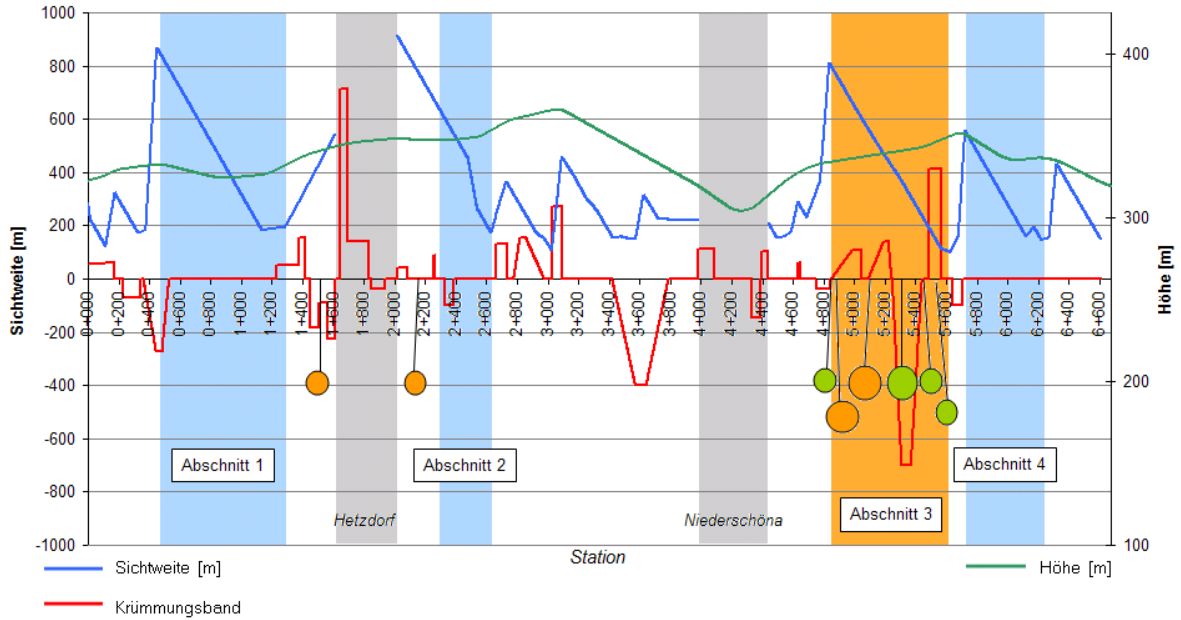
Unfalltypen

-  Fahr Unfall (F)
-  Abbiegen-Unfall (AB)
-  Einbiegen/Kreuzen-Unfall (EK)
-  Überschreiten-Unfall (ÜS)
-  Unfall durch ruhenden Verkehr (RV)
-  Unfall im Längsverkehr (LV)
-  Sonstiger Unfall (SO)

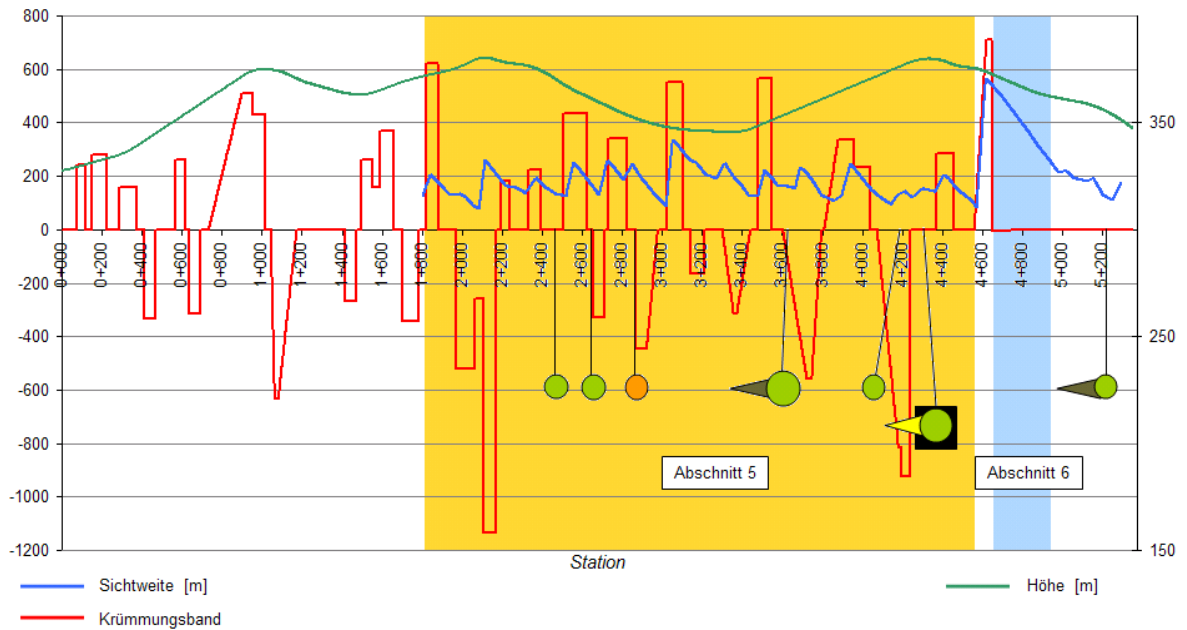
Unfallumstände

-  Fußgänger
-  Radfahrer
-  Krad
-  Baum
-  Alkohol
-  Überholen
-  Wild

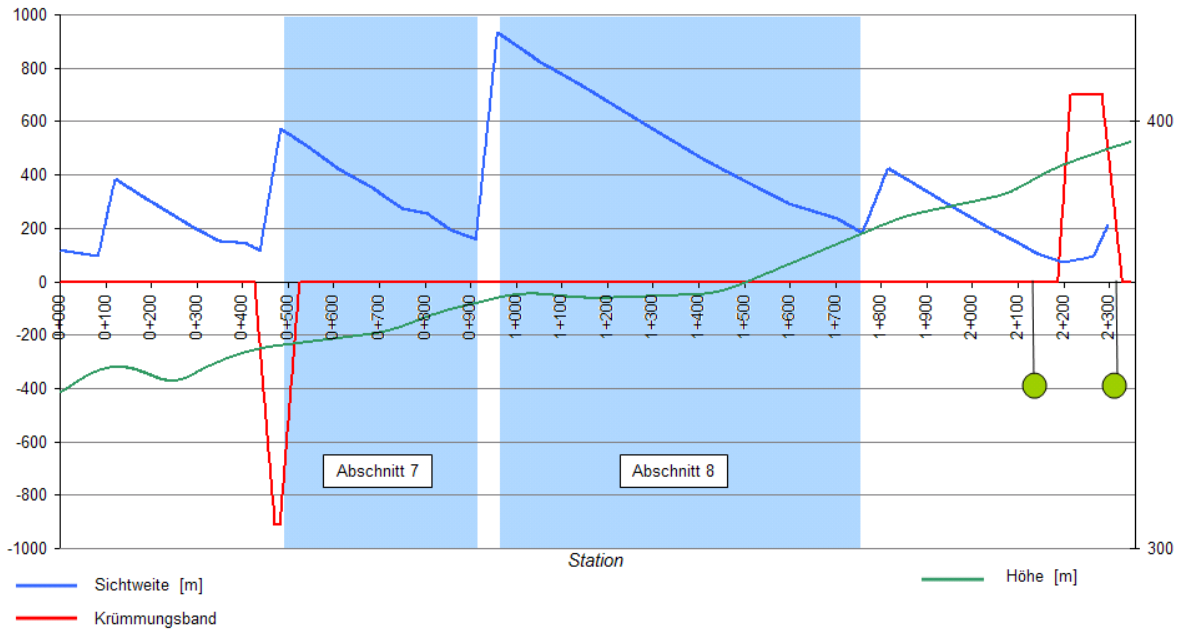
Teilstrecke 1 - B173 - hin
Mohorn - Naundorf



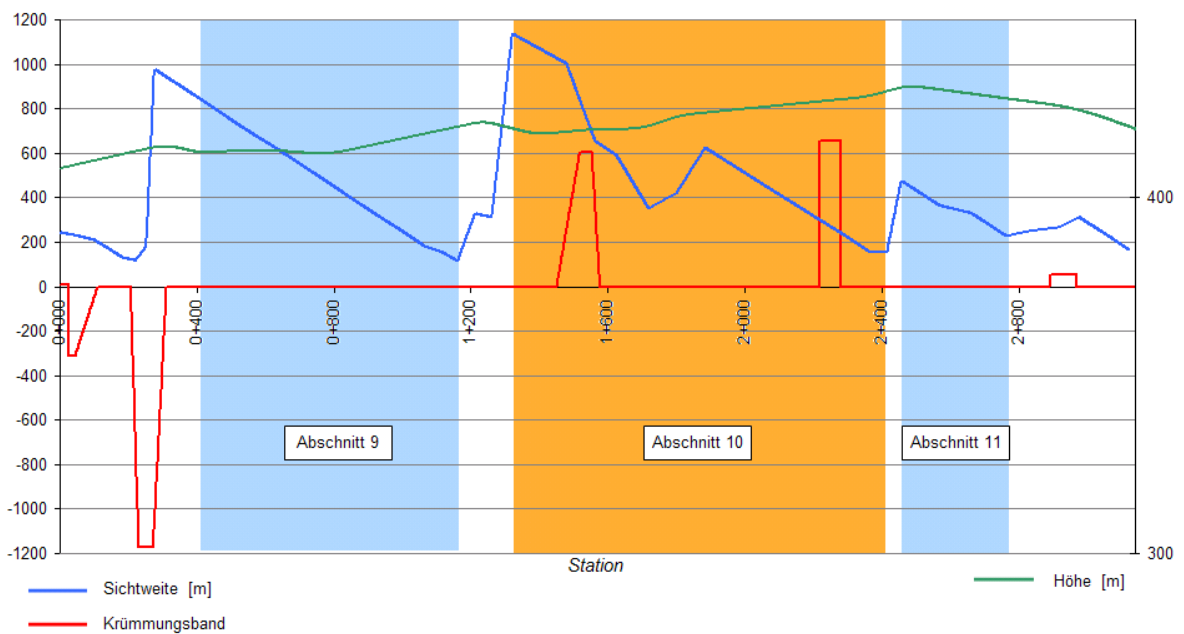
Teilstrecke 2 - S194 - hin
Naundorf - Grillenburg



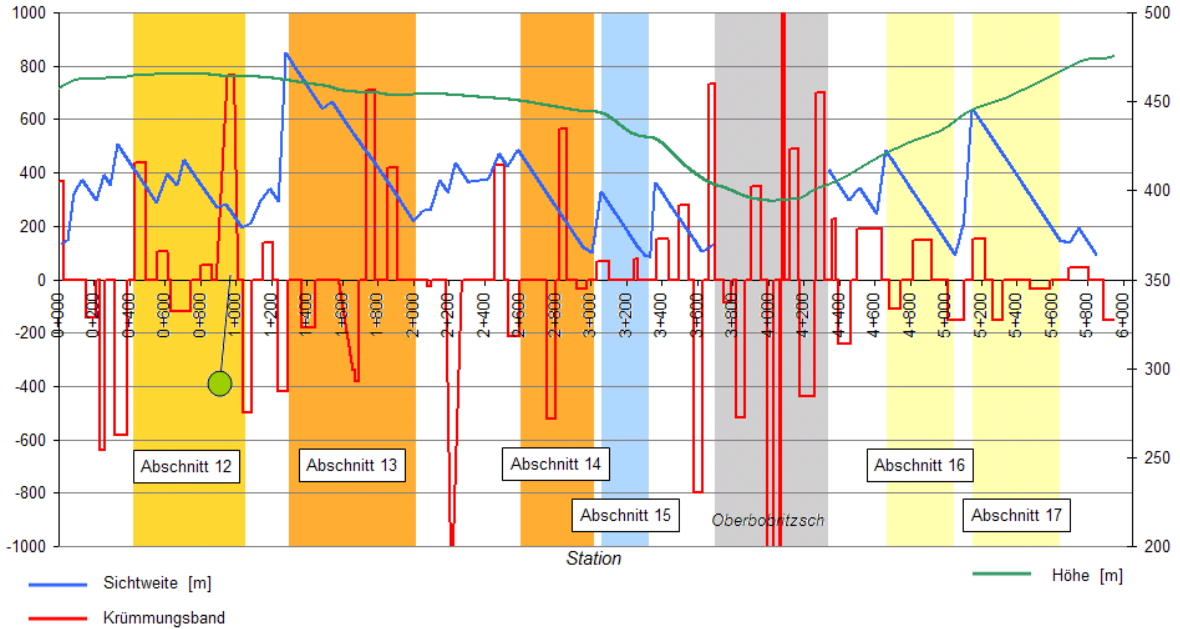
Teilabschnitt 3 - S189 - hin
Grillenburg - Klingenberg



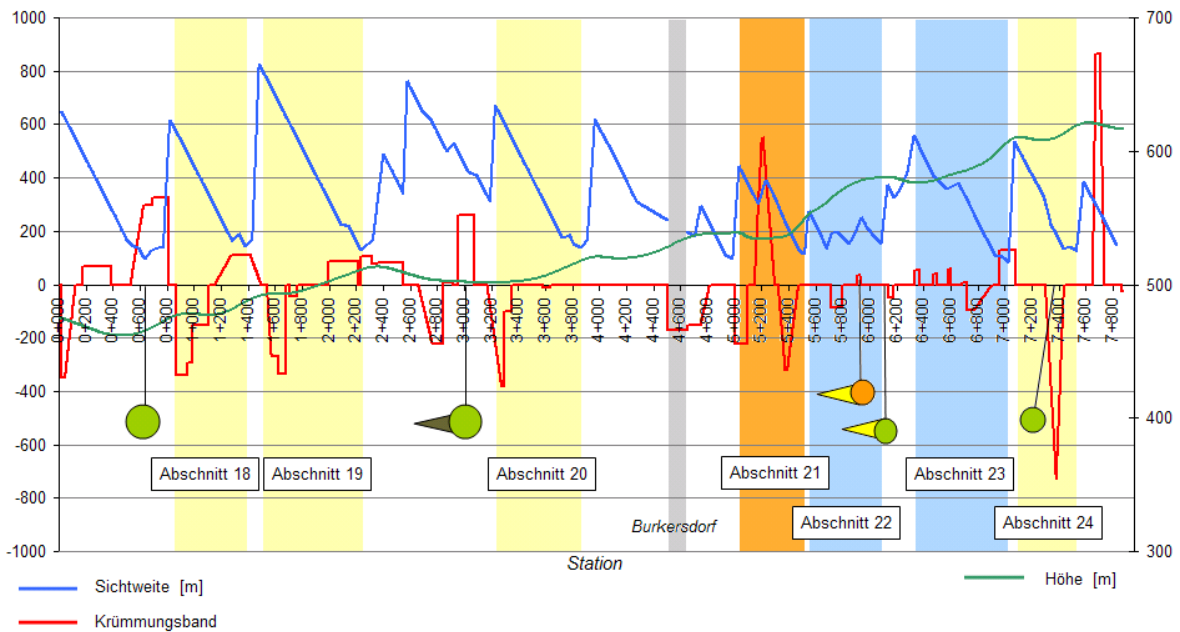
Teilstrecke 4 - S189 - hin
Klingenberg - Pretzschendorf



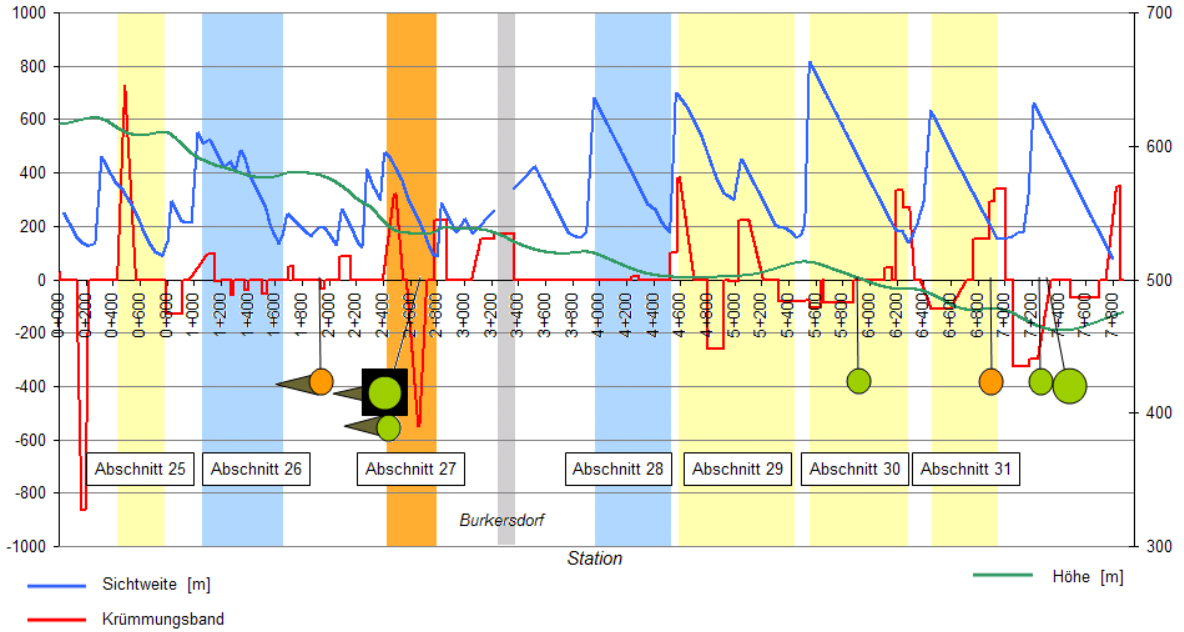
Teilstrecke 5 - K9013 und K7730 - hin
Pretzschendorf - KP



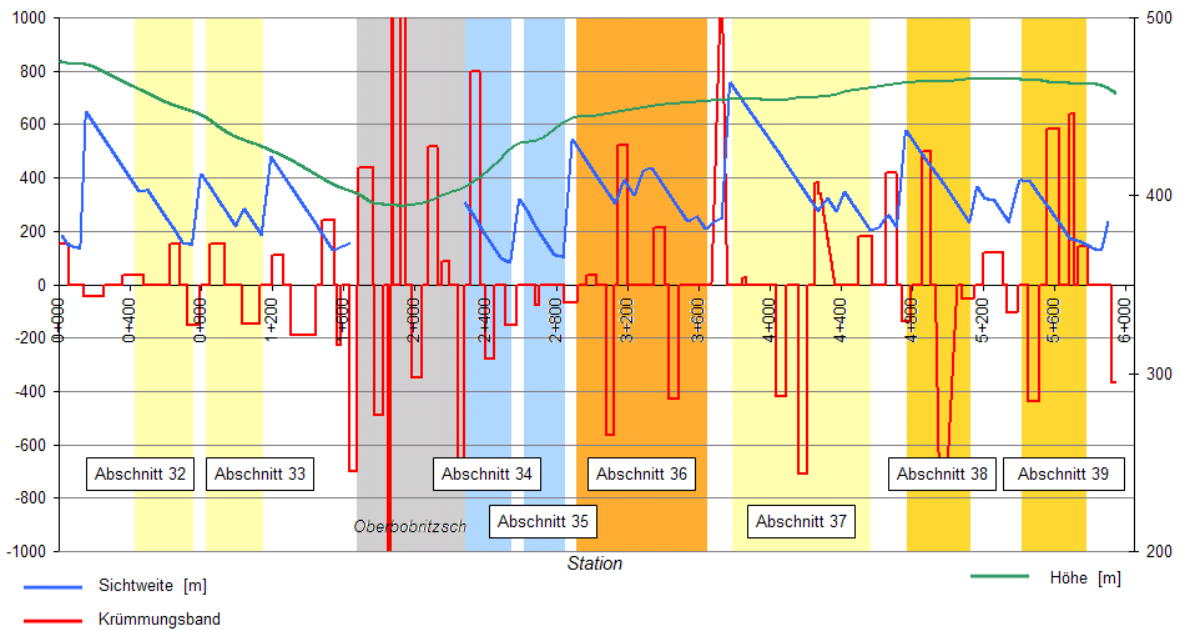
Teilstrecke 6 - S184 - hin
KP - Frauenstein



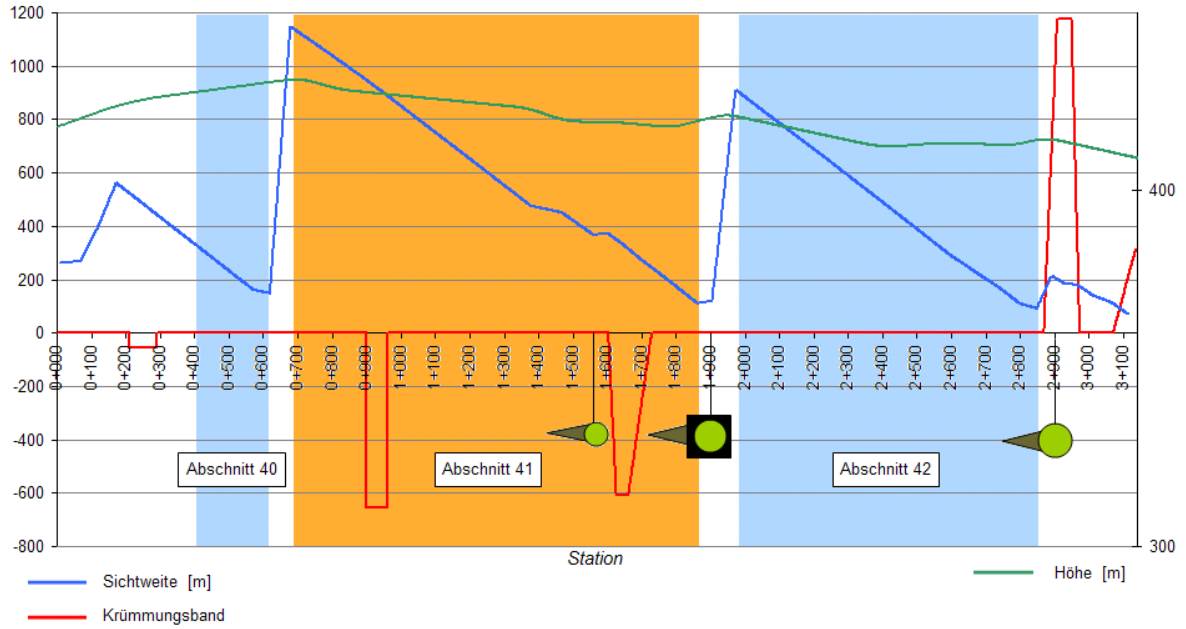
Teilstrecke 7 - S184 - rück
Frauenstein - KP



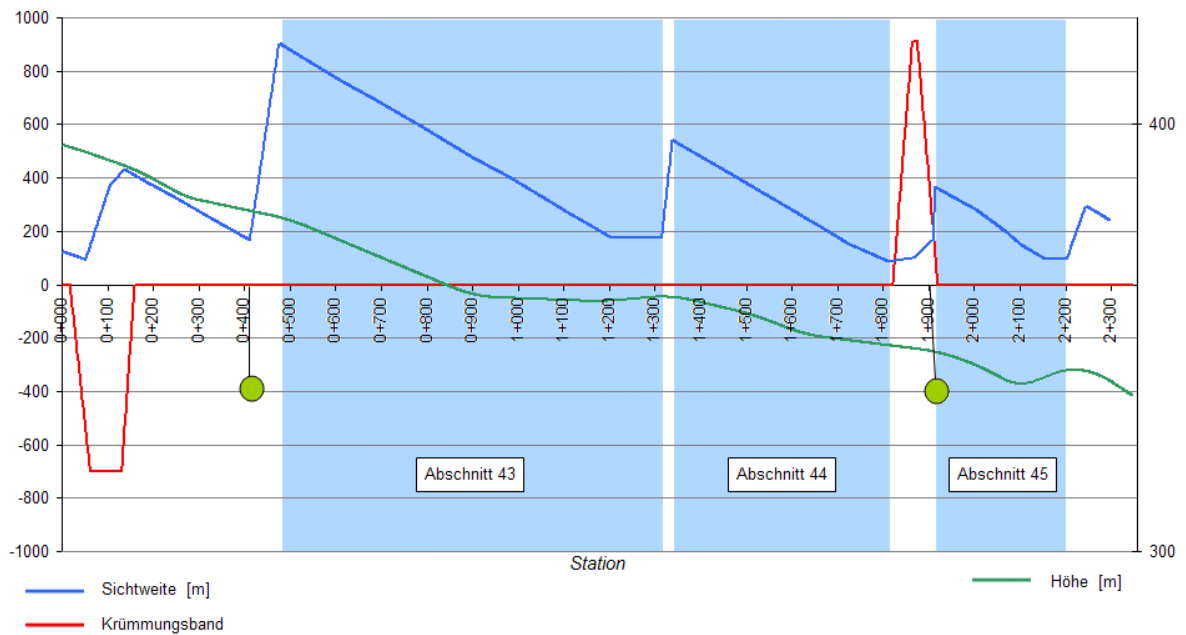
Teilstrecke 8 - K9013 und K7730 - rück
KP - Pretzschendorf



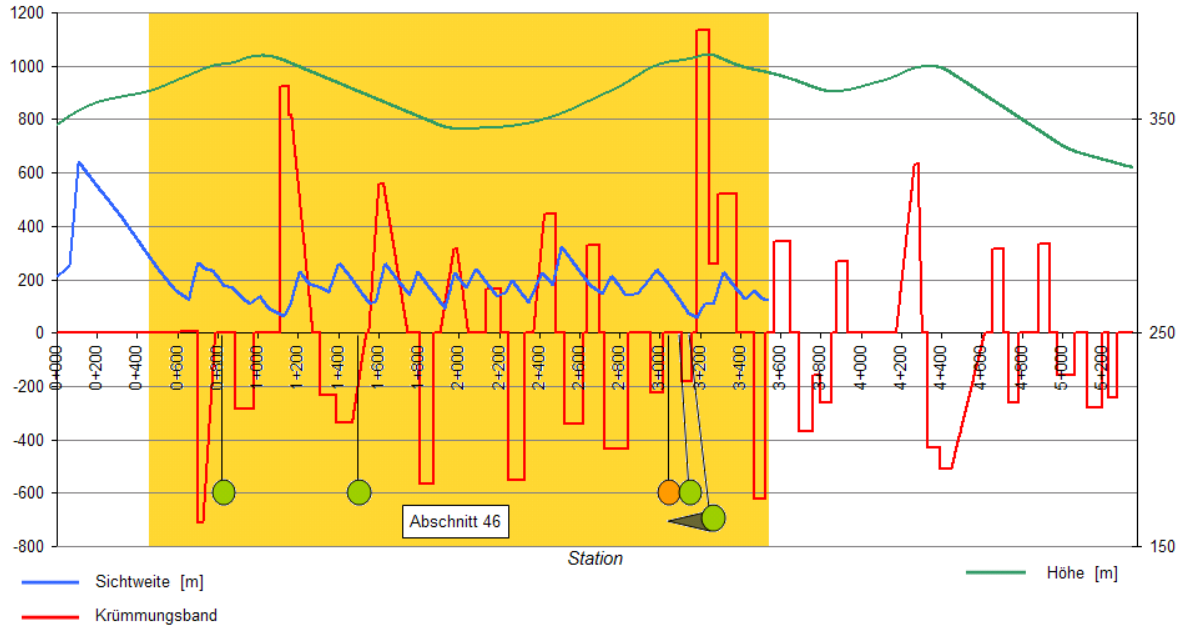
Teilstrecke 9 - S189 - rück
 Pretzschendorf - Klingenberg



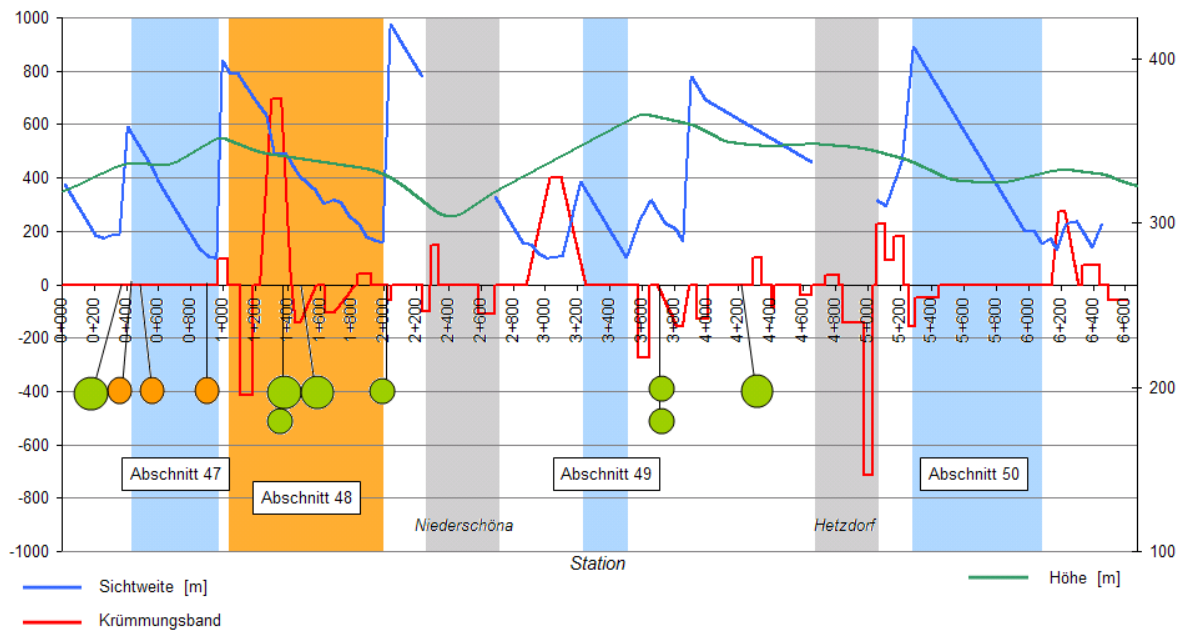
Teilstrecke 10 - S189 - rück
 Klingenberg - Grillenburg



Teilstrecke 11 - S194 - rück
Grillenburg - Naundorf



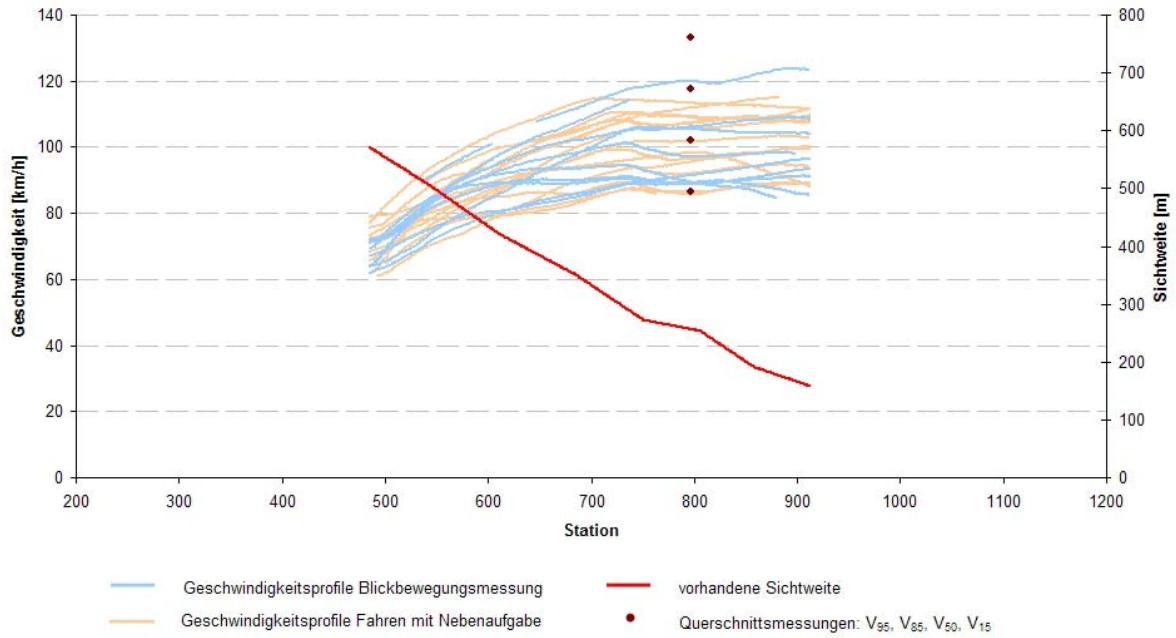
Teilstrecke 12 - B173 - rück
Naundorf - Mohom



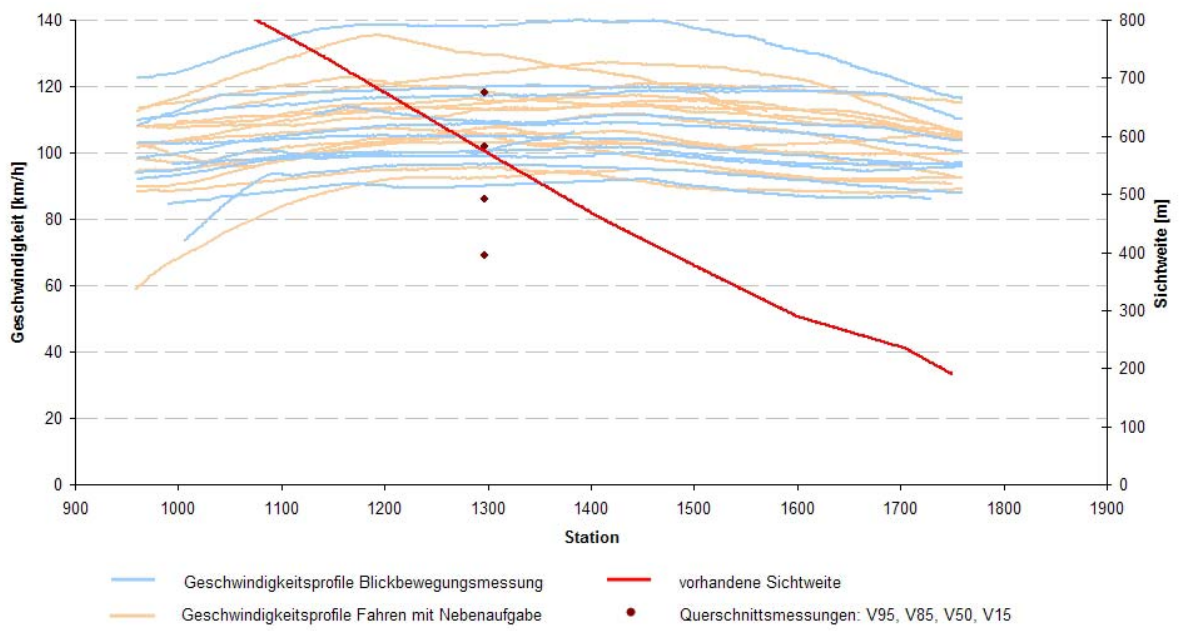
Anhang 2

- Geschwindigkeitsprofile und Querschnittsmessungen -

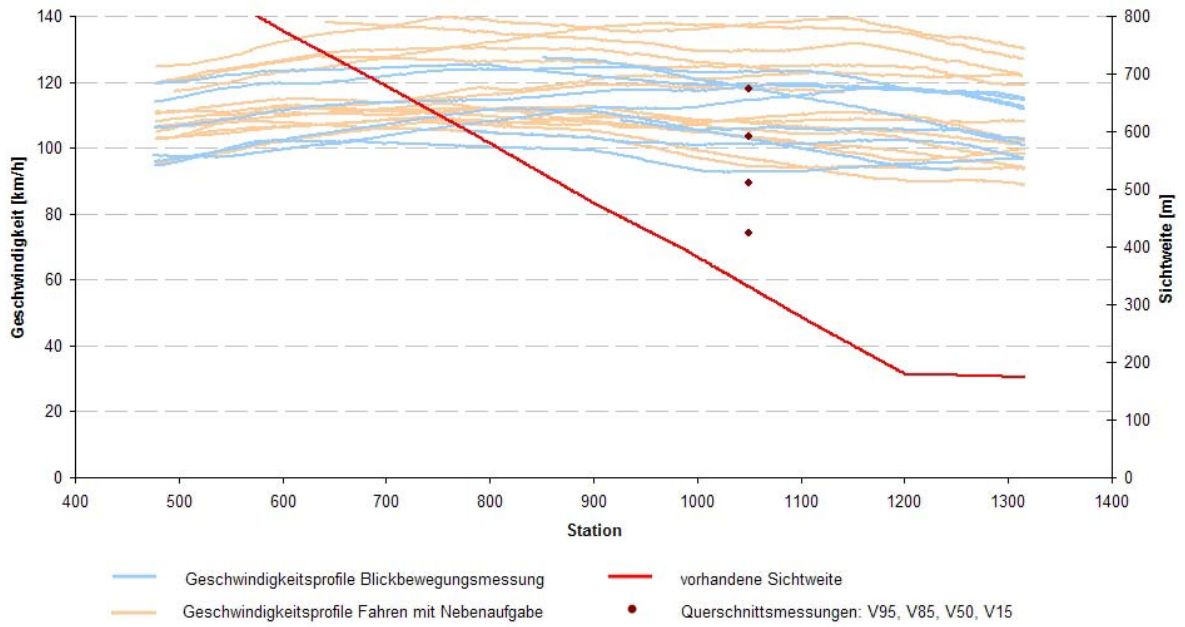
Geschwindigkeitsprofile Abschnitt 7



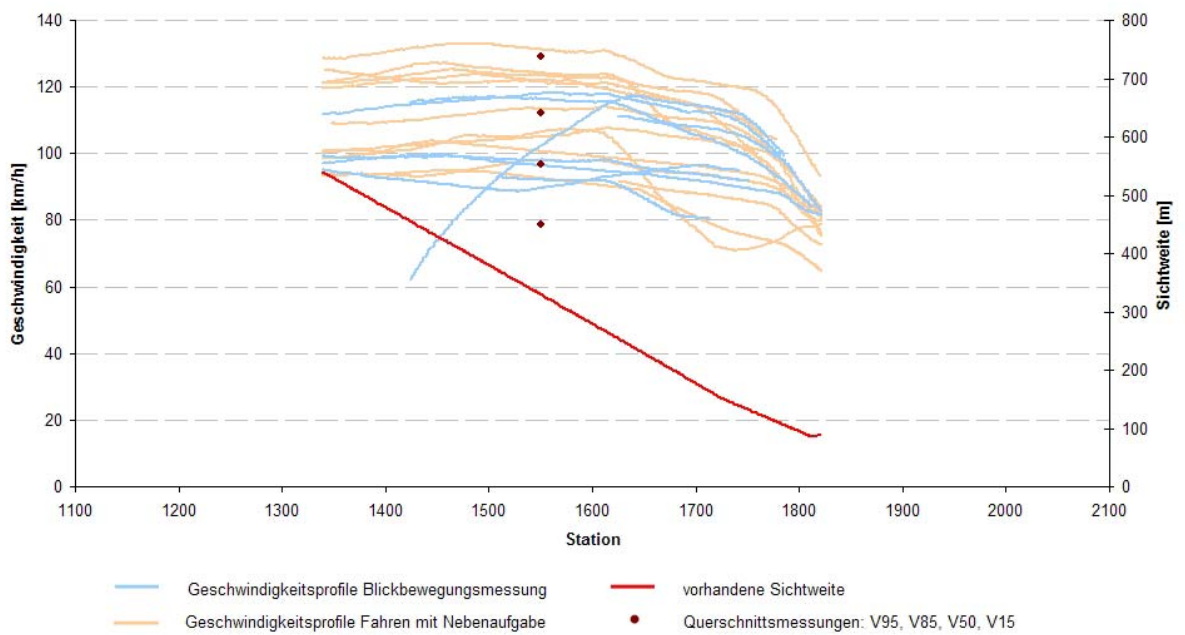
Geschwindigkeitsprofile Abschnitt 8



Geschwindigkeitsprofile Abschnitt 43



Geschwindigkeitsprofile Abschnitt 44



Anhang 3

- Exemplarische Videoanalyse -

Exemplarische Videoanalyse: Blickverhalten beim Durchfahren einer Kurve

Anfahrt auf die Kurve: Orientierung am Krümmungsbeginn der inneren Fahrstreifenmarkierung





Beginn des Übergangsbogens: Der Blick „ruht“ in konstanter Entfernung vor dem Fahrzeug auf der inneren Fahrstreifenbegrenzung







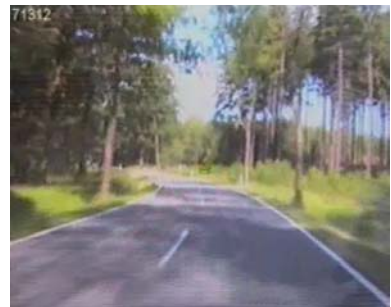
Mitte des einleitenden Übergangsbogens: Der Blick löst sich erstmals kurz von der Markierung und orientiert sich für einen Moment weiter voraus



Mitte des einleitenden Übergangsbogens: Der Blick kehrt zurück in den Nahbereich vor dem Fahrzeug, liegt jetzt auf der inneren Fahrbahnmarkierung (linker Fahrbahnrand)



nach 2/3 des Übergangsbogens: Wieder ein kurzer Blick voraus, Wahrnehmen eines vorausliegenden Parkplatzes



Rückkehr des Blickes zur Fahrbahn, etwas weiter nach vorn und zur Fahrbahnmitte orientiert als zuvor



Ende des Übergangsbogens fast erreicht: Rückkehr des Blickes zur inneren Fahrbahnbegrenzung





Volle Krümmung erreicht, das Ende der Kurve rückt ins Blickfeld: Der Blick orientiert sich wieder weiter voraus in die Mitte der Fahrbahn



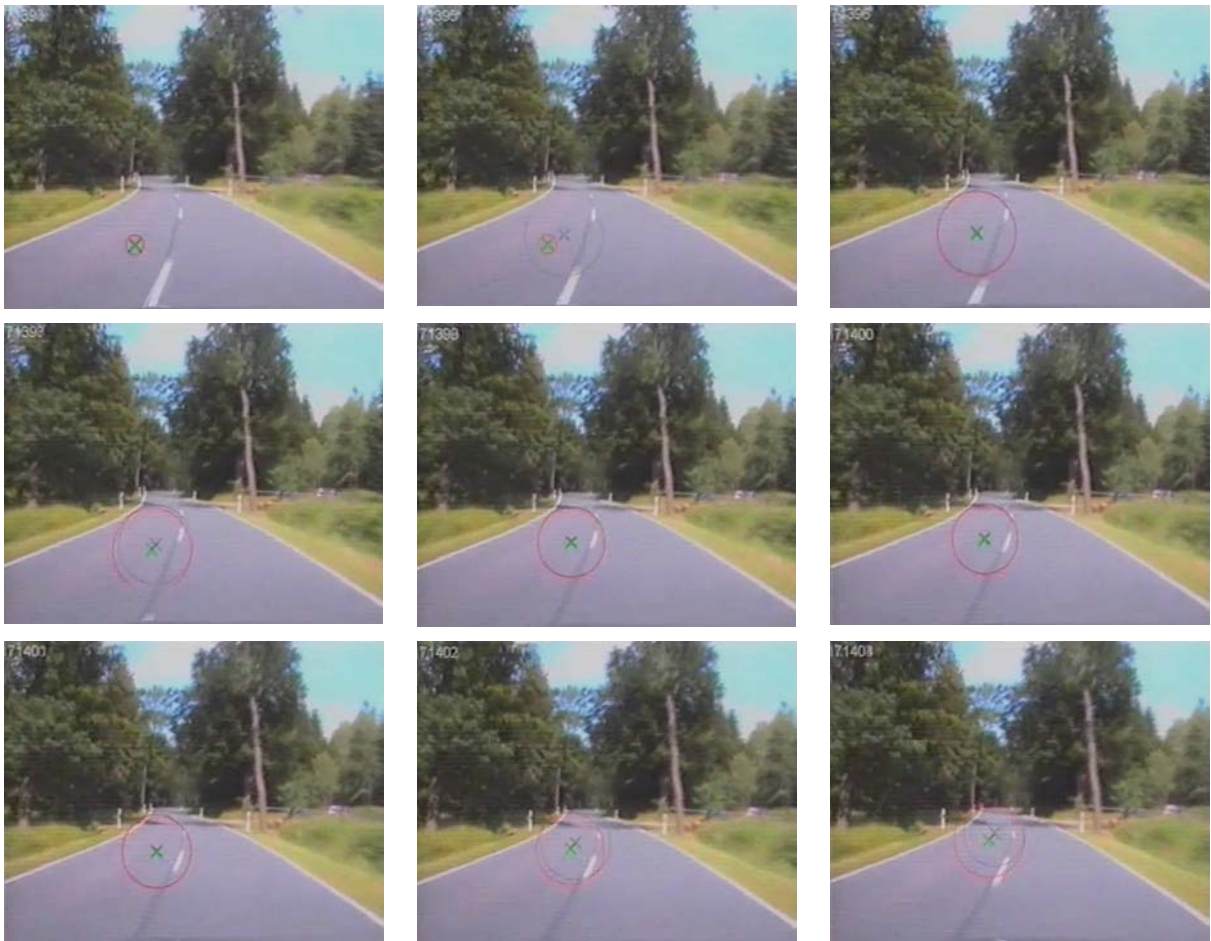


Kurvenmitte: Blickorientierung wieder näher vor dem Fahrzeug zur inneren Fahrbahnbegrenzung, der Blick folgt anschließend dem linken Fahrstreifen in konstanter Entfernung vor dem eigenen Fahrzeug





Kurvenausgang: Der Blick bleibt noch nah vor dem Fahrzeug, verschiebt sich vom linken Fahrstreifen hin zur Mittelmarkierung



Kurvenende: Der Blick springt weiter voraus, orientiert sich bereits zur nächsten Kurve

