

Anpassung der Lichtverteilung des Abblendlichtes an den vertikalen Straßenverlauf

zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)
der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Paderborn

genehmigte
DISSERTATION

von
Dipl.-Wirtsch.Ing. Patrick Kuhl
aus Frankfurt am Main

Tag des Kolloquiums: 8. September 2006
Referent: Prof. Dr. Jörg Wallaschek
Korreferent: Prof. Dr. Burkard Wördenweber

Geleitwort

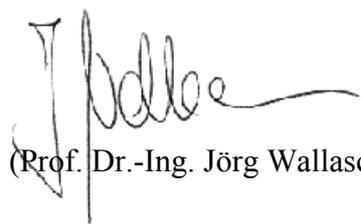
Mit Hilfe von Kurvenlicht wird eine Anpassung der Kraftfahrzeug-Lichtverteilung an den horizontalen Straßenverlauf vorgenommen und die automatische Leuchtweitenregulierung kompensiert die aus vertikalen Störbewegungen des Fahrzeuges resultierenden Verschiebungen der Hell-Dunkel-Grenze. Eine Anpassung der Lichtverteilung an den vertikalen Straßenverlauf (Kuppen und Wannen) ist jedoch mit heutigen Systemen nicht möglich.

Herr Kuhl hat im Rahmen seiner Dissertation ein aktives Scheinwerfersystem entwickelt, mit dem eine Anpassung der Lichtverteilung an den vertikalen Straßenverlauf erfolgt. Dazu hat er zunächst die Anforderungen ermittelt, die an ein solches System zu stellen sind, wobei sich zeigte, dass zu einigen Fragen (wie z.B. der optimalen Dynamik der Schwenkbewegung) noch keine Erkenntnisse vorliegen. Diese fehlenden Randbedingungen hat Herr Kuhl im Rahmen zielgerichteter Untersuchungen, u.a. mit Hilfe einer maßstäblich verkleinerten Modell-Fahrbahn, wissenschaftlich untersucht und so aufbereitet, dass sie als Basis für die Systementwicklung formuliert werden konnten.

Neben lichttechnischen Fragestellungen hat Herr Kuhl auch die Sensorik, die für ein solches Scheinwerfersystem benötigt wird, untersucht und einen voll funktionsfähigen Prototypen aufgebaut, der bereits in Fahrversuchen untersucht werden konnte.

Die Arbeit von Herrn Kuhl zeichnet sich durch eine gelungene Balance zwischen lichttechnischer Grundlagenforschung und anwendungsspezifischer Weiterentwicklung aus. Insbesondere zeigt sie, dass sich mit vergleichsweise sehr geringem Aufwand deutliche Verbesserungen der Wahrnehmungsbedingungen für den Fahrer bei gleichbleibender Blendung des Gegenverkehrs, bzw. eine deutlich reduzierte Blendung des Gegenverkehrs bei gleichbleibenden Wahrnehmungsbedingungen des Fahrers erzielen lassen. Aus diesem Grund bin ich sehr zuversichtlich, dass die von Herrn Kuhl erzielten Ergebnisse sehr schnell Eingang in den Stand der Technik finden werden.

Paderborn, im Oktober 2006



(Prof. Dr.-Ing. Jörg Wallaschek)

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand in der Entwicklungsabteilung für Lichttechnik der BMW AG in München.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Wallaschek für seine Bereitschaft, die Arbeit zu betreuen, für seine wissenschaftlichen Anregungen und Ideen sowie für das mir entgegengebrachte Vertrauen. Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei Prof. Dr. Wördenweber für die Übernahme des Korreferats, für seine fachlichen Ratschläge und für die kritische Durchsicht der Arbeit.

Dem Initiator dieser Arbeit, Herrn Dr. Enders danke ich herzlich für die uneingeschränkte Unterstützung insbesondere bei der Ideengenerierung und dafür, dass er mir immer den Rücken frei gehalten hat. Mein Dank gilt zudem Herrn Dr. Aulbach für zahlreiche Fachgespräche sowie für seine Hilfe und Erfahrung bei der Durchführung der Blendungs- und Wahrnehmungsversuche. Beide ermöglichten mir die Nutzung der notwendigen Ressourcen, insbesondere eines Versuchsfahrzeugs, mit dessen Hilfe die neue Lichtfunktion entwickelt werden konnte. Für die freundliche Aufnahme und die kooperative Mithilfe bedanke ich mich bei allen Mitarbeitern des Fachgebiets Lichttechnik der BMW AG. Besonders hervorheben möchte ich hierbei die Studenten Dirk Günzel und Thomas Antpöhler, die mit ihren Diplomarbeiten wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Bei den Mitarbeitern des L-LAB's in Paderborn bedanke ich mich für zahlreiche fachliche Diskussionen, für die fürsorgliche Hilfe in einer äußerst freundlichen Atmosphäre und insbesondere dafür, dass sie mir das Eye-Tracking-System unbürokratisch zur Verfügung stellten.

Meiner Mutter möchte ich für ihre immerwährende Hilfe bei alltäglichen aber wichtigen Dingen und meinem Vater für die kritische Durchsicht der Arbeit und für seine wissenschaftlichen Ratschläge danken. Beide unterstützten mich während der Doktorandenzeit auf ihre liebevolle Art und Weise und haben mich immer auf meinem Weg ermuntert. Ihr Haus stand jederzeit offen und ermöglichte es mir, zwischendurch den regenerativen Abstand zur Arbeit zu gewinnen.

Allen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben:

Herzlichen Dank!

A handwritten signature in black ink, reading "Patrick Kuhl". The signature is written in a cursive, flowing style.

Patrick Kuhl

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Scheinwerfertechnik und Sensorsysteme im Fahrzeug.....	1
1.2	Ziel und Aufbau der Arbeit.....	1
2	Visuelle Wahrnehmung im Straßenverkehr	3
2.1	Menschliches Auge und Wahrnehmung	3
2.1.1	Schwellenkontrast	4
2.1.2	Aufbau des Auges	5
2.1.3	Wahrnehmung	7
2.1.4	Blickverhalten	7
2.1.5	Blendung	9
2.1.6	Folgen der nächtlichen Sichteinschränkung.....	14
2.2	Stand der Kraftfahrzeug-Lichttechnik	17
2.2.1	Abblendlichtverteilung.....	17
2.2.2	Xenon-Scheinwerfer.....	19
2.2.3	Automatische und dynamische Leuchtweitenregulierung	20
2.2.4	Adaptives Kurvenlicht.....	22
2.3	Vertikale Straßengeometrie.....	25
2.3.1	Eigenschaften	25
2.3.2	Einfluss auf die Wirkung des Abblendlichtes	30
2.4	Verbesserungspotential durch vertikale Anpassung der Lichtverteilung	36
3	Sensorsystem zur Ermittlung der vertikalen Straßenkrümmung	41
3.1	Auswertung der Fahrzeugdynamik	41
3.1.1	Nickbewegungen der Fahrzeugkarosserie.....	42
3.1.2	Gier- und Wankbewegung bei Kurvenfahrt.....	46
3.1.3	Geometriemodell zur Bestimmung der vertikalen Straßenkrümmung	48
3.1.4	Plausibilitätsprüfung.....	50
3.2	Erfassung der Fahrzeugumgebung.....	51
3.2.1	Ultraschallsensoren	51
3.2.2	Radar- und Lidarsensoren	51

3.2.3	Kamerasensor	53
3.2.4	Geometriemodell zur Bestimmung der vertikalen Straßenkrümmung	55
3.3	Gespeicherte Daten	57
3.3.1	Ortsbestimmung	57
3.3.2	Digitale Karten	57
3.3.3	Geometriemodell zur Bestimmung der vertikalen Fahrbahnkrümmung.....	58
4	Anpassung der Lichtverteilung an die vertikale Straßenform.....	61
4.1	Forderungen der Verkehrsteilnehmer an eine Fahrzeuglichtverteilung.....	61
4.1.1	Forderungen des Fahrers	62
4.1.2	Forderungen der anderen Verkehrsteilnehmer	64
4.2	Geometrische Betrachtung	67
4.3	Entwicklung der Verstellstrategie zur adaptiven Leuchtweitenregulierung	70
5	Wirkung der adaptiven Leuchtweitenregulierung.....	81
5.1	Geometrische Berechnungen und Simulation	81
5.2	Untersuchungen an der Modellstraße	89
5.2.1	Erkennbarkeit von Objekten.....	90
5.2.2	Blendung des Gegenverkehrs.....	95
5.3	Nachtfahrten im realen Straßenverkehr	102
5.3.1	Erkennbarkeitsentfernung von Objekten.....	103
5.3.2	Blickverhalten des Fahrers	110
5.3.3	Subjektive Bewertung der Leuchtweitenregulierung	119
5.4	Schlussfolgerungen	126
6	Zusammenfassung und Ausblick	129
6.1	Zusammenfassung.....	129
6.2	Ausblick	130
7	Literaturverzeichnis	133
8	Anhang.....	143
8.1	Verteilung von Kuppen- und Wannennadien	143
8.1.1	Route zur Aufzeichnung der Kuppen- und Wannennadien	143

8.1.2	Ausgewählte Verteilungen von Kuppen- und Wannensradien.....	144
8.2	Einfluss der vertikalen Straßenkrümmung auf die Wirkung der Lichtverteilung..	147
8.2.1	Vertikale Straßenkrümmung und Leuchtweite	149
8.2.2	Abstand der Hell-Dunkel-Grenze zur Fahrbahnoberfläche	151
8.3	Fahrwerkmodell und Kalmanfilter.....	152
8.3.1	Einspurmodell des Fahrwerks	152
8.3.2	Erweiterung des Einspurmodells.....	153
8.3.3	Kalmanfilter	157
8.3.4	Integration des Fahrwerkmodells in den Kalmanfilter.....	159
8.4	Simulation der Blendbeleuchtungsstärken und Leuchtdichten	162
8.4.1	Simulationsmodell.....	163
8.4.2	Berechnung der Winkelkoordinaten.....	165
8.4.3	Berechnung der Beleuchtungsstärken am Fahrerauge	168
8.4.4	Berechnung der reflektierten Leuchtdichten	170
8.4.5	Validierung.....	173
8.4.6	Simulierte Beleuchtungsstärken und Leuchtdichten	183
8.5	Messung des Blickverhaltens mit dem Eye-Tracking-System.....	191
8.6	Ausschnitt aus dem Fragenkatalog	197

Liste der Formelzeichen

a_x	Längsbeschleunigung [m/s ²]
a_y	Querbearleunigung [m/s ²]
A_k	Zustandsübergangsmatrix
α	Brems- / Beschleunigungskraftverteilung [1]
$\alpha_{v/h}$	vertikaler / horizontaler Beobachtungswinkel [°]
B	Bremsmittelpunkt
B	Einflussmatrix
β	Anleuchtungswinkel [°]
$\beta_{k/w}$	vertikaler Scheinwerferschwenkwinkel auf Kuppen / in Wannan [°]
$\beta_0, \tan \beta_0$	Grundeinstellung der Scheinwerfer [°], [%]
$\beta_{Bk/Bw}$	vertikaler Basisschwenkwinkel auf Kuppen / in Wannan [°]
$\beta_{Kk/Kw}$	vertikaler Kurvenschwenkwinkel auf Kuppen / in Wannan [°]
$c_{v/h}$	Federkonstante der Vorder-/Hinterachse [N/m]
c_R	Federkonstante der Reifen [N/m]
C_1, C_2	Reflexionskoeffizienten [cd/m ² lx]
C_k	Messmatrix
d, d_x	Entfernung [m]
d_y	seitliche Entfernung [m]
$d_{v/h}$	Dämpfungs-konstante der Vorder- / Hinterachse [Ns/m]
d_A	seitlicher Abstand des Fahrerauges zur Fahrzeugmitte [m]
d_E	Erkennbarkeitsentfernung [m]
d_{HDG}	geometrische Leuchtweite [m]
d_R	Dämpfungs-konstante der Reifen [Ns/m]

d_{SW}	seitlicher Abstand der Scheinwerfer zueinander [m]
δ	Lenkwinkel [°]
E	Beleuchtungsstärke [lx]
E_A	(Blend-) Beleuchtungsstärke am Fahrerauge [lx]
$\varepsilon_{Bv/Bh}$	Winkel der resultierenden Kraft vorne / hinten [°]
$\varepsilon_{Gv/Gh}$	Stützwinkel der Längslenker vorne / hinten [°]
F_B	Brems- / Beschleunigungskraft [N]
$F_{Bv/Bh}$	resultierende Kraft an den vorderen / hinteren Radaufstandspunkten [N]
$F_{Bvx/Bhx}$	Bremskraft an den vorderen / hinteren Radaufstandspunkten [N]
$F_{Bvz/Bhz}$	Radlastverlagerung zwischen Vorder- und Hinterachse [N]
Φ_Y	Nickträgheitsmoment [Nms ² /°]
g	Erdbeschleunigung [m/s ²]
$G_{v/h}$	Gewichtskraft an der Vorder- / Hinterachse [N]
h_A	Höhe des Fahrerauges [m]
h_{HDG}	Höhe der Hell-Dunkel-Grenze über Fahrbahnoberfläche [m]
h_{SW}	Anbauhöhe der Scheinwerfer [m]
$h_{SWk/w}$	Höhe der Scheinwerfer auf Kuppen / in Wannern bzgl. Fahrbahnoberfläche [m]
i, j	Index [1]
I	Lichtstärke [cd]
I	Einheitsmatrix
φ	Wankwinkel der Fahrzeugkarosserie [°/s]
k, k'	Konstanten
k	Zeitindex [1]
K, K_S	Kontrast [1], Schwellenkontrast [1]
$K_{v/h}$	vertikale / horizontale Krümmung der Straße [1/m]
K_{v0}, K_{vl}	Basiskrümmung [1/m], Krümmungsänderung [1/m ²] einer Klothoide

l	Radstand [m]
$l_{v/h}$	Abstand der Vorder- / Hinterachse zum Fahrzeugschwerpunkt [m]
l_B	Abstand der Vorderachse zum Bremsmittelpunkt [m]
$l_{Gv/Gh}$	Länge der Längslenker an Vorder- / Hinterachse [m]
L	Leuchtdichte [cd/m^2]
$\Delta L, \Delta L_S$	Leuchtdichteunterschied [cd/m^2], Schwellenleuchtdichteunterschied [cd/m^2]
L_{Bl}	Leuchtdichte der Blendquelle [cd/m^2]
L_O	Objektleuchtdichte [cd/m^2]
L_{St}	Schleierleuchtdichte [cd/m^2]
L_U	Umgebungsleuchtdichte [cd/m^2]
$m_{Fzg.}$	Fahrzeugmasse [Ns^2/m]
P_k	Schätzfehlervarianz
P'_k	geschätzte Schätzfehlervarianz
Q_k/R_k	Kovarianzmatrix für den Messfehler / Systemfehler
R_R	Leuchtdichtekoeffizient für die Rückreflexion [$\text{cd}/\text{m}^2\text{lx}$]
θ	Blendwinkel: Winkel zwischen der Blickrichtung und der Blendquelle [$^\circ$]
$\ddot{\theta}$	Winkelbeschleunigung um die Nickachse [$^\circ/\text{s}^2$]
θ_{Fw}	Nickwinkel der Fahrzeugkarosserie bezogen auf Fahrbahnoberfläche [$^\circ$]
$\dot{\theta}_{Fw}$	Nickrate der Fahrzeugkarosserie bezogen auf Fahrbahnoberfläche [$^\circ/\text{s}$]
θ_{Sens}	Nickwinkel der Fahrzeugkarosserie bezüglich Horizont [$^\circ$]
$\dot{\theta}_{Sens}$	Nickrate der Fahrzeugkarosserie bezüglich Horizont [$^\circ/\text{s}$]
θ_{Str}	Steigungswinkel der Straße bezüglich Horizont [$^\circ$]
$\dot{\theta}_{Str}$	Steigungsänderung beim Fahren durch eine vertikale Kurve [$^\circ/\text{s}$]
$R_{v/h}$	vertikaler / horizontaler Radius der Straße [m]
R_{Rad}	Reifenhalbmesser [m]
s_x	Strecke in Fahrtrichtung [m]

s_z	vertikale Strecke [m]
S	Fahrzeugschwerpunkt
$S_{v/h}$	Störkraft an der Vorder- / Hinterachse [N]
$t, \Delta t$	Zeit [s], Zeitdifferenz [s]
t_B	Blendzeit [s]
t_E	Erkennbarkeitszeit [s]
t_R	Verlustzeit, Readaptationszeit [s]
τ	horizontaler Scheinwerferschwenkwinkel [°]
τ_B	horizontaler Basisschwenkwinkel [°]
τ_K	horizontaler Kurvenschwenkwinkel [°]
u_k	Vektor der Einflussgrößen
\ddot{u}_{SW}	Überhang der Scheinwerfer zur Vorderachse [m]
v_k / w_k	Vektor für den Messfehler / die Systemungenauigkeiten
v_x	Fahrzeuggeschwindigkeit [m/s]
v_E	Entwurfsgeschwindigkeit einer Straße [km/h]
w	Maß der subjektiven Bewertung [1]
ω	Sehwinkel: Winkel unter dem ein Objekt gesehen wird [°]
Ω_0	Einheitsraumwinkel [sr]
x	Strecke in Fahrtrichtung [m]
\dot{x}	Fahrzeuggeschwindigkeit [m/s]
\ddot{x}	Längsbeschleunigung [m/s ²]
x_k	Zustandsvektor
\hat{x}_k	geschätzter Zustandsvektor
\hat{x}'_k	geschätzter und korrigierter Zustandsvektor
\ddot{y}	Querbeschleunigung [m/s ²]
$\dot{\psi}$	Gierrate des Fahrzeugs [°/s]

z	vertikale Strecke [m]
$z_{v/h}$	Höhenstand der Karosserie an der Vorder- / Hinterachse [m]
$z_{Gv/Gh}$	Höhe der Längslenker an der Vorder- / Hinterachse [m]
$z_{Rv/Rh}$	Höhe der Vorder- / Hinterachse über Fahrbahnoberfläche [m]
z_S	Höhe des Schwerpunkts / Bremsmittelpunkts über Fahrbahnoberfläche [m]

1 Einleitung

1.1 Scheinwerfertechnik und Sensorsysteme im Fahrzeug

Die Fahrzeugbeleuchtung hat sich in den letzten Jahren zu einem komplexen mechatronischen System entwickelt. So ermöglichen bewegliche, im Scheinwerfer integrierte Blenden ein Umschalten zwischen Abblend- und Fernlicht mit nur einer Lichtquelle im Scheinwerfermodul. Als Lichtquellen werden in zunehmendem Maße Gasentladungslampen verwendet, für die der Gesetzgeber eine automatische Leuchtweitenregulierung fordert. Diese sorgt dafür, dass die Scheinwerferneigung unabhängig vom statischen Nickwinkel der Fahrzeugkarosserie innerhalb der gesetzlich definierten Grenzen bleibt. Seit der Erweiterung der automatischen Leuchtweitenregulierung zu einem dynamischen System, welches auch kurzfristige Nickbewegungen ausgleicht, und der Markteinführung adaptiver Kurvenlichtsysteme werden im Fahrzeug Scheinwerfer eingebaut, die sich vertikal und horizontal schwenken lassen. Diese vollbeweglichen Scheinwerfer bilden die technische Grundlage für die Entwicklung weiterer Scheinwerferfunktionen, welche eine verbesserte Fahrbahnausleuchtung bieten.

Zur Realisierung dieser adaptiven Scheinwerferfunktionen werden Informationen aus dem Fahrzeugumfeld benötigt, welche die jeweilige Verkehrssituation beschreiben. Da einzelne Sensoren diese Daten nicht liefern können, wurden bei der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen, die ebenfalls auf Informationen aus dem Fahrzeugumfeld angewiesen sind, erstmals verschiedene Sensoren in einem Netzwerk (z.B. CAN-Bus) miteinander verbunden und ihre Daten fusioniert. Durch die Datenfusion gelingt es, detaillierte Informationen über Straßenverlauf, andere Verkehrsteilnehmer und weitere Objekte im Straßenraum zu erhalten.

Sensornetzwerke und vollbewegliche Scheinwerfermodule bieten die Möglichkeit, neue Scheinwerfersteuerungen zu realisieren, welche die Lichtverteilung noch besser an die aktuelle Verkehrssituation anpassen können.

1.2 Ziel und Aufbau der Arbeit

Basierend auf dem Ansatz, vorhandene Einzelkomponenten (z.B. Sensoren, Steuergeräte und Scheinwerfer) zu einem System mit einem erhöhten Kundennutzen zusammenzufügen, ist das Ziel der vorliegenden Arbeit die Entwicklung einer neuen Scheinwerferfunktion, welche die Abblendlichtverteilung an den vertikalen Straßenverlauf anpasst. Der Nutzen dieses Systems sind die verbesserten Wahrnehmungsbedingungen der Verkehrsteilnehmer auf hügeligen Straßen und damit eine erhöhte Sicherheit im nächtlichen Straßenverkehr. Zudem soll die optimierte Fahrbahnausleuchtung eine frühzeitige Ermüdung verhindern und für mehr Komfort bei Nachtfahrten sorgen. Letztendlich soll mit der neuen Scheinwerferfunktion eine Reduktion des nächtlichen Unfallsrisikos erreicht werden.

Dieses Unfallrisiko begründet sich zum Teil in der verringerten Sehleistung der Fahrzeugführer bei Nacht. Daher wird in Kapitel 2 ausgehend vom menschlichen Wahrnehmungsprozess im Straßenverkehr und dem Stand der Kfz-Lichttechnik der Einfluss vertikaler Fahrbahnkrümmungen auf die Wirkung der Abblendlichtverteilung erläutert und die Verbesserungsmöglichkeit in Form einer vertikal angepassten Lichtverteilung vorgestellt.

In Kapitel 3 werden verschiedene Sensorsysteme beschrieben und ihre Eignung zur Detektion der vertikalen Straßengeometrie diskutiert. Zur Wahl stehen nur solche Sensoren, die bereits heute oder in naher Zukunft in Fahrzeugen eingesetzt werden.

Kapitel 4 stellt die Entwicklung eines Algorithmus dar, der ausgehend von den Sensordaten den Sollwinkel zur Anpassung der Abblendlichtverteilung an vertikale Kurven berechnet. Dazu werden zunächst die Anforderungen der Verkehrsteilnehmer an eine angepasste Lichtverteilung dargestellt und diskutiert. Anschließend wird das Konzept der Zielentfernungen genutzt, um aus den Anforderungen mit Hilfe geometrischer Betrachtungen eine mathematische Funktion zu generieren, die aus den Krümmungsdaten den optimalen Sollwinkel zur Einstellung der Scheinwerferneigung berechnet.

In Kapitel 5 erfolgt die Beschreibung der Simulationen, Laborversuche und Testfahrten, mit denen die Wirkungsweise der angepassten Lichtverteilung und ihr Einfluss auf die Wahrnehmungsbedingungen der Verkehrsteilnehmer untersucht und die Akzeptanz der neuen Lichtfunktion geprüft werden.

Kapitel 6 bildet eine Zusammenfassung der vorliegenden Arbeit und zeigt die weiteren Schritte zur Einführung der entwickelten Lichtfunktion auf.

2 Visuelle Wahrnehmung im Straßenverkehr

Die primäre Aufgabe des Autofahrers ist es, sein Fahrzeug sicher und effizient zum geplanten Ziel zu bewegen. Diese Aufgabe gliedert sich in fünf Teilaufgaben, welche der Fahrer zum Teil simultan durchführen muss¹:

Die wichtigste der fünf Teilaufgaben ist die **Stabilisierung und Spurhaltung** des Fahrzeugs. Durch einen ständigen Vergleich der aktuellen Fahrzeugposition und dessen Bewegungen mit der geplanten Fahrweise werden Abweichungen erkannt und korrigiert. Diese Aufgabe bildet die Grundlage zur Durchführung der anderen Teilaufgaben.

Die **Fahrzeugführung** beinhaltet die Auswahl der Fahrspur und der Fahrzeuggeschwindigkeit sowie die Festlegung der Fahrweise.

Um seine Fahrweise an die jeweilige und neue Situation anzupassen, ist eine ständige **Überwachung** des Verkehrsraums vor dem Fahrzeug notwendig. Dabei findet noch keine zielgerichtete Suche nach Informationen statt.

Diese Suche gehört zu einer anderen Aufgabe, zur **Antizipation**. Mithilfe seiner durch Fahrpraxis gesammelten Erfahrungen sucht der Fahrer kommende Verkehrssituationen gezielt nach relevanten Informationen ab und schätzt sie anschließend ein.

Das Bestimmen der Fahrtroute zum geplanten Ziel erfolgt im Rahmen der **Navigation**. Hierfür muss sich der Fahrer im Verkehrsraum orientieren, Hinweisschilder beachten und die richtigen Abzweigungen finden.

Um die Fahraufgaben korrekt zu erfüllen, benötigt der Fahrer Informationen über sein Fahrzeug und über seine Umgebung. Diese Informationen nimmt er im Wesentlichen visuell auf².

2.1 Menschliches Auge und Wahrnehmung

Die aufgenommenen Informationen beschreiben den Verkehrsraum, der aus einer Vielzahl von Objekten besteht. Die wichtigsten Objekte für den Fahrer sind der Verlauf der Fahrspur, andere Verkehrsteilnehmer, Verkehrszeichen und Hindernisse auf der Fahrbahn.

Damit das Auge die Objekte visuell wahrnehmen kann, müssen nach Lachenmayr drei Bedingungen erfüllt sein³:

¹ COHEN 1987 [21], S. 62 f.

² ECKERT 1993 [36], S. 13, HELLA 2000 [57], S. 10 und DIEM 2002 [26], S. 11

Ein Objekt kann nur dann visuell wahrgenommen werden, wenn seine **Sichtbarkeit** gegeben ist. Dazu muss es sich im binokularen Gesichtsfeld des Betrachters befinden und darf nicht von anderen Gegenständen verdeckt sein.

Als weitere Voraussetzung zur Wahrnehmung eines Objektes muss sein Leuchtdichte- oder Farbkontrast größer sein als der physiologische Schwellenwert (siehe Abschnitt 2.1.1). Ist diese Voraussetzung erfüllt, wird der visuelle Reiz des Objektes als **überschwellig** bezeichnet.

Die überschwellige Darbietung eines Objektes im Gesichtsfeld führt nicht zwangsläufig zu dessen Wahrnehmung. Besitzen andere Objekte eine größere Überschwelligkeit und lösen diese daher stärkere Stimuli aus, dann kann die **Auffälligkeit** des Objektes so stark reduziert werden, dass dessen Wahrnehmung erschwert oder verhindert wird.

2.1.1 Schwellenkontrast

Die Größe der Überschwelligkeit von Objekten wird mit Kontrasten beschrieben. Bei Dämmerung und Dunkelheit verschwinden Farbkontraste in der menschlichen Wahrnehmung. Daher erfolgt die Erkennung der Objekte im nächtlichen Straßenverkehr primär über ihren Leuchtdichtekontrast.

Der Kontrast K ist das Verhältnis von Leuchtdichteunterschied ΔL eines Objektes zur Umgebungsleuchtdichte L_U ⁴. Der Leuchtdichteunterschied ΔL ist die Differenz zwischen Objektleuchtdichte L_O und Umgebungsleuchtdichte L_U :

$$K = \frac{\Delta L}{L_U} = \frac{L_O - L_U}{L_U} \quad (2.1)$$

Sowohl der Schwellenkontrast K_S als auch der Schwellenleuchtdichteunterschied ΔL_S beschreiben die Grenzwerte, bei denen der Mensch ein Objekt mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 % wahrnimmt. Wie zahlreiche Untersuchungen belegen, ist der Schwellenleuchtdichteunterschied ΔL_S abhängig vom Sehwinkel ω des Objekts und von der Umgebungsleuchtdichte L_U ⁵. Die prinzipielle Abhängigkeit des Schwellenkontrasts K_S von der Umgebungsleuchtdichte L_U zeigt Bild 2.1.

³ LACHENMAYR 1995 [74], S. 67 ff.

⁴ ECKERT 1993 [36], S. 52 f.

⁵ BLACKWELL 1946 [12], zitiert in ECKERT 1993 [36], S. 53 sowie SCHMIDT-CLAUSEN 1968 [105], S. 40 ff., GERDES 1979 [46], S. 23 ff. und ADRIAN 1995 [2], S. 15

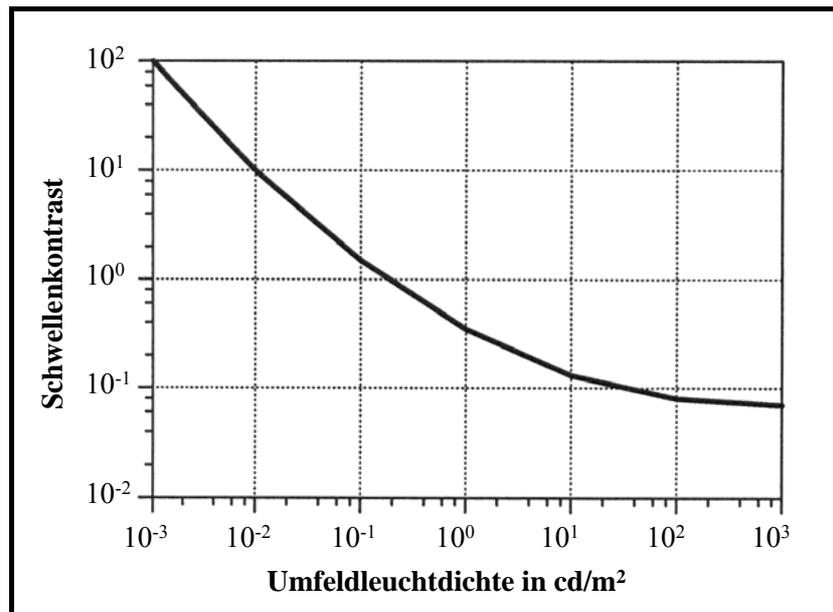


Bild 2.1: Qualitative Abhängigkeit des Schwellenkontrasts von der Umfeldleuchtdichte bei gegebener Darbietungszeit und Objektgröße⁶

2.1.2 Aufbau des Auges

Das menschliche Sinnesorgan zum Wahrnehmen visueller Reize ist das Auge. Im vorderen Bereich des nahezu kugelförmigen Auges befindet sich das optische System. Wie Bild 2.2 a zeigt, besteht es aus der Linse, der vorderen und hinteren Augenkammer sowie der Hornhaut⁷. Die Variation der Linsenkrümmung dient zum scharfen Sehen von Objekten in verschiedenen Entfernungen. Der verstellbare Pupillendurchmesser ermöglicht eine Anpassung an unterschiedliche Leuchtdichteniveaus sowie die Tiefenschärfe bei Fernakkommodation.

Das optische System wirft ein verkleinertes und umgekehrtes Bild des Gesichtsfelds auf die Netzhaut⁸. Dort befinden sich die für visuelle Reize empfindlichen Zapfen und Stäbchen (siehe Bild 2.2 b). Die Zapfen werden vor allem für hohe Leuchtdichten bei Tageslicht sowie für das Farbsehen verwendet, dem so genannten photopischen Sehen. Mit den Stäbchen ist zwar das Unterscheiden von Farben nicht möglich, dagegen kann der Mensch mit ihnen sehr kleine Leuchtdichten in der Dunkelheit wahrnehmen (skotopisches Sehen). Bei Dämmerung befindet sich das Auge im mesopischen Übergangsbereich zwischen photopischem und skotopischem Sehen mit eingeschränkter Farbwahrnehmung. Die Mitte der Netzhaut wird Fovea genannt. Die Dichte der Zapfen ist hier am höchsten und nimmt zum Rand der

⁶ BEAR 1996 [7], zitiert in EWERHART 2002 [40], S. 7

⁷ VON CAMPENHAUSEN 1981 [115], S. 99 ff.

⁸ SCHMIDT/THEWS/LANG 2000 [109], S. 284

Netzhaut hin ab, während die Dichte der Stäbchen im parafovealen Bereich zunächst ansteigt und anschließend bis zum Rand der Netzhaut hin abfällt.

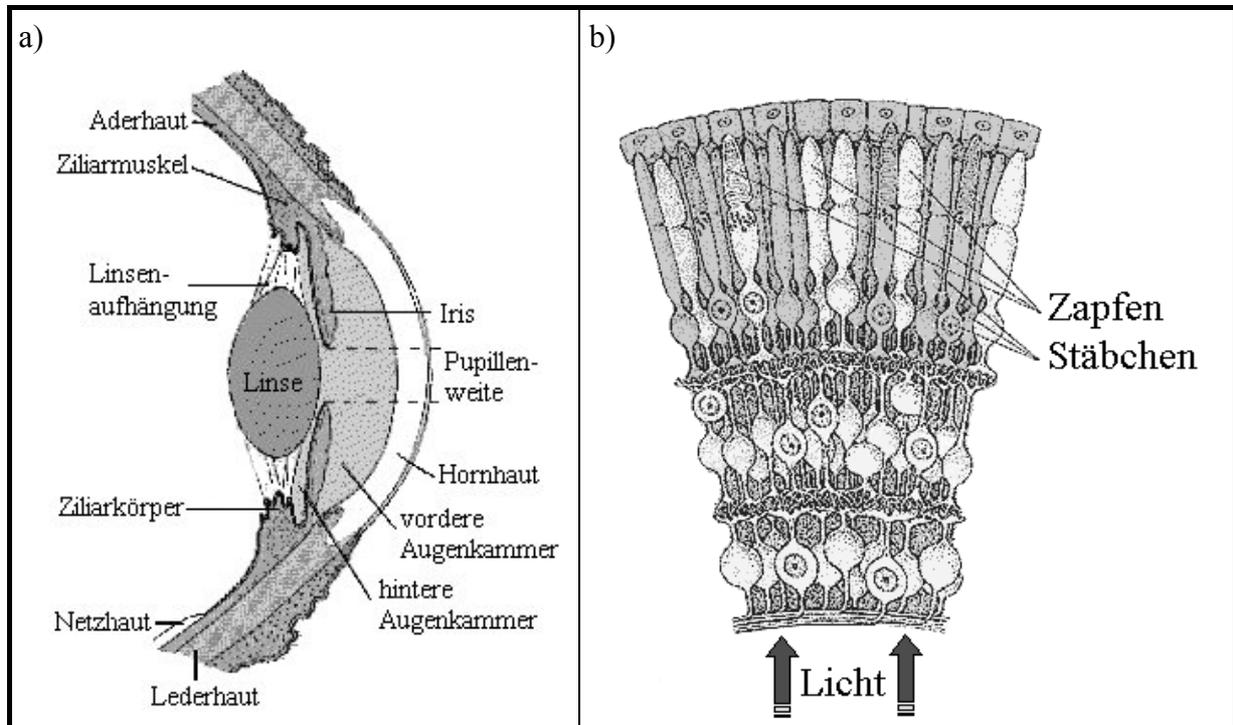


Bild 2.2: Querschnitt durch a) das optische System und b) die Netzhaut des Auges

Neben dem Umschalten zwischen den Zapfen- und Stäbchenempfängern sowie dem Verändern des Pupillendurchmessers ermöglichen zudem eine veränderbare Konzentration des Sehfärbstoffes⁹ und variable neuronale Vorgänge in der Netzhaut die Anpassung des Auges an unterschiedliche Leuchtdichteniveaus. Nach Baer¹⁰ ermöglichen diese Vorgänge das Erkennen von Objekten bei Umgebungsleuchtdichten zwischen 10^{-6} cd/m^2 und 10^5 cd/m^2 .

⁹ Der Sehfärbstoff Rhodopsin (Sehpurpur) besteht aus Retinol, dem Aldehyd des Vitamins A sowie weiteren Proteinen. Durch das Rhodopsin wird einfallendes Licht innerhalb der Photorezeptoren in elektrisches Potential an ihren Zellmembranen umgewandelt und führt damit zur Erregung der benachbarten Nervenzellen (EYSEL 1996 [41], S. 590 ff.).

¹⁰ BEAR 1996 [7], zitiert in EWERHART 2002 [40], S. 5

2.1.3 Wahrnehmung

Aufgrund der unterschiedlichen Verteilung von Zapfen und Stäbchen auf der Netzhaut besitzt der Mensch zwei verschiedene Wahrnehmungsarten, die Lachenmayr folgendermaßen beschreibt¹¹:

Bei der **fovealen Wahrnehmung** wird das Objekt vom Menschen fixiert und auf der Fovea abgebildet. Die hohe Dichte der Zapfen ermöglicht hier eine hohe Sehschärfe und damit eine gute räumliche Auflösung, die Wahrnehmung auch langsamer Bewegungen und einen geringen Schwellenkontrast. Jedoch führen die geringe Dichte der Stäbchen im fovealen Bereich und der Wechsel vom photopischen zum mesopischen oder skotopischen Sehen dazu, dass die Leistung des fovealen Sehens bei Dämmerung und Dunkelheit abnimmt.

Erfolgt die Abbildung eines Objektes auf der Netzhaut außerhalb der Fovea, wird die Aufnahme seines visuellen Reizes als **periphere Wahrnehmung** bezeichnet. In diesem Bereich überwiegen die Stäbchen als Empfänger für visuelle Stimuli. Sie ermöglichen eine gute zeitliche Auflösung und somit das Wahrnehmen schneller Bewegungen. Da die Rezeptorfelder im peripheren Bereich der Netzhaut größer sind als im fovealen Bereich, ergibt sich dort zudem eine wesentlich höhere Lichtempfindlichkeit.

2.1.4 Blickverhalten

In der Regel erscheinen neue Objekte im parafovealen Bereich des Gesichtsfeldes. Der Wahrnehmungsprozess beginnt daher mit der peripheren Wahrnehmung. Ein Objekt, dessen optische Abbildung einen großen Abstand zur Fovea besitzt, kann zwar detektiert werden, eine Bestimmung seiner Form und Farbe ist dort jedoch nicht möglich¹². Daher löst der Beobachter eine Blickzuwendung (Sakkade) zum neuen Objekt aus. Er fixiert das Objekt, da er nur während der Fixationsphase visuelle Informationen aufnehmen kann¹³. In einer Untersuchung zur Reaktionszeit von Kraftfahrern stellt Hartmann¹⁴ zudem fest, dass der Mensch auf ein Objekt in seinem Gesichtsfeld nur dann bewusst reagieren kann, wenn er es fixiert hat. Das bedeutet für den Fahrer eines Kraftfahrzeugs, dass er ständig den Blick auf die für ihn relevanten Bereiche im Verkehrsraum richten muss. Da ihm auch die periphere Wahrnehmung Informationen liefert (z.B. zur Stabilisierung des Fahrzeugs), kann der Fahrer mehrere der fünf Teilaufgaben des Fahrens gleichzeitig erfüllen.

¹¹ LACHENMAYR 1995 [74], S. 18

¹² FLECK 1986 [42] zitiert in GREULE 1993 [48], S. 74

¹³ SCHMIDT/THEWS/LANG 2000 [109], S. 279 f.

¹⁴ HARTMANN 1979 [55] zitiert in LACHENMAYR 1981[73], S. 10

Wie gut er die Informationsaufnahme mittels peripherer Wahrnehmung nutzen kann, hängt von der Komplexität der aktuellen Verkehrssituation, von der Fahrerfahrung, vom Zustand des Fahrers sowie von der Beleuchtung (Tag/Nacht) ab.

Die Fahrt bei guter Sicht am Tage auf einem geraden Autobahnteilstück stellt für den Fahrer eine einfache Aufgabe da. Die Stabilisierung des Fahrzeugs erfolgt überwiegend mit der peripheren Wahrnehmung, sodass er seinen Blick zur Überwachung und Antizipation in größere Entfernungen richten kann. Mehrere Untersuchungen belegen, dass bei erfahrenen Fahrzeugführern die Fixationsentfernungen etwa $100\text{ m} - 200\text{ m}$ betragen¹⁵.

Die Beanspruchung des Fahrers steigt in Kurven. Hier erfordert die Stabilisierung des Fahrzeugs eine ständige Anpassung an die Kurvenradien, welche sich aufgrund der gesetzlich vorgeschriebenen Klothoiden¹⁶ im Kurvenverlauf kontinuierlich ändern. Der höhere Aufwand zur Stabilisierung des Fahrzeugs bewirkt eine häufigere Fixierung des Nahbereichs vor dem Fahrzeug. Cohen stellt einen deutlichen Zusammenhang zwischen dem Blickverhalten beim Fahren in Kurven und der Fahrerfahrung fest¹⁷. Ein erfahrener Fahrzeuglenker richtet seinen Blick zielgerichtet in die Kurve und benötigt nur kurze Fixationszeiten zur Aufnahme der Informationen. Nach Land und Lee orientiert er sich dabei am Tangentenpunkt der Kurve¹⁸. Ein Fahranfänger hingegen richtet seinen Blick weniger in die Kurve hinein und benötigt mehr Zeit für die visuelle Informationsaufnahme, wie größere mittlere Fixationszeiten zeigen. Außerdem häufen sich bei ihm die Fixationen im Nahbereich vor dem Fahrzeug.

Neben der Straßenform hat auch die Fahrzeuggeschwindigkeit einen Einfluss auf das Wahrnehmungsverhalten des Fahrers¹⁹. Mit zunehmender Geschwindigkeit sinkt die durchschnittliche Anzahl der Fixationen pro Zeiteinheit. Gleichzeitig steigt die mittlere Fixationsdauer, sodass weniger Details im Straßenraum fixiert werden können. Daher muss der Fahrer seine Aufmerksamkeit auf wenige, relevante Objekte richten.

Gallery²⁰ untersuchte das Blickverhalten im nächtlichen Straßenverkehr und stellte fest, dass der Zustand des Fahrers einen Einfluss auf sein Blickverhalten besitzt. So verursacht Müdigkeit einen Übergang vom aktiven, vorausschauenden Blickverhalten zu einem passiven Blickverhalten, welches von visuellen Reizen geleitet wird. Häufige Blicke in den Nahbereich

¹⁵ MORTIMER/JORGESON 1974 [88], S. 82 ff. und DIEM/SCHMIDT-CLAUSEN et al. 1999 [27], S. 191

¹⁶ RAS 1995 [97], S. 15 ff.

¹⁷ COHEN 1987 [21], S. 142 ff.

¹⁸ LAND/LEE 1994 [77], S. 742 ff.

¹⁹ KAYSER/HEB 1990 [63], S. 102 f.

²⁰ GALLERY 1988 [45], S. 115 ff.

belegen, dass ein großer Teil der Aufmerksamkeit des Fahrers für die Stabilisierung des Fahrzeugs benötigt wird. Zudem deutet eine gestiegene mittlere Fixationsdauer auf eine langsame und ineffiziente Informationsaufnahme hin. Zusammengefasst entspricht das Blickverhalten eines müden Fahrers dem Verhalten eines Fahranfängers.

In ähnlicher Art und Weise wirkt sich die eingeschränkte Beleuchtung der Fahrbahn bei Nacht auf das menschliche Blickverhalten aus. Die vertikalen und horizontalen Blickwinkel konzentrieren sich auf den schmalen, beleuchteten Bereich vor dem Fahrzeug²¹. Die Folgen sind eine geringere mittlere Fixationsentfernung und eine höhere durchschnittliche Fixationsdauer. Beides führt zu einer niedrigeren visuellen Informationsaufnahme sowie zu Fehleinschätzungen der Verkehrssituation bei Dunkelheit.

Die genannten Nachteile können jedoch mit neuen Scheinwerfern vermindert werden, die dem Fahrer einen breiten und weit reichenden Lichtkegel bieten. Zu diesem Zweck verglichen Damasky und Hosemann in einer Untersuchung das Blickverhalten von Fahrern in Fahrzeugen mit Xenon- und Halogen-Scheinwerfern²². Die breite und weit reichende Lichtverteilung der Xenon-Scheinwerfer führte im Blickverhalten der Fahrer zu einer stärkeren lateralen Streuung der Fixationen und zu höheren mittleren Fixationsentfernungen.

Weitere Möglichkeiten, mit der Lichtverteilung das Blickverhalten der Fahrer positiv zu beeinflussen, bieten adaptive Scheinwerfer. So zeigen Untersuchungen zur Kurvenlichtfunktion von Fahrzeugscheinwerfern, dass durch das horizontale Schwenken der Scheinwerfer in Kurven die mittlere Fixationsentfernung deutlich ansteigt²³. Insgesamt nähert sich das Blickverhalten mit adaptiven Scheinwerfern dem Blickverhalten bei Tageslicht an. Größere Fixationsentfernungen ermöglichen das frühere Erkennen von Objekten im Straßenraum und erhöhen dadurch die Sicherheit beim nächtlichen Fahren.

Daraus definiert sich das Blickverhalten bei nächtlicher Fahrt als Merkmal zur Bewertung einer Scheinwerferlichtverteilung über seine Ähnlichkeit zum Blickverhalten bei Tageslicht²⁴.

2.1.5 Blendung

Eine Fahrbahnausleuchtung, die so breit und weit reichend ist, dass sie das Blickverhalten des Fahrers bei Nachtfahrten nicht einengt, wirkt sich zwar positiv auf die Wahrnehmungsbedin-

²¹ MORTIMER/JORGESON 1974 [88], S. 82 ff.

²² DAMASKY/HOSEMANN 1997 [24], S. 132 ff.

²³ DIEM/SCHMIDT-CLAUSEN et al. 1999 [27], S. 191 ff. und DIEM 2000 [26], S. 12

²⁴ MORTIMER/JORGESON 1974 [88], S. 87 f. und DIEM/SCHMIDT-CLAUSEN et al. 1999 [27], S. 205

gungen des Fahrers aus, verschlechtert aber durch Blendung die Wahrnehmungsbedingungen anderer Verkehrsteilnehmer.

Die Blendung wird entweder durch Fehladaptation des Auges aufgrund einer inhomogenen Leuchtdichtevertellung oder durch zu hohe Leuchtdichten im Gesichtsfeld hervorgerufen, die nicht durch Adaptation kompensiert werden können.

Zur Beschreibung der Blendung werden in der Literatur zwei Blendungsarten unterschieden:

- physiologische Blendung und
- psychologische Blendung.

Als **physiologische Blendung im statischen Fall** ist die objektiv messbare Beeinträchtigung der Sehleistung aufgrund der Streuung von Licht an Grenzflächen und Trübungen im optischen System des Auges definiert (siehe Bild 2.3). Mit zunehmendem Alter verstärken sich die Trübungen. Sie bewirken einen größeren Streulichtanteil und somit eine höhere Blendempfindlichkeit²⁵.

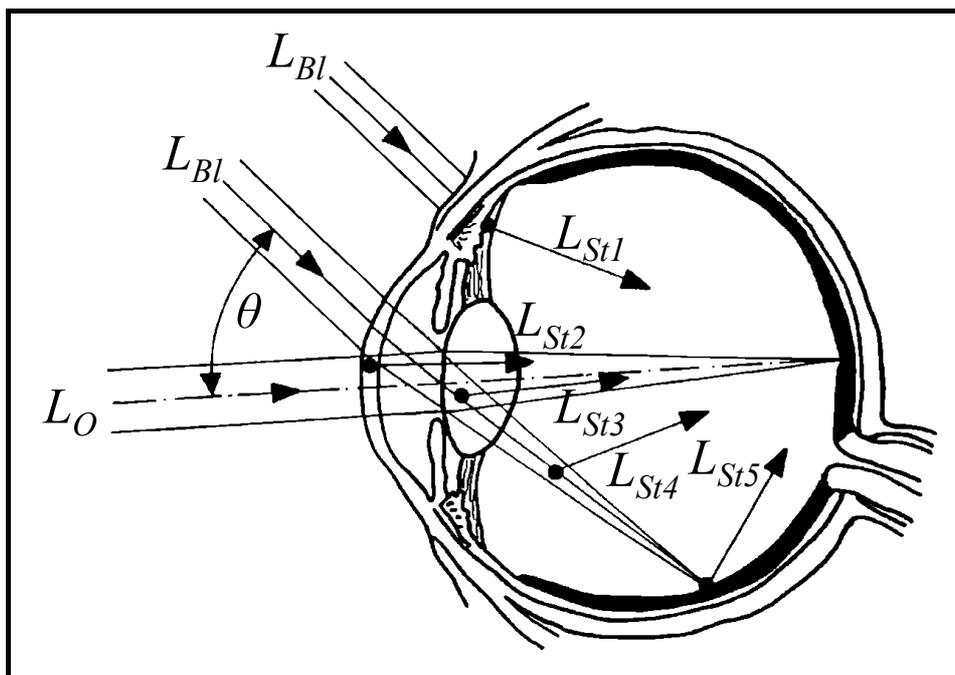


Bild 2.3: Schematische Darstellung der Entstehung von Streulicht $L_{St1-St5}$ durch eine Blendlichtquelle L_{Bl} bei Betrachtung eines Objekts L_O ²⁶

²⁵ ADRIAN 1999 [3], S. 2 f. und BOCKELMANN 1997 [14], S. 83

²⁶ DIEM 2000 [26], S. 15

Bereits 1926 untersuchte Holladay²⁷ die Abhängigkeit der Blendwirkung vom Winkel zwischen Blickachse und Blendquelle. Er bestätigte die Streulichttheorie mit seiner Formel zur Berechnung der Schleierleuchtdichte L_{St} :

$$L_{St} = k \cdot 10^4 \cdot \frac{L_{Bl} \cdot \varpi \cdot \cos \theta}{\theta^2} \quad (2.2)$$

Das unter dem Blendwinkel θ einfallende Licht L_{Bl} der Blendquelle erzeugt nicht nur ein Bild der Blendquelle auf der Netzhaut, sondern zusätzliches Streulicht, welches sich abhängig vom Blendwinkel als Schleierleuchtdichte L_{St} auch auf andere Bereiche der Netzhaut auswirkt. Die Leuchtdichte der Blendquelle L_{Bl} lässt sich über ihrem Sehwinkel ω und ihrem Einfallswinkel θ am Auge zur Augenbeleuchtungsstärke E_A zusammenfassen:

$$E_A = L_{Bl} \cdot \varpi \cdot \cos \theta \quad (2.3)$$

Daraus ergibt sich folgende Gleichung zur Bestimmung der Schleierleuchtdichte:

$$L_{St} = k' \cdot \frac{E_A}{\theta^2} \quad (2.4)$$

Ohne Blendung berechnet sich der Kontrast K eines Objektes nach Formel (2.1). Bei Blendung hingegen überlagert die Schleierleuchtdichte L_{St} sowohl die Abbildung L_O des Objektes auf der Netzhaut als auch die Umgebungsleuchtdichten L_U . Dies führt zu einem niedrigeren wahrnehmbaren Kontrast K' :

$$K' = \frac{(L_O + L_{St}) - (L_U + L_{St})}{L_U + L_{St}} = \frac{L_O - L_U}{L_U + L_{St}} = \frac{\Delta L}{L_U + L_{St}} \leq K = \frac{\Delta L}{L_U} \quad (2.5)$$

Befindet sich der Kontrast K eines Objektes ohne Blendung knapp oberhalb Wahrnehmungsschwelle K_S , kann die Schleierleuchtdichte L_{St} bei Blendung eine Verschiebung des wahrgenommenen Kontrastes unterhalb des Schwellenwertes K_S bewirken. Das Objekt wird dann nicht mehr wahrgenommen.

Weitere Untersuchungen zur physiologischen Blendung von Boynton²⁸ und Mitarbeitern sowie von Hartmann²⁹ bestätigen den von Holladay beschriebenen Wirkmechanismus der physiologischen Blendung über die Schleierleuchtdichte. Ihre Ergebnisse beziehen sich auf stationäre Blendsituationen, bei denen alle Adaptationsvorgänge im Auge abgeschlossen sind. Die Adaptationsvorgänge werden durch Leuchtdichtesprünge im Gesichtsfeld ausgelöst und bewirken bis zu ihrem Abschluss kurzfristige Sichtbarkeitsverluste.

²⁷ HOLLADAY 1926 [60], zitiert in HARTMANN 1961 [53], S. 7

²⁸ BOYNTON/ENOCH et al. 1954 [19], S. 879 ff.

²⁹ HARTMANN 1961 [53], S. 22, S. 27 und S. 39 f.

Die **physiologische Blendung im dynamischen Fall** wird deshalb durch den zeitlichen Verlauf der Anpassung des Auges während der transienten Adaptation bestimmt. Der komplette Vorgang der transienten Adaptation gliedert sich in vier Phasen³⁰:

1. Die Anpassung an einen Leuchtdichtesprung erfolgt im so genannten Vorzeiteffekt bereits wenige Millisekunden vor der Wahrnehmung des Lichtreizes aufgrund geringerer Latenzzeiten hochschwelliger Reize im Nervensystem.
2. Es folgt die α -Adaptation oder Sofortadaptation, die bis etwa 100 ms andauert.
3. Danach beginnt die β -Adaptation oder Zapfenadaptation, die nach etwa acht Minuten abgeschlossen ist.
4. Der Übergang zur γ -Adaptation im so genannten Kohlrausch-Knick erfolgt beim Wechsel von der Zapfenadaptation zur Stäbchenadaptation. Diese Phase und damit der gesamte Adaptationsvorgang sind nach etwa 45 Minuten abgeschlossen.

Bild 2.4 zeigt den Verlauf der Leuchtdichteunterschiedsschwelle ΔL_S und die vier Phasen der transienten Adaptation nach einem Leuchtdichtesprung von 100 cd/m^2 auf $0,000025\text{ cd/m}^2$.

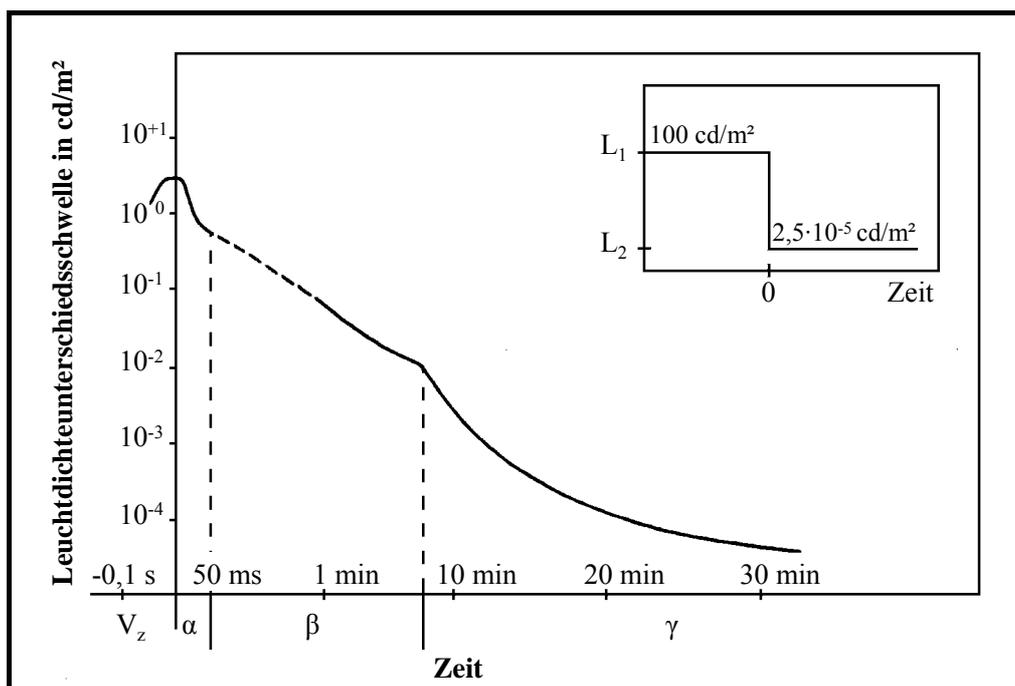


Bild 2.4: Zeitlicher Verlauf der transienten Adaptation bei einem negativen Leuchtdichtesprung³¹

³⁰ HARTMANN 1968 [54], zitiert in GREULE 1993 [48], S. 7

³¹ HARTMANN 1968 [54], zitiert in GREULE 1993 [48], S. 7

Weitere Ausführungen zur transienten Adaptation, insbesondere die Beschreibung der chemischen Prozesse in den Rezeptoren mit Hilfe von Modellen sowie die mathematischen Gleichungen zur Berechnung der Sehleistung während des Adaptationsprozesses finden sich in der angegebenen Literatur³².

Neben der physiologischen Blendung ist in der Literatur die **psychologische Blendung** als subjektiv empfundene Störung bekannt. Eine psychologische Blendung bewirkt zwar eine Einschränkung des Komforts, nicht jedoch der Sehleistung. Wird dagegen aufgrund von physiologischer Blendung die Sehleistung reduziert, liegt gleichzeitig auch eine psychologische Blendung vor³³.

Die Bestimmung von Schwellen, die den Übergang zur psychologischen Blendung beschreiben, basiert auf Aussagen eines Beobachterkollektivs. Diese können mit drei verschiedenen Methoden gewonnen werden³⁴:

1. Nutzt der Versuchsleiter die Konstanzmethode, zeigt er dem Probanden konstante Einzelreize in zufälliger Folge. Der Proband bestimmt dabei, ob die Empfindung des Reizes größer oder kleiner ist als ein vorgegebenes Kriterium.
2. Bei der Grenzmethode wird der Reiz kontinuierlich variiert, bis der Proband angibt, dass seine Empfindung des Reizes einem vorgegeben Kriterium entspricht.
3. Die Herstellmethode ist der Grenzmethode sehr ähnlich. Der Unterschied ist, dass anstelle des Versuchsleiters der Proband selbst den Reiz verändert.

Wie zahlreiche Untersuchungen zeigen³⁵, hat sich bei der Bewertung lichttechnischer Größen die Konstanzmethode durchgesetzt, jedoch nicht mit einer ordinal skalierten Bewertung, sondern mit einer kardinal skalierten Bewertung anhand einer neunstufigen Skala. Die symmetrische Skala zur Bewertung w der Blendung besitzt folgende Stufen:

$w=1$	2	3	4	5	6	7	8	9
unerträglich		störend		gerade zulässig		befriedigend		unmerklich

Tabelle 2.1: 9-stufige Skala zur Bewertung der psychologischen Blendung

³² HECHT 1921 [56], FRY 1973 [43], HARTMANN 1968 [54] und GREULE 1993 [48]

³³ HARTMANN 1961 [53], S. 2

³⁴ BENZ 1966 [9], S. 4 f.

³⁵ ARMBRUSTER 2001 [5], S. 44 f., AULBACH 1998 [6], S. 33, DE BOER/SCHMIDT-CLAUSEN 1971 [18], DAHLEM 2001 [22], S. 36 f., RIPPERGER 2001 [98], S. 80, KUHL 1998 [70], S. 21 f. u.v.a.

Benz führte mehrere Untersuchungen über die psychologische Blendung durch und stellte Abhängigkeiten der zulässigen Blendleuchtdichte vom Raumwinkel der Blendquelle, von der Umgebungsleuchtdichte L_U und von der Position der Blendquelle im Gesichtsfeld fest³⁶. Schmidt-Clausen und Bindels bestätigten die Ergebnisse und formulierten die Abhängigkeit der Blendungsbewertung w als folgende Gleichung³⁷:

$$w = 5 + 2 \cdot \lg \left(1 + \sqrt{\frac{L_U}{k_{pl}}} \right) - 2 \cdot \lg \sum_i \frac{E_A^{(i)}}{k_{p00}^{(i)} \cdot \theta_{(i)}^{0,46}} \quad (2.6)$$

Die Position mehrerer Blendquellen (mit Index i) im Gesichtsfeld wird dabei als Blendwinkel θ_i , der Raumwinkel der Blendquellen über die Beleuchtungsstärken $E_A^{(i)}$ am Auge (bei gegebenen Blendleuchtdichten) dargestellt. Die Konstanten in der Formel besitzen folgende Werte:

$$\begin{aligned} k_{pl} &= 4,0 \cdot 10^{-2} \text{ cd} / \text{m}^2 \\ k_{p00} &= 3,0 \cdot 10^{-3} \text{ lx} / \text{min}^{0,46} \end{aligned} \quad (2.7)$$

2.1.6 Folgen der nächtlichen Sichteinschränkung

Wie bereits beschrieben, führen mehrere Faktoren zu einer reduzierten Informationsaufnahme im nächtlichen Straßenverkehr:

- eingeschränkte Farbwahrnehmung,
- gesteigener Schwellenkontrast,
- geringe Streuung der vertikalen und horizontalen Blickwinkel,
- geringere mittlere Fixationsentfernungen,
- höhere durchschnittliche Fixationsdauer,
- starke Leuchtdichteunterschiede im Gesichtsfeld, Fehladaptationen und Blendung.

Zusammengefasst sinkt die Leistungsfähigkeit des fovealen Sehens. Dagegen bleiben die Sehfunktionen des peripheren Sehens, welche für die Fahrzeugstabilisierung und -führung wichtig sind, bis zur Grenze zum skotopischen Sehen erhalten³⁸. Dadurch wird dem Fahrer ein trügerisches Sicherheitsgefühl vermittelt, welches durch Fahrbahnmarkierungen und

³⁶ BENZ 1966 [9], S. 87 f.

³⁷ SCHMIDT-CLAUSEN/BINDELS 1974 [106], S. 80 ff.

³⁸ OWENS/SIVAK 1993 [94], S. 2 f.

Leitpfosten nochmals verstärkt wird. Der Fahrer passt daher seine Fahrzeuggeschwindigkeit nicht an die verminderte Sehleistung an und der Bremsweg reicht nicht mehr für unerwartet auftauchende Hindernisse auf der Fahrbahn aus³⁹. Zudem sinkt die Qualität der Fahrzeugquerführung⁴⁰.

Die Folgen daraus spiegeln sich in den Unfallzahlen wieder. So belegen Analysen zu deutschen Unfallstatistiken von Langwieder und Bäuml⁴¹, dass sich bei Dämmerung oder Dunkelheit etwa

- 30 % aller Unfälle mit Leichtverletzten,
- 35 % aller Unfälle mit Schwerverletzten und
- 45 % aller Unfälle mit Getöteten ereignen.

Ein internationaler Vergleich der Unfallzahlen mit Todesfolge ergibt nur geringe Unterschiede in den nächtlichen Unfallquoten⁴² zwischen Deutschland, Australien und Japan.

Nach übereinstimmender Meinung in der Literatur werden während der Dämmerung und der Dunkelheit nur 20 % - 30 % der geleisteten Kilometer gefahren. Daraus ergibt sich ein etwa doppeltes Risiko, pro gefahrenen Kilometer bei Nacht in einen tödlichen Unfall verwickelt zu werden⁴³.

Unfallschwere	Unfallrisikoverhältnis Nacht / Tag		
	Bezogenes Unfallrisiko		Risikoüberhöhung bei Dunkelheit
	Tag	Nacht	
Leichtverletzte	0,98	1,04	+ 6 %
Schwerverletzte	0,87	1,3	+ 50 %
Getötete	0,72	1,7	+ 136 %

Tabelle 2.2: Fahrleistungsbezogenes Unfallrisiko nach Lichtverhältnissen⁴⁴

³⁹ ROPER/HOWARD 1938 [100], zitiert in BÖRNCHEN 2001 [16], S.19

⁴⁰ LAND/HORWOOD 1995 [76], S. 339 f.

⁴¹ LANGWIEDER 1995 [79], S. 105, LANGWIEDER/BÄUMLER 1997 [80], S. 328 und BÄUMLER 1998 [8], S. 3

⁴² WÖRDENWEBER/LACHMAYER/WITT 1996 [125], S. 546 f.

⁴³ LANGWIEDER 1995 [79], S. 106, HAMM/FRIEDRICH 2000 [52], S. 1043 und VDA. 2003 [114], S. 188

⁴⁴ LANGWIEDER/BÄUMLER 1997 [80], S. 329

Genauere Daten zur Risikoüberhöhung bei Dämmerungs- und Dunkelheitsunfällen sind in Tabelle 2.2 dargestellt. Sie zeigt das Risikoverhältnis für Tag- und Nachtunfälle. Das bezogene Unfallrisiko berechnet sich dabei als Quotient aus prozentualen Unfallanteil zu prozentualen Fahrleistungsanteil. Als Ursachen für die Risikoüberhöhung bei Nachtunfällen kommen vielfältige Faktoren in Frage.

So nennt Langwieder als Hauptursache für nächtliche Autobahnunfälle zu hohe Fahrgeschwindigkeiten, die auf eine Diskrepanz zwischen subjektiver und objektiver Sicherheit zurückzuführen sind. Diese Diskrepanz wird unter anderem durch die Fehleinschätzung der tatsächlichen Sichtweite sowie der eigenen Geschwindigkeit aufgrund geringer Umfeldwahrnehmung⁴⁵ verursacht. Als weitere Gründe führt Langwieder Einschlafen während des Fahrens und ständige Irritationen sowie Adaptionvorgänge des Auges durch die Scheinwerfer des Gegenverkehrs auf, welche ihn von der eigenen Fahrbahn ablenken.

Die Bedeutung der schlechten Umfeldwahrnehmung als Ursache für das nächtliche Unfallgeschehen wird durch Aussagen von weiteren Unfallforschern gestützt. Viele Unfälle wären nämlich vermeidbar, wenn der Fahrer das Fernlicht bei gegebener Verkehrslage auch immer nutzen würde⁴⁶.

Owens und Sivak untersuchten die tödlichen Unfälle in den USA in einem Zeitraum von 11 Jahren, die sich in den täglichen Dämmerungsphasen zwischen 4:00 Uhr und 7:00 Uhr morgens sowie zwischen 17:00 Uhr und 20:00 Uhr abends ereigneten⁴⁷. In diesen beiden Zeitbereichen sind mögliche Einflussfaktoren auf das Unfallgeschehen wie Verkehrsdichte, Müdigkeit, Altersstruktur der Fahrer sowie Alkohol über das gesamte Jahr hinweg nahezu konstant. Die Sichtverhältnisse verändern sich jedoch mit der Jahreszeit. Im Winter ist der zeitliche Anteil der Dunkelheit in den beiden Dämmerungsphasen größer als im Sommer. Es zeigte sich, dass die Anzahl der tödlichen Unfälle mit Fußgängern und Radfahrer stark mit den Sichtverhältnissen in den Jahreszeiten korreliert. Für alle anderen Unfallarten ist Alkohol am Steuer die maßgebliche Einflussgröße.

Das Ergebnis wurde durch Sullivan und Flannagan in ihrer Analyse der Unfallzahlen während der Dämmerung, bei Tageslicht und in der Nacht bestätigt⁴⁸. Sie fanden außerdem eine gute Korrelation der tödlichen Unfälle mit Passanten zu den veränderten Wahrnehmungsbedingungen vor und nach dem Wechsel zwischen normaler Zeit und der „Eastern Daylight Savings Time“. Sie sehen daher in adaptiven Scheinwerfern ein großes Potential zur Reduktion

⁴⁵ LANGWIEDER 1995 [79], S. 109

⁴⁶ MAYER 2000 [86], S. 34

⁴⁷ OWENS/SIVAK 1996 [95], S. 681 ff.

⁴⁸ SULLIVAN/FLANNAGAN 1999 [112], S. 60 ff.

tödlicher Unfälle bei schlechten Wahrnehmungsbedingungen, wenn durch sie unerwartete und kontrastschwache Hindernisse, z.B. Fußgänger oder Fahrradfahrer, frühzeitig erkannt werden.

Die genannten Analysen belegen, dass die Wahrnehmungsbedingungen einen wesentlichen Einfluss auf das Unfallrisiko besitzen. Diese Wahrnehmungsbedingungen werden bei Nacht außerhalb geschlossener Ortschaften ausschließlich von den fahrzeugeigenen Scheinwerfern bestimmt.

2.2 Stand der Kraftfahrzeug-Lichttechnik

Üblicherweise verfügen Fahrzeuge in Europa über mindestens zwei Fahrlichtfunktionen. Das **Fernlicht** wird außerhalb geschlossener Ortschaften eingesetzt und bietet dem Fahrer sehr gute Wahrnehmungsbedingungen mit hoher Reichweite. Besitzt jeder der beiden Fernlichtscheinwerfer die maximal erlaubte Lichtstärke von 112500 cd ⁴⁹, können dunkle Objekte (Reflektionsgrad 4,5 %) bis zu einer Entfernung von etwa 400 m erkannt werden⁵⁰.

Die hohen Lichtstärken des Fernlichts führen jedoch zur Blendung des entgegenkommenden Fahrerauges. Daher wurde bereits in den 20er Jahren das **Abblendlicht** eingeführt. Dessen Lichtverteilung stellt einen Kompromiss dar zwischen guter Sicht für den Fahrer und möglichst geringer Blendung des Gegenverkehrs. Da aufgrund der hohen Verkehrsdichte auf europäischen Straßen das Einschalten des Fernlichts kaum möglich ist, werden mit rund 95 % Einschaltzeit die Abblendlichtscheinwerfer am häufigsten genutzt⁵¹.

2.2.1 Abblendlichtverteilung

Bild 2.5 zeigt eine schematische Darstellung der Lichtverteilung des europäischen Abblendlichts für den Rechtsverkehr aus der Sicht eines Scheinwerfers. In dieser Abbildung wurden zusätzlich einige Messpunkte der ECE-Regelungen sowie die Straße perspektivisch eingezeichnet.

Die Lichtverteilung des Abblendlichtes besteht aus zwei Bereichen, die durch die Hell-Dunkel-Grenze getrennt werden. Im oberen Bereich, dem so genannten **Blendungsbereich** gelangt nur Streulicht, um eine Blendung des entgegenkommenden Fahrerauges zu vermei-

⁴⁹ Die ECE R48 [33] erlaubt für das Fernlicht eine höchst zulässige Lichtstärke von 225000 cd . Unter der Annahme, dass das Fernlicht von zwei Scheinwerfern erzeugt wird, ergibt sich pro Fernlichtscheinwerfer eine maximale Lichtstärke von 112500 cd .

⁵⁰ RUMAR 2001 [103], S. 832

⁵¹ HAMM/FRIEDRICH 2000 [52], S. 1042

den. Unterhalb der Hell-Dunkel-Grenze befindet sich der **Beleuchtungsbereich**. Dieser wird hell beleuchtet, um dem Fahrer gute Wahrnehmungsbedingungen zu bieten.

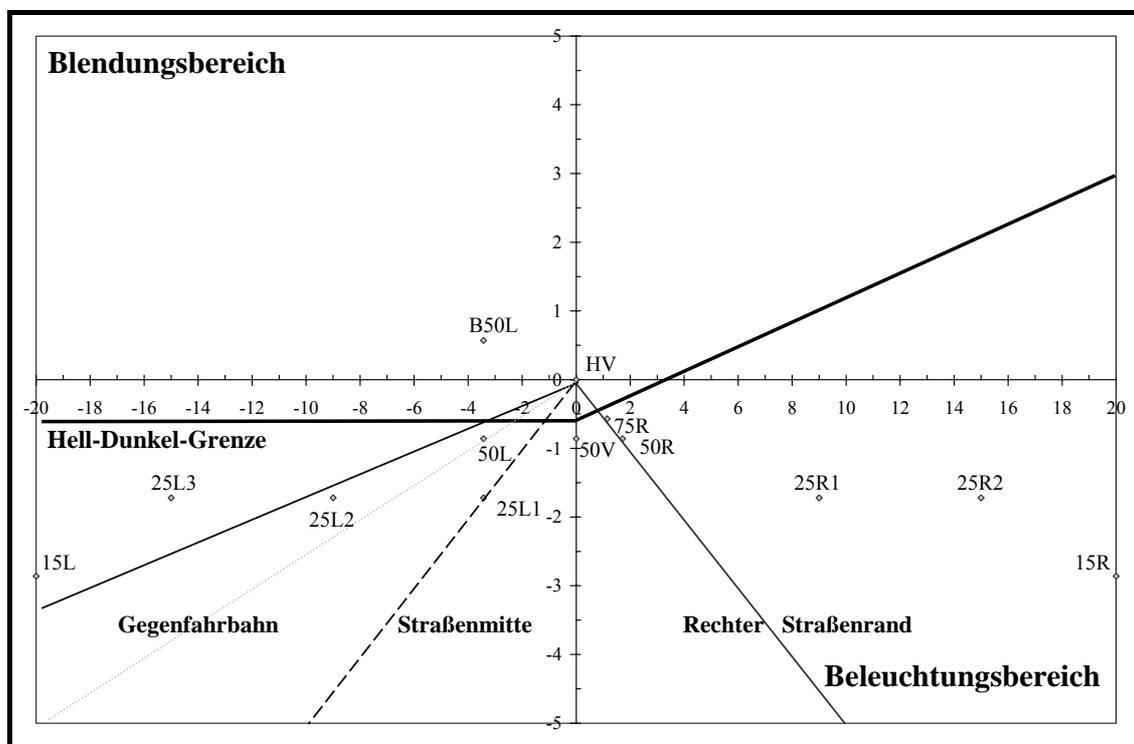


Bild 2.5: Lichtverteilung des europäischen Abblendlichts für den Rechtsverkehr

An den Messpunkten der ECE-Regelungen⁵² werden die Beleuchtungsstärken in einer Entfernung von 25 m vor dem Scheinwerfer gemessen. Die Messwerte dürfen dabei bestimmte Minima und Maxima nicht unter- bzw. überschreiten.

Die optische Achse des Scheinwerfers ist so eingestellt, dass die Höhe der Hell-Dunkel-Grenze mit zunehmender Entfernung abnimmt und in rund 40 m – 70 m Entfernung die Fahrbahnoberfläche schneidet⁵³. Die Entfernung des Schnittpunkts wird als geometrische Leuchtweite d_{HDG} bezeichnet.

⁵² Je nach verwendetem Leuchtmittel kommen folgende ECE-Regelungen zur Anwendung:

- ECE R1 [30] für Scheinwerfer mit Biluxlampen R2 oder HS1
- ECE R8 [31] oder ECE R20 [32] für Scheinwerfer mit Halogenlampen
- ECE R98 [34] für Scheinwerfer mit Gasentladungslampen
- ECE R112 [35] für Scheinwerfer mit Glühlampen (ersetzte 2002 die ECE R8 und R20)

⁵³ Nähere Angaben zur Grundeinstellung der Scheinwerfer befinden sich in Abschnitt 2.2.3 ab Seite 20.

Das Abblendlicht bietet aber nur dann gute Sicht für den Fahrer ohne gleichzeitige Blendung des Gegenverkehrs, wenn die Straße eben und gerade ist und sich das Fahrzeug in seiner Konstruktionslage auf der Straße befindet. Schon ein beladener Kofferraum bewirkt einen veränderten Nickwinkel der Karosserie und kann zur Blendung der anderen Verkehrsteilnehmer führen. Um diese Blendung zu vermeiden, müssen Fahrzeuge mit Halogen-Scheinwerfern mit einer manuellen Leuchtweitenregulierung ausgestattet sein⁵⁴.

2.2.2 Xenon-Scheinwerfer

Seit der Einführung von Xenon-Scheinwerfern steht dem Abblendlicht ein wesentlich höherer Lichtstrom für den Beleuchtungsbereich unterhalb der Hell-Dunkel-Grenze zur Verfügung⁵⁵. Üblicherweise ist ein Xenon-Scheinwerfer als Projektionssystem aufgebaut. Er besteht aus einer Gasentladungslampe mit einem Reflektor sowie einer optischen Linse. Zwischen der Linse und der Lampe befindet sich eine Blende, welche mit ihrem Schatten den dunklen Bereich der Abblendlichtverteilung erzeugt (siehe Bild 2.6). Die Blende wirkt wie ein Diapositiv in einem Projektor. Daher der Name „Projektionssystem“.

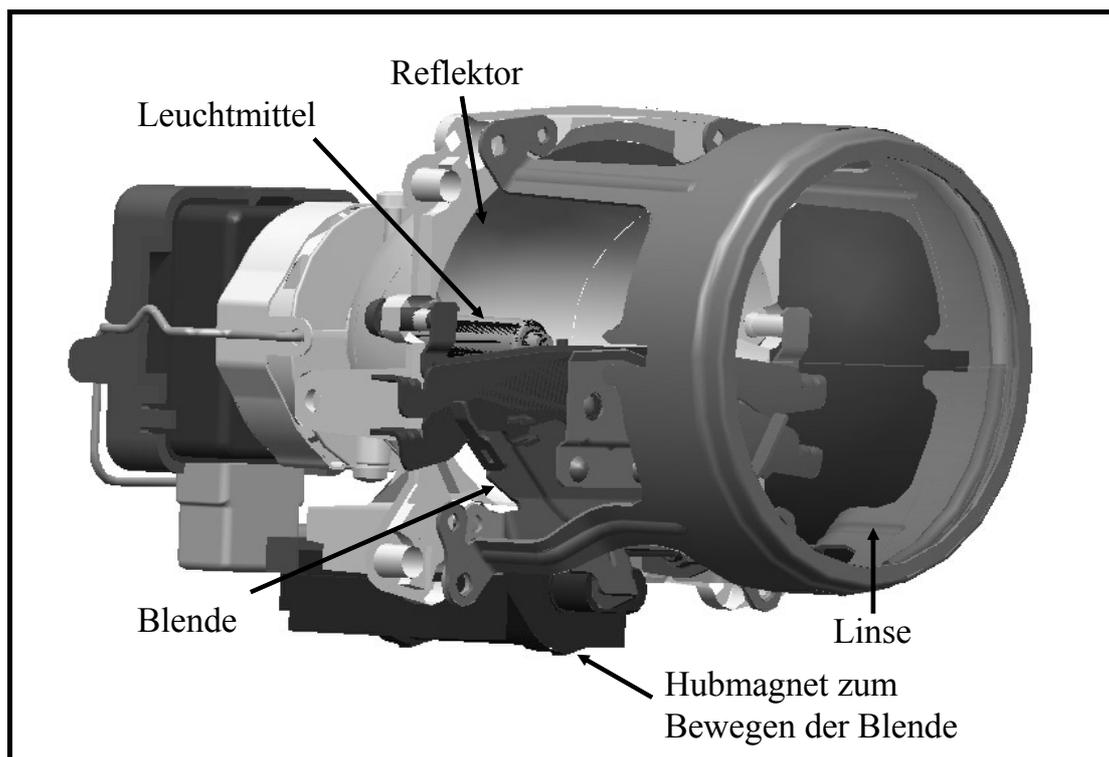


Bild 2.6: Projektionsmodul eines BiXenon-Scheinwerfers, Quelle: Fa. Automotive Lighting

⁵⁴ ECE R48 [33]

⁵⁵ HENDRISCHK/WENDT 1996 [58], S. 772

So genannte Bi-Xenon-Scheinwerfer nutzen den hohen Lichtstrom der Gasentladungsscheinwerfer auch für das Fernlicht, indem die Blende mit einem Hubmagneten aus dem Strahlengang bewegt werden kann⁵⁶.

Aufgrund der hohen Lichtstärken im Beleuchtungsbereich können falsch eingestellte Xenon-Scheinwerfer zu einer starken Blendung der anderen Verkehrsteilnehmer führen. Eine manuelle Einstellung der Leuchtweite, wie sie in Fahrzeugen mit Halogen-Scheinwerfern eingesetzt wird, ist dort nicht mehr ausreichend. Der Gesetzgeber schreibt deshalb für Fahrzeuge mit Xenon-Scheinwerfer eine automatische Leuchtweitenregulierung vor⁵⁷.

2.2.3 Automatische und dynamische Leuchtweitenregulierung

Als Sensoren für die automatische Leuchtweitenregulierung werden Höhenstandssensoren im Fahrwerk eingesetzt. Diese messen sowohl an der Vorder- als auch an der Hinterachse die Einfederung des Fahrwerks. Ein Mikroprozessor berechnet daraus den Nickwinkel der Karosserie und steuert über Stellmotoren die optischen Scheinwerferachsen, sodass die Neigung der Hell-Dunkel-Grenze innerhalb der gesetzlichen Vorgaben gehalten wird.

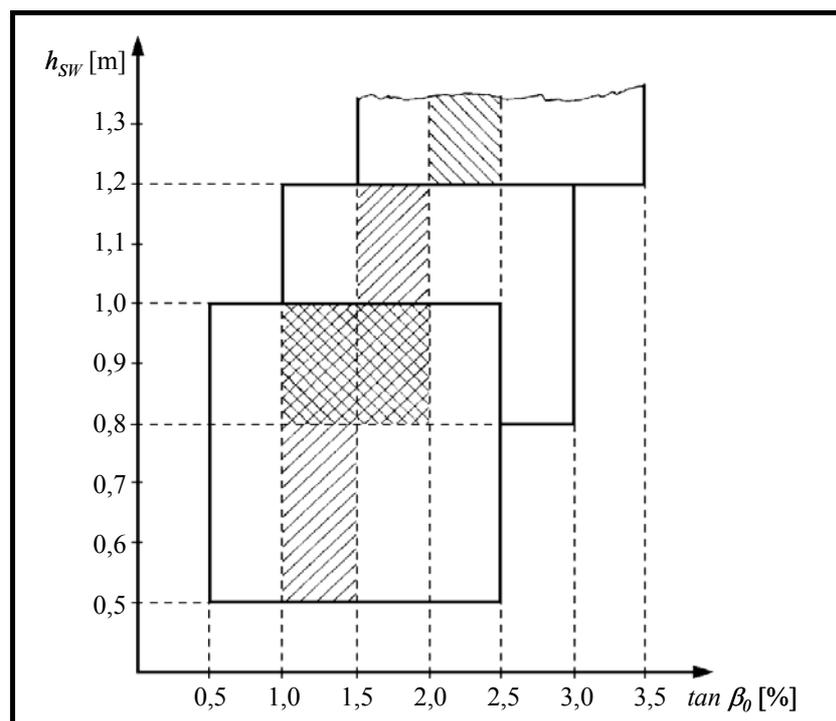


Bild 2.7: Anbauhöhe und Einstellbereich der Scheinwerfer

⁵⁶ HAMM 2000 [51], S. 1126 und BÖRNCHEN 2001 [16], S. 67 ff.

⁵⁷ ECE R48 [33]

Bild 2.7 zeigt die Grenzen der Scheinwerfereinstellung - gemessen als Tangens des Winkels β der optischen Scheinwerferachse gegenüber dem Horizont – in Abhängigkeit von der Anbauhöhe h_{SW} der Scheinwerfer⁵⁸. Der schraffierte Bereich kennzeichnet die zulässigen Werte der Grundeinstellung β_0 . Der erweiterte weiße Bereich zeigt die Grenzen der Scheinwerferneigung für alle zulässigen Beladungszustände des Fahrzeugs.

Der Gesetzgeber gibt sich damit zufrieden, dass die Scheinwerfer im Stand nach seiner Vorgabe automatisch eingestellt werden und diese Einstellung während der Fahrt nicht mehr verändert wird⁵⁹. Damit wird von der automatischen Leuchtweitenregulierung nur die statische Änderung des Nickwinkels aufgrund der Beladung ausgeglichen. Sie reagiert jedoch nicht auf kurzfristige Nick- und Hubbewegungen der Karosserie. Diese entstehen beim Bremsen und Beschleunigen oder beim Überfahren von Bodenwellen.

Bild 2.8 zeigt das positive Nicken θ_{FW} der Karosserie bei einem starken Bremsmanöver, welches zu einer erheblichen Abnahme der geometrischen Leuchtweite d_{HDG} führt. Objekte auf der Fahrbahn können dann unter Umständen nicht mehr rechtzeitig erkannt werden.

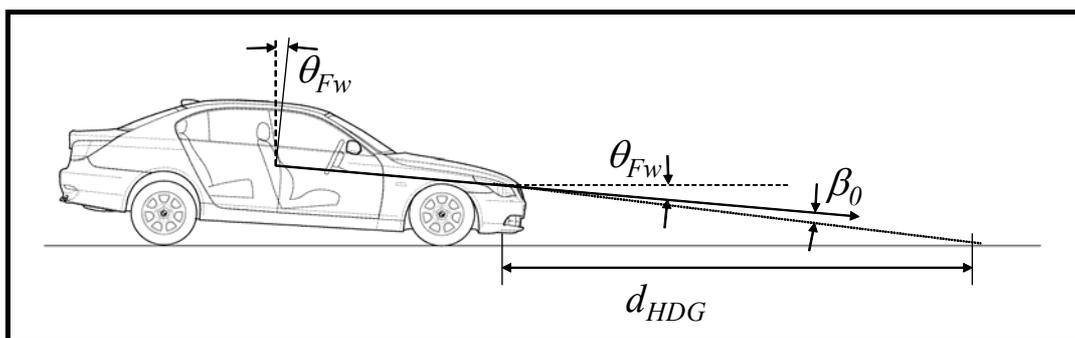


Bild 2.8: Einfluss der Fahrzeugdynamik auf die Lichtverteilung

Starke Beschleunigungsmanöver bedeuten hingegen keine Sichteinschränkung für den Fahrer. Jedoch besteht durch das negative Nicken der Karosserie eine starke Blendefahr für den Gegenverkehr⁶⁰.

Es ist daher sinnvoll, eine schnelle Regelung zum Ausgleich der dynamischen Hub- und Nickbewegungen der Karosserie zu verwenden, um die oben aufgezeigten Nachteile, welche beim Fahren unweigerlich auftreten, zu vermeiden. Eine solche dynamische Leuchtweitenregulierung wird heute bereits bei vielen Fahrzeugen mit Xenon-Scheinwerfern eingesetzt⁶¹.

⁵⁸ ECE R48 [33], S. 18

⁵⁹ ECE R48 [33] und KBA 1997 [67] zitiert in LEHNERT 2001 [83], S. 12

⁶⁰ LEHNERT 2001 [83], S. 40 ff.

⁶¹ THIEMANN/STRYSCHIK/HOBEIN 1998 [113], S. 820

Damit werden Karosseriebewegungen beim Bremsen und Beschleunigen sowie Änderungen des Nickwinkels durch Beladung und aerodynamische Effekte ausgeglichen.

Darüber hinaus erfolgt durch Auswertung des Geschwindigkeitssignals eine Anpassung der Leuchtweite an die gefahrene Geschwindigkeit innerhalb der Grenzen, die vom Gesetzgeber zugelassen sind⁶². So kann durch eine Anhebung der optischen Scheinwerferachse um maximal 0,5 % die Leuchtweite auf Autobahnen erhöht werden, wobei durch die räumliche Trennung der Fahrbahnen der Gegenverkehr nicht geblendet wird. Damit ist auch bei hohen Fahrzeuggeschwindigkeiten das rechtzeitige Erkennen von Hindernissen auf der Fahrbahn möglich.

2.2.4 Adaptives Kurvenlicht

Neben den Nickbewegungen der Fahrzeugkarosserie stellt auch der Straßenverlauf eine Ursache für die eingeschränkte Wirkung des Abblendlichtes dar. Bild 2.9 zeigt, wie in Linkskurven der beleuchtete Bereich der Fahrbahn stark abnimmt, während es in Rechtskurven zur Blendung anderer Verkehrsteilnehmer kommt⁶³.

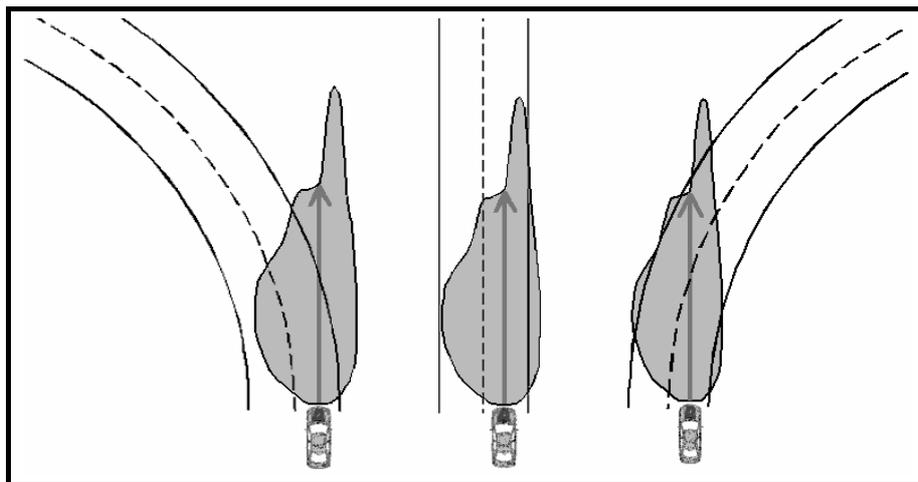


Bild 2.9: Wirkung des Abblendlichtes in Kurven und auf der Geraden

Die Pfeile in Bild 2.9 beschreiben den Leuchtzeiger des Abblendlichtes, welcher den Punkt symbolisiert, bei dem der Knick der Hell-Dunkel-Grenze (siehe Bild 2.5 auf Seite 18) die Fahrbahnoberfläche berührt. Die Länge eines Pfeils entspricht der geometrischen Leuchtweite d_{HDG} .

⁶² Siehe Bild 2.7 auf Seite 20.

⁶³ BILZ 2003 [11], S. 961 f. und EWERHART [40], S.24

Bild 2.10 zeigt, wie das Kurvenlicht durch ein Schwenken der Scheinwerfermodule (bzw. deren Leuchtzeiger) in der horizontalen Ebene die oben beschriebenen Nachteile vermeiden kann.

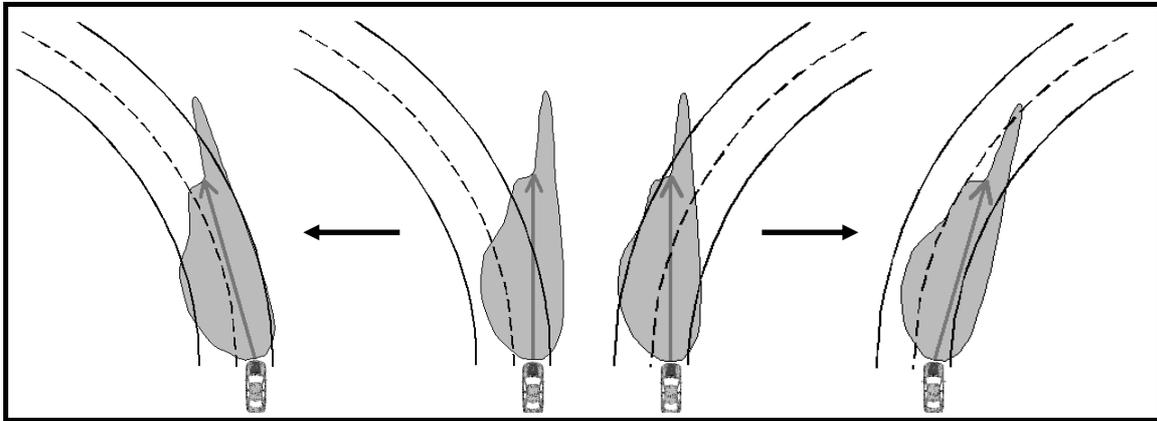


Bild 2.10: Horizontal schwenkbares Abblendlicht

Als Sensoren für das Kurvenlicht dienen die Geschwindigkeit v_x , der Lenkwinkel δ sowie die Gierrate $\dot{\psi}$ des Fahrzeugs⁶⁴. Bei gegebenen Radstand l lassen sich aus diesen Daten Schätzwerte für den Kurvenradius ableiten. Unter Verwendung des Lenkwinkels ergibt sich:

$$R_\delta = \frac{l}{\sin(\delta)} \quad (2.8)$$

und unter Verwendung der Gierrate erhält man:

$$R_{\dot{\psi}} = \frac{v_x}{\dot{\psi}} \quad (2.9)$$

Die beiden Schätzwerte R_δ und $R_{\dot{\psi}}$ können nun abhängig von der Geschwindigkeit gewichtet und zu einem Schätzwert für den aktuell gefahrenen Radius R_h zusammengefasst werden.

Wie Bild 2.11 zeigt, fährt die Hinterachse eines Fahrzeugs in einer Kurve auf einem kleineren Radius als die Vorderachse. Daher steht die Fahrzeuglängsachse nicht im Lot zum Kurvenradius R_h der Vorderachse, sondern im Winkel τ_B zum Lot des Kurvenradius. Dieser Winkel τ_B , der so genannte Basisschwenkwinkel berechnet sich folgendermaßen:

$$\tau_B = \arcsin \frac{l}{R_h} \quad (2.10)$$

⁶⁴ BILZ 2003 [11], S. 964 ff.

Die optische Scheinwerferachse darf maximal so weit in die Kurve geschwenkt werden, dass die Spitze des Lichtzeigers die Kreisbahn mit dem berechneten Radius R_h tangiert⁶⁵. Daraus ergibt sich der Kurvenschwenkwinkel τ_K bezüglich des Lotes zum Kurvenradius:

$$\tau_K \leq \arcsin \frac{d_{HDG}}{2 \cdot R_h} \quad (2.11)$$

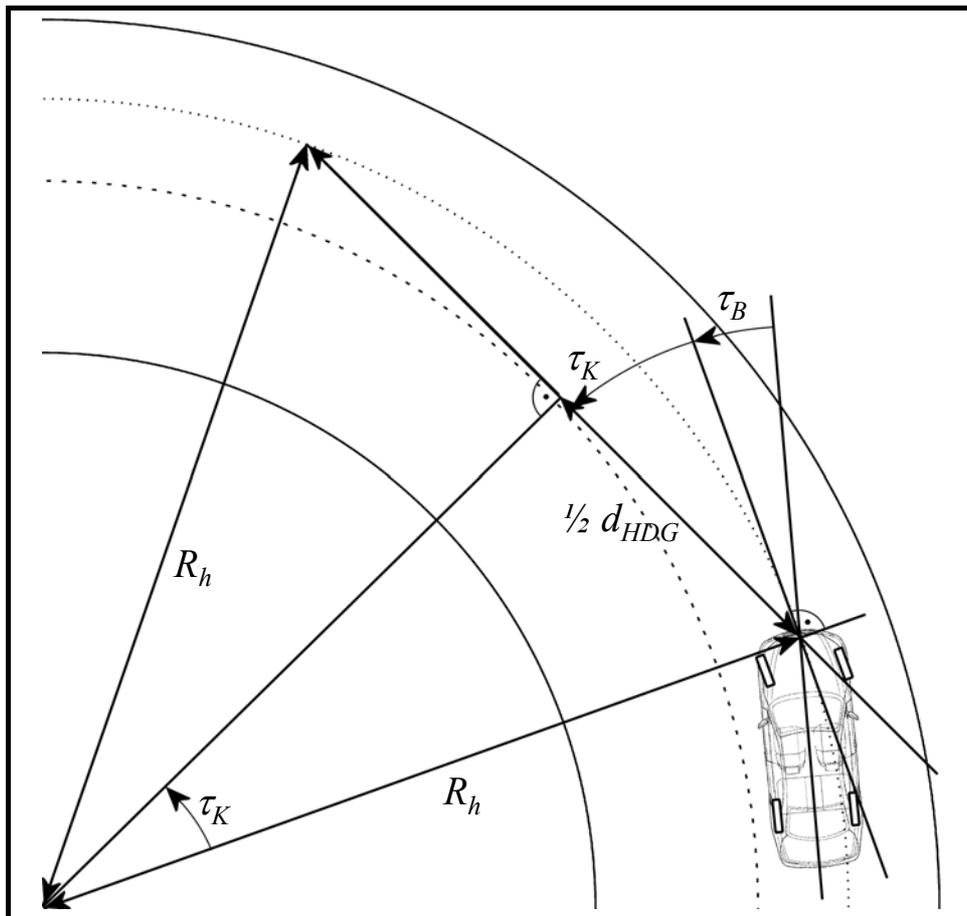


Bild 2.11: Basisschwenkwinkel τ_B und maximaler Kurvenschwenkwinkel τ_K in Linkskurven

Die Summe aus Basisschwenkwinkel τ_B und Kurvenschwenkwinkel τ_K ergibt den eigentlichen Schwenkwinkel τ der Scheinwerfer (siehe Bild 2.11):

$$\tau = \tau_B + \tau_K \leq \arcsin \frac{l}{R_h} + \arcsin \frac{d_{HDG}}{2 \cdot R_h} \quad (2.12)$$

⁶⁵ ECE R48 [33]

Die Auswertung der Fahrzeugdynamik liefert nach den Gleichungen 2.8 und 2.9 den aktuell gefahrenen Kurvenradius R_h . Dieser Radius stimmt jedoch nicht immer mit dem Kurvenradius im Fahrzeugvorfeld überein, in dem sich die Lichtkegel der Scheinwerfer befinden. Dadurch kann beim Fahren der richtige Kurvenradius aus den genannten Sensorsignalen nur verzögert berechnet werden. Aufgrund der vorgeschriebenen Übergangsbögen im Kurvenverlauf sind die Unterschiede durch die Verzögerung jedoch gering⁶⁶. Dennoch ist in Wechselkurven und am Ausgang enger Straßenkrümmungen eine verspätete Scheinwerferbewegung bemerkbar⁶⁷. Ewerhart zeigte durch die Entwicklung einer videobasierten Kurvenlichtsteuerung, dass solche Nachteile durch die Verwendung eines vorausschauenden Sensorsystems vermieden werden können⁶⁸.

2.3 Vertikale Straßengeometrie

Die dynamische Leuchtweitenregulierung gleicht die Nickbewegungen der Fahrzeugkarosserie aus und erzeugt auf einer ebenen Straße sowohl beim Bremsen als auch beim Beschleunigen eine konstante Leuchtweite. Das adaptive Kurvenlicht reduziert die Nachteile horizontal gekrümmter Straßen wie zu kurze Leuchtweite oder Blendung des Gegenverkehrs. Bisher fehlt jedoch eine Anpassung der Lichtverteilung an die vertikale Straßenkrümmung.

2.3.1 Eigenschaften

Die vertikalen Krümmungen der Straße verändern den Steigungswinkel θ_{sr} der Fahrbahn, welcher gegenüber dem Horizont oder dem Lot zum Erdmittelpunkt gemessen wird. In der Straßengeometrie lassen sich zwei Sorten von vertikalen Krümmungen unterscheiden:

Bodenwellen besitzen enge Krümmungsradien mit wechselnden Vorzeichen innerhalb weniger Meter. Sie haben zwar keinen nachhaltigen Einfluss auf die durchschnittliche Steigung der Straße, beeinflussen aber die Wirkung des Abblendlichtes, indem sie die Fahrzeugkarosserie zu Hub- und Nickbewegungen anregen⁶⁹. Die Krümmungsradien von **vertikalen Kurven** (Kuppen und Wannen) sind deutlich größer als bei Bodenwellen. Da sie sich über einen größeren Straßenabschnitt erstrecken, beeinflussen sie den Steigungswinkel der Fahrbahnoberfläche. Normalerweise verursachen sie keine Hub- und Nickbewegungen der Fahrzeugkarosserie. Die Deutsche Industrienorm 70000 beschreibt das Koordinatensys-

⁶⁶ RAS 1995 [97], S. 15 ff. Eine grafische Darstellung eines Übergangsbogens zeigt Bild 2.12 auf Seite 27.

⁶⁷ ABEL/LABAHN 2000 [1], S. 1090 ff.

⁶⁸ EWERHART 2002 [40], S. 77 ff.

⁶⁹ SCHAL/HUGEMANN 1992 [104], S. 266 ff.

tem von Straßenfahrzeugen⁷⁰. Aufgrund der darin genormten Vorzeichenregelung besitzen Kuppen eine positive Krümmung. Der Steigungswinkel θ_{St} einer Straße, die bergauf führt, hat demnach ein negatives Vorzeichen. Bergabpassagen besitzen eine positive Steigung. Während Bodenwellen durch unerwünschte Alterungserscheinungen in der Fahrbahnoberfläche entstehen, müssen Kuppen und Wannen bereits in der Planungsphase einer neuen Straße aufgrund topologischer Gegebenheiten berücksichtigt werden. Da insbesondere Kuppen die Sicht des Fahrers auf den Verkehrsraum stark einschränken können, sind in der Richtlinie zur Anlage von Straßen, Teil Linienführung (RAS-L-1)⁷¹ Mindestradien für Kuppen vorgeschrieben. Für Wannen werden solche Mindestradien lediglich empfohlen, da sie nur in Verbindung mit Unterführungen die Sichtweiten beeinflussen. Tabelle 2.3 zeigt die in der Richtlinie vorgegebenen vertikalen Mindestradien für eine gerade Straße. Diese hängen von der Entwurfsgeschwindigkeit v_E der Straße und bei Kuppen zusätzlich von der geforderten Sichtweitenkategorie ab. Die Haltesichtweite muss immer erfüllt sein, während die Überholsichtweiten nur für Straßen gefordert werden, bei denen ein sicheres Überholen möglich sein soll. Kuppenradien, die zwischen der halben und vollen Überholsichtweite liegen, sollen vermieden werden, da sie riskante Überholversuche fördern⁷².

v_E [km/h]	minimaler Kuppenradius [m] bei			minimaler Wannennradius [m]
	Haltesichtweite	½ Überholsichtweite	Überholsichtweite	
50	1400	7000	28200	500
60	2400	7800	30000	750
70	3150	8600	35000	1000
80	4400	10300	40000	1300
90	5700	12200	48000	2400
100	8300	13000	52000	3800
120	16000	-	-	8800

Tabelle 2.3: Mindestradien für Kuppen und Wannen

⁷⁰ DIN 70000 [29], S. 2 und S. 11

⁷¹ RAS 1995 [97], S. 19

⁷² Der Sinn der Überholsichtweiten als Maßgabe für die vertikalen Mindestradien wird im Rahmen einer Richtlinienüberprüfung durch LAUFFER 2000 [81] in Frage gestellt, da die Länge eines Überholvorgangs von weiteren Faktoren wie z.B. dem Beschleunigungsvermögen des überholenden Fahrzeugs oder die Geschwindigkeit des überholten Fahrzeugs abhängt.

Horizontalen Kurven muss der Fahrer aktiv per Lenkeinschlag folgen. Um ihm ein ruhiges und sicheres Lenken zu ermöglichen, dürfen sich die horizontalen Krümmungsradien der Straße nur stetig ändern. Der stetige Übergang zwischen verschiedenen Kurvenradien wird Klothoide genannt. Bild 2.12 zeigt den Übergangsboden zwischen einem geraden Streckenabschnitt und einer Linkskurve mit Radius $R = x$.

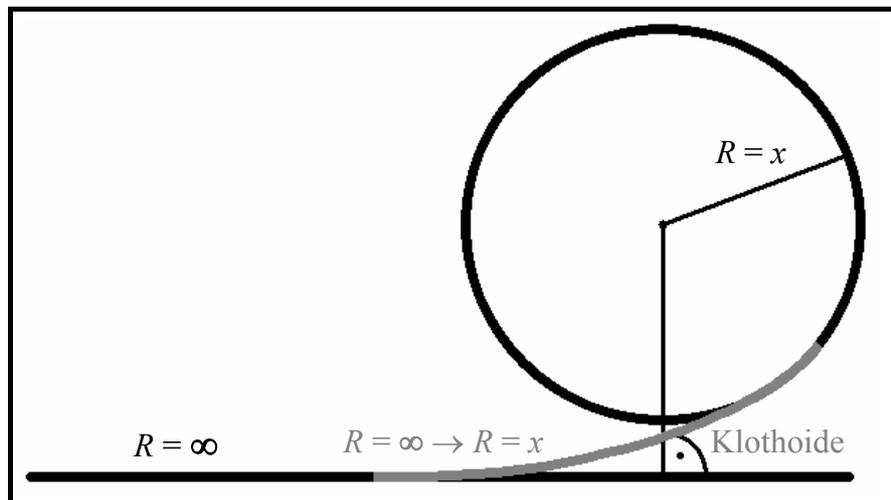


Bild 2.12: Übergangsboden zwischen einer Geraden und einer Kurve

Da das Fahrzeug den vertikalen Kurven aufgrund der Schwerkraft zwangsläufig folgt, sind in der Richtlinie zur Anlage von Straßen die Übergangsbögen in der vertikalen Ebene nicht vorgeschrieben, sondern lediglich empfohlen⁷³. Die Klothoide sollen dabei in Form quadratischer Parabeln angelegt werden, bei denen sich die vertikale Krümmung K_v linear über die Bogenlänge d verändert:

$$K_v(d) = K_{v0} + d \cdot K_{v1} \quad (2.13)$$

Viele Straßen in Deutschland sind vor Einführung dieser Richtlinie gebaut worden. Die Richtlinie selbst wurde zwischen 1979 und 1995 zweimal überarbeitet. Daher sind Abweichungen in der realen Straßengeometrie zur aktuellen Richtlinie sehr wahrscheinlich.

Um einen Überblick über die tatsächliche Verteilung der Kuppen- und Wannenradien auf verschiedenen Straßentypen sowie in Abhängigkeit von topologischen Gegebenheiten zu erhalten, wurden im Rahmen einer Untersuchung rund 6500 Kilometer des deutschen Straßennetzes beim Fahren vermessen⁷⁴. Die gefahrene Route ist in Bild 8.1 im Anhang 8.1 dargestellt.

⁷³ RAS 1995 [97], S. 19

⁷⁴ Die Messungen im Alpengebiet fanden etwa zur Hälfte auf österreichischen Straßen statt.

Da Bodenwellen wie ein Rauschen die gemessenen Kuppen- und Wannennradien verfälschen, mussten die aufgezeichneten Krümmungswerte jeweils über eine Strecke von 50 m gemittelt werden. Eine genaue Beschreibung des hierfür verwendeten Sensorsystems befindet sich in Abschnitt 3.1.

Die Zuordnung der aufgezeichneten Daten zu den **Straßentypen** erfolgte nach folgenden Kategorien:

- Autobahnen,
- Landstraßen (unterteilt in Bundes-, Staats- und Kreisstraßen) und
- Stadtgebiete.

Nach der Größe ihrer vertikalen Radien wurden alle Krümmungsdaten in 12 Kuppen- und 12 Wannenklassen sowie in ein Klasse für ebene Streckenabschnitte aufgeteilt⁷⁵. In Bild 2.13 ist die Häufigkeitsverteilung der 25 Klassen aller aufgezeichneten Daten nach ihrer Zuordnung zu den Straßentypen dargestellt.

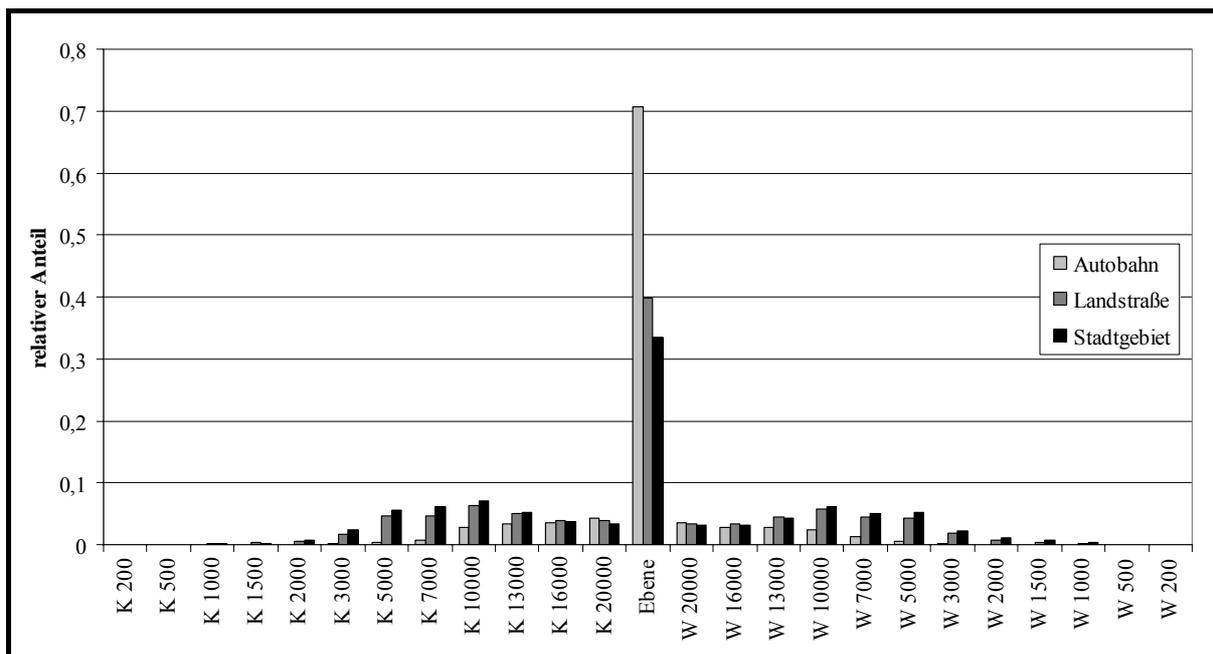


Bild 2.13: Relativer Anteil der Kuppen- und Wannennradien

⁷⁵ Die Bezeichnung der Klasse besteht aus einem Buchstaben K oder W für Kuppe oder Wanne sowie einer Zahl, die den größten Radius dieser Klasse angibt. So enthält zum Beispiel die Klasse „K 200“ alle Kuppen mit Radien $R_v \leq 200\text{ m}$. Die nächste Klasse „K 500“ steht für alle Kuppen mit Radien $200\text{ m} < R_v \leq 500\text{ m}$, usw. Der zusätzlichen Klasse „Ebene“ wurden alle Kuppen und Wannen mit Radien $R > 20000\text{ m}$ zugewiesen.

Zum Teil spiegeln sich in diesem Diagramm die Vorgaben der Richtlinie zur Anlage von Straßen wider. So zeigt ein Vergleich der drei Straßentypen, dass schnell befahrene Streckenabschnitte einen hohen Anteil sehr großer Kuppen- und Wannenradien besitzen, während enge Krümmungen kaum oder gar nicht vorkommen. Auf Autobahnen ist zum Beispiel der Anteil der Klasse „Ebene“ mit rund 70 % dominierend. In Stadtgebieten und auf Landstraßen sinkt dieser Anteil auf 33 % bzw. 40 %. Der Rest verteilt sich bei diesen beiden Straßenkategorien weitgehend auf den Radienbereich zwischen 3000 m und 20000 m. Die kleinsten gemessenen Radien liegen sowohl für Kuppen als auch für Wannen in der Klasse „K 1000“ bzw. „W 1000“. Offensichtlich stammen diese Streckenabschnitte aus der Zeit vor der Richtlinie in ihrer Fassung von 1995, da dort zumindest für Kuppen ein Mindestradius von 1400 m vorgegeben wird (siehe Tabelle 2.3 auf Seite 26).

Entgegen der Erwartungen aus der Vorgabe der Richtlinie zeigt das Diagramm keine asymmetrische Verteilung mit engeren Wannen- als Kuppenradien. Für alle Straßentypen sind die Häufigkeitsverteilungen nahezu symmetrisch.

Um den Einfluss der **Topologie** auf die Straßengeometrie zu ermitteln, wurden die aufgezeichneten Daten neben den Straßentypen auch folgenden Geländetypen zugeordnet:

- Flachland (norddeutsche Tiefebene, Rheinebene, Rhein-Main-Gebiet etc.),
- deutsche Mittelgebirge,
- Alpengebiet.

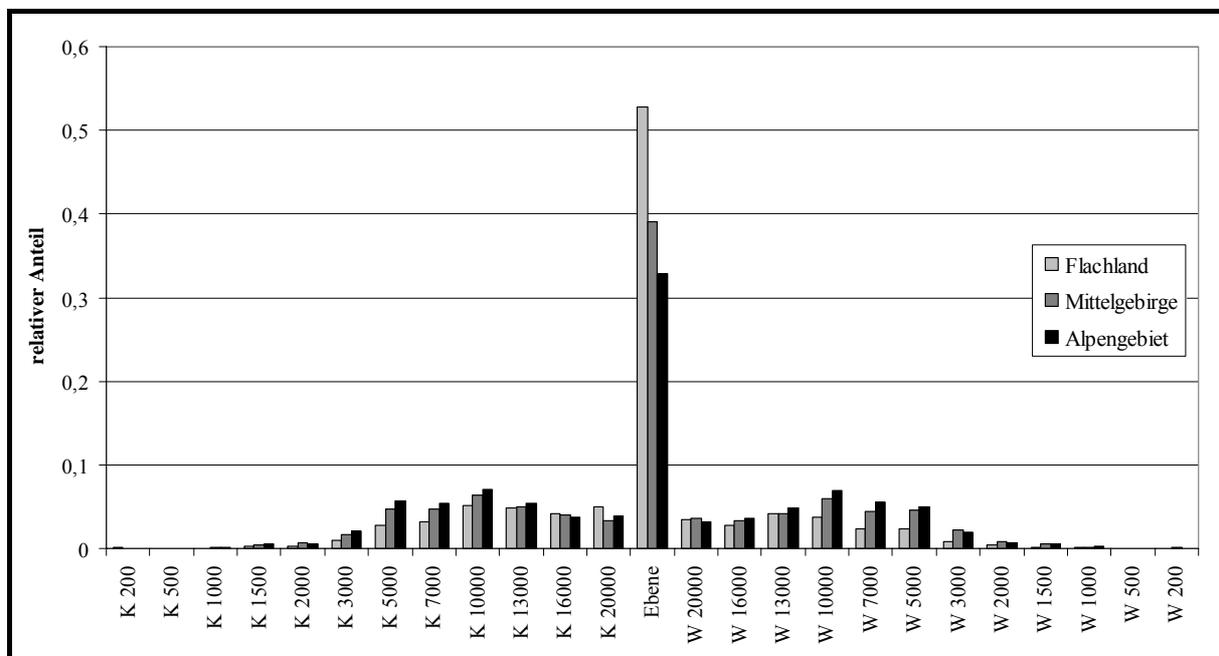


Bild 2.14: Einfluss der Topologie auf die Verteilung von Kuppen- und Wannenradien auf Landstraßen

Bild 2.14 zeigt diese Zuordnung beispielhaft für die vermessenen Landstraßen. Hier ist gut zu erkennen, dass in Gebirgsregionen der Anteil enger vertikaler Krümmungen mit Radien $R_v \leq 13000 \text{ m}$ zunimmt. Der Anteil ebener Straßen bzw. Krümmungen mit großen Radien $R_v \geq 20000 \text{ m}$ sinkt dort dagegen deutlich.

Ein ähnlicher Effekt tritt auch bei Autobahnen auf. Er ist jedoch weniger stark ausgeprägt und betrifft ausschließlich vertikale Kurven mit Radien $R_v \geq 7000 \text{ m}$. Krümmungen mit kleineren Radien spielen in der Häufigkeitsverteilung auf Autobahnen keine Rolle.

In Städten beeinflusst die Topologie nahezu allen Radienklassen. Dies zeigt ein Vergleich einer sehr hügeligen Stadt wie Aschaffenburg mit Städten, die innerhalb ihrer Grenzen sehr eben sind (Berlin) oder nur wenige Hügel und Täler besitzen (München).

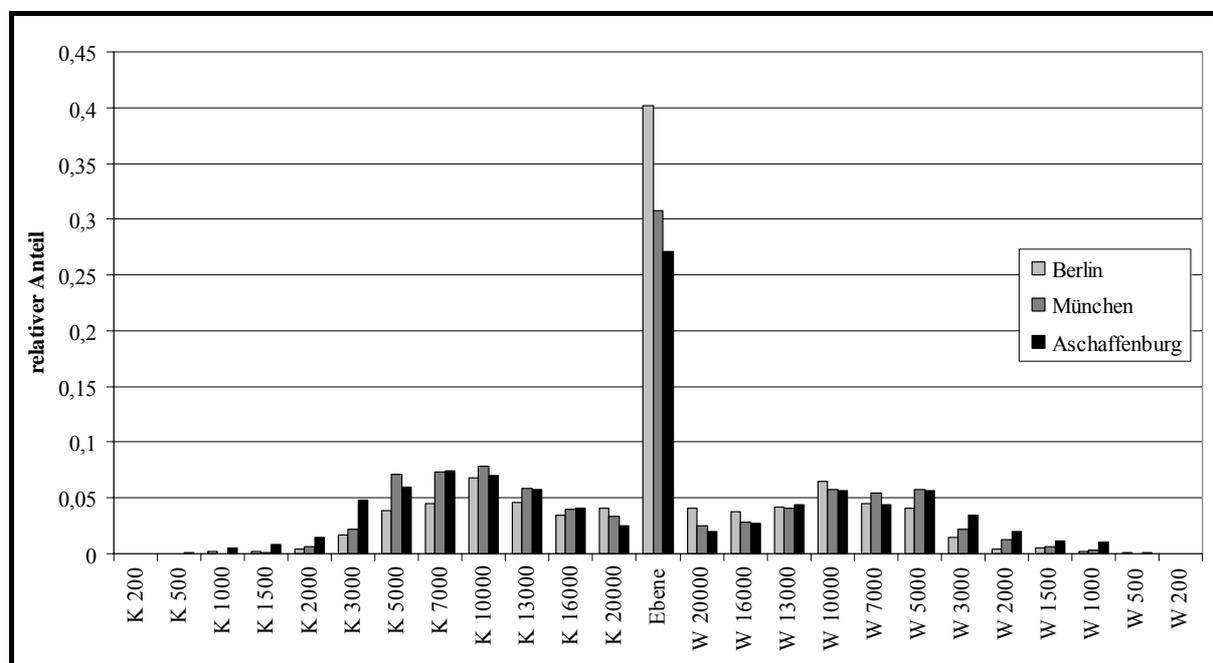


Bild 2.15: Einfluss der Topologie auf die Verteilung von Kuppen- und Wannensradien im Stadtgebiet

Je hügeliger das Stadtgebiet ist, desto größer ist der Anteil sehr kleiner Radien $R_v \leq 5000 \text{ m}$ und desto geringer ist der Anteil großer Radien $R_v \geq 16000 \text{ m}$ (siehe Bild 2.15). Weitere Diagramme zur Verteilung von Kuppen- und Wannensradien befinden sich in Anhang 8.1.

2.3.2 Einfluss auf die Wirkung des Abblendlichtes

Das Abblendlicht ist optimiert für ebene Straßen. Hier bietet es gute Wahrnehmungsbedingungen für den Fahrer, ohne den Gegenverkehr zu blenden. Die Wirkung des Abblendlichts wird jedoch durch Wannen und Kuppen nachteilig beeinflusst.

So verringern **Wannen** die geometrischen Leuchtweite und verschlechtern dadurch die Wahrnehmungsbedingungen des Fahrers (siehe Bild 2.16). Die geometrische Leuchtweite bildet die Grenze des hell beleuchteten Bereichs der Lichtverteilung unterhalb der Hell-Dunkel-Grenze. Durch die kürzere Leuchtweite beim nächtlichen Fahren verkleinert sich der für den Fahrer relevante Sichtbereich.

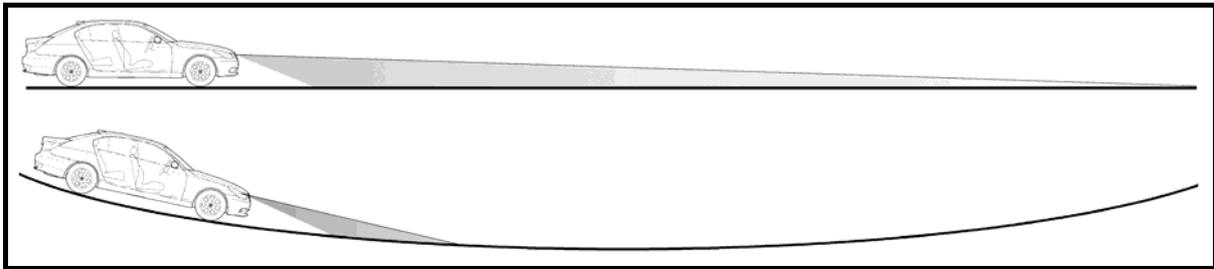


Bild 2.16: Geometrische Leuchtweite in der Ebene und Wanne

Neben der vertikalen Krümmung ist die geometrische Leuchtweite d_{HDG} auch von der Grundeinstellung β_0 und Anbauhöhe h_{SW} der Scheinwerfer am Fahrzeug abhängig⁷⁶.

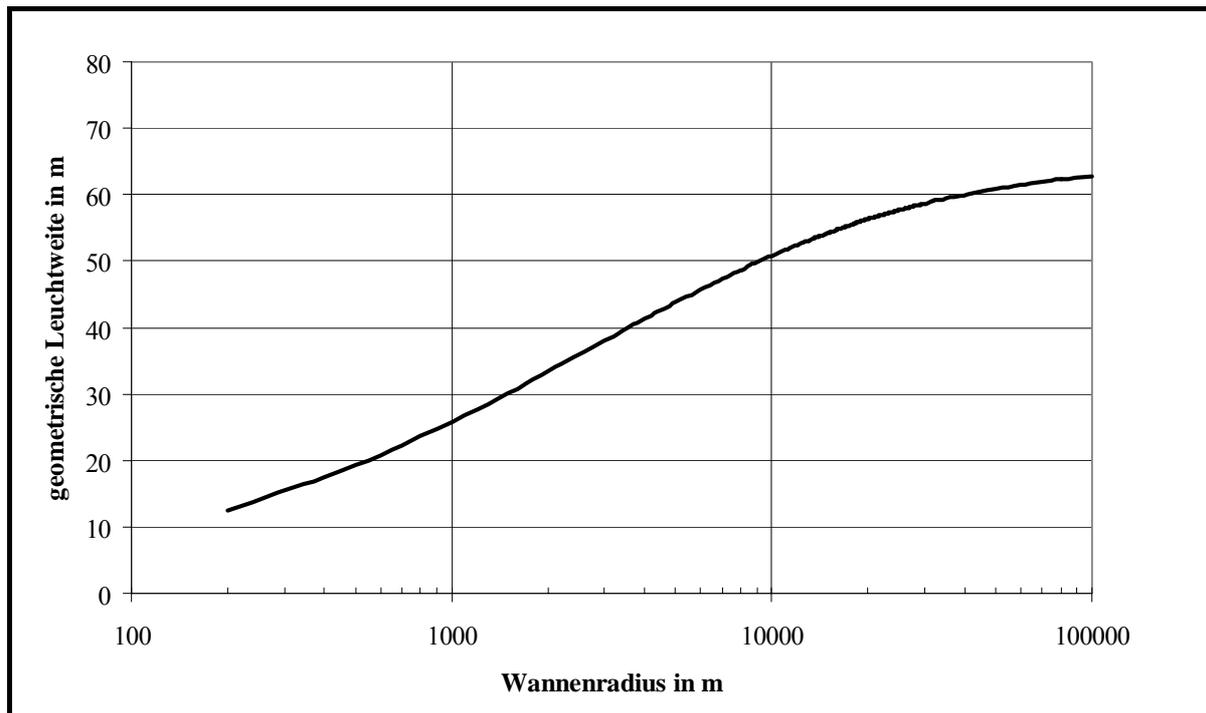


Bild 2.17: Abhängigkeit der geometrischen Leuchtweite vom Wannenradius

⁷⁶ Mathematische Formeln zur Berechnung der geometrischen Leuchtweite aus der vertikalen Straßenkrümmung, der Anbauhöhe und der Grundeinstellung der Scheinwerfer befinden sich im Anhang 8.2.1 ab Seite 149.

Bild 2.17 zeigt den quantitativen Einfluss von Wannenzentren auf die geometrische Leuchtweite bei einer Grundeinstellung $\tan \beta_0 = 1 \%$ und Höhe der Scheinwerfer $h_{SW} = 0,655 \text{ m}$ ⁷⁷. Wie in Abschnitt 2.3.1 beschrieben, existieren auf Landstraßen und im Stadtgebiet Wannenzentren mit Radien $R_v \leq 1000 \text{ m}$. Anhand des Diagramms wird ersichtlich, dass solche Wannenzentren die geometrische Leuchtweite auf weniger als 30 m reduzieren.

Da in einer Wanne die hohen Lichtstärken eines Scheinwerfers unterhalb der Hell-Dunkel-Grenze eine kleinere Fläche beleuchten als auf einer ebenen Straße, steigen auf der Fahrbahnoberfläche im Nahbereich die Beleuchtungsstärken und damit die zum Fahrer reflektierten Leuchtdichten.

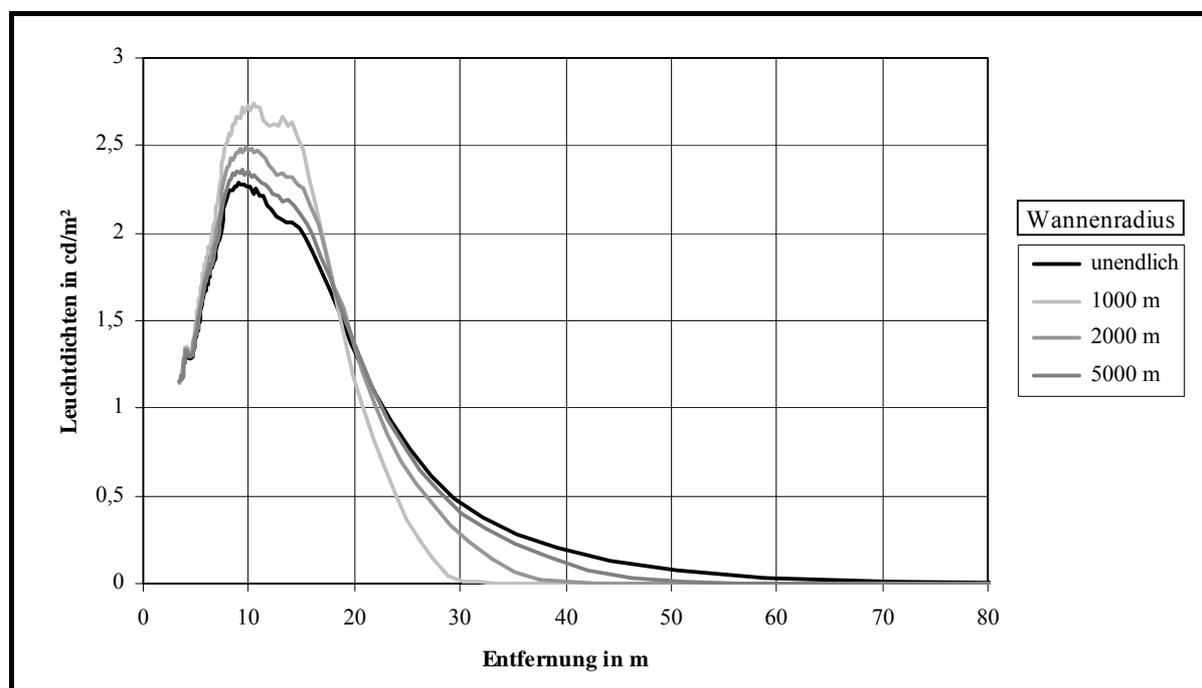


Bild 2.18: Fahrbahnleuchtdichten in Wannen und auf einer ebenen Straße

Dieser Effekt wird anhand Bild 2.18 verdeutlicht, welches die Leuchtdichteverteilung bezogen auf die Entfernung zum Fahrzeug für eine ebene Straße und für verschiedene Wannenzentren darstellt⁷⁸. Hier ist zu erkennen, dass mit abnehmendem Wannenzentrum die reflektierten Leuchtdichten der Fahrbahnoberfläche im Nahbereich vor dem Fahrzeug ansteigen. Gleichzeitig wird der hell beleuchtete Bereich vor dem Fahrzeug kleiner. Beide Veränderungen im Leuchtdichteverlauf der Fahrbahnoberfläche bewirken eine Konzentration

⁷⁷ Die angegebenen Werte stammen von einem BMW der 5er Baureihe (E60) mit Xenon-Scheinwerfer.

⁷⁸ Genaue Angaben zur Berechnung der Fahrbahnleuchtdichten mit Hilfe einer Simulationssoftware befinden sich in Abschnitt 8.4 ab Seite 162.

des Blickverhaltens auf den hellen Nahbereich sowie eine Adaptation des Auges an die höheren Leuchtdichten. Bei Nacht können dadurch dunkle Objekte auf der Fahrbahn außerhalb des hellen Bereichs nicht mehr rechtzeitig erkannt werden. Diese Vermutung wird von Damasky und Huhn bestätigt⁷⁹, die den Einfluss der Leuchtdichten im Fahrzeugvorfeld auf die Schwellenleuchtdichten von Probanden untersuchten und ein Anstieg der Schwellenleuchtdichten mit zunehmenden Vorfeldleuchtdichten nachwiesen.

Die Wahrnehmungsbedingungen des Gegenverkehrs werden durch eine Wanne nicht nachteilig beeinflusst. Das entgegenkommende Fahrerrauge befindet sich während einer Begegnungssituation immer im dunklen Bereich der Abblendlichtverteilung oberhalb der Hell-Dunkel-Grenze.

Diese Aussage gilt jedoch nicht, wenn sich Fahrzeuge auf **Kuppen** begegnen. Wie Bild 2.19 zeigt, steigt die geometrische Leuchtweite mit sinkendem Kuppenradius. Bei der oben angegebenen Anbauhöhe und Grundeinstellung der Scheinwerfer trifft ab einem Radius $R \leq 13000 \text{ m}$ die Hell-Dunkel-Grenze nicht mehr auf die Fahrbahnoberfläche, sodass die geometrische Leuchtweite unendlich groß wird.

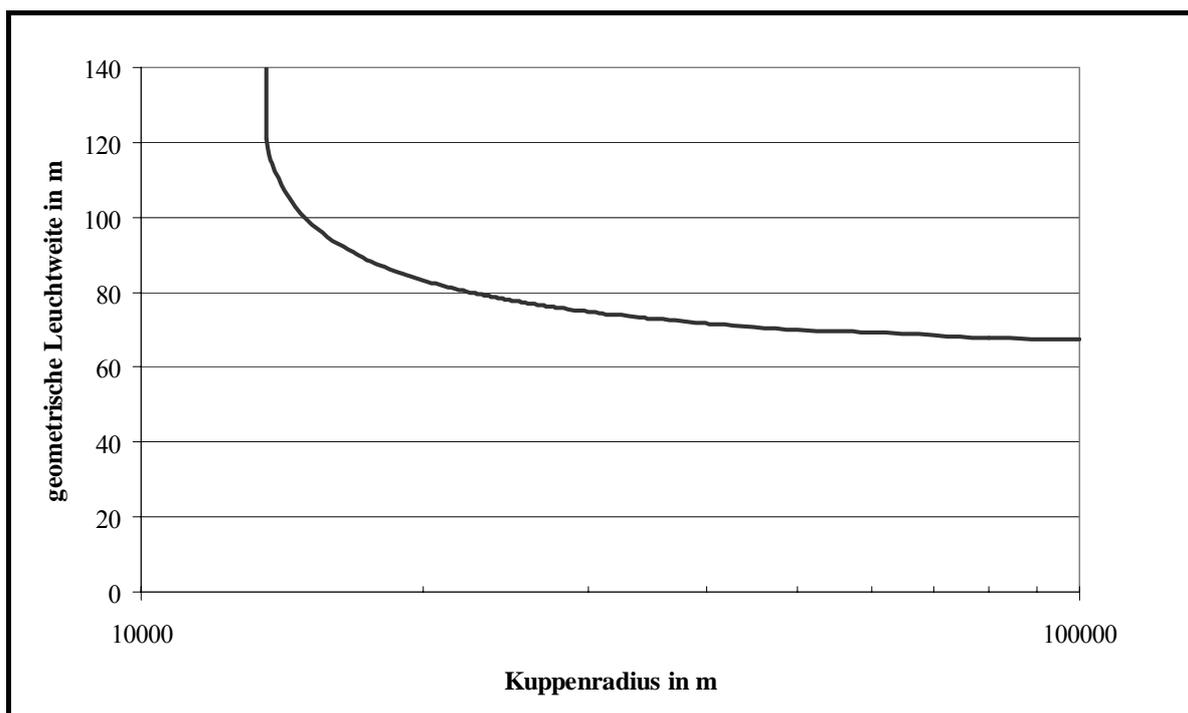


Bild 2.19: Abhängigkeit der geometrischen Leuchtweite vom Kuppenradius

⁷⁹ DAMASKY 1995 [23], S. 20 ff. und HUHN 1998 [61], S. 86 ff.

Daher befindet sich bei engen Kuppenradien das entgegenkommende Fahrerauge während der Annäherung zum Teil im Bereich hoher Lichtstärken unterhalb der Hell-Dunkel-Grenze (siehe Bild 2.20).

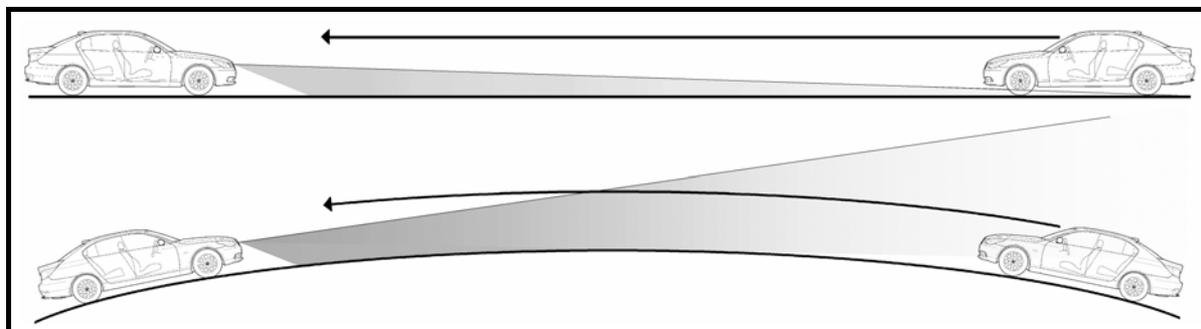


Bild 2.20: Geometrische Leuchtweite in der Ebene und auf einer Kuppe

Dabei entstehen am entgegenkommenden Fahrerauge hohe Beleuchtungsstärken, die zur Blendung führen. Wie stark diese Blendung ist, zeigen die berechneten Augenbeleuchtungsstärken in Bild 2.21⁸⁰.

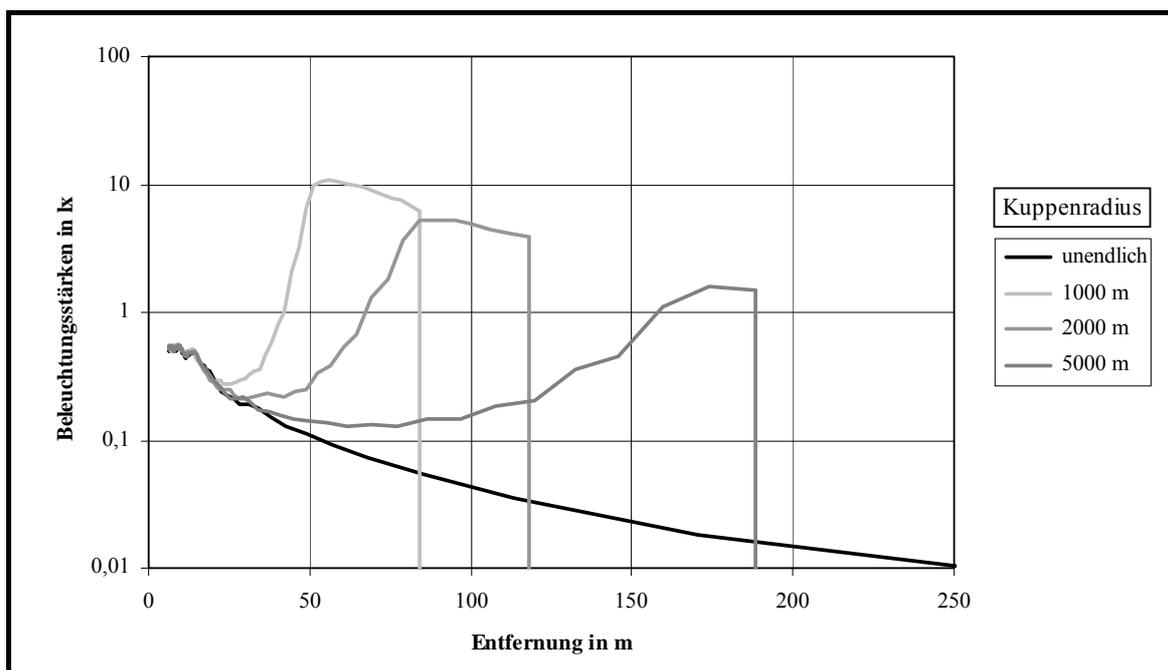


Bild 2.21: Beleuchtungsstärken am entgegenkommenden Fahrerauge

⁸⁰ Genaue Angaben zur Berechnung der Augenbeleuchtungsstärken mit Hilfe einer Simulationssoftware befinden sich in Abschnitt 8.4 ab Seite 162.

Auf einer Kuppe mit Radius $R_v = 1000 \text{ m}$ steigen die Beleuchtungsstärken E_A an den Augen des Gegenverkehrs auf etwa 10 lx bei einer Entfernung von rund 50 m . In dieser Entfernung betragen bei einer Begegnung auf einer ebenen Straße die Augenbeleuchtungsstärken nur $0,1 \text{ lx}$.

Die senkrechte Flanke im Verlauf der Beleuchtungsstärken während einer Begegnung auf Kuppen entsteht aufgrund der Abschattung der Scheinwerfer durch die Fahrbahnoberfläche. Das heißt, in größeren Entfernungen kann der Fahrer noch nicht in die Scheinwerfer des entgegenkommenden Fahrzeugs schauen.

Nicht nur die Wahrnehmung des entgegenkommenden Verkehrs wird durch die Kuppen beeinträchtigt, auch für den Fahrer selbst verschlechtern sich die Wahrnehmungsbedingungen. Zwar bewirkt eine Erhöhung der geometrischen Leuchtweite auf Kuppen eine größere beleuchtete Fläche auf der Fahrbahn, jedoch sinken dort im Durchschnitt die vorhandenen Leuchtdichten (siehe Bild 2.22).

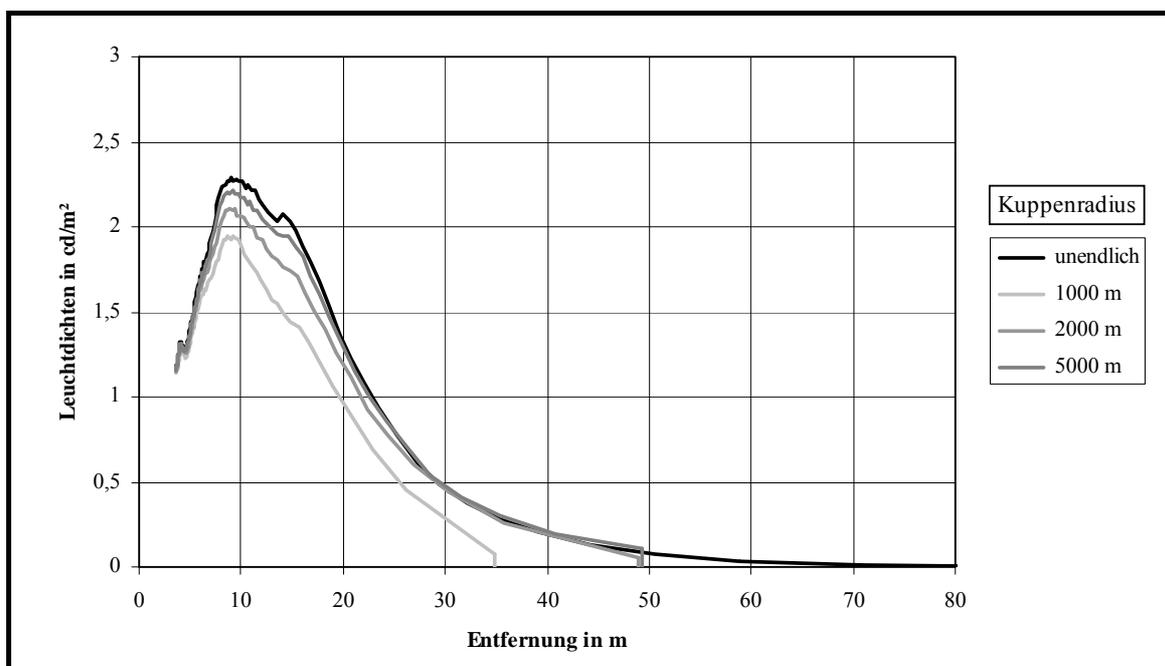


Bild 2.22: Fahrbahnleuchtdichten auf Kuppen und einer ebenen Straße

Wie in Abschnitt 2.1.1 beschrieben, bewirken geringere Leuchtdichten einen höheren Schwellenkontrast. Die Wahrnehmung von Objekten mit geringem Kontrast zur Fahrbahn wird dadurch erschwert.

2.4 Verbesserungspotential durch vertikale Anpassung der Lichtverteilung

Wie in Abschnitt 2.3.2 dargestellt, verschlechtern Wannen und Kuppen die Wahrnehmungsbedingungen beim nächtlichen Fahren. Zusammengefasst entstehen durch vertikale Kurven in der Straße folgende Nachteile für die Verkehrsteilnehmer:

- In Wannen reduziert sich die geometrische Leuchtweite der Abblendlichtverteilung. Damit wird die Wahrnehmung von Objekten auf der Fahrbahn erschwert.
- Kuppen führen zu hohen Beleuchtungsstärken am entgegenkommenden Fahrerrauge und bewirken dessen Blendung.

Bild 2.23 zeigt, wie durch eine vertikale Anpassung der Lichtverteilung an die Straßenform die genannten Nachteile vermindert werden könnten. Daraus lassen sich nachstehende Hypothesen ableiten:

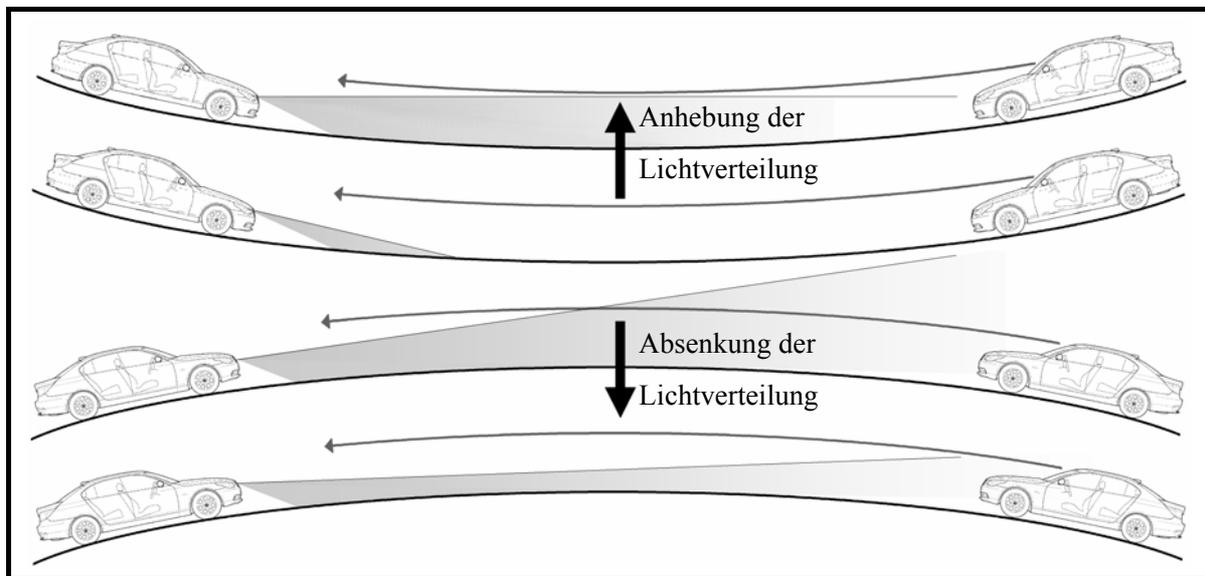


Bild 2.23: Anpassung der Lichtverteilung an Wannen und Kuppen

- Eine **Anhebung der optischen Scheinwerferachse** bewirkt ein Ansteigen der Hell-Dunkel-Grenze vor dem Fahrzeug. Dadurch können eine Abnahme der geometrischen Leuchtweite in **Wannen** sowie ein Anstieg der Leuchtdichten im Nahbereich vor dem Fahrzeug verhindert werden. Die genannten Nachteile für die Wahrnehmung des Fahrers werden dadurch möglicherweise reduziert.
- Durch eine Beschränkung der Scheinwerferanhebung in Wannen können die Wahrnehmungsbedingungen des Fahrers verbessert werden, ohne dabei den Gegenverkehr stärker zu blenden als bei einer Begegnung auf einer ebenen Straße.
- Auf **Kuppen** verkleinert sich durch **Absenken der optischen Scheinwerferachse** der Zeitraum, innerhalb dessen sich das entgegenkommende Fahrerrauge während einer

Begegnungssituation im Bereich hoher Lichtstärken unterhalb der Hell-Dunkel-Grenze befindet. Dadurch kann sowohl die Höhe als auch die Dauer der Blendimpulse verringert werden.

- Bei einer optimalen Absenkung der Hell-Dunkel-Grenze auf Kuppen kann die Blendung des Gegenverkehrs reduziert werden, ohne die Wahrnehmungsbedingungen des Fahrers im Vergleich zu den Bedingungen auf einer ebenen Straße zu verschlechtern.

Zur Überprüfung der Hypothesen werden die Wahrnehmungsbedingungen für den Fahrer und den Gegenverkehr mit und ohne angepasste Lichtverteilung untersucht. Zu diesem Zweck wird eine Scheinwerfersteuerung nach folgenden Vorgaben entwickelt:

- Die Anpassung der Lichtverteilung erfolgt durch eine Verstellung des Scheinwerfers um die Querachse. Dies bedeutet, dass die Neigung der optischen Scheinwerferachse verändert wird.
- In Wannen soll die optische Scheinwerferachse angehoben werden, um dort die Wahrnehmungsbedingungen für den Fahrer zu verbessern.
- Die Anhebung der optischen Scheinwerferachse in Wannen darf nicht zur Blendung des Gegenverkehrs führen. Daher wird die Anhebung der Lichtverteilung soweit eingeschränkt, dass die Hell-Dunkel-Grenze immer unterhalb der Ortslinie des entgegenkommenden Fahrerauges bleibt.
- Auf Kuppen soll die optische Scheinwerferachse abgesenkt werden, um die Blendung des Gegenverkehrs zu reduzieren.
- Um eine Verschlechterung der Wahrnehmungsbedingungen des Fahrers zu vermeiden, erfolgt die Absenkung der Hell-Dunkel-Grenze auf Kuppen so, dass die geometrische Leuchtweite nicht kürzer wird als auf einer ebenen Straße.
- Der relevante Bereich für eine Anpassung der Lichtverteilung an vertikale Krümmungen wird auf Radien $R_v \geq 1000 \text{ m}$ eingeschränkt, da engere Kuppen- und Wannenradien nur einen sehr geringen Anteil an der Häufigkeitsverteilung der vertikalen Straßenkrümmungen besitzen.
- Das System zur Anpassung der Lichtverteilung an die vertikale Straßenkrümmung soll so weit wie möglich aus vorhandenen Komponenten (Sensoren, Fahrzeuginfrastruktur, Scheinwerfer) bestehen.
- Die Scheinwerfer sollen in der vertikalen Ebene so ruhig bewegt werden, dass der Fahrer die Bewegungen kaum bewusst wahrnimmt und nicht davon irritiert wird.

- Die Anpassung der Lichtverteilung an die Straßengeometrie erfolgt nur für Kuppen und Wannen, nicht jedoch für Bodenwellen⁸¹.
- Die Wirkung der angepassten Lichtverteilung, insbesondere die erwarteten Verbesserungen bei der Wahrnehmung im nächtlichen Straßenverkehr auf Kuppen und in Wannen soll mit Hilfe von Versuchen belegt werden. Dazu werden Simulationsläufe ausgewertet sowie Untersuchungen zur Objekterkennung, zum Blickverhalten und zur Blendung sowohl im Labor als auch im Straßenverkehr durchgeführt.

In Bild 2.24 sind die Komponenten der Scheinwerferssteuerung zur Anpassung der Lichtverteilung an vertikale Krümmungen dargestellt. Wie bei solchen mechatronischen Systemen üblich, sind darin Sensoren, Controllerelemente und Aktoren enthalten⁸².

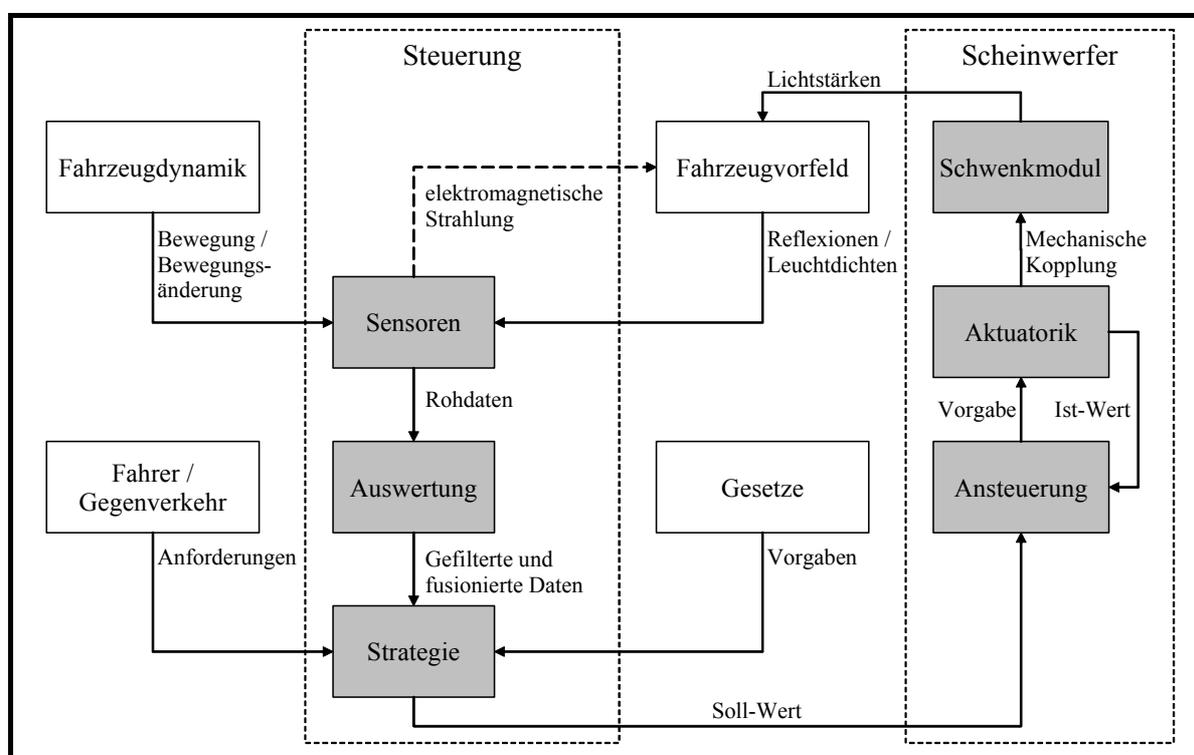


Bild 2.24: Systemübersicht der Scheinwerfersteuerung

⁸¹ Bodenwellen regen die Fahrzeugkarosserie zu kurzen Nickbewegungen an und beeinflussen daher nur kurzfristig die Wirkung der Abblendlichtverteilung (HUHN 1998 [61], S. 103). Eine Anpassung der Lichtverteilung an die Fahrzeugnickbewegungen, welche durch Bodenwellen verursacht werden, setzt schnelle und häufige Bewegungen der Scheinwerfer voraus. Erfolgt die Verstellung der Scheinwerfer nicht in Echtzeit, kann die Steuerung eine unruhige, sich ständig bewegende Lichtverteilung zur Folge haben und dadurch den Fahrer irritieren. Eine Scheinwerfersteuerung in Echtzeit erfordert einen sehr hohen technischen Aufwand.

⁸² WALLASCHEK 1995 [118], S. 36 und EICHHORN/LACHMAYER 1998 [38], S. 58 ff.

Mit Hilfe von **Sensoren** wird die vertikale Krümmung der Straße gemessen. Je nach verwendetem Sensorsystem werden dazu entweder die Bewegungen bzw. Bewegungsänderungen des Fahrzeugs ausgewertet oder das Fahrzeugvorfeld erfasst. Die Sensoren zur Bestimmung der Krümmung im Fahrzeugvorfeld senden entweder elektromagnetische Strahlung aus und messen deren Reflexionen oder sie erfassen die reflektierten Leuchtdichten der vom Scheinwerfer abgestrahlten Lichtstärken. Im letzten Fall besitzt das System einen geschlossenen Regelkreis, ansonsten ist es eine reine Steuerung. In Kapitel 3 folgt eine nähere Beschreibung der Sensoren und ihrer Eignung zur Steuerung der Scheinwerfer.

Die Daten der Sensoren rauschen, driften und sind bei der Umfelderkennung nicht sicher. Aus diesem Grund müssen sie im Rahmen der **Auswertung** gefiltert und plausibilisiert werden. Redundante Daten mehrerer Sensoren werden zu einem Signal fusioniert.

Die **Strategie** bestimmt aufgrund der sensierten Daten den Sollwert zur Verstellung des Scheinwerfers. Dabei müssen sowohl die Forderungen des Fahrers und des Gegenverkehrs berücksichtigt als auch gesetzliche Vorgaben erfüllt werden. Die Inhalte der Steuerstrategie, insbesondere die Algorithmen zur Berechnung des Sollwertes werden in Kapitel 4 beschrieben.

Das bewegliche **Schwenkmodul** des Scheinwerfers ermöglicht die Veränderung der Lichtverteilung. Es wird von einem **Aktuator** über eine mechanische Kopplung angetrieben. Die **Ansteuerung** vergleicht den aktuellen Ist-Zustand des Aktuators mit dem Sollwert und verstellt den Aktuator bei Abweichungen. Für das System zur Anpassung der Lichtverteilung an die vertikale Straßenkrümmung werden ohne Änderungen die Scheinwerfer eingesetzt, welche heute bereits für die dynamische Leuchtweitenregulierung verwendet werden (siehe Abschnitt 2.2.3)

3 Sensorsystem zur Ermittlung der vertikalen Straßenkrümmung

Voraussetzung für eine vertikale Anpassung der Lichtverteilung an die Straßengeometrie sind Informationen über die Straßenkrümmung. Diese Informationen werden von Sensoren bereitgestellt. Je nachdem wie die Sensoren die Informationen erfassen, werden drei Grundprinzipien unterschieden:

- Ein Fahrzeug folgt zwangsläufig dem vertikalen Straßenverlauf. Daher lässt sich durch die **Auswertung der Fahrzeugdynamik** aus den Bewegungen des Fahrzeugs im Raum die Krümmung der Straße ermitteln.
- Mit Hilfe von Sensoren, die zur **Erfassung der Fahrzeugumgebung** geeignet sind, kann die vertikale Straßenkrümmung vom Fahrzeug aus gemessen werden.
- Verfügt das Fahrzeug über ein System zur exakten Ortsbestimmung, dann lassen sich damit die auf einem Medium **gespeicherten Krümmungsdaten** der Straße dem aktuell gefahrenen Streckenabschnitt zuordnen.

In den folgenden drei Abschnitten werden die genannten Prinzipien zur Erfassung der Straßenkrümmung erläutert und ihre Eignung für eine Scheinwerfersteuerung diskutiert.

3.1 Auswertung der Fahrzeugdynamik

Üblicherweise werden Drehratensensoren im Fahrzeug so eingebaut, dass sie Drehbewegungen des Fahrzeugs um die Hochachse messen. Solche Gierratensensoren liefern Daten für die dynamische Stabilitätskontrolle (DSC, ESP) und für das Navigationssystem⁸³.

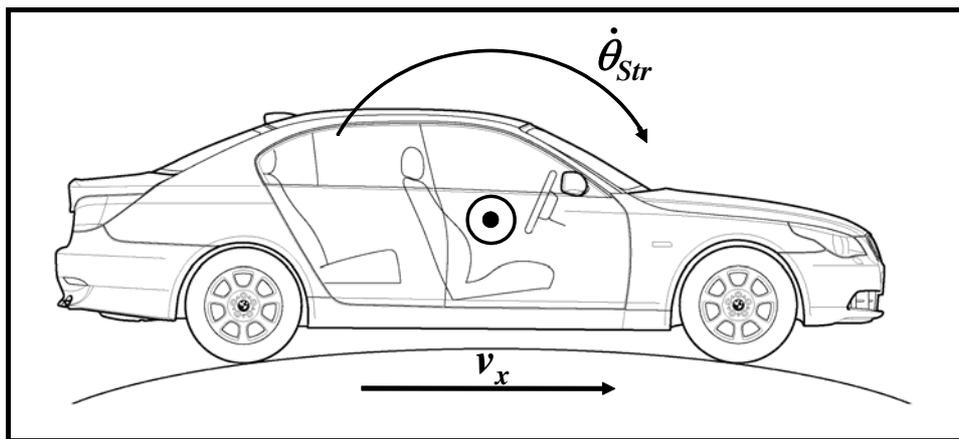


Bild 3.1: Nickrate des Fahrzeugs beim Überfahren einer Kuppe

⁸³ MÖRBE/ILLING 2001 [87], S. 57

Ein Drehratensensor lässt sich auch so in das Fahrzeug einbauen, dass er die Drehbewegungen des Fahrzeugs um die Querachse, also die Nickrate erfasst. Er misst dabei die Nickbewegungen $\dot{\theta}_{Sens}$ der Karosserie im Raum bzw. gegenüber dem Horizont. Wie Bild 3.1 verdeutlicht, dreht sich das Fahrzeug mit $\dot{\theta}_{Str}$ um die Querachse, wenn es über eine Kuppe oder durch eine Wanne fährt.

Der Nickratensensor detektiert jedoch auch Drehbewegungen um die Querachse, die nicht durch die Straßenkrümmung verursacht werden. Solche Drehbewegungen um die Sensorachse entstehen direkt durch Nickbewegungen der gefederten Fahrzeugkarosserie gegenüber der Fahrbahnoberfläche und indirekt durch die Seitenneigung und Gierbewegung des Fahrzeugs bei Kurvenfahrt. Beide Effekte müssen mit zusätzlichen Sensoren erkannt und die falschen Werte aus den Daten des Nickratensensors zur Bestimmung der Straßenkrümmung gefiltert werden.

3.1.1 Nickbewegungen der Fahrzeugkarosserie

Die Karosserien gefederter Fahrzeuge ohne aktiven Nickausgleich werden im Fahrbetrieb zu Nickbewegungen angeregt, welche den Winkel der Fahrzeuglängsachse gegenüber der Fahrbahnoberfläche verändern (siehe Bild 3.2). Auslöser für solche Nickbewegungen sind Fahrbahnebenheiten sowie Brems- und Beschleunigungsmanöver.

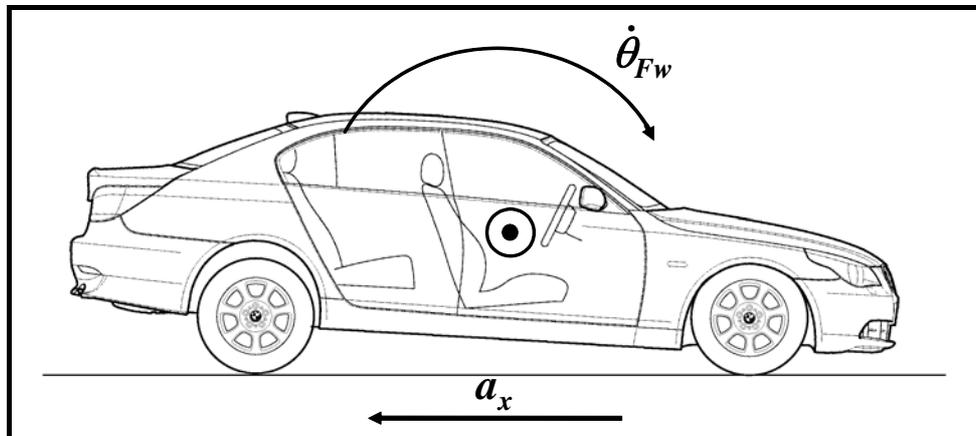


Bild 3.2: Nickrate des Fahrzeugs beim Bremsen

Diese Nickbewegungen $\dot{\theta}_{Fw}$ gegenüber der Fahrbahnoberfläche addieren sich zu den Drehbewegungen um die Querachse beim Fahren durch vertikale Kurven $\dot{\theta}_{Str}$:

$$\dot{\theta}_{Sens} = \dot{\theta}_{Str} + \dot{\theta}_{Fw} \quad (3.1)$$

Eine Möglichkeit, die störenden Nickbewegungen zu bestimmen und aus den Daten des Nickratensensors herauszufiltern, bieten Höhenstandssensoren im Fahrwerk. Diese messen die Höhe der Karosserie über der Fahrbahn sowohl an der Vorderachse z_v als auch an der

Hinterachse z_h ⁸⁴. Aus den Werten der beiden Sensoren und dem Radstand l berechnet sich der Nickwinkel nach folgender Formel:

$$\theta_{Fw} = \arctan \frac{z_h - z_v}{l}; \quad \dot{\theta}_{Fw} = \frac{d\theta_{Fw}}{dt} \quad (3.2)$$

Die zeitliche Änderung des Nickwinkels θ_{Fw} ergibt die Nickrate $\dot{\theta}_{Fw}$.

Die Federung des Fahrzeugs filtert einen großen Teil der Fahrbahnunebenheiten und verhindert somit ständige Nickbewegungen der Karosserie. Die Unebenheiten werden trotzdem von den Höhenstandssensoren erfasst und verursachen ein Rauschen der Sensorsignale. Daher müssen die Signale der Höhenstandssensoren gefiltert werden. Optimal hierfür ist ein Filter, der das Feder-Dämpfer-Verhalten des Fahrwerks nachbildet.

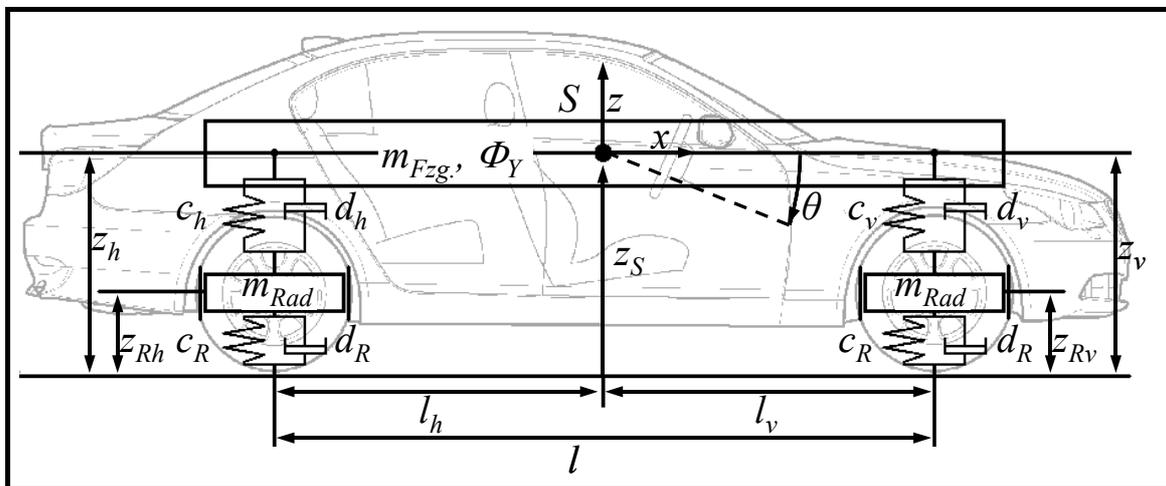


Bild 3.3: Feder-Dämpfer-Modell des Fahrwerks

Ein Beispiel für einen solchen Filter ist der Kalmanfilter mit einem integrierten Ersatzmodell des Fahrzeugs⁸⁵. In diesem Modell werden die Karosserie und das Fahrgestell als starrer Körper betrachtet. Verformungen und Torsionen, welche bei einem realen Fahrzeug auftreten, werden nicht berücksichtigt. Das Federverhalten des Fahrwerks und der Räder wird als Reihenschaltung von Masse-, Feder- und Dämpferelementen modelliert. Das Modell besitzt zehn Freiheitsgrade, die sich aus den Vertikalbewegungen der vier Räder und den sechs Freiheitsgraden der Karosserie ergeben. Diese kann sich rotatorisch um die drei Raumachsen

⁸⁴ Die Höhenstandssensoren messen den Abstand der Achse zur Karosserie. Die Höhe der Karosserie gegenüber der Fahrbahnoberfläche wird daraus über eine Kennlinie bestimmt. Diese Kennlinie wird für jeden Fahrzeugtyp individuell erzeugt und berücksichtigt auch das Einfedern z_{Rv} und z_{Rh} der Reifen.

⁸⁵ Eine genaue Beschreibung des Fahrwerkmodells, des Kalmanfilters und der Integration des Modells in den Filter befindet sich im Anhang 8.3 ab Seite 152.

sowie translatorisch entlang der drei Raumrichtungen bewegen⁸⁶. Zur Beschreibung der Hub- und Nickbewegungen (Vertikaldynamik) des Fahrzeugs genügt ein Einspur-Modell wie es in Bild 3.3 dargestellt ist. Trotz der Vereinfachungen in der Modellbeschreibung lässt sich damit die Vertikaldynamik eines realen Fahrzeugs bei Anregungen durch Fahrbahnebenheiten in ausreichender Genauigkeit nachbilden⁸⁷.

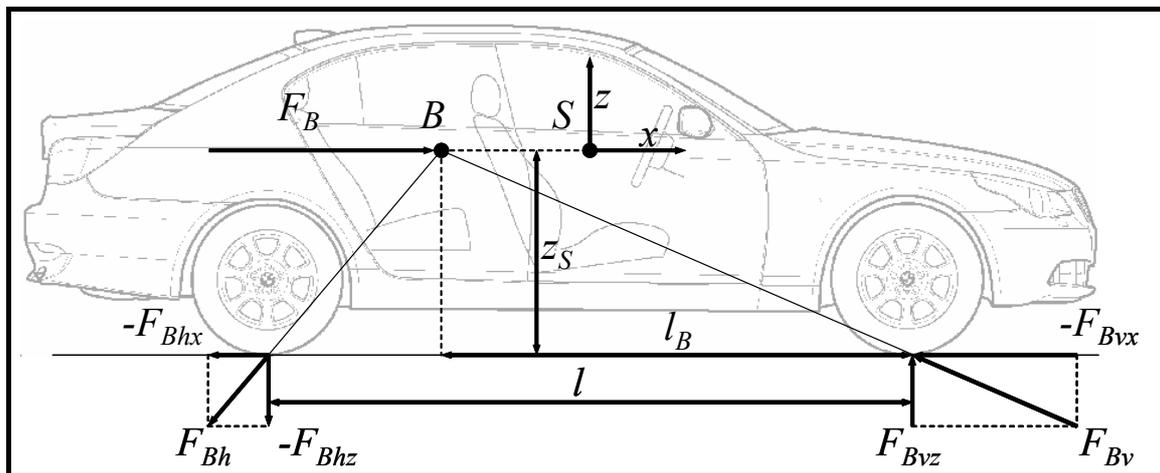


Bild 3.4: Zusätzliche Kräfte beim Bremsen

Beim Bremsen und Beschleunigen greifen am Fahrzeug zusätzliche Kräfte an. Wie Bild 3.4 zeigt, wirken beim Verzögern des Fahrzeugs die Bremskräfte F_{Bvx} und F_{Bhx} an den Radaufstandspunkten entgegen der Fahrtrichtung. Am Bremsmittelpunkt B entsteht dabei die Massenverzögerungskraft F_B . Die Lage des Bremsmittelpunktes B hängt von der Bremskraftverteilung ab. Je größer der Anteil α der Bremskraft an den vorderen Rädern ist, desto weiter hinten liegt der Bremsmittelpunkt im Fahrzeug:

$$F_{Bvx} = -\alpha \cdot F_B; \quad F_{Bhx} = -(1-\alpha) \cdot F_B \quad \text{mit } \alpha \in [0,1] \quad (3.3)$$

$$l_B = \alpha \cdot l \quad (3.4)$$

Die Höhe des Bremsmittelpunktes entspricht der Schwerpunktshöhe z_S . Aufgrund der unterschiedlichen Höhe der Massenverzögerungskraft und der Bremskräfte an den Radaufstandspunkten entsteht ein äußeres Nickmoment am Fahrzeug, welches eine Radlastverlagerung F_{Bvz}/F_{Bhz} von der hinteren zur vorderen Achse bewirkt⁸⁸:

⁸⁶ GÄRTNER/SAEGER 2003 [44], S. 5 f.

⁸⁷ ZOMOTOR 1987 [127], zitiert in BERTRAM/HILLER/OPGEN-RHEIN et al. 2000 [10], S. 1110

⁸⁸ Ein Beschleunigungsvorgang verursacht Zusatzkräfte mit umgekehrten Vorzeichen. Bei Fahrzeugen mit Einachsantrieb befindet sich der Beschleunigungsmittelpunkt über der nicht angetriebenen Achse.

$$F_{Bvz} = +F_B \cdot \frac{z_S}{l}; \quad F_{Bhz} = -F_B \cdot \frac{z_S}{l} \quad (3.5)$$

Aus den horizontal gerichteten Bremskräften und der vertikal wirkenden Radlastverlagerung entstehen an den Radaufstandspunkten die schräggerichteten resultierenden Kräfte F_{Bv} und F_{Bh} ⁸⁹.

Die vertikalen Kräfte F_{Bvz} und F_{Bhz} der Radlastverlagerung wirken am oben aufgeführten Ersatzmodell des Fahrzeugs (siehe Bild 3.3) direkt auf die Feder-Dämpfer-Elemente. Daraus resultiert ein Einfedern der Vorderachse sowie ein Ausfedern der Hinterachse und somit eine Nickbewegung des Fahrzeugs. Die Fahrwerke moderner Fahrzeuge sind jedoch so konstruiert, dass sie auch bei starken Brems- und Beschleunigungsmanövern nur zu geringen Nickbewegungen angeregt werden. Erreicht wird dieses Verhalten mit Längslenkern im Fahrwerk, die einen Teil der resultierenden Kräfte F_{Bv} und F_{Bh} an den Radaufstandspunkten aufnehmen. Dadurch werden die vertikalen Kräfte auf die Feder-Dämpfer-Elemente verringert sowie starke Nickbewegungen verhindert. Beim Bremsen wird dieser Effekt progressiver Bremsnickausgleich genannt, da mit zunehmendem Nickwinkel der Karosserie der Anteil der Kräfte ansteigt, die von den Längslenkern aufgenommen werden. Beim Beschleunigen kann mit den Längslenkern ein starkes Ein- oder Ausfedern nur an angetriebenen Achsen verhindert werden.

Um das tatsächliche Nickverhalten moderner Fahrzeuge beim Bremsen und Beschleunigen auch im Feder-Dämpfer-Modell nachzubilden, wird es um einen Längslenker an jeder Achse erweitert. Diese Längslenker nehmen einen Teil der resultierenden Kräfte F_{Bv} und F_{Bh} an den Radaufstandspunkten auf. Dadurch reduzieren sie die vertikalen Kräfte auf die Feder-Dämpfer-Elemente und verringern die Nickbewegungen⁹⁰.

Aus dem aktuellen Zustand des Modells und den äußeren Einflussgrößen schätzt der zeitdiskrete Kalmanfilter anhand der Feder- und Dämpfungseigenschaften des Fahrwerks den nächsten Zustand. Der Zustand des Modells wird mit der Hubhöhe und der Hubgeschwindigkeit sowie mit dem Nickwinkel und der Nickwinkelgeschwindigkeit beschrieben. Die Zustandsschätzung wird durch einen Vergleich mit den gemessenen Werten optimiert. Als Messwerte dienen dabei die Daten der Höhenstandssensoren. Die zusätzlichen Kräfte beim Bremsen und Beschleunigen werden aus den Signalen eines Beschleunigungssensors, welcher die Beschleunigung in X-Richtung erfasst, und aus den geometrischen Daten des Fahrwerks bestimmt. Sie wirken als äußerer Einfluss auf das Modell. Der Filter berücksichtigt zudem

⁸⁹ MATSCHINSKY 1987 [85], S. 114

⁹⁰ Eine Darstellung der Kräfte und Momente auf die Längslenker und ihre Auswirkungen auf die Vertikaldynamik der Karosserie bei Längsbeschleunigung des Fahrzeugs befindet sich in Abschnitt 8.3.2 im Anhang ab Seite 153.

Ungenauigkeiten in der Modellbeschreibung und Fehler bei der Messung der Höhenstände im Fahrwerk sowie als Störgrößen die Bodenwellen⁹¹.

Als Ergebnis liefert der Kalmanfilter eine gute Abschätzung der Hub- und Nickbewegungen des Fahrzeugs bei Anregung durch Fahrbahnunebenheiten und Beschleunigungen. Die Differenz aus den Nickbewegungen $\dot{\theta}_{Fw}$ der Fahrzeugkarosserie und den Daten des Nickratensensors $\dot{\theta}_{Sens}$ ergibt die Drehbewegungen des Fahrzeugs um die Querachse $\dot{\theta}_{Str}$, welche durch vertikale Kurven verursacht werden:

$$\dot{\theta}_{Str} = \dot{\theta}_{Sens} - \dot{\theta}_{Fw} \quad (3.6)$$

Damit bietet der Kalmanfilter eine gute Möglichkeit, unerwünschte Daten, die durch Nickbewegungen auf der Straße entstehen, aus dem Signal des Nickratensensors zur Bestimmung der vertikalen Straßenkrümmung zu eliminieren.

3.1.2 Gier- und Wankbewegung bei Kurvenfahrt

Ohne Seitenneigung des Fahrzeugs auf der Fahrbahn (Wankwinkel $\varphi = 0$) stehen die Gierachse und die Nickachse senkrecht zueinander (siehe Bild 3.5 a). Dadurch beeinflussen sich die Drehbewegungen um beide Achsen nicht.

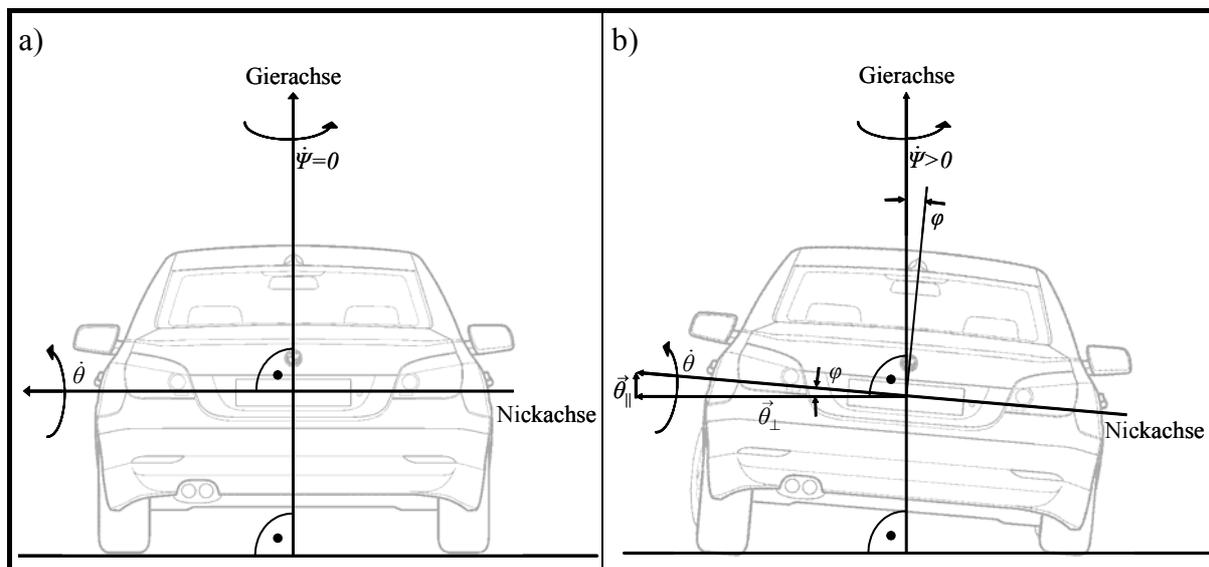


Bild 3.5: Einfluss der Gierrate auf die Nickrate bei Wankwinkel $\varphi \neq 0$

Beim Fahren durch eine horizontale Kurve dreht sich das Fahrzeug um seine Hochachse. Wie in Bild 3.5 b dargestellt, neigt sich die Fahrzeugkarosserie außerdem zur Seite.

⁹¹ WENZEL 2000 [121], S. 66 f. sowie WENZEL 2000 [122], S. 50 ff.

Die Gierachse verändert bei einer Kurvenfahrt ihre Ausrichtung nicht, sie steht immer senkrecht zur Fahrbahnoberfläche. Da der Nickratensensor fest mit der Karosserie verbunden ist und sich zur Seite neigt, steht dessen Sensorachse nicht mehr orthogonal zur Gierachse, sondern in einem Winkel, der um den Wankwinkel φ kleiner ist als 90° . Der Vektor $\vec{\theta}$ der Sensorachse des Nickratensensors lässt sich daher in zwei Vektoren zerlegen, die senkrecht und parallel zur Gierachse ausgerichtet sind. Über den zur Gierachse parallelen Vektor $\vec{\theta}_{\parallel}$ erfasst der Nickratensensor $\dot{\theta}_{\text{Kurve}}$ auch einen Teil der Gierbewegungen $\dot{\psi}$:

$$\dot{\theta}_{\text{Kurve}} = \dot{\psi} \cdot \sin \varphi \quad (3.7)$$

Dies bedeutet, dass der Nickratensensor bei jeder Kurvenfahrt mit einer zur Seite geneigten Karosserie Signale erzeugt, die dem Überfahren einer Kuppe entsprechen.

Dieser Effekt lässt sich kompensieren, wenn sowohl die Gierrate $\dot{\psi}$ als auch der Wankwinkel φ bekannt sind. Während die Gierrate bei Fahrzeugen mit dynamischer Stabilitätskontrolle (DSC, ESP) auf dem Fahrzeug CAN-Bus verfügbar ist, sind Sensoren zur Messung des Wankwinkels üblicherweise nicht vorhanden.

Ein mögliches Ersatzsignal für den Wankwinkel stellt die Querschleunigung a_y dar. Sie verursacht nämlich zum größten Teil das Wanken der Karosserie im Fahrbetrieb⁹² und lässt sich nach folgender Formel aus vorhandenen Fahrzeugsignalen wie der Gierrate $\dot{\psi}$ und der Fahrzeuggeschwindigkeit v_x berechnen:

$$a_y = \dot{\psi} \cdot v_x \quad (3.8)$$

Wie die Messpunkte in Bild 3.6 zeigen, ist der Einfluss der Gierrate auf die vom Sensor erfasste Nickrate bei stationärer Kurvenfahrt nahezu linear abhängig von der Querschleunigung. Das Bestimmtheitsmaß der linearen Trendlinie beträgt $0,99$.

Um den Wankwinkel auch im dynamischen Fall zu bestimmen, muss er mit einem Kalmanfilter aus der Querschleunigung geschätzt werden. Zwar ist auch bei diesem Kalmanfilter ein Feder-Dämpfer-Modell des Fahrzeugs integriert⁹³, jedoch beschreibt es nicht das Nickverhalten, sondern das Wankverhalten der Karosserie.

⁹² Ein Nachteil bei der Bestimmung des Wankwinkels anhand des Produkts aus Gierrate und Geschwindigkeit ist, dass eine Seitenneigung der Karosserie auf der Fahrbahn - verursacht durch eine ungleichmäßige Beladung - nicht erkannt wird. Der exakte Wankwinkel lässt sich nur über Höhenstandssensoren an jedem Rad ermitteln.

⁹³ Auf eine Darstellung des Feder-Dämpfer-Modells zur Beschreibung der Wankbewegungen wird verzichtet. Es entspricht weitgehend dem Modell zur Beschreibung der Nickbewegungen. Lediglich das Trägheitsmoment um die Querachse Φ_y wird durch das Trägheitsmoment um die Längsachse Φ_x , der Radstand l durch die Spurweite b und die Feder-Dämpfer-Kräfte der Vorder- und Hinterachse durch die Feder-Dämpfer-Kräfte der linken und rechten Radaufhängungen ersetzt.

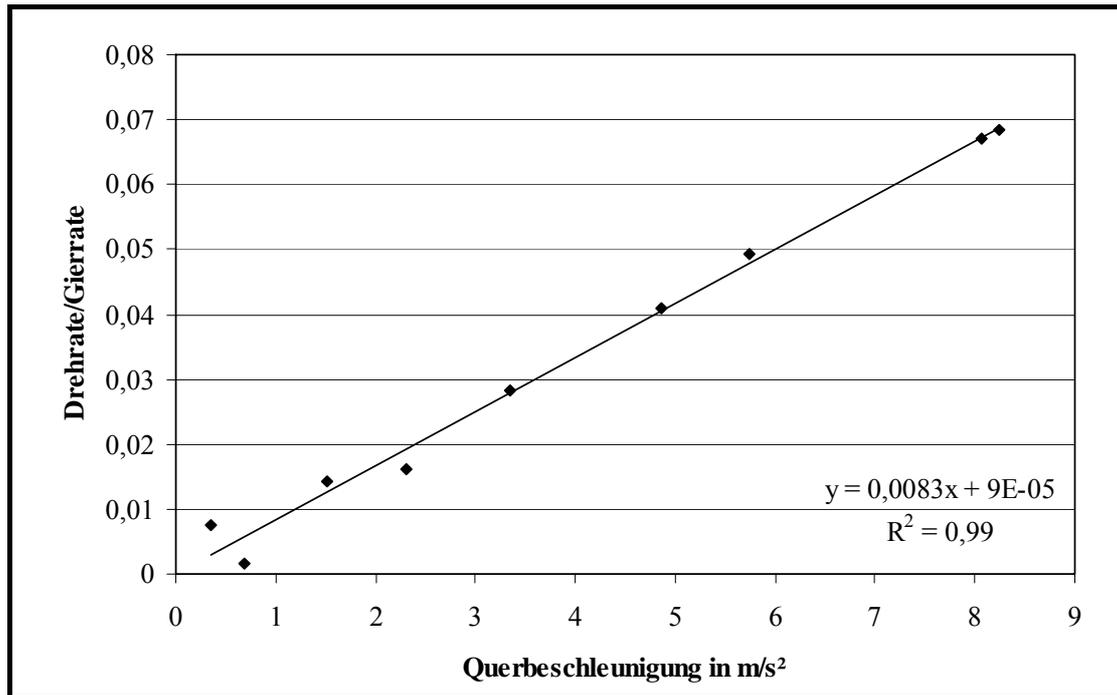


Bild 3.6: Einfluss der Gierrate auf Nickrate bei Querbeschleunigung⁹⁴

Über den Sinus des Wankwinkels und der Gierrate lässt sich nach Formel 3.7 die Nickrate $\dot{\theta}_{\text{Kurve}}$ berechnen, die der Nickratensensor bei Kurvenfahrt auf einer ebenen Straße erfasst. Die tatsächliche vertikale Straßenkrümmung $\dot{\theta}_{\text{Str}}$ ergibt sich daher zu:

$$\dot{\theta}_{\text{Str}} = \dot{\theta}_{\text{Sens}} - \dot{\theta}_{\text{Kurve}} \quad (3.9)$$

3.1.3 Geometriemodell zur Bestimmung der vertikalen Straßenkrümmung

Bei der Berücksichtigung der Nickbewegungen $\dot{\theta}_{\text{Fw}}$ der Fahrzeugkarosserie und des Einflusses $\dot{\theta}_{\text{Kurve}}$ der Gierrate auf die Nickrate beim Kurvenfahren ergibt sich die eigentliche Nickrate $\dot{\theta}_{\text{Str}}$ zur Bestimmung der Straßenkrümmung aus dem Sensorsignal $\dot{\theta}_{\text{Sens}}$ nach folgender Formel:

$$\dot{\theta}_{\text{Str}} = \dot{\theta}_{\text{Sens}} - \dot{\theta}_{\text{Fw}} - \dot{\theta}_{\text{Kurve}} \quad (3.10)$$

Der Quotient aus der Nickrate $\dot{\theta}_{\text{Str}}$ durch die Fahrzeuggeschwindigkeit v_x ergibt die initiale vertikale Straßenkrümmung K_{v0} im Klothoidenmodell:

$$K_{v0} = \frac{\dot{\theta}_{\text{Str}}}{v_x} \quad (3.11)$$

⁹⁴ Die Messungen wurden an einem BMW 5er (E60) durchgeführt.

Die streckengebundene Ableitung K_{v1} der vertikalen Straßenkrümmung beschreibt die Änderung der Fahrbahnkrümmung in der Klothoide:

$$K_{v1} = \frac{dK_{v0}}{ds} \quad (3.12)$$

Mit Hilfe der Klothoidenformel lässt sich die vertikale Straßenkrümmung in verschiedenen Entfernungen d vor dem Fahrzeug schätzen:

$$K_v(d) = K_{v0} + d \cdot K_{v1} \quad (3.13)$$

Die durchschnittliche Fahrbahnkrümmung K_v in einem Bereich bis zur Entfernung d berechnet sich nach folgender Formel:

$$K_v = \frac{\int_0^d K_{v0} + s \cdot K_{v1} ds}{d} \quad (3.14)$$

Dieser Wert dient als Basisgröße zur Verstellung der Scheinwerfer. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Straße als Klothoide angelegt wurde und sich ihre Krümmung innerhalb der Reichweite der Scheinwerfer mit der Entfernung zum Fahrzeug linear verändert.

Wurden beim Bau der Straße die Empfehlungen der Richtlinie zur Anlage von Straßen beachtet, dann existieren Klothoiden zwischen den verschiedenen Krümmungsformen. Wie bereits in Abschnitt 2.3.1 beschrieben, entsprechen nicht alle Strecken im Straßennetz den Vorgaben der Richtlinie und es existieren im realen Straßenverkehr Sprünge in den vertikalen Krümmungen (siehe Bild 3.7). Unter diesen Umständen ist eine Scheinwerfersteuerung in Echtzeit mit diesem Sensorsystem nicht möglich, da sprunghafte Krümmungsänderungen beim Fahren eine verzögerte Anpassung der Scheinwerfer bewirken.

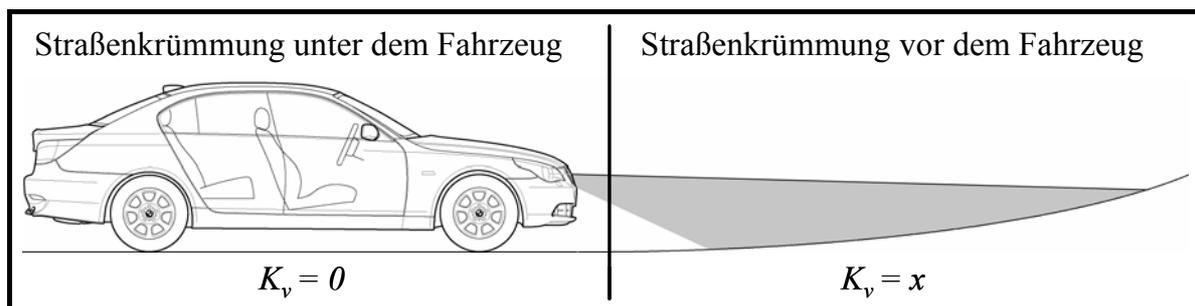


Bild 3.7: Straßenkrümmung vor und unter dem Fahrzeug

Eine Analyse der vertikalen Krümmungsänderungen im zuletzt befahrenen Streckenabschnitt ermöglicht eine Aussage über die Existenz von Klothoiden. Fehlen diese, kann der Regler der adaptiven Scheinwerfersteuerung die Verstellwinkel der Scheinwerfer begrenzen oder die

Funktion abschalten, um Nachteile in den Wahrnehmungsbedingungen durch die verzögerte Anpassung der Lichtverteilung am Ende vertikaler Krümmungen zu verhindern.

Eine Scheinwerfersteuerung, welche auch bei unstetigen Übergängen zwischen vertikalen Krümmungen die Scheinwerfer in Echtzeit optimal einstellen kann, benötigt demnach Sensoren, welche die Fahrzeugumgebung, insbesondere das Fahrzeugvorfeld erfassen.

3.1.4 Plausibilitätsprüfung

Der Sensorcluster der dynamischen Stabilitätskontrolle (DSC, ESP) verfügt in modernen Fahrzeugen neben dem Gierraten- und Querbeschleunigungssensor auch über einen Längsbeschleunigungssensor a_{x1} . Mit diesem Sensor ist es möglich, die Daten des Nickratensensors zur Berechnung der vertikalen Straßenkrümmung auf ihre Korrektheit zu überprüfen. Dazu muss – wie im Folgenden dargestellt – aus dem Signal des Beschleunigungssensors die vertikale Krümmung der Straße bestimmt und mit den Werten verglichen werden, die aus den Daten des Nickratensensors berechnet wurden.

Der Beschleunigungssensor a_{x1} reagiert nicht nur auf Beschleunigungen entlang der Fahrzeuglängsachse, sondern auch auf die Neigung θ des Fahrzeugs gegenüber dem Horizont. Steht zum Beispiel das Fahrzeug in seiner Konstruktionslage auf einer horizontalen Straße, dann wirkt keine Beschleunigung auf den Sensor $a_{x1} = 0 \text{ m/s}^2$. Hängt das Fahrzeug dagegen senkrecht an einem Kranhaken, liefert der Sensor den Messwert $a_{x1} = 1 \text{ g} = 9,81 \text{ m/s}^2$.

Das zeitliche Ableiten der Fahrzeuggeschwindigkeit v_x ergibt ein Signal, das ebenfalls der Längsbeschleunigung $a_{x2} = \dot{v}_x$ entspricht. Dieses Signal ist jedoch unabhängig vom Neigungswinkel θ des Fahrzeugs.

Durch ein Abgleichen der beiden Signale ist die Berechnung der Fahrzeugneigung gegenüber dem Horizont möglich:

$$\theta = \arcsin\left(\frac{a_{x2} - a_{x1}}{g}\right) = \arcsin\left(\frac{dv_x / dt - a_{x \text{ Sensor}}}{g}\right) \quad (3.15)$$

Nach der Subtraktion des Fahrzeugsnickwinkels ergibt sich daraus die Steigung der Fahrbahn:

$$\theta_{Str} = \theta - \theta_{Fw} \quad (3.16)$$

Die Steigungswinkel der Straßen sind üblicherweise gering und ihr Anteil an den gemessenen Beschleunigungswerten des Sensors sehr klein. Die aus den Beschleunigungssignalen berechnete Steigung ist daher sehr ungenau und die daraus bestimmte Fahrbahnkrümmung lässt sich nicht als Parameter zur Steuerung der Scheinwerfer verwenden.

Es ist aber möglich, das Signal zur Plausibilitätsprüfung der Daten aus dem Nickratensensor zu nutzen. Große und langfristige Abweichungen zwischen den Krümmungssignalen aus dem Beschleunigungs- und Nickratensensor deuten auf die Fehlfunktion eines Sensors hin. Durch

eine Überprüfung des Längsbeschleunigungssensors anhand der Daten aus dem differenzierten Geschwindigkeitssignal lässt sich bei einem Fehlverdacht der defekte Sensor eindeutig bestimmen. Die Funktion zur Anpassung der Leuchtweite wird in diesem Fall abgeschaltet.

3.2 Erfassung der Fahrzeugumgebung

Mit der Einführung von Fahrerassistenzsystemen, wie der Einparkhilfe (PDC) oder dem Abstandstempomaten (ACC), wurden erstmals Sensoren im Fahrzeug verwendet, die Informationen aus dem Fahrzeugumfeld erfassen. Die Idee, die Informationen solcher Sensoren auch für die Scheinwerfersteuerung zu nutzen, wird in der Literatur mehrfach beschrieben⁹⁵.

3.2.1 Ultraschallsensoren

Für die Funktion der akustischen Einparkhilfe werden üblicherweise Ultraschallsensoren verwendet. Sie senden Signale im Ultraschallbereich aus und empfangen deren Reflexionen. Aus der Zeitdifferenz zwischen einem gesendeten und empfangenen Signal lässt sich der Abstand von Hindernissen zum Fahrzeug berechnen. Ultraschallsensoren sind jedoch nur im niedrigen Geschwindigkeitsbereich einsetzbar, da beim Fahren Windgeräusche im Ultraschallbereich auftreten, welche die Reflexionen der gesendeten Signale überlagern. Diese Sensoren sind daher zur Scheinwerfersteuerung im normalen Fahrbetrieb ungeeignet.

3.2.2 Radar- und Lidarsensoren

Für den Abstandstempomaten (ACC) wurden zwei Sensorsysteme entwickelt⁹⁶: **Radarsysteme** und **Lidarsysteme**. Wie die Ultraschallsensoren der Einparkhilfe, senden auch diese Sensoren Signale aus und empfangen deren Reflexionen, um den Abstand und die Relativgeschwindigkeit von Objekten im Verkehrsraum zu bestimmen.

Die **Radarsensoren** in automobilen Anwendungen arbeiten im Frequenzbereich um 77 GHz zur Detektion von Objekten in größerer Entfernung. Ein Nahbereichsradar mit Frequenzen um 24 GHz befindet sich in der Entwicklung. Die Bestimmung des Abstands und der Relativgeschwindigkeit der detektierten Objekte erfolgt mit Hilfe zwei verschiedener Radarprinzipien:

- Puls-Doppler-Radar oder
- frequenzmoduliertes Dauerstrichradar.

⁹⁵ LABAHN 2000 [71], S. 36, MÜHLENBERG/KAPHINGST 2001 [89], S. 695, NEUNZIG/LACHMAYER 2002 [93], S. 576, KLASCHE 2003 [64], S.12 u.a.

⁹⁶ EHMANN/NEUNZIG et al. 2001 [37], S. 18

Das Puls-Doppler-Radar sendet Mikrowellenimpulse aus. Die Signale werden von Objekten vor dem Fahrzeug reflektiert und wieder empfangen. Aus der Phasenverschiebung der Signale werden der Abstand und aus der Frequenzverschiebung (Doppler-Effekt) die Relativgeschwindigkeit des Objekts zum Fahrzeug⁹⁷ bestimmt.

Beim frequenzmodulierten Dauerstrichradar wird permanent ein frequenzmoduliertes Mikrowellensignal abgestrahlt. Die Relativgeschwindigkeit wird wie beim Puls-Doppel-Radar mit Hilfe einer Fast-Fourier-Transformation aus dem Doppler-Effekt ermittelt. Zur Bestimmung des Abstands wird die Frequenzmodulation genutzt. Durch die kontinuierliche Modulation der Frequenz entsteht eine Frequenzdifferenz zwischen dem gesendeten und gleichzeitig empfangenen Signal. Aus dieser Differenz lässt sich die Laufzeit der Signale ermitteln und der Abstand der Objekte berechnen⁹⁸.

Durch die Verwendung mehrerer Sende- und Empfangseinheiten oder einer rotierenden Sende- oder Empfangskomponente (Scanner) ist eine räumliche Auflösung der Objekte vor dem Fahrzeug möglich. Vorteile der Radartechnologie sind ihre weitgehende Unabhängigkeit von Wetterbedingungen wie Regen, Nebel oder Schnee sowie von Verschmutzung und die Möglichkeit der verdeckten Montage an der Fahrzeugfront.

In ähnlicher Art und Weise wie das Radar arbeiten die **Lidarsensoren**. Sie senden und empfangen Infrarotsignale mit einer Wellenlänge zwischen $\lambda = 0,78 \mu m$ bis $\lambda = 1 \mu m$. Wie beim Radarsensor unterscheiden sich die Wellenlängen der gesendeten und empfangenen Signale, wenn sie von einem bewegten Objekt reflektiert werden. Die Verschiebung $\Delta\lambda$ der Wellenlänge von naher Infrarotstrahlung $\lambda \leq 2 \mu m$ ist bei Reflektion an Objekten mit Geschwindigkeiten im Straßenverkehr ($v \leq 250 km/h$) sehr gering und nur ungenau messbar:

$$\Delta\lambda = \lambda \cdot \frac{2 \cdot v}{c} < 1 pm \quad (3.17)$$

Daher erfolgt die Bestimmung der Objektgeschwindigkeit aus der Änderung der Objektabstände im Zeitraum mehrerer Messungen. Wie bei den Radarsystemen werden auch bei den Lidarsensoren entweder scannende Systeme oder Sensoren mit mehreren Sende- und Empfangseinheiten zur räumlichen Auflösung der durch die Reflexionen erfassten Objekte eingesetzt⁹⁹.

⁹⁷ LANGHEIM/LARRIEU et al. 2002 [78], S. 3 ff.

⁹⁸ EHMANN/NEUNZIG et al. 2001 [37], S. 19

⁹⁹ WIESNER/SCHULZ 2003 [124], S. 396

Mit beiden Sensorsystemen können Objekte, deren Oberfläche senkrecht zur Straße steht (vgl. Bild 3.8 a), bis zu Entfernungen zwischen 100 m und 200 m erfasst werden¹⁰⁰. Wie Bild 3.8 b zeigt, müssten zur Bestimmung der vertikalen Straßenform die Reflexionen der Fahrbahnoberfläche ausgewertet werden. Die Amplituden dieser Reflexionen sind aufgrund der flachen Einstrahlwinkel β und Rückreflexionswinkel α mit zunehmendem Abstand zum Fahrzeug jedoch so gering, dass sie ab Entfernungen von etwa 15 m innerhalb der Rauschgrenzen der Sensoren liegen. Eine Messung der Straßenkrümmung ist dann nicht mehr möglich.

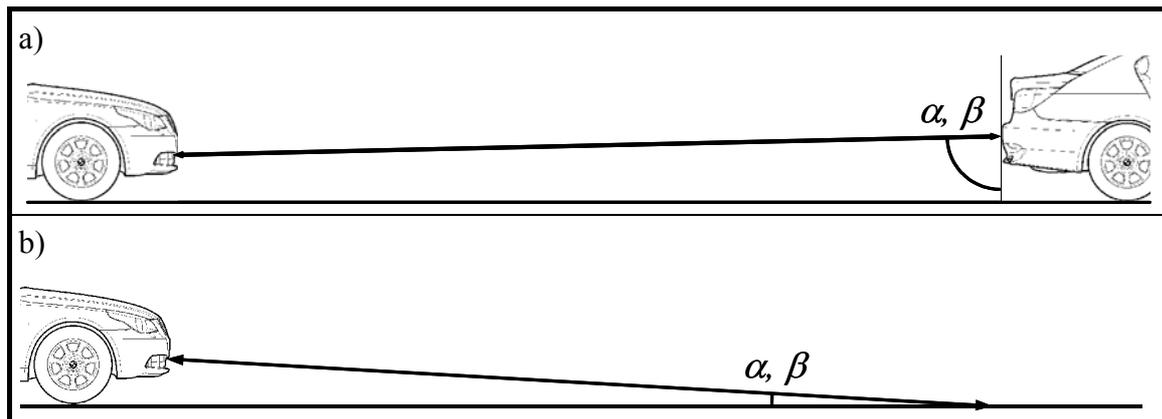


Bild 3.8: Einstrahl- und Reflexionswinkel bei Objekten, deren Oberflächen
a) senkrecht und b) parallel zur Straße stehen

Für eine zeitgerechte Anpassung der Scheinwerfer an die Straßenform im Bereich der geometrischen Leuchtweite ist eine Voraussichtweite von 15 m nicht ausreichend¹⁰¹.

3.2.3 Kamerasensor

Kamerasensoren mit Bildverarbeitung stellen die Grundlage für vielfältige Assistenzfunktionen im Fahrzeug dar. Sie ermöglichen die Erkennung und Prädiktion der Fahrspur und können somit den Fahrer vor einem unbeabsichtigten Verlassen der Fahrbahn warnen¹⁰². Mit Hilfe einer umfangreichen Bildauswertung lassen sich zudem Objekte im Verkehrsraum erkennen und somit die ACC-Funktionalität auf den Stop & Go-Verkehr erweitern und eine Unfall-Prävention realisieren¹⁰³.

¹⁰⁰ LABAHN/BOEHLAU 2001 [72], S. 320, NEUNZIG/LACHMAYER 2002 [93], S. 578 und LANGHEIM/LARRIEU et al. 2002 [78], S. 3

¹⁰¹ Eine Bewertung verschiedener Voraussichtweiten der Sensorsysteme durch Probanden anhand der Reaktionszeiten der Scheinwerfersteuerung befindet sich in Abschnitt 5.3.3.

¹⁰² GÖDECKE/HANEY 2003 [49], S. 227 ff. und MÜHLENBERG/SEUBERT 2002 [90], S. 659 ff.

¹⁰³ LABAHN/BOEHLAU 2001 [72], S. 323

Das System des Kamerasensors besteht aus ein oder zwei Kameras und einer Rechneinheit zur Bildauswertung. Die Kameras besitzen entweder CCD- oder CMOS-Chips. Zwar weisen CCD-Kameras eine höhere Lichtempfindlichkeit auf als CMOS-Kameras und sind daher besonders gut für dunkle Straßenszenen bei Nacht geeignet. Sie besitzen jedoch eine geringere Leuchtdichtedynamik und reagieren mit Blooming und Smearing auf hohe Leuchtdichten im Aufnahmebereich¹⁰⁴. Eine Bildauswertung wird dadurch gestört oder verhindert.

Eine wesentliche Funktion der Bildauswertung ist die Bestimmung der Fahrbahnkrümmung vor dem Fahrzeug. Zusammen mit den Daten aus der Fahrzeugdynamik lässt sich das Verhalten des Fahrzeugs in der Fahrspur bestimmen und ein Spurhalteassistent realisieren, der den Fahrer vor unbeabsichtigtem Verlassen der Fahrspur warnt.

Geeignet zur Berechnung der Fahrbahnkrümmung aus den Kamerabildern sind Fahrbahnmarkierungen¹⁰⁵. Selbst bei Dunkelheit bilden sie aufgrund ihrer retroreflektierenden Eigenschaften einen hohen Kontrast zur Fahrbahnoberfläche¹⁰⁶, und ihre Form kann auch in Entfernungen außerhalb der geometrischen Leuchtweite des Abblendlichts bestimmt werden.

Zur Ermittlung der geometrischen Form von Fahrbahnmarkierungen wird das Graustufenbild der Straßenszene vor dem Fahrzeug mit Hilfe spezieller Suchmasken auf Kanten untersucht, die sich durch eine starke Änderung der Helligkeit kennzeichnen. Zuvor wird die Form der Suchmasken an die Form von Kanten angeglichen, die in vorausgehenden Aufnahmen der Straßenszene ermittelt wurden. Die geometrische Form einer gefundenen Kante wird mit einer Regressionsfunktion beschrieben¹⁰⁷. In einem 4D-Ansatz (drei Raumdimensionen sowie die Dimension der Zeit) berechnet ein Kalmanfilter aus der bisherigen Lage und Form der gefundenen Kanten im Bild sowie aus den Bewegungsgleichungen des Fahrzeugs die neue Lage und Form von Kanten, wie sie in der nächsten Aufnahme erwartet werden¹⁰⁸. Die auf diese Weise geschätzten geometrischen Daten werden mit den gemessenen Werten der nächsten Aufnahme der Straßenszene verglichen und korrigiert. Die Korrektur der Koeffizienten der Regressionsfunktionen zur Beschreibung der Kanten erfolgt nach dem Least-Square-Verfahren.

Fehlen Fahrbahnmarkierungen in der Straßenszene, müssen ersatzweise Bordsteinkanten oder der Farb-, Helligkeits- oder Texturübergang vom Asphalt zur Oberfläche neben der Straße als

¹⁰⁴ BOEHLAU 2003 [15], S. 19 und KNOLL/ESCHLER et al. 2003 [65], S. 168

¹⁰⁵ EHMANN/NEUNZIG et al. 2001 [37], S. 23

¹⁰⁶ MÜHLENBERG/SEUBERT 2002 [90], S. 660

¹⁰⁷ HOFMANN/RIEDER et al. 2001 [59], S. 130 f.

¹⁰⁸ DICKMANN 1998 [25], S. 23 ff.

fahrspurbeschreibende Kanten verwendet werden¹⁰⁹. Zur Erkennung dieser Merkmale ist eine ausreichende Beleuchtung notwendig¹¹⁰. Bei Dunkelheit stehen ausschließlich die Fahrzeugscheinwerfer als Lichtquellen zur Verfügung. Daher reduziert sich die Reichweite des Kamerasensors auf Straßen ohne Fahrbahnmarkierungen bei Dunkelheit auf den beleuchteten Bereich vor dem Fahrzeug.

Eine Möglichkeit, das Kamerabild für eine Auswertung bei Dunkelheit zu optimieren, bietet die Fusion von Kamerabildern aus dem infraroten und visuellen Spektralbereich¹¹¹. Diese Technologie wird für Nachtsichtsysteme entwickelt und dient in erster Linie zur kontrastreichen Darstellung einer dunklen Straßenszene auf einem Monitor im Fahrzeug.

3.2.4 Geometriemodell zur Bestimmung der vertikalen Straßenkrümmung

Befinden sich im aufgezeichneten Kamerabild mindestens zwei Fahrbahnmarkierungen, dann lässt sich aus ihren Regressionsfunktionen die vertikale Fahrbahnkrümmung berechnen. Wie Bild 3.9 b zeigt, nimmt im Kamerabild einer ebenen Straße der laterale Abstand zwischen zwei Markierungslinien vom unteren zum oberen Bildrand mit einer linearen Funktion ab. Auf Kuppen (siehe Bild 3.9 a) besitzt die Abstandsfunktion einen progressiven, in Wannen einen degressiven Verlauf (vergleiche Bild 3.9 c).

Zwar bewirken auch Fahrbahnverengungen eine degressive Abstandsfunktion, doch durch eine fortwährende Berechnung der geometrischen Eigenschaften der Markierungen während der Fahrt (4D-Ansatz) lassen sich Kuppen und Fahrbahnverengungen unterscheiden. Ebenso ist eine Differenzierung von Wannen und Fahrbahnaufweitungen möglich.

Die geometrische Beschreibung der Fahrbahnkrümmung erfolgt als Klothoide mit einer initialen Krümmung K_{v0} und einer linearen Krümmungsänderung K_{v1} in Abhängigkeit der Bogenlänge d im Erfassungsbereich der Kamera¹¹²:

$$K_v(d) = K_{v0} + d \cdot K_{v1} \quad (3.18)$$

Der Radius der Fahrbahn entspricht dem Kehrwert der Krümmung:

$$R_v(d) = \frac{1}{K_v(d)} \quad (3.19)$$

¹⁰⁹ GREGOR/BATEN et al. 1997 [47], S. 197

¹¹⁰ ABEL/LABAHN 2000 [1], S. 1092 f.

¹¹¹ WEIDNER/HAHN et al. 2004 [123], S. 4 ff.

¹¹² GREGOR/BATEN et al. 1997 [47], S. 197

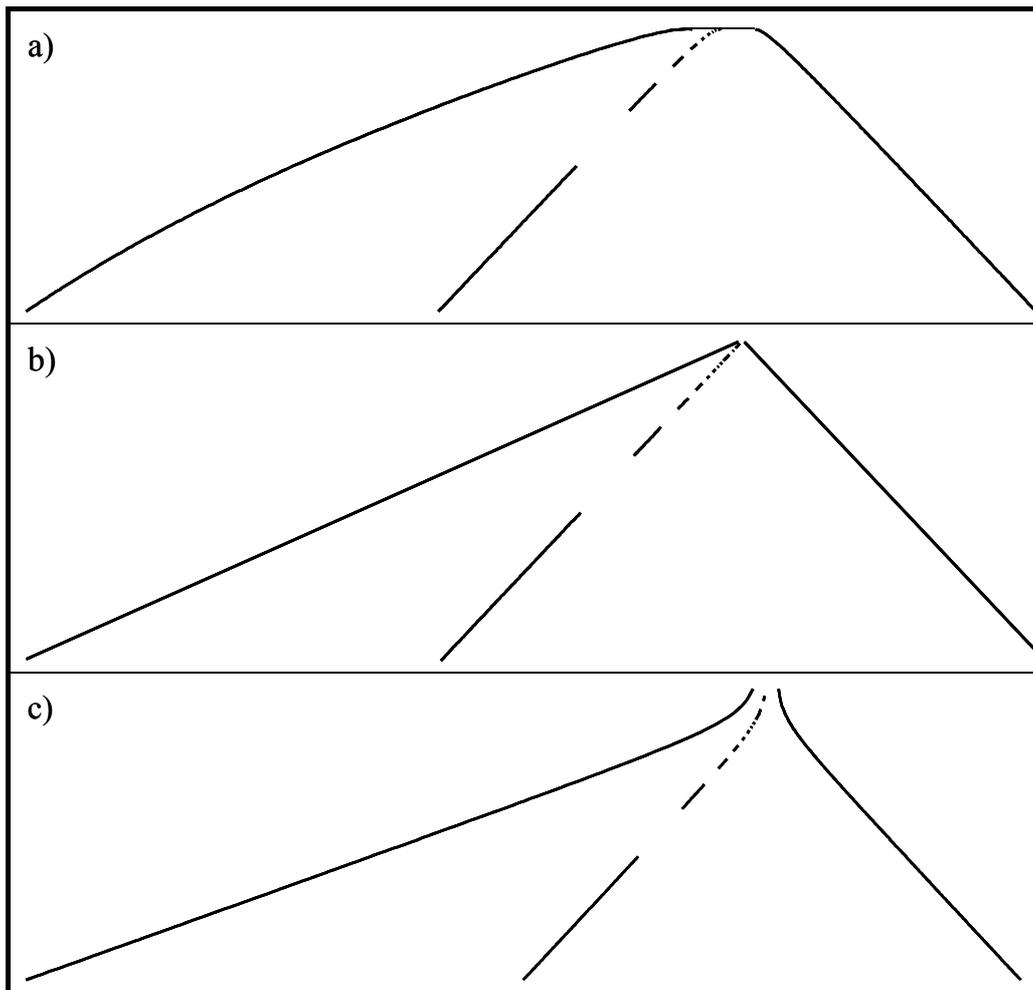


Bild 3.9: Kamerabild a) einer Kuppe, b) einer ebenen Straße und c) einer Wanne

Die Daten des Kamerasensors werden in modernen Fahrzeugen auf dem CAN-Bus an andere Steuergeräte verteilt. Eine Botschaft des Sensors auf dem CAN-Bus enthält Daten über die Fahrbahngeometrie wie Fahrspurbreite und Fahrbahnkrümmung¹¹³, die Position und Bewegungsrichtung des Fahrzeugs, die Reichweite des Sensors und einen Wert, der die Güte der Fahrspurerkennung angibt¹¹⁴.

Ist die tatsächliche Reichweite des Kamerasensors signifikant kleiner als der Bereich, der für eine optimale Anpassung der Lichtverteilung an die Straßenform benötigt wird, muss der Verstellbereich der Scheinwerfer begrenzt werden, um große Fehler bei starken Änderungen der Fahrbahnkrümmung im Fahrzeugvorfeld zu vermeiden.

¹¹³ STÜKER/SCHMIDT 2003 [111], S. 43

¹¹⁴ GÖDECKE/HANEY 2003 [49], S. 233

Sinkt die Güte der Daten aus der Bildverarbeitung unter eine festgelegte Grenze, muss der Regler der Scheinwerfersteuerung anhand folgender Strategien darauf reagieren:

- Begrenzung der Scheinwerferstellwinkel als Funktion der Datengüte,
- Abschalten der adaptiven Scheinwerfersteuerung oder
- Umschalten auf alternative Sensoren (z.B. Fahrdynamikauswertung vgl. Abschnitt 3.1).

3.3 Gespeicherte Daten

Eine weitere Möglichkeit, die benötigten Informationen für die Scheinwerfersteuerung bereit zu stellen, bietet der Zugriff auf eine Datenbank, in der die vertikale Krümmung der Fahrbahn abgespeichert ist. Voraussetzung dafür ist ein System zur eindeutigen Positions- und Fahrtrichtungsbestimmung des Fahrzeugs. Nur so können die gespeicherten Daten dem gefahrenen Streckenabschnitt zugeordnet werden.

3.3.1 Ortsbestimmung

Das bekannteste System zur Bestimmung des Fahrzeugortes ist das GPS (Global Positioning System), welches aus der Laufzeit von Signalen mehrerer Satelliten die Position des Empfängers berechnet. Mit Hilfe der Koppelnavigation wird die Fahrzeugposition zwischen dem Empfang aufeinander folgender GPS-Signale anhand der Gierrate und der Fahrzeuggeschwindigkeit kontinuierlich fortgeschrieben. Durch den Abgleich der Fahrzeugposition und -bewegung mit den horizontalen Krümmungsdaten einer digitalen Karte (Map-Matching) ist eine sehr genaue Ortsbestimmung und damit eine exakte Zuweisung der gespeicherten Daten zum gefahrenen Streckenabschnitt möglich.

3.3.2 Digitale Karten

Die Daten der digitalen Karte enthalten einige Attribute zur Kategorisierung der Straße sowie die Koordinaten der gespeicherten Streckenpunkte mit einer Genauigkeit von $\pm 15\text{ m}$. Der Abstand der Messpunkte beträgt auf einer freien Strecke ca. 200 m . Nur im Bereich von Kreuzungen, in denen mehrere Straßen aufeinander treffen, sind die Abstände der Messpunkte klein, um eine schnelle Zuordnung der neuen Fahrtrichtung zu einer der Straßen zu ermöglichen. Durch Baustellen entstehen immer wieder Änderungen im Straßenverlauf. Eine schnelle Anpassung der digitalen Karten an diese Änderungen fehlt bisher. Aus diesen Gründen sind die derzeitigen digitalen Karten für eine Steuerung adaptiver Lichtfunktionen (z.B. Kurvenlicht) noch nicht geeignet¹¹⁵.

¹¹⁵ ABEL/LABAHN 2000 [1], S. 1093 f.

Für eine vertikale Anpassung der Lichtverteilung fehlen zudem die Höheninformationen in den aktuellen Kartendatenbanken¹¹⁶. Relative Höhendaten sind nur an Punkten in der digitalen Karte gespeichert, an denen mehrere Straßen aufeinander treffen. Diese Höheninformationen geben Auskunft darüber, ob der Punkt eine Kreuzung darstellt, oder es sich um eine Über- oder Unterführung handelt.

Navigationssysteme mit hochgenauen, dreidimensionalen Kartendaten befinden sich zurzeit in der Entwicklung¹¹⁷. Diese digitalen Karten sollen voraussichtlich bis Ende 2006 in Europa flächendeckend verfügbar sein und enthalten zusätzliche Informationen wie z.B. Geschwindigkeitsbegrenzungen, die Steigung der Fahrbahn, Eigenschaften der Fahrbahnoberfläche und des Banketts¹¹⁸. Aus solchen Kartendaten lässt sich die vertikale Krümmung der Fahrbahn im Streckenabschnitt vor dem Fahrzeug bestimmen und die Lichtverteilung daran anpassen. Eine Steuerung der vertikalen Scheinwerferachse ist sogar leichter realisierbar als die Steuerung der horizontalen Bewegungen (Kurvenlicht), weil das Fahrzeug zwangsläufig dem vertikalen Straßenverlauf folgt, während bei horizontalen Kurven der Fahrer das Fahrzeug nicht immer entlang der tatsächlichen Fahrbahnkrümmung steuert (z.B. beim Schneiden der Kurve).

3.3.3 Geometriemodell zur Bestimmung der vertikalen Fahrbahnkrümmung

Die Informationen über die geometrischen Eigenschaften der Fahrbahn sind auf den digitalen Karten nur an diskreten Punkten gespeichert. Für eine Steuerung adaptiver Scheinwerfer ist jedoch ein kontinuierlicher Informationsfluss erforderlich. Daher müssen die Daten zwischen den gespeicherten Punkten interpoliert werden.

Üblicherweise werden hierfür kubische Splines verwendet. Jeder Spline verbindet zwei aufeinander folgende Punkte zu einer stetigen Kurve mit folgenden Eigenschaften:

- die Kurve verläuft exakt durch beide gespeicherten Punkte,
- als Kurvenfunktion wird ein Polynom dritter Ordnung verwendet,
- zwischen den Punkten besitzt die Kurve eine möglichst geringe Krümmung,
- sowohl die Kurve selbst, als auch die Steigung der Kurve sind stetig. Die Aussage gilt insbesondere am Übergang zu den Nachbarsplines.

Zur Berechnung des Polynoms dienen die gespeicherten Punkte als Stützstellen und die Bedingung, dass die Steigung einer Polynomkurve an beiden Stützstellen der Steigung der

¹¹⁶ SCHRAUT 2000 [110], S. 41 ff.

¹¹⁷ IBRAHIM/SCHMIDT et al. 2005 [62], S. 290 ff.

¹¹⁸ NAVTEQ 2005 [92], S. 4

angrenzenden Polynomkurven entsprechen muss. Zusätzlich werden die initialen Steigungen am ersten und letzten Punkt des Interpolationsbereiches benötigt¹¹⁹.

¹¹⁹ BRONSTEIN/SEMENDJAJEW 1991 [17], S. 758 ff.

4 Anpassung der Lichtverteilung an die vertikale Straßenform

Das Ziel der Lichttechnik im Automobilbau ist es, auf effiziente Art und Weise allen Teilnehmern am nächtlichen Straßenverkehr möglichst gute Wahrnehmungsbedingungen zu bieten. Es entsteht dabei ein Zielkonflikt, da der Verkehrsteilnehmer einerseits als Fahrer eines Fahrzeugs eine helle und weit reichende Fahrbahnausleuchtung wünscht und andererseits als Teilnehmer des Gegenverkehrs nicht geblendet werden möchte. Den Konflikt durch die konträren Forderungen der beiden Seiten löst der Gesetzgeber durch einen Kompromiss, die Abblendlichtverteilung.

Auf Kuppen und in Wannen wird dieser Kompromiss zum Nachteil jeweils einer Seite verschoben. Ziel der vertikalen Anpassung der Lichtverteilung ist es daher, die Neigung der Hell-Dunkel-Grenze der Abblendlichtverteilung in vertikalen Kurven so zu verändern, dass auch dort für beide Seiten akzeptable Wahrnehmungsbedingungen entstehen. Als Referenz zur Anpassung der Lichtverteilung dienen die Wahrnehmungsbedingungen, die das Abblendlicht auf einer ebenen Straße bietet. Die Scheinwerferfunktion, die das vorgegebene Ziel erreichen soll, wird im Folgenden als „adaptive Leuchtweitenregulierung“ bezeichnet.

In den nächsten Abschnitten erfolgt die Darstellung und Diskussion von Forderungen der Verkehrsteilnehmer an eine adaptive Leuchtweitenregulierung sowie eine Gegenüberstellung der geometrischen Eigenschaften der Lichtverteilung und des vertikalen Straßenverlaufs. Anschließend werden zur Entwicklung einer optimalen Verstellstrategie verschiedene Algorithmen vorgestellt und miteinander verglichen.

4.1 Forderungen der Verkehrsteilnehmer an eine Fahrzeuglichtverteilung

Grundlage für die Algorithmusentwicklung sind die Forderungen der Verkehrsteilnehmer an die Fahrzeuglichtverteilung wie:

- hohe Sichtweiten und
- eine homogene Leuchtdichtevertellung im Gesichtsfeld.

Hohe Sichtweiten sind erforderlich, um mögliche Hindernisse auf der Fahrbahn rechtzeitig zu erkennen und darauf reagieren zu können.

Bereiche im Gesichtsfeld des Menschen, die sich durch hohe Leuchtdichten und durch eine wahrnehmbare Bewegung auszeichnen, sind für das Auge attraktiv. Der Mensch wird dazu geleitet, seinen Blick dorthin zu wenden. Enthalten diese Bereiche keine relevanten Informationen für den Fahrer, war seine Blickzuwendung nutzlos. Wördenweber¹²⁰ hat gezeigt, dass

¹²⁰ WÖRDENWEBER 1996 [126] zitiert in HUH 1998 [61], S. 111

Stress bei Nachtfahrten neben Blendeinflüssen vor allem durch solche Blickzuwendungen auf attraktive Bereiche im Gesichtsfeld ohne Informationsinhalt entsteht.

Eine homogene Leuchtdichteverteilung im Gesichtsfeld vermeidet solche unnützen Blickbewegungen sowie ständige Adaptationsvorgänge am Fahrerauge, die neben Stress auch zu frühzeitiger Ermüdung führen können¹²¹.

4.1.1 Forderungen des Fahrers

Um den Bedürfnissen eines Fahrzeugsführers gerecht zu werden, müssen die Forderungen der Verkehrsteilnehmer nach hohen Sichtweiten und einer homogenen Leuchtdichteverteilung im Gesichtsfeld auf die Eigenschaften der Abblendlichtverteilung übertragen werden.

Da die Lichtstärken des Abblendlichtes oberhalb der Hell-Dunkel-Grenze vom Gesetzgeber beschränkt wurden, wird die Forderung nach einer hohen Sichtweite durch die Forderung nach einer hohen **Reichweite** des Scheinwerfers ersetzt. Sie wird durch die Neigung der optischen Scheinwerferachse und die Lichtstärken im Bereich direkt unter der Hell-Dunkel-Grenze bestimmt.

Der Einfluss der Neigung der Abblendlichtscheinwerfer auf die Erkennbarkeitsentfernung verschiedener Objekte auf einer ebenen Straße wurde von Schmidt-Clausen und Finsterer untersucht¹²². Das Ergebnis zeigt, dass mit geringerer Neigung der Scheinwerferachse, also mit größerer geometrischer Leuchtweite die Erkennbarkeitsentfernung zunimmt. Tabelle 4.1 zeigt beispielhaft die Erkennbarkeitsentfernungen von Objekten am linken und rechten Fahrbahnrand bei einer Anbauhöhe $h_{sw} = 540 \text{ mm}$ in Abhängigkeit von der Scheinwerferneigung.

Scheinwerferneigung [%]	1,5	1,0	0,5
Geometrische Leuchtweite [m]	36	54	108
Erkennbarkeitsentfernung linker Fahrbahnrand [m]	44,2	51,4	59
Erkennbarkeitsentfernung rechter Fahrbahnrand [m]	70,8	72,6	75,4

Tabelle 4.1: Abhängigkeit der Erkennbarkeitsentfernung von der Scheinwerferneigung¹²³

¹²¹ WALLASCHEK/KAUSCHKE et al. 2003 [119], S. 27 f.

¹²² SCHMIDT-CLAUSEN/FINSTERER 1989 [108] zitiert in HUHN [61], S. 114

¹²³ HUHN 1998 [61], S. 114

Der Anhalteweg eines Fahrzeugs besteht aus seinem eigentlichen Bremsweg und der Strecke, die das Fahrzeug während der so genannten Verlustzeit zurücklegt. Die Verlustzeit entspricht der Zeitspanne, die der Fahrer vom Erkennen eines Hindernisses bis zum Betätigen des Bremspedals benötigt sowie der Dauer, bis der volle Bremsdruck aufgebaut ist. Üblicherweise wird für diese Verlustzeit der Wert $t_R = 1 \text{ s}$ angesetzt¹²⁴. Moderne Fahrzeuge erreichen auf trockener Straße Verzögerungen von $a_x = -9 \text{ m/s}^2$. Daraus ergibt sich auf Landstraßen bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von $v_x = 100 \text{ km/h} = 28 \text{ m/s}$ ein Anhalteweg $s_x = 71 \text{ m}$. Ein Vergleich mit den Erkennbarkeitsentfernungen zeigt, dass selbst bei optimalen Bedingungen wie:

- trockene Fahrbahnoberfläche,
- eine hohe Bremsleistung des Fahrzeugs,
- hohe geometrische Leuchtweite,
- keine Blendung oder Sichteinschränkung des Fahrers,

nur kleine Reserven für ein rechtzeitiges Anhalten vor unerwarteten Hindernissen existieren. Sinkt dagegen die geometrische Leuchtweite aufgrund der Krümmung der Fahrbahn in Wannen¹²⁵, ist selbst bei niedrigen Fahrzeuggeschwindigkeiten ein rechtzeitiges Anhalten kaum möglich. Ein Anheben der optischen Scheinwerferachse kann auch in Wannen eine hohe Reichweite der Lichtverteilung bewirken und das Verhältnis zwischen Anhalteweg und Erkennbarkeitsentfernung verbessern.

Der Wunsch, den Stress und eine frühzeitige Ermüdung zu vermeiden, führt zur der Forderung nach einer homogenen Leuchtdichtevertelung im Gesichtsfeld. Bei der Nutzung der Abblendlichtverteilung als Lichtquelle sind Inhomogenitäten unvermeidlich, da sie vom Gesetzgeber an der Hell-Dunkel-Grenze gefordert werden. Wie stark die gesetzlichen Lichtstärkeunterschiede an der Hell-Dunkel-Grenze als Leuchtdichteunterschiede vom Fahrer wahrgenommen werden, hängt von der geometrischen Leuchtweite und den Reflexionseigenschaften der Fahrbahn ab. Je größer die geometrische Leuchtweite ist, desto kleiner werden die absoluten Unterschiede in den reflektierten Leuchtdichten. Die Forderung nach einer **gleichmäßigen Lichtverteilung** muss daher zum einen auf den hellen Bereich unterhalb der Hell-Dunkel-Grenze beschränkt werden, sie kann aber auch als Wunsch nach einer hohen geometrischen Reichweite interpretiert werden.

Neben räumlichen Leuchtdichteunterschieden entstehen durch Scheinwerferbewegungen auch zeitliche Unterschiede in der Leuchtdichtevertelung. Zur Verringerung dieser Inhomogenität-

¹²⁴ o.V. 1991 [96], S. 670 ff.

¹²⁵ siehe Abschnitt 2.3.2 ab Seite 30 und Abschnitt 8.2.1 ab Seite 149 im Anhang.

ten müssen sich die adaptiven Scheinwerfer so **ruhig bewegen**, dass die zeitliche Änderung des reflektierten Leuchtdichtebildes minimal ist.

Nach Wallaschek et al. muss die Wirkung einer gleichmäßigen Ausleuchtung als Grundlage für optimale Wahrnehmungsbedingungen allerdings noch geprüft werden¹²⁶.

4.1.2 Forderungen der anderen Verkehrsteilnehmer

Die Sichtverhältnisse im nächtlichen Straßenverkehr werden im starken Maße durch Blendung beeinträchtigt. Schon geringe Blendbeleuchtungsstärken am Fahrerauge reduzieren den Komfort beim nächtlichen Fahren und bewirken Irritationen sowie Adaptationsprozesse. Sie führen zu Stress und frühzeitiger Ermüdung. Steigt das Niveau der Blendbeleuchtungsstärken an, kann es zu einer spürbaren Herabsetzung der Sehleistung kommen¹²⁷.

Zur Vermeidung dieser Nachteile ist es sinnvoll, Grenzwerte für maximale Beleuchtungsstärken am Fahrerauge anzugeben. Durch Versuche wurden solche Maximalwerte ermittelt; sie betragen $1,7 lx$ für Halogen-Scheinwerfer und $1,12 lx$ für Xenon-Scheinwerfer. Die Forderung nach einer homogenen Leuchtdichtevertelung wird daher als Forderung nach **Einhaltung der Grenzwerte für die Blendbeleuchtungsstärken** konkretisiert. Aus den angegebenen Werten lassen sich für bestimmte Entfernungen die maximalen Lichtstärken von Scheinwerfern berechnen, die als psychologische Blendung gerade noch akzeptiert werden¹²⁸. Die Ergebnisse solcher Berechnungen unter Berücksichtigung des Transmissionsgrades der Windschutzscheibe und der Reflexion über die Außenspiegel bei Blendung durch einen Xenon-Scheinwerfer zeigt Tabelle 4.2.

Entfernung	Blendung des Gegenverkehrs	Blendung des vorausfahrenden Fahrzeugführers
<i>300 m</i>	<i>63000 cd</i>	<i>78750 cd</i>
<i>200 m</i>	<i>28000 cd</i>	<i>35000 cd</i>
<i>100 m</i>	<i>7000 cd</i>	<i>8750 cd</i>
<i>50 m</i>	<i>1750 cd</i>	<i>2188 cd</i>

Tabelle 4.2: Akzeptable Lichtstärken¹²⁹

¹²⁶ WALLASCHEK/KAUSCHKE et al. 2003 [119], S. 28

¹²⁷ vergleiche Abschnitt 2.1.5

¹²⁸ KOJIMA 2002 [66] zitiert in WALLASCHEK/ROSLAK 2003 [120], S. 30 f

¹²⁹ WALLASCHEK/ROSLAK 2003 [120], S. 30 modifiziert

In der Realität werden diese Grenzwerte häufig überschritten, weil sich das Fahrerauge aufgrund der Straßengeometrie (z.B. Kuppen) oder durch eine Neigungsänderung des Scheinwerfers im hellen Bereich der Lichtverteilung unterhalb der Hell-Dunkel-Grenze befindet. Nach der ECE-Regelung 98 beträgt die maximale Beleuchtungsstärke eines Scheinwerfers am Messschirm in 25 m Entfernung in der linken Hälfte der Lichtverteilung unterhalb der Hell-Dunkel-Grenze $E_{maxL} = 50 \text{ lx}$. Demnach dürfen zwei Abblendlichtscheinwerfer zusammen eine maximale Lichtstärke von 62500 cd erzeugen. Ein Vergleich mit Tabelle 4.2 zeigt, dass solche Lichtstärken selbst bei Entfernungen von knapp 300 m die Grenzen zur Blendung des Gegenverkehrs überschreiten.

Die grau markierte Fläche in Bild 4.1 stellt den Entfernungsbereich dar, in dem sich das entgegenkommende Fahrerauge während der Annäherung auf einer Kuppe mit konstantem Radius im hellen Bereich der Lichtverteilung unterhalb der Hell-Dunkel-Grenze befindet, wenn die Einstellung der Scheinwerfer nicht verändert wird.

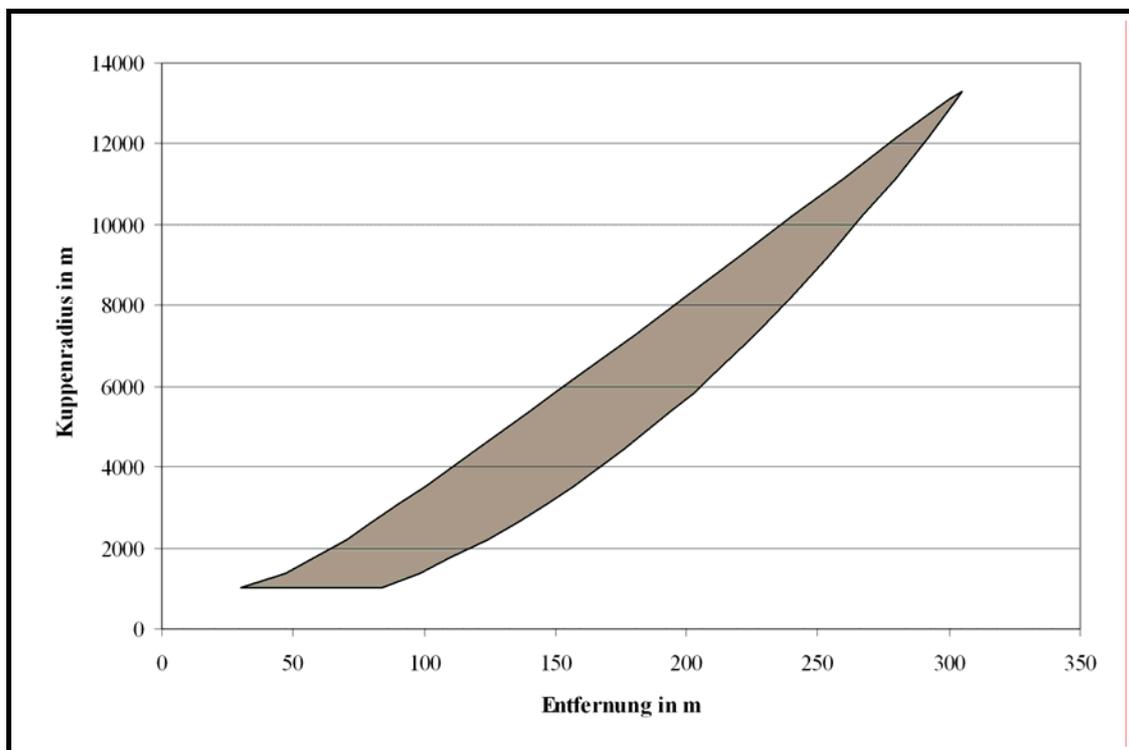


Bild 4.1: Blendbereich auf einer geraden Kuppe

In größeren Entfernungen wird der Gegenverkehr nicht geblendet, weil dort die direkte Sichtlinie zwischen dem Scheinwerfer und dem entgegenkommenden Fahrerauge durch die Kuppe unterbrochen wird. Kleine Entfernungen links der grau markierten Fläche zählen nicht

zum Blendbereich, weil sich dort die Augen des Gegenverkehrs im dunklen Bereich der Lichtverteilung oberhalb der Hell-Dunkel-Grenze befinden¹³⁰.

Auf Kuppen mit Radien zwischen $R_v = 3000\text{ m}$ und $R_v = 7000\text{ m}$ werden die zulässigen Blendbeleuchtungsstärken über eine Entfernung von etwa 50 m überschritten. Fahren beide Fahrzeuge mit 70 km/h beträgt die Dauer der Blendimpulse mit $E_A > 1,12\text{ lx}$ knapp $1,3$ Sekunden. Die Blendung, die dabei entsteht, äußert sich als psychologische und physiologische Blendung.

Eine Untersuchung von Lehnert zur psychologischen Blendung mit kurzzeitigen Blendimpulsen zeigt, dass die Grenzwerte der Blendbeleuchtungsstärken nur bei sehr kurzen Blendzeiten $t_B < 0,5\text{ s}$ überschritten werden dürfen¹³¹.

Aufgrund der geringen Dauer der Blendimpulse, muss die physiologische Blendung als dynamische Blendung betrachtet werden, die über die Readaptationszeiten beurteilt wird. Die Readaptationszeit ist die Zeit, die das Auge nach einer Blendstörung benötigt, bis es wieder das ursprüngliche Adaptationsniveau erreicht hat. Da während dieser Zeit die Unterschiedsempfindlichkeit herabgesetzt ist, reduziert sich die Erkennbarkeitsentfernung. Der Zeitverlust bis zur tatsächlichen Erkennung der Objekte muss daher zur üblichen Reaktionszeit hinzugefügt werden. Roddewig fordert sogar eine Korrektur des in der Rechtsprechung festgelegten Wertes für Reaktionszeiten, wenn Readaptationseffekte berücksichtigt werden müssen¹³². Die allgemeine Forderung der Verkehrsteilnehmer nach einer hohen Sichtweite wird für Begegnungssituationen auf Kuppen auf die Forderung nach einer möglichst **kurzen Readaptationszeit** reduziert.

Durch das Absenken der Lichtverteilung wandert die linke Begrenzungslinie der grau markierten Fläche in Bild 4.1 nach rechts und die Breite des Blendungsbereichs wird verkleinert. Optimal wäre, wenn der Blendungsbereich komplett verschwinden würde. Jedenfalls wird damit die Dauer der Blendimpulse auf Kuppen reduziert. Eine kürzere Blendzeit bewirkt zwei Effekte, nämlich eine geringere psychologische Blendung und kürzere Readaptationszeiten.

¹³⁰ Die linke Begrenzung der grau markierten Fläche ergibt sich durch die Berechnung der Höhe der Hell-Dunkel-Grenze nach den Formeln in Anhang 8.2 mit den Eingangswerten eines BMW der 5er Baureihe (E60): $h_{SW} = 0,655\text{ m}$; $\beta_0 = 1\%$; $\ddot{u}_{SW} = 0,542\text{ m}$ und ihrem Vergleich mit der durchschnittlichen Augenhöhe $h_A = 1,13\text{ m}$ eines Autofahrers. Die rechte Begrenzungslinie des Blendungsbereichs entspricht der maximalen Entfernung bei welcher der Gegenverkehr direkt in die Scheinwerfer des Fahrzeugs blicken kann. Sie wird nach folgender Formel berechnet: $d = R_v \cdot \frac{\pi}{180^\circ} \cdot (\arccos(R_v / (R_v + h_{SWk})) + \arccos(R_v / (R_v + h_A)))$.

¹³¹ LEHNERT 2001 [83], S. 96 ff.

¹³² RODDEWIG 1983 [99] zitiert in LEHNERT 2001 [83], S. 109

4.2 Geometrische Betrachtung

Aus geometrischer Sicht muss die Hell-Dunkel-Grenze als Gerade an eine vertikale Kurve angepasst werden. Da ein Punkt der Gerade durch die Anbauhöhe der Scheinwerfer definiert ist, lässt sich nur die Steigung der Geraden verändern. Auf eine vertikale Ebene vor dem Fahrzeug projiziert, bedeutet eine Winkeländerung der optischen Scheinwerferachse eine vertikale Verschiebung der Lichtverteilung. Die vertikale Position der Abblendlichtverteilung wird als Höhe h_{HDG} der Hell-Dunkel-Grenze über der Fahrbahn dargestellt¹³³. Aufgrund der geometrischen Gegebenheiten auf Kuppen und in Wannen lässt sich durch das vertikale Schwenken der Scheinwerfer nur in einer bestimmten Entfernung d vor dem Fahrzeug die gleiche Höhe der Hell-Dunkel-Grenze $h_{HDG}(d)$ einstellen wie auf einer ebenen Straße in der gleichen Entfernung d . Anhand Bild 4.2 wird ersichtlich, dass sie in allen anderen Entfernungen ($x \neq d$) entweder größer oder kleiner ist als auf einer Ebene.

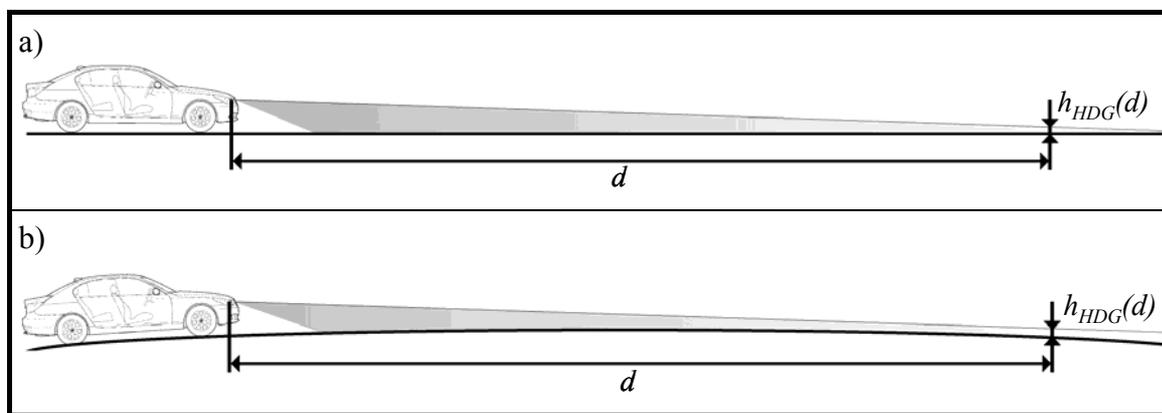


Bild 4.2: Höhe der Hell-Dunkel-Grenze über der Fahrbahnoberfläche
a) in einer Ebene und b) auf einer Kuppe

Die zentrale Aufgabe der Entwicklung des Algorithmus zur vertikalen Anpassung der Lichtverteilung ist daher das Finden einer Zielentfernung d vor dem Fahrzeug bei der die Höhe der Hell-Dunkel-Grenze auf einer Kuppe oder in einer Wanne der Höhe auf einer ebenen Straße entspricht. Die Entfernung d kann bei unterschiedlichen Krümmungsradien variieren. Die optimale Entfernung ist dadurch gekennzeichnet, dass bei der dafür eingestellten optischen Scheinwerferachse die Wahrnehmungsbedingungen, die das Abblendlicht den Verkehrsteilnehmern auf einer ebenen Straße bietet, möglichst umfassend auch auf Kuppen und Wannen übertragen werden können. Die Wunschhöhe $h_{HDG}(d)$ der Hell-Dunkel-Grenze in der Zielentfernung d berechnet sich nach folgender Formel:

$$h_{HDG}(d) = h_{SW} - d \cdot \tan \beta_0 \quad (4.1)$$

¹³³ Formeln zur Berechnung der Höhe der Hell-Dunkel-Grenze befinden sich in Abschnitt 8.2.2 ab Seite 151 im Anhang.

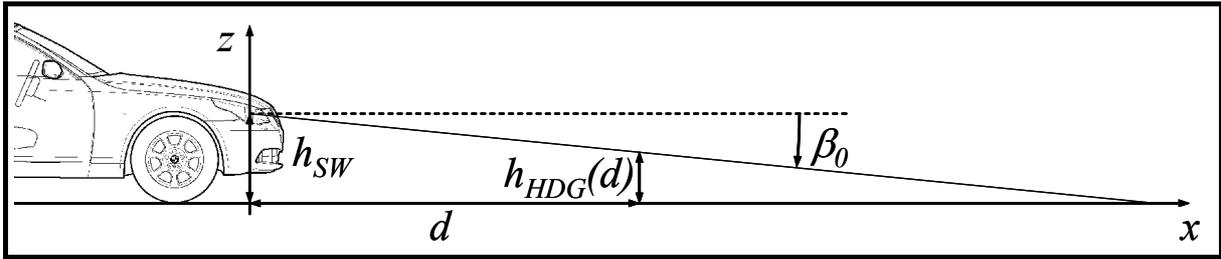


Bild 4.3: Höhe der Hell-Dunkel-Grenze in der Entfernung d

Wie Formel 4.1 und Bild 4.3 zeigen, ist die Wunschhöhe zudem abhängig von der Scheinwerferanbauhöhe h_{SW} sowie der Grundeinstellung β_0 der Scheinwerfer.

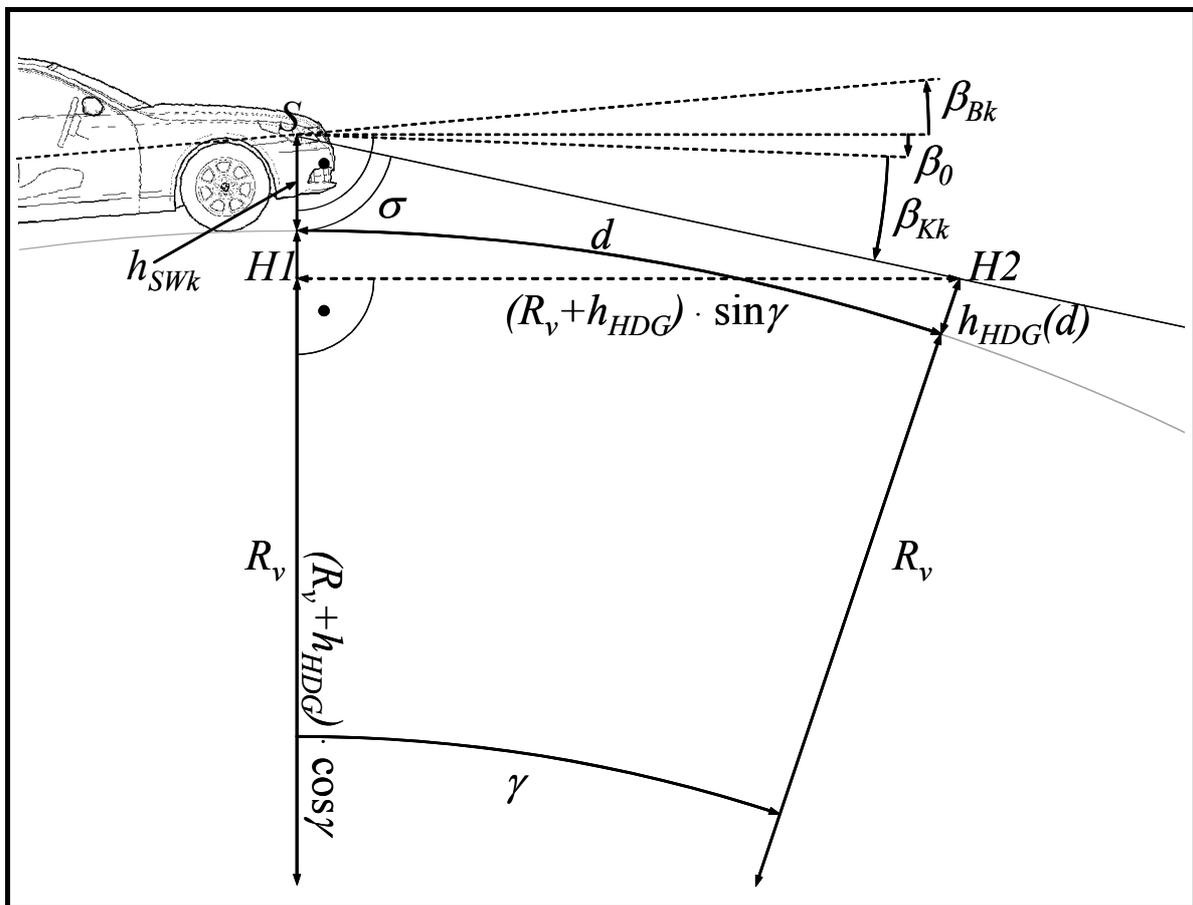


Bild 4.4: Vertikaler Winkel zur Anpassung der Lichtverteilung auf Kuppen

Die optische Scheinwerferachse muss im Winkel β_k bewegt werden, um auf einer Kuppe mit Radius R_v die Höhe $h_{HDG}(d)$ der Hell-Dunkel-Grenze in der Entfernung d konstant zu halten:

$$\beta_k = \beta_{Bk} + \beta_{Kk} = \beta_{Bk} + \left(90^\circ - \beta_0 - \arctan \left(\frac{(R_v + h_{HDG(d)}) \cdot \sin \gamma}{R_v + h_{SWk} - (R_v + h_{HDG(d)}) \cdot \cos \gamma} \right) \right) \quad (4.2)$$

Anhand Bild 4.4 wird die Herleitung der Formel 4.2 veranschaulicht. Die Fahrzeuglängsachse ist auf einer Kuppe um den Basisneigungswinkel β_{Bk} gegenüber der Horizontalen geneigt¹³⁴. Daher wird dieser Winkel als erster Summand zum gesamten Schwenkwinkel β_k des Scheinwerfers hinzugefügt. Der zweite Summand entspricht dem (vertikalen) Kurvenschwenkwinkel β_{Kk} auf Kuppen, der die Krümmung im Fahrzeugvorfeld ausgleicht. Um diesen Winkel zu bestimmen, wird das Dreieck $S-H1-H2$ in Bild 4.4 betrachtet. Zunächst wird der Winkel σ am Punkt S berechnet:

$$\sigma = \arctan\left(\frac{\text{Strecke}(H1-H2)}{\text{Strecke}(S-H1)}\right) \quad (4.3)$$

Die Formeln zur Bestimmung der Strecken $S-H1$ und $H1-H2$ lauten:

$$\text{Strecke}(H1-H2) = (R_v + h_{HDG(d)}) \cdot \sin \gamma \quad (4.4)$$

$$\text{Strecke}(S-H1) = R_v + h_{SWk} - (R_v + h_{HDG(d)}) \cdot \cos \gamma \quad (4.5)$$

Durch Einsetzen der Formeln 4.4 und 4.5 in die Formel 4.3 erhält man die Berechnungsvorschrift für den Winkel σ :

$$\sigma = \arctan\left(\frac{(R_v + h_{HDG(d)}) \cdot \sin \gamma}{R_v + h_{SWk} - (R_v + h_{HDG(d)}) \cdot \cos \gamma}\right) \quad (4.6)$$

Die Differenz dieses Winkels σ sowie der Grundeinstellung β_0 zum rechten Winkel ergibt den zweiten Summanden β_{Kk} in Formel 4.2:

$$\beta_{Kk} = 90^\circ - \beta_0 - \sigma = 90^\circ - \beta_0 - \arctan\left(\frac{(R_v + h_{HDG(d)}) \cdot \sin \gamma}{R_v + h_{SWk} - (R_v + h_{HDG(d)}) \cdot \cos \gamma}\right) \quad (4.7)$$

Der Öffnungswinkel γ des Kuppensegments ist eine Funktion der Entfernung d und des Kuppenradius R_v :

$$\gamma = d \cdot \frac{1}{R_v} \cdot \frac{180^\circ}{\pi} \quad (4.8)$$

Analog zur Berechnung des Verstellwinkels auf Kuppen ergibt sich nach Bild 4.5 der Verstellwinkel β_w in Wannen:

$$\beta_w = \beta_{Bw} + \beta_{Kw} = \beta_{Bw} + \left(\beta_0 + \arctan\left(\frac{R_v - h_{SWw} - (R_v - h_{HDG(d)}) \cdot \cos \gamma}{(R_v - h_{HDG(d)}) \cdot \sin \gamma}\right) \right) \quad (4.9)$$

¹³⁴ Die Berechnungsvorschriften für den Basisneigungswinkel β_{Bk} sowie für die tatsächliche Höhe h_{SWk} der Scheinwerfer über der Fahrbahn auf einer Kuppe befinden sich in Abschnitt 8.2 ab Seite 147 im Anhang.

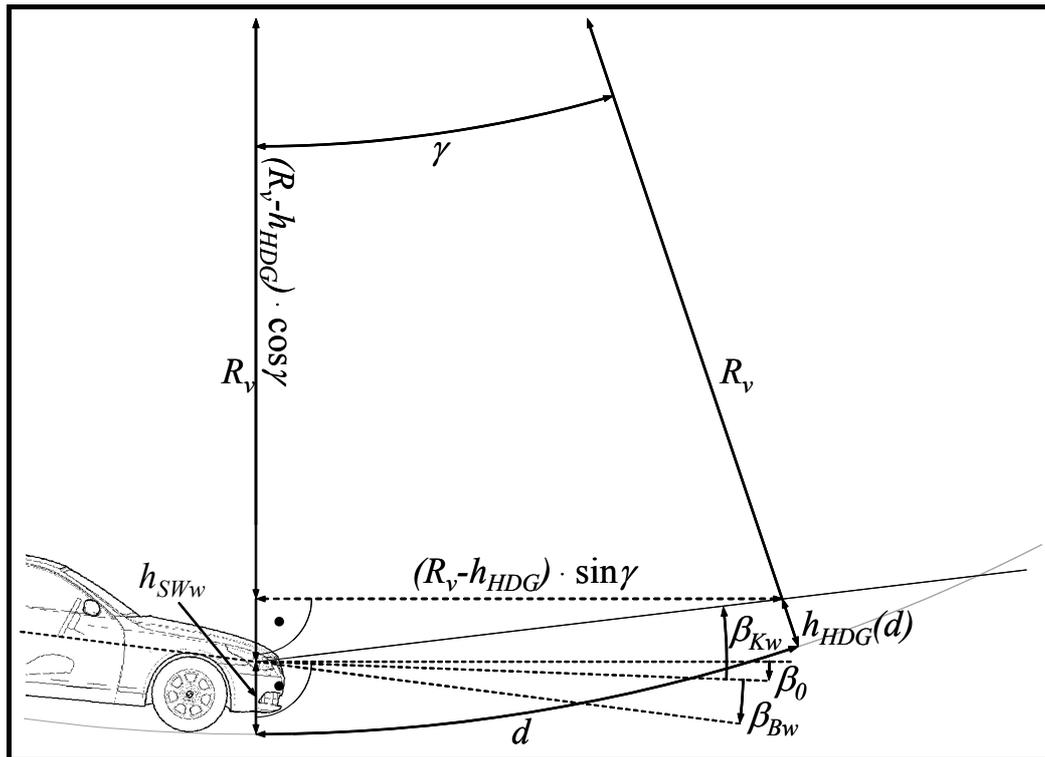


Bild 4.5: Vertikaler Winkel zur Anpassung der Lichtverteilung in Wannen

4.3 Entwicklung der Verstellstrategie zur adaptiven Leuchtweitenregulierung

Zur Bestimmung einer optimalen Verstellstrategie wird das Verhalten des vorgestellten Algorithmus' mit verschiedenen Zielentfernungen betrachtet. Gegenstand der Untersuchung sind vier feste Zielentfernungen $d_1 - d_4$ sowie eine radiusabhängige Zielentfernung d_5 :

- $d_1 = 25$ m,
- $d_2 = 50$ m,
- $d_3 = 65,5$ m,
- $d_4 = 75$ m,
- $d_5 = d(R_v)$.

In diesen Entfernungen vor dem Fahrzeug befindet sich der Punkt, an dem die Höhe der Hell-Dunkel-Grenze von der Scheinwerfersteuerung konstant gehalten wird.

Die Zielentfernungen d_1 , d_2 und d_4 wurden gewählt, weil sich in ihren Entfernungen zahlreiche Punkte auf dem Messschirm der ECE-Regelung 98 für Xenon-Scheinwerfer befinden¹³⁵.

¹³⁵ ECE R98 [34] für Scheinwerfer mit Gasentladungslampen

Die Entfernung d_3 entspricht der geometrischen Leuchtweite eines BMW der 5er-Baureihe mit einer Scheinwerferanbauhöhe $h_{SW} = 0,655 \text{ m}$ sowie einer Grundeinstellung $\tan \beta_0 = 1 \%$. Diese beiden Werte werden im Folgenden als Eingangsparameter für sämtliche geometrischen Berechnungen verwendet.

Der fünfte Algorithmus besitzt eine variable Zielentfernung d_5 , deren Wert mit abnehmendem Radius R_v kleiner wird. Ausgangspunkt zur Bestimmung der Zielentfernung ist die Tangente vom Scheinwerfer zur Fahrbahnoberfläche auf Kuppen bzw. die Tangente an die dynamische Augenlinie des Gegenverkehrs in Wannen. Die Höhe der dynamischen Augenlinie über der Fahrbahnoberfläche entspricht der durchschnittlichen Augenhöhe der Fahrer $h_A = 1,13 \text{ m}$ ¹³⁶. Die Tangenten stellen lediglich geometrische Hilfsgrößen zur Ermittlung der Zielentfernung d_5 dar, die wiederum als Grundlage zur Berechnung des Sollwinkels der optischen Scheinwerferachse (vgl. Abschnitt 4.2) dient.

Die Bogenlänge zwischen dem Berührungspunkt der Tangente und dem Fahrzeug entspricht der Zielentfernung d_5 und berechnet sich nach folgenden Gleichungen:

$$d_{5 \text{ Kuppe}} = \pi / 180^\circ \cdot R_v \cdot \arccos(R_v / (R_v + h_{SWk})) \quad (4.10)$$

$$d_{5 \text{ Wanne}} = \pi / 180^\circ \cdot R_v \cdot \arccos((R_v - h_A) / (R_v - h_{SWw})) \quad (4.11)$$

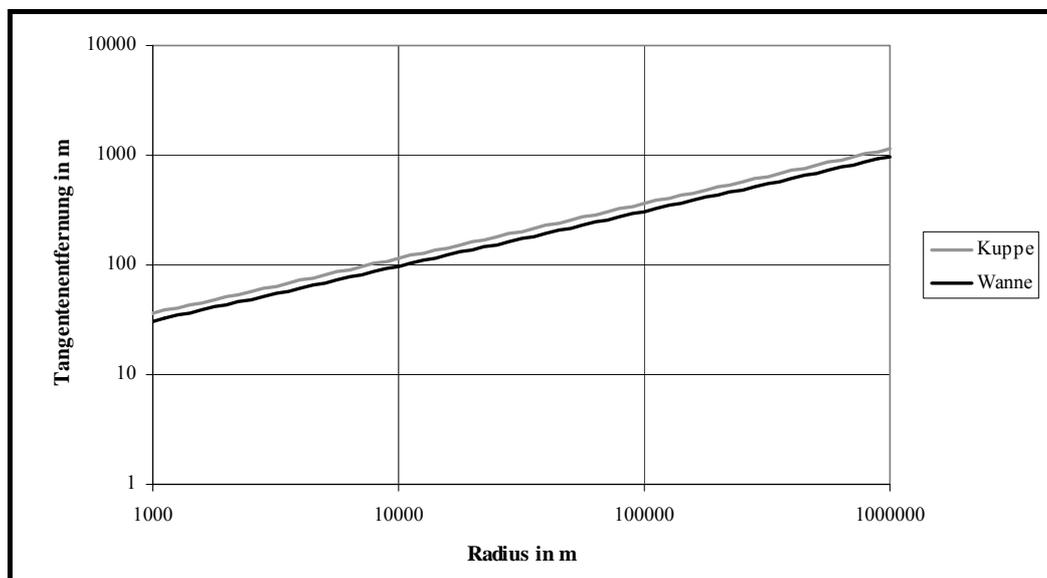


Bild 4.6: Entfernung des Tangentenberührungspunktes auf Kuppen und in Wannen

Die Abhängigkeit der Zielentfernung d_5 von den vertikalen Radien zeigt Bild 4.6. Da die Höhe der dynamischen Augenlinie etwa doppelt so groß ist, wie die Anbauhöhe der Schein-

¹³⁶ SCHMIDT-CLAUSEN/DAMASKY 1996 [107] zitiert in LEHNERT 2001 [83], S. 36

werfer, weisen die berechneten Zielentfernungen d_5 auf Kuppen und in Wannen nur geringe Unterschiede auf.

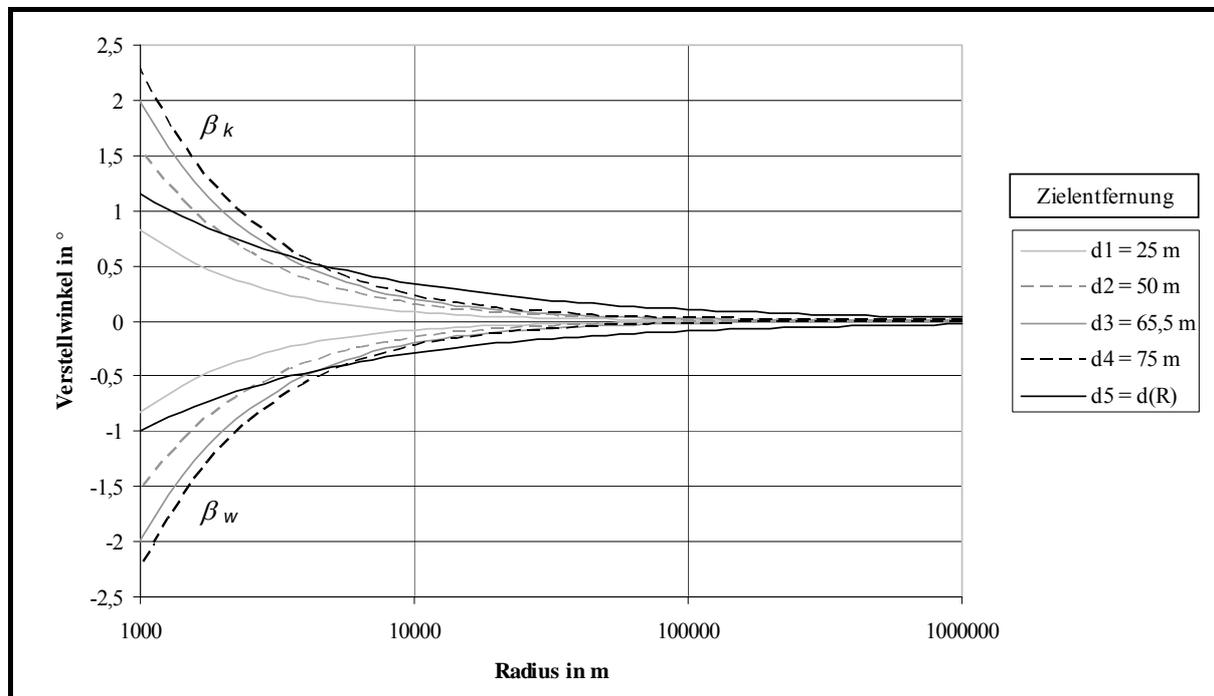


Bild 4.7: Verstellwinkel mit den Zielentfernungen d_1 bis d_5

In Bild 4.7 sind die vertikalen Verstellwinkel β_k und β_w dargestellt, welche sich aus den Formeln 4.2 und 4.9 mit den Zielentfernungen d_1 bis d_5 ergeben. Die positiven Werte stehen für das Absenken der optischen Scheinwerferachse auf Kuppen, die negativen Werte für das Anheben der Achse in Wannen¹³⁷. Der Betrag des Verstellwinkels steigt mit zunehmender Zielentfernung sowie mit sinkendem Radius. Da die variable Zielentfernung d_5 mit abnehmendem Radius kürzer wird, sind die Verstellwinkel dieses Algorithmus' bei großen Radien größer und bei kleinen Radien kleiner als die Beträge der meisten anderen Algorithmen.

Gegenstand der folgenden Untersuchung ist der Einfluss einer verstellten Scheinwerferachse auf die geometrische Leuchtweite und auf die Größe des Blendbereichs (vgl. Bild 4.1 auf Seite 65). Die Eigenschaften der Verstellstrategien werden zunächst für Kuppen und anschließend für Wannen diskutiert.

In Bild 4.8 sind die geometrischen Leuchtweiten der fünf Verstellstrategien auf **Kuppen** dargestellt. Die geringen Verstellwinkel der Versionen mit den Zielentfernungen $d_1 = 25 \text{ m}$ und $d_2 = 50 \text{ m}$ bewirken ein Ansteigen der geometrischen Leuchtweite auf Kuppen. Bei Radien $R_v < 8000 \text{ m}$ bzw. $R_v < 11500 \text{ m}$ schneidet die Hell-Dunkel-Grenze die Fahrbahnober-

¹³⁷ Vorzeichenregelung nach DIN 70000 [29], S.2 und S.11

fläche nicht mehr und der berechnete Wert der geometrischen Leuchtweite steigt auf unendlich. Bei sehr kleinen Radien $R_v < 1000 \text{ m}$ steuert der Algorithmus mit der Zielentfernung d_2 den Scheinwerfer offensichtlich zu weit nach unten, da hier die Hell-Dunkel-Grenze die Fahrbahnoberfläche wieder schneidet und sich eine sehr kurze Leuchtweite erzeugt. Zwar erfolgt - wie in Abschnitt 2.4 beschrieben - die Anpassung der Lichtverteilung nur für Kuppen und Wannen mit Radien $R_v > 1000 \text{ m}$, jedoch zeigt diese Eigenschaft der Zielentfernung d_2 , dass die Höhe der Hell-Dunkel-Grenze auch bei Kuppenradien $R_v > 1000 \text{ m}$ im nahen Bereich vor dem Fahrzeug sehr kleine Werte annimmt, wodurch die Erkennbarkeit von Objekten auf der Fahrbahn erschwert wird. Daher ist für solche engen Kuppen ein Steuern der Lichtverteilung mit der Zielentfernung d_2 nicht geeignet.

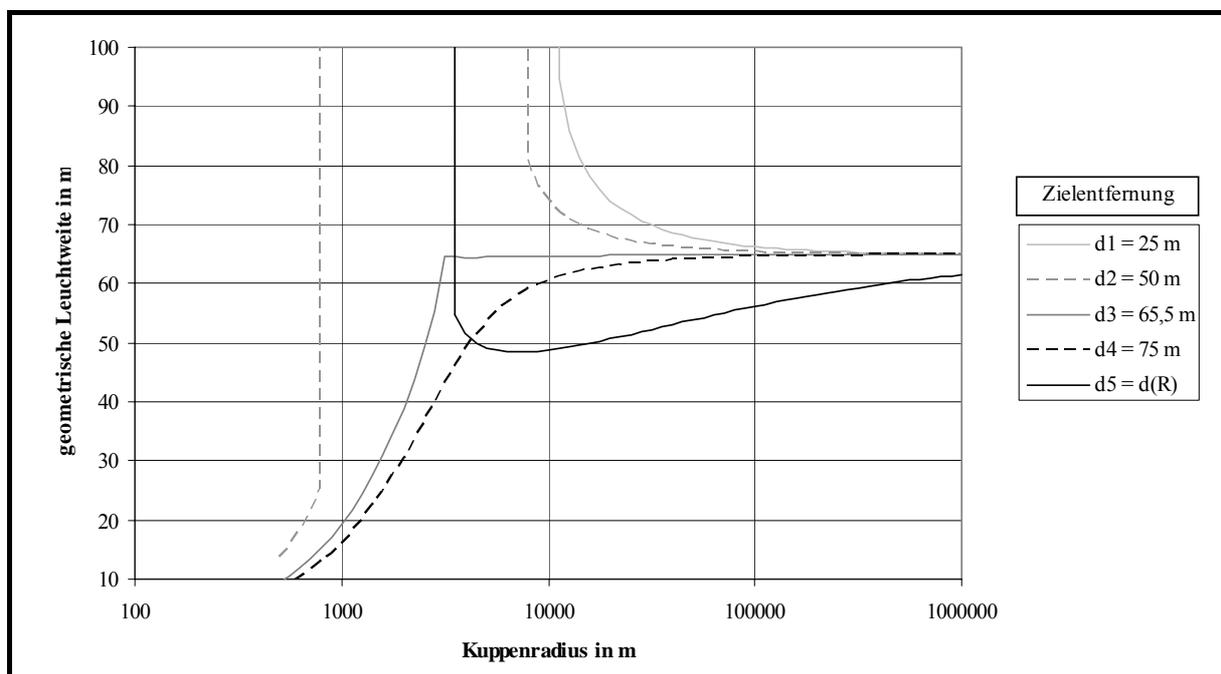


Bild 4.8: Geometrische Leuchtweiten auf Kuppen

Die Zielentfernung $d_3 = 65,5 \text{ m}$ entspricht der geometrischen Leuchtweite auf einer ebenen Straße. Das bedeutet, dass in diesem Abstand die Hell-Dunkel-Grenze die Fahrbahnoberfläche berührt ($h_{HDG} = 0 \text{ m}$). In der Zielentfernung d_3 hält der Algorithmus auch auf Kuppen die Höhe der Hell-Dunkel-Grenze auf dem Wert $h_{HDG} = 0 \text{ m}$ und erreicht somit eine konstante geometrische Leuchtweite bei großen und mittleren vertikalen Radien. Je kleiner der Kuppenradius wird, desto geringer wird jedoch die Höhe der Hell-Dunkel-Grenze in Entfernungen $d < d_3$ (vgl. Bild 4.9 a). Dadurch werden Objekte auf der Fahrbahn nur noch in ihrem untersten Bereich hell beleuchtet und werden vom Fahrer schlecht wahrgenommen. Wie Bild 4.9 b zeigt, durchschneidet ab einem Kuppenradius $R_v < 3000 \text{ m}$ die Hell-Dunkel-Grenze die Fahrbahnoberfläche in einem kurzen Abstand zum Fahrzeug. Dieser Effekt hat eine äußerst kurze geometrische Leuchtweite und sehr schlechte Wahrnehmungsbedingungen des Fahrers zur Folge.

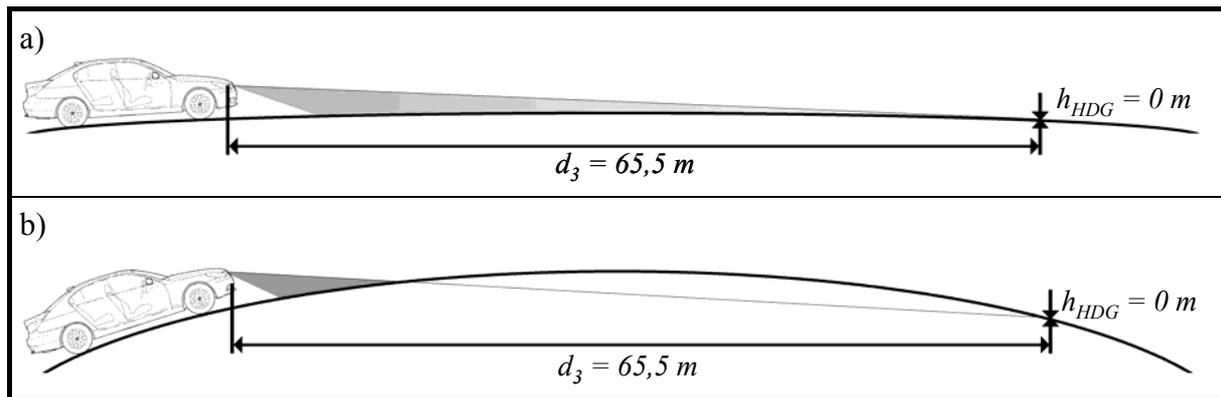


Bild 4.9: Höhe der Hell-Dunkel-Grenze über der Fahrbahnoberfläche bei der Zielentfernung d_3 auf einer Kuppe a) mit großem und b) mit kleinem Radius

Die vertikalen Verstellwinkel des Algorithmus' mit der Zielentfernung d_4 sind sehr groß (vgl. Bild 4.7 auf Seite 72). Daher wird die Lichtverteilung auf Kuppen zu stark abgesenkt, und die geometrische Leuchtweite ist immer kleiner als auf einer ebenen Straße. Bild 4.8 zeigt diesen Effekt.

Die Tatsache, dass selbst auf Kuppen mit kleinen Radien die Leuchtweiten bei den Algorithmen mit den Zielentfernungen d_3 und d_4 immer einen endlichen Wert besitzen, erlaubt die Schlussfolgerung, dass der Gegenverkehr nicht geblendet wird, da sich sein Auge bei jedem Kuppenradius oberhalb der Hell-Dunkel-Grenze befindet. Dieser Vorteil wird jedoch durch spürbar schlechtere Wahrnehmungsbedingungen des Fahrers erkauft. Die Zielentfernungen d_3 und d_4 sind daher als Grundlage für eine Scheinwerfersteuerung auf Kuppen ungeeignet.

Anhand Bild 4.7 und Bild 4.8 wird ersichtlich, dass die Verstellstrategie mit der variablen Zielentfernung d_5 auf Kuppen mit großen Radien die Scheinwerferachse zu stark absenkt und zu einer kurzen geometrischen Leuchtweite führt. Auf Kuppen mit engen Radien $R_v < 3500 \text{ m}$ nehmen die Verstellwinkel nur in kleinen Schritten zu und bewirken dort ein Ansteigen der geometrischen Leuchtweite bis zum rechnerischen Wert unendlich. Das bedeutet, dass beim Annähern an eine Kuppe mit parabelförmiger Ausrundung die Leuchtweite zunächst abnimmt und anschließend wieder ansteigt. Der Vorgang wiederholt sich in umgekehrter Reihenfolge beim Verlassen der Kuppe. Insgesamt bewirkt dieses Verhalten während der Fahrt über eine Kuppe eine sehr unruhige Lichtverteilung.

Wie bereits erwähnt, steigen bei den Algorithmen mit den Zielentfernungen $d_1 = 25 \text{ m}$, $d_2 = 50 \text{ m}$ und $d_5 = d(R_v)$ die geometrischen Leuchtweiten auf Kuppen mit kleinen Radien stark an. Ab einem Grenzradius berührt die Hell-Dunkel-Grenze die Fahrbahnoberfläche nicht mehr. Daher muss es einen Entfernungsbereich geben, in dem sich während der Annäherung zweier Fahrzeuge auf Kuppen das entgegenkommende Fahrerauge unterhalb der Hell-Dunkel-Grenze befindet und geblendet werden kann. Bild 4.10 zeigt diese Blendungsbereiche für die Algorithmen mit den drei Zielentfernungen d_1 , d_2 und d_5 sowie für den Fall d_0 , dass die Scheinwerferachse auf der Kuppe nicht verstellt wird.

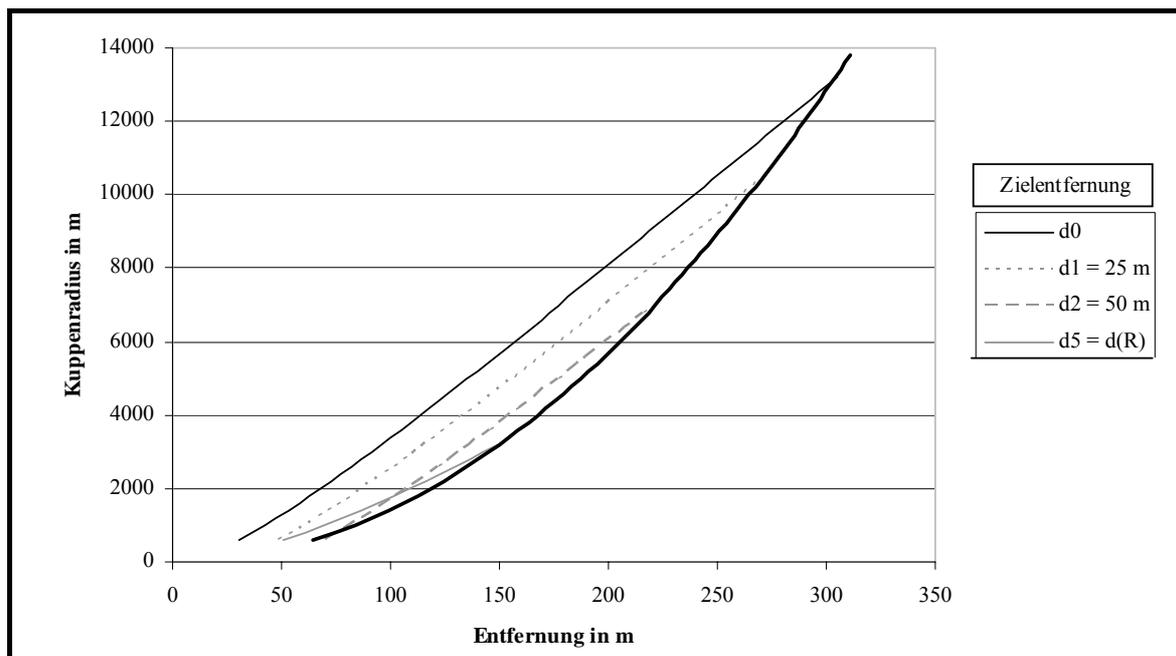


Bild 4.10: Blendbereich auf Kuppen bei verschiedenen Zielentfernungen

Der Blendungsbereich für die vier dargestellten Fälle wird jeweils von zwei Linien umschlossen. Die rechte schwarze Begrenzungslinie gilt für alle vier Versionen und entspricht der Entfernung, bei der das entgegenkommende Fahrerauge während der Annäherung zweier Fahrzeuge erstmals in die Scheinwerfer blicken kann. In größeren Entfernungen wird die direkte Sichtverbindung durch die Kuppe unterbrochen.

Auf der linken Seite wird der jeweilige Blendbereich durch eine graue Linie begrenzt, die individuell für jede der vier Algorithmen d_0 bis d_2 und d_5 berechnet wird. Bei der Bestimmung dieser Linien wird die Entfernung gesucht, bei der die dynamische Augenlinie des Gegenverkehrs die Hell-Dunkel-Grenze überschreitet¹³⁸.

Die kleinsten Blendbereiche und damit die kürzesten Blendzeiten auf Kuppen zeigen die Varianten mit den Zielentfernungen $d_2 = 50\text{ m}$ und $d_5 = d(R_v)$. Da jedoch die Regelung mit der Zielentfernung d_5 bei großen und mittleren Kuppenradien zu kurze Leuchtweiten und unruhige Scheinwerferbewegungen erzeugt und die Verstellstrategie mit der Zielentfernung d_2 bei sehr kleinen Radien für den Fahrer ungünstige Wahrnehmungsbedingungen bietet, wird eine gemischte Verstellstrategie bevorzugt:

- Algorithmus mit Zielentfernung $d_2 = 50\text{ m}$ für Kuppen mit großem Radius und
- Algorithmus mit variabler Zielentfernung d_5 für Kuppen mit kleinem Radius.

¹³⁸ Eine Darstellung der linken Begrenzungslinien für die Zielentfernungen d_3 und d_4 macht keinen Sinn, da diese Linien rechts der rechten Begrenzungslinie liegen würden. Zur Berechnung der Begrenzungslinien siehe auch Abschnitt 4.1.2 ab Seite 64.

Wie Bild 4.7 auf Seite 72 zeigt, schneiden sich die Verstellwinkel der beiden Algorithmen bei einem Kuppenradius $R_v \approx 2000 \text{ m}$. Bei diesem Radius ist ein stetiges Umschalten zwischen beiden Algorithmen möglich.

Alle fünf Algorithmen arbeiten weitgehend symmetrisch. Das heißt, der Betrag der Verstellwinkel in Wannen entspricht nahezu dem Betrag der Verstellwinkel auf Kuppen. Trotzdem werden im Folgenden die Eigenschaften der Algorithmen mit den fünf Zielentfernungen in **Wannen** näher untersucht.

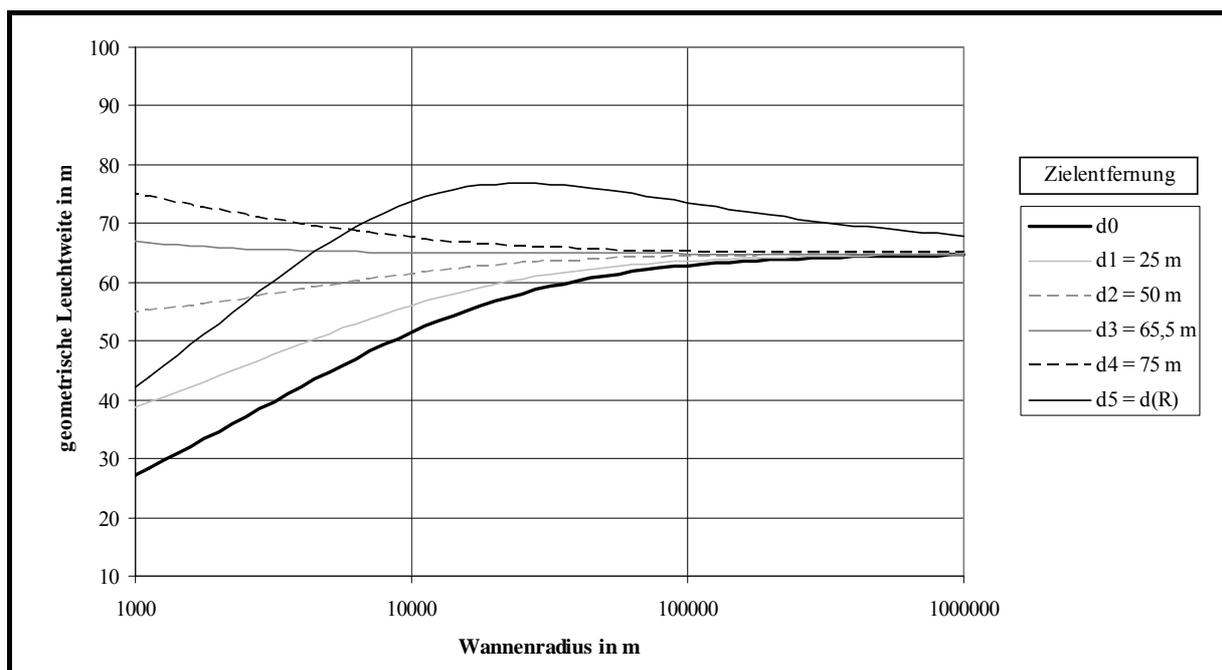


Bild 4.11: Geometrische Leuchtweiten in Wannen

Bild 4.11 stellt die geometrischen Leuchtweiten in Wannen mit verschiedenen Radien dar. Dort sind die Werte der fünf Algorithmen d_1 bis d_5 zu sehen und zum Vergleich der Fall d_0 , bei dem die Scheinwerferachse in Wannen nicht angehoben wird.

Wie auf Kuppen verstellen auch in Wannen die Algorithmen mit den Zielentfernungen $d_1 = 25 \text{ m}$ und $d_2 = 50 \text{ m}$ die Scheinwerfer nur um kleine Beträge. Daher sinkt die geometrische Leuchtweite bei kleinen Wannenradien stärker als bei den Verstellstrategien mit größeren Zielentfernungen. Die Leuchtweiten sind jedoch größer als bei Fahrzeugen ohne Scheinwerferverstellung, wie die breite schwarze Linie (d_0) in Bild 4.11 zeigt.

Für den Fahrer gilt zwar, je größer die Leuchtweite, desto besser sind die Wahrnehmungsbedingungen. Wird aber die Scheinwerferachse in Wannen zu stark angehoben, dann besteht die Gefahr, dass die Hell-Dunkel-Grenze die dynamische Augenlinie des Gegenverkehrs schneidet und an dessen Auge Blendimpulse entstehen (siehe Bild 4.12).

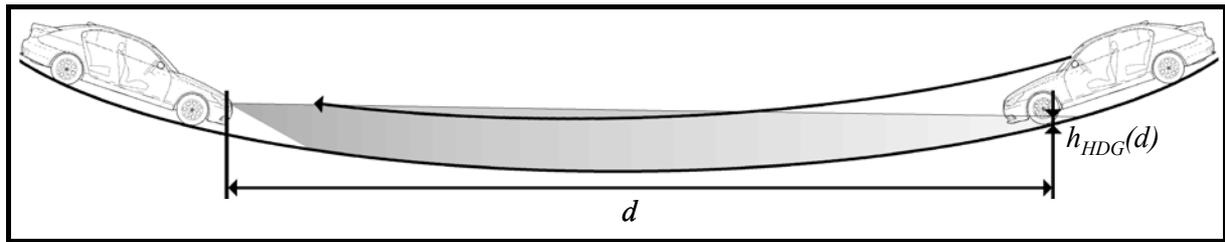
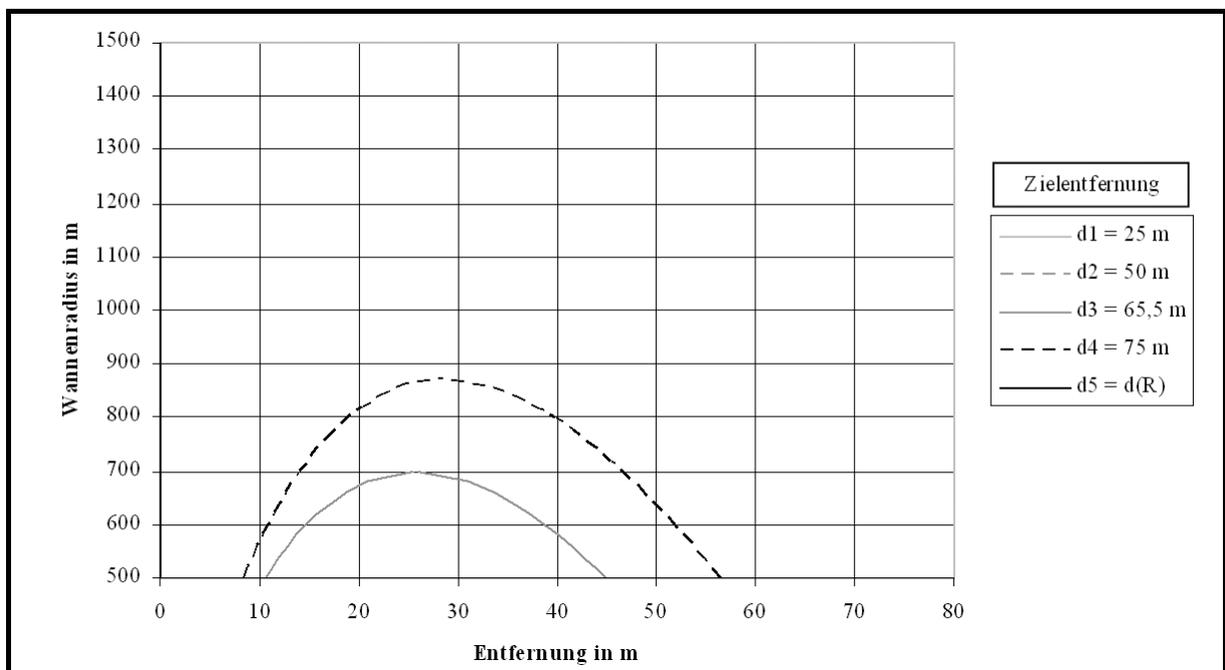


Bild 4.12: Blendgefahr in Wannen

Aus diesem Grund werden die Schnittpunkte der Hell-Dunkel-Grenze mit der dynamischen Augenhöhe berechnet. Als Ausgangshöhe der dynamischen Augenhöhe wird die durchschnittliche Augenhöhe eines Fahrers $h_A = 1,13 \text{ m}$ angesetzt¹³⁹. Die Ergebnisse der Berechnungen für verschiedene Wannenradien und den Verstellstrategien mit den fünf Zielentfernungen d_1 bis d_5 sind in Bild 4.13 dargestellt.

Bild 4.13: Blendbereich in Wannen bei einer Augenhöhe $h_A = 1,13 \text{ m}$

Der Blendbereich für eine Zielentfernung befindet sich unterhalb der Kurve, welche der jeweiligen Zielentfernung zugeordnet ist. Es zeigt sich, dass nur in sehr engen Wannen die dynamische Augenhöhe von der Hell-Dunkel-Grenze bei zwei Algorithmen geschnitten wird. Wie in Abschnitt 2.4 beschrieben, soll die Anpassung der Lichtverteilung nur für Kuppen und Wannen mit Radien $R_v > 1000 \text{ m}$ erfolgen. In diesem Radienbereich besteht offensichtlich bei keiner Zielentfernung eine Blendgefahr für den Gegenverkehr. Diese Aussage berücksichtigt

¹³⁹ SCHMIDT-CLAUSEN/DAMASKY 1996 [107] zitiert in LEHNERT 2001 [83], S. 36

jedoch nicht die Tatsache, dass die Fahrer von Sportwagen oder flachen Fahrzeugen sowie kleingewachsene Fahrer eine unterdurchschnittliche Augenhöhe besitzen. Außerdem wird die Fahrzeugkarosserie durch Bodenwellen zu Nickbewegungen angeregt, die kurzfristig eine zusätzliche Anhebung der Lichtverteilung bewirken. Um diese Nachteile zu vermeiden, ist bereits für ebene Straßen eine nach unten gerichtete Scheinwerferachse vorgeschrieben¹⁴⁰.

Daher werden analog zu den Verhältnissen auf einer ebenen Straße zur Bestimmung des Blendbereichs nicht die Schnittpunkte der Hell-Dunkel-Grenze zur dynamischen Augenlinie, sondern die Schnittpunkte der optischen Scheinwerferachse zur dynamischen Augenlinie berechnet. Der Winkel zwischen der optischen Scheinwerferachse und der Hell-Dunkel-Grenze entspricht der Grundeinstellung der Scheinwerfer β_0 . Zusätzlich wird die Augenhöhe des entgegenkommenden Fahrers auf den Wert $h_A = 0,90 \text{ m}$ herabgesetzt. Die Ergebnisse der modifizierten Berechnungen zeigt Bild 4.14.

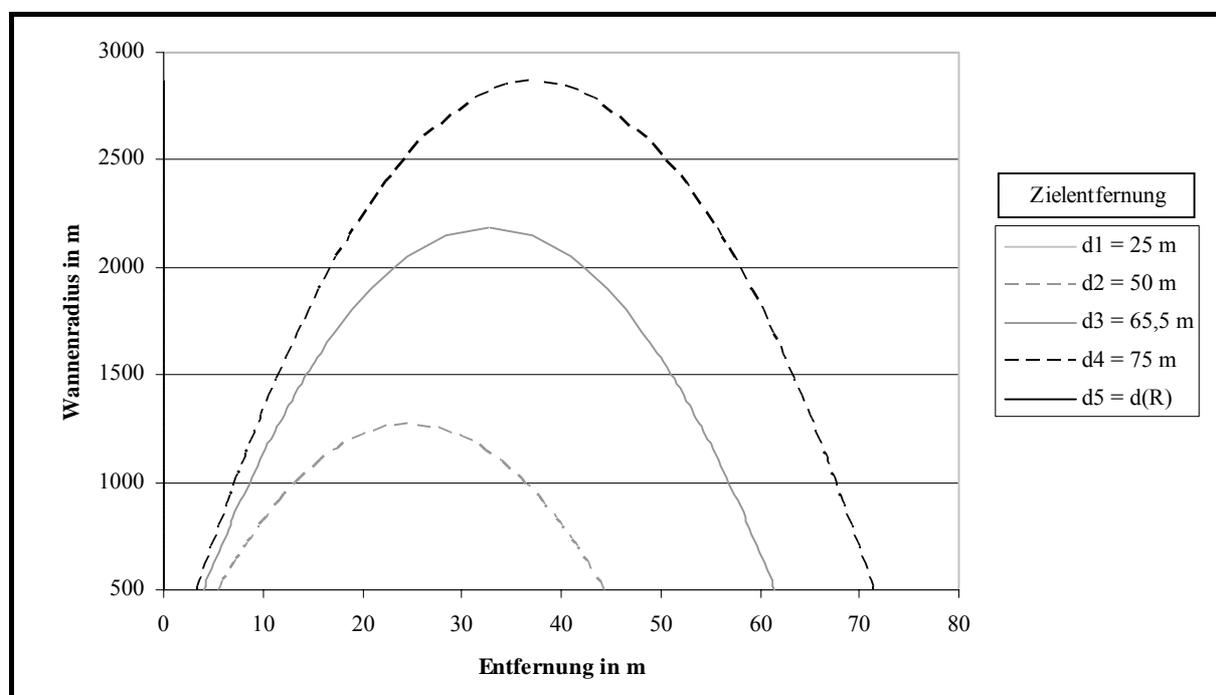


Bild 4.14: Blendbereich in Wannen bei einer Augenhöhe $h_A = 0,90 \text{ m}$

Unterhalb der parabelförmigen Kurven befindet sich der Bereich mit der erhöhten Blendgefahr für die dargestellte Zielentfernung. Aufgrund der geringen Entfernung des entgegenkommenden Fahrers sind darin sehr hohe Blendbeleuchtungsstärken zu erwarten, sodass der Bereich unbedingt vermieden werden muss. Aus diesem Grund sind die Algorithmen mit den großen Zielentfernungen $d_3 = 65,5 \text{ m}$ und $d_4 = 75 \text{ m}$ für Wannen nicht geeignet.

¹⁴⁰ ECE R48 [33], S. 17 f.

Die Verstellstrategie mit der Zielentfernung $d_2 = 50 \text{ m}$ erzeugt lediglich für Wannen mit Radien $R_v < 1300 \text{ m}$ einen Gefahrenbereich. Bei größeren Wannenradien besteht keine Blendefahr. Zudem zeigt Bild 4.11 auf Seite 76, dass in Wannen die geometrische Leuchtweite dieser Verstellstrategie größer als die Leuchtweite des Algorithmus' mit der Zielentfernung $d_1 = 25 \text{ m}$. Daher ist für Radien $R_v > 1300 \text{ m}$ die Zielentfernung d_2 der Entfernung d_1 vorzuziehen.

Die Verstellstrategie mit der Zielentfernung d_5 erzielt zwar eine noch größere Leuchtweite, doch wie auf Kuppen bewirkt dieser Algorithmus auch in Wannen eine unruhige Lichtverteilung. In der Annäherungsphase an eine Wanne sind die vertikalen Radien groß, die Leuchtweite steigt an. Je mehr sich das Fahrzeug dem Wannenzentrum annähert, desto enger wird die Krümmung und die Leuchtweite reduziert sich wieder. Der Vorgang wiederholt sich beim Verlassen der Wanne. Die Unruhe, die dadurch in der Lichtverteilung entsteht, könnte den Fahrer irritieren und eine verkürzte Lebensdauer der Stellmotoren in den Scheinwerfern verursachen.

In Tabelle 4.3 auf Seite 80 sind die wichtigsten Eigenschaften der Zielentfernungen zusammenfassend dargestellt. Als Folge dieser Eigenschaften wird für Wannen wie auch für Kuppen eine gemischte Verstellstrategie mit zwei verschiedenen Zielentfernungen $d_2 = 50 \text{ m}$ und $d_5 = d(R_v)$ gewählt. Für größere Radien wird die Zielentfernung d_2 eingesetzt und für kleine Radien die Zielentfernung d_5 . Umschaltwinkel ist der Schnittpunkt der Verstellwinkel der beiden Strategien bei einem Wannenradius $R_v \approx 2500 \text{ m}$.

Unter den gegebenen Eingangsparametern, wie Anbauhöhe $h_{SW} = 0,655 \text{ m}$ und Grundeinstellung $\tan\beta_0 = 1 \%$ der Scheinwerfer, ergibt sich daraus folgende Verstellstrategie zur Anpassung der Lichtverteilung an vertikale Kurven:

- In Kuppen- und Wannen mit großen und mittleren Radien $R_v > R_{vG}$ hält der Algorithmus die Höhe der Hell-Dunkel-Grenze in einer Entfernung $d_2 = 50 \text{ m}$ konstant.
- Beim Durchfahren von vertikalen Kurven mit kleinen Radien $R_v < R_{vG}$ wird die Verstellstrategie mit der variablen Zielentfernung $d_5 = d(R_v)$ verwendet.
- Der Grenzradius R_{vG} zum Umschalten zwischen den beiden Zielentfernungen beträgt auf Kuppen $R_{vG} \approx 2000 \text{ m}$ und in Wannen $R_{vG} \approx 2500 \text{ m}$.

Besitzt das Fahrzeug andere Eingangsparameter, dann ändern sich die Grenzradien, bei denen zwischen den beiden Verstellstrategien gewechselt wird. Der Grenzradius wird durch die Schnittpunkte der Verstellwinkel beider Algorithmen bestimmt. Bei einer extrem niedrigen Anbauhöhe der Scheinwerfer sowie bei einer stark nach unten geneigten Grundeinstellung kann es sinnvoll sein, eine kleinere Zielentfernung d_2 zu verwenden.

Eigenschaft	Bedingung	Zielentfernung					
		d_0	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5
	Kuppe						
geometrische Leuchtweite $d_{HDG} > 60 m$	$R_v \leq 3500 m$	+	+	-	-	-	+
	$3500 m < R_v \leq 12000 m$	+	+	+	-	-	-
	$R_v > 12000 m$	+	+	+	+	+	-
Blendgefahr für Gegenverkehr	$R_v \leq 3500 m$	-	-	-	+	+	-
	$3500 m < R_v \leq 7000 m$	-	-	+	+	+	+
	$R_v > 7000 m$	-	+	+	+	+	+
	Wanne						
geometrische Leuchtweite $d_{HDG} > 60 m$	$R_v \leq 3500 m$	-	-	-	+	+	-
	$3500 m < R_v \leq 12000 m$	-	-	+	+	+	+
	$R_v > 12000 m$	-	-	+	+	+	+
Blendung des Gegenverkehrs mit $h_A = 1,13 m$	$R_v \leq 800 m$	+	+	+	-	-	+
	$800 m < R_v \leq 1000 m$	+	+	+	+	-	+
	$R_v > 1000 m$	+	+	+	+	+	+
Blendung des Gegenverkehrs mit $h_A = 0,90 m$	$R_v \leq 1300 m$	+	+	-	-	-	+
	$1300 m < R_v \leq 3000 m$	+	+	+	-	-	+
	$R_v > 3000 m$	+	+	+	+	+	+
	Kuppe und Wanne						
ruhige Bewegungen der Scheinwerfer		+	+	+	+	+	-

Tabelle 4.3: Eigenschaften der Zielentfernungen¹⁴¹¹⁴¹ Ein + Symbol bedeutet: „trifft zu“, ein - Symbol bedeutet „trifft nicht zu“.

5 Wirkung der adaptiven Leuchtweitenregulierung

In den folgenden Abschnitten wird die Frage geklärt, ob eine adaptive Anpassung der Abblendlichtverteilung an den vertikalen Straßenverlauf tatsächlich die Wahrnehmungsbedingungen der Fahrzeugführer verbessert.

Gegenstand der Untersuchungen sind vier verschiedene Versionen der vorgestellten Verstellstrategie (siehe Kapitel 4) zur Anpassung der Lichtverteilung:

- 0 % - es erfolgt keine vertikale Anpassung der Lichtverteilung (entspricht dem Stand der Technik),
- 60 % - die vertikalen Verstellwinkel der Scheinwerfer betragen nur 60 % der Sollwerte, die der Algorithmus berechnet,
- 100 % - die Scheinwerferachse wird exakt so verstellt, wie es die adaptive Leuchtweitenregulierung vorgibt,
- 130 % - der im Algorithmus bestimmte Sollwinkel wird mit Faktor 1,3 multipliziert.

Zur Bewertung dieser vier Versionen der adaptiven Leuchtweitenregulierung wurden die Wahrnehmungsbedingungen, die sie auf Kuppen und in Wannen den Fahrern bieten, miteinander verglichen. Zusätzlich erfolgte ein Vergleich mit den Referenzwerten, die eine Abblendlichtverteilung auf einer ebenen Straße erzeugt.

Die Untersuchungen wurden als geometrische Berechnungen und Simulationen, in Form von Laborversuchen an einer Modellstraße und als Fahrversuche auf öffentlichen Straßen durchgeführt.

5.1 Geometrische Berechnungen und Simulation

Ziel der Berechnungen war die Bestimmung der geometrischen Leuchtweite der Abblendlichtverteilung für verschiedene Kuppen- und Wannenradien, wenn die Lichtverteilung nach den vier vorgestellten Versionen an die Krümmung angepasst wird. Mit Hilfe einer Simulationssoftware wurden zudem die Blendbeleuchtungsstärken und die zum Fahrer reflektierten Leuchtdichten berechnet¹⁴².

Die Wichtigkeit der geometrischen Leuchtweite zeigt sich in ihrem Einfluss auf die Erkennbarkeitsentfernung von Objekten. In einem bestimmten Entfernungsbereich, dessen Grenzen durch das Adaptationsniveau des Fahrers, durch die Lichtstärken der Scheinwerfer sowie durch die Reflexionseigenschaften der Objekte und ihrer Umgebung bestimmt werden, steigt

¹⁴² Die Funktionsweise der Simulationssoftware wird in Abschnitt 8.4 ab Seite 162 im Anhang vorgestellt.

die Erkennbarkeitsentfernung mit zunehmender Leuchtweite (bzw. mit geringerer Neigung der optischen Scheinwerferachse) an¹⁴³. Außerhalb dieses Entfernungsbereichs ist ihr Einfluss jedoch vernachlässigbar.

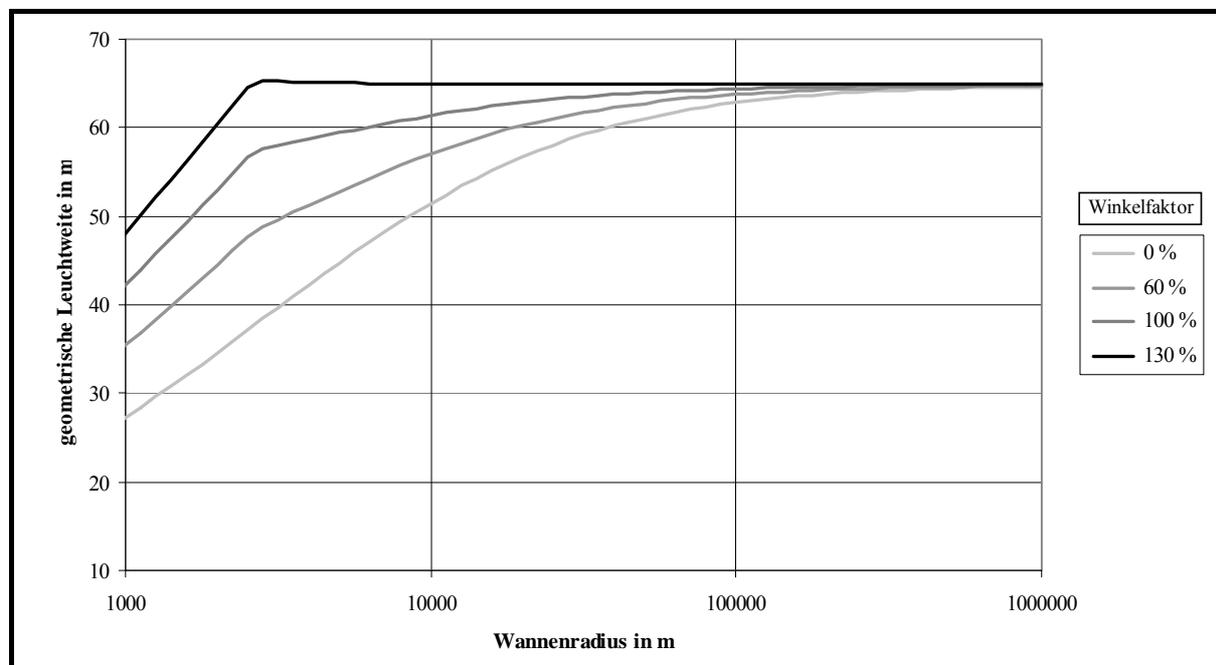


Bild 5.1: Vergleich der geometrischen Leuchtweiten in Wannen

Anhand Bild 5.1 zeigt sich, dass der Einfluss von **Wannen** auf die geometrische Leuchtweite umso kleiner ist, je stärker die Lichtverteilung daran angepasst wird. Während die Leuchtweite ohne Anhebung der Scheinwerferachse auf unter 30 m sinken kann, bleibt sie bei der Version mit Winkelfaktor 130 % mit abnehmenden Wannenradien zunächst nahezu konstant und wird erst bei Wannenradien $R_v < 2500$ m kürzer. Die Variante mit Winkelfaktor 100 % erreicht in einem großen Radienbereich hohe Leuchtweiten $d_{HDG} > 55$ m. Erst wenn der Wannenradius den Wert $R_v = 2500$ m unterschreitet, sinkt die geometrische Leuchtweite mit einem größeren Gradienten, weil hier im Algorithmus der adaptiven Leuchtweitenregulierung von der konstanten Zielentfernung $d_2 = 50$ m auf die variable Zielentfernung d_5 umgeschaltet wird.

Im Vergleich zum herkömmlichen Scheinwerfer ohne Anhebung der optischen Achse steht dem Fahrer in sehr engen Wannen mit Radius $R_v = 1000$ m durch 100 % (130 %) Anpassung der Lichtverteilung die 1,5 (1,7) fache Leuchtweite zur Verfügung (siehe Bild 5.1).

Neben der Leuchtweite verändert sich auch die Leuchtdichtevertelung auf der Fahrbahnoberfläche. So entsteht durch die Anhebung der Scheinwerferachse in Wannen eine deutlich

¹⁴³ SCHMIDT-CLAUSEN/FINSTERER 1989 [108] zitiert in HUHNS [61], S. 114

homogenere Verteilung der zum Fahrer reflektierten Leuchtdichten bei Beleuchtung der Fahrbahn durch die Fahrzeugscheinwerfer. Wie Bild 5.2 verdeutlicht, beträgt die Spannweite zwischen minimaler und maximaler Leuchtdichte in einer engen Wanne ohne Anpassung der Lichtverteilung (0 %) rund $4,8 \text{ cd/m}^2$. Wird dagegen die Lichtverteilung an die Wanne mit Verstelfaktor 100 % (130 %) angepasst, reduziert sich dieser Wert auf etwa 2,2 ($1,5 \text{ cd/m}^2$).

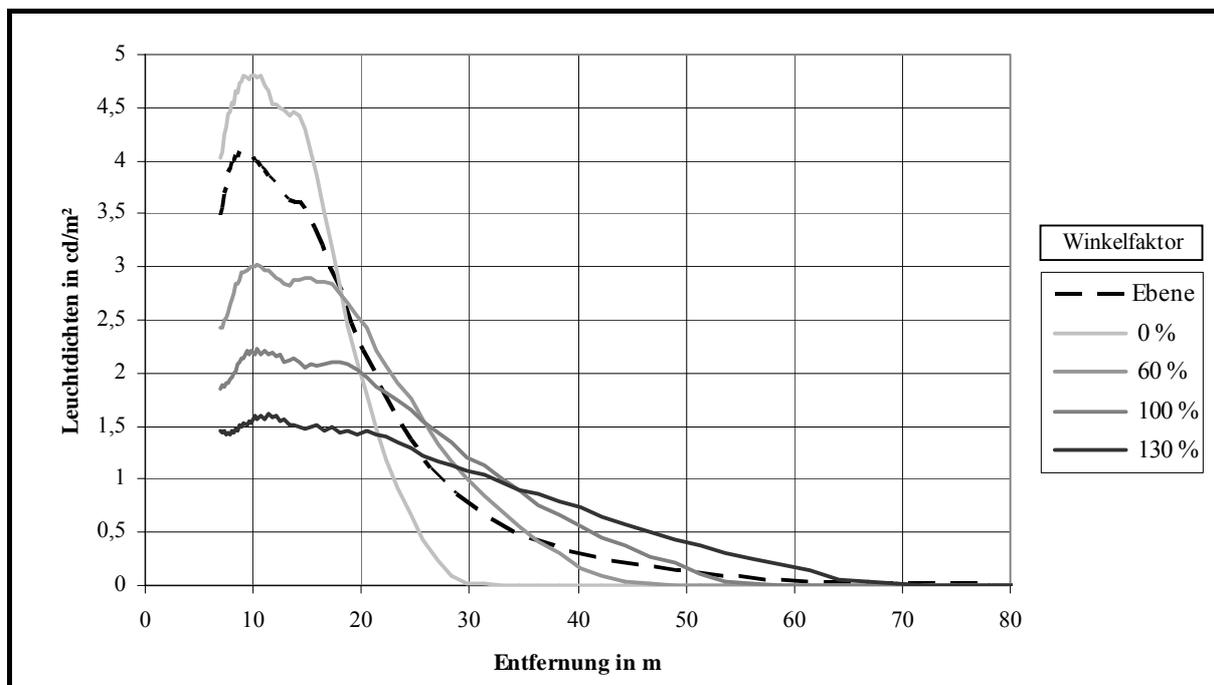


Bild 5.2: Reflektierte Leuchtdichten in einer Wanne mit $R_v = 1000 \text{ m}$

Zwar bietet die Anhebung der Scheinwerferachse insbesondere mit dem Winkelfaktor 130 % dem Fahrer in engen Wannen bessere Wahrnehmungsbedingungen als ohne Anpassung, sie kann jedoch eine erhöhte Blendung des Gegenverkehrs bewirken. Bild 5.3 zeigt, dass die Beleuchtungsstärken am entgegenkommenden Fahrerauge bei dem Winkelfaktor 130 % im Entfernungsbereich zwischen 10 m und 70 m größer sind als bei allen anderen Faktoren.

Im Diagramm ist als Referenz zusätzlich der Verlauf der Beleuchtungsstärken dargestellt, wie er am Auge des entgegenkommenden Fahrers entsteht, wenn sich beide Fahrzeuge auf einer ebenen Straße begegnen und die Scheinwerferachse nicht verstellt wird. Ein Vergleich dieser Referenzkurve mit dem Verlauf der Beleuchtungsstärken in der Wanne mit Radius $R_v = 1000 \text{ m}$ bei einer Anpassung der Lichtverteilung mit Winkelfaktor 100 % verdeutlicht, dass es mit einer angepassten Lichtverteilung gelingt, die Leuchtweite in Wannen zu erhöhen, ohne dabei den entgegenkommenden Fahrer stärker zu blenden, als auf einer ebenen Straße.

Je größer der Radius der Wanne ist, desto geringer sind die Unterschiede zwischen den Fahrbahnleuchtdichten sowie zwischen den Augenbeleuchtungsstärken der vier Versionen mit den verschiedenen Verstelfaktoren.

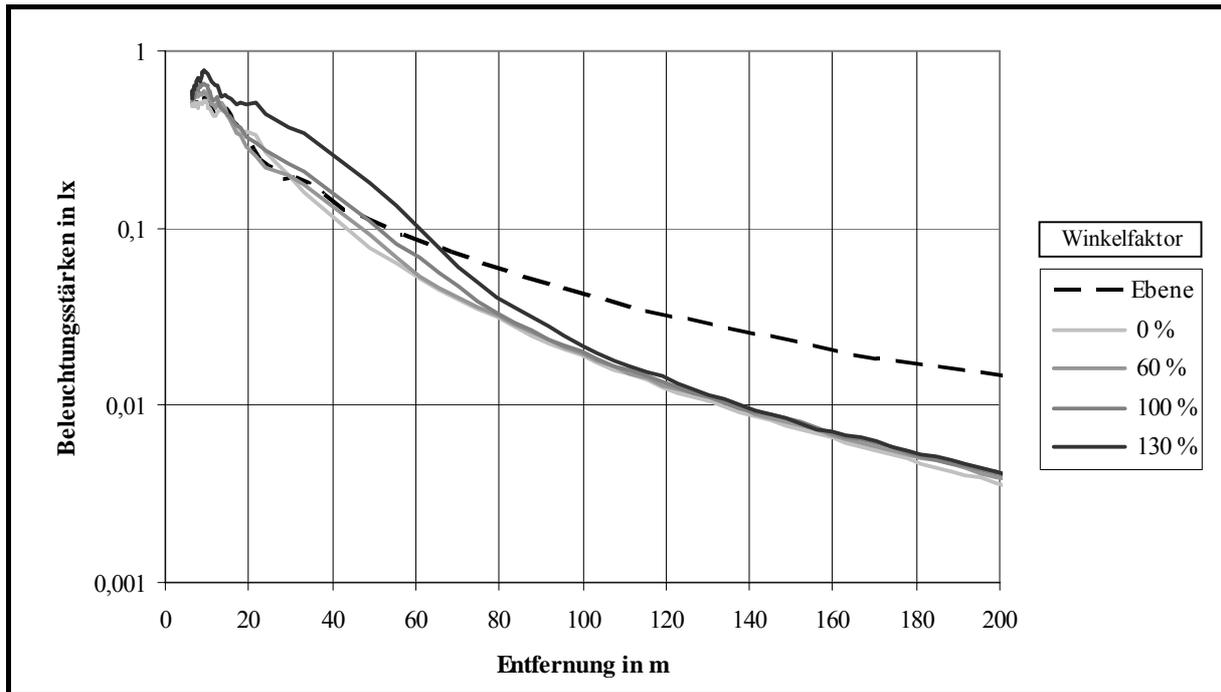


Bild 5.3: Augenbeleuchtungsstärken in einer Wanne mit $R_v = 1000$ m

Weitere Diagramme, die den Verlauf der Leuchtdichten und Beleuchtungsstärken in Wannen mit verschiedenen Radien zeigen, befinden sich im Anhang 8.4.6 ab Seite 183.

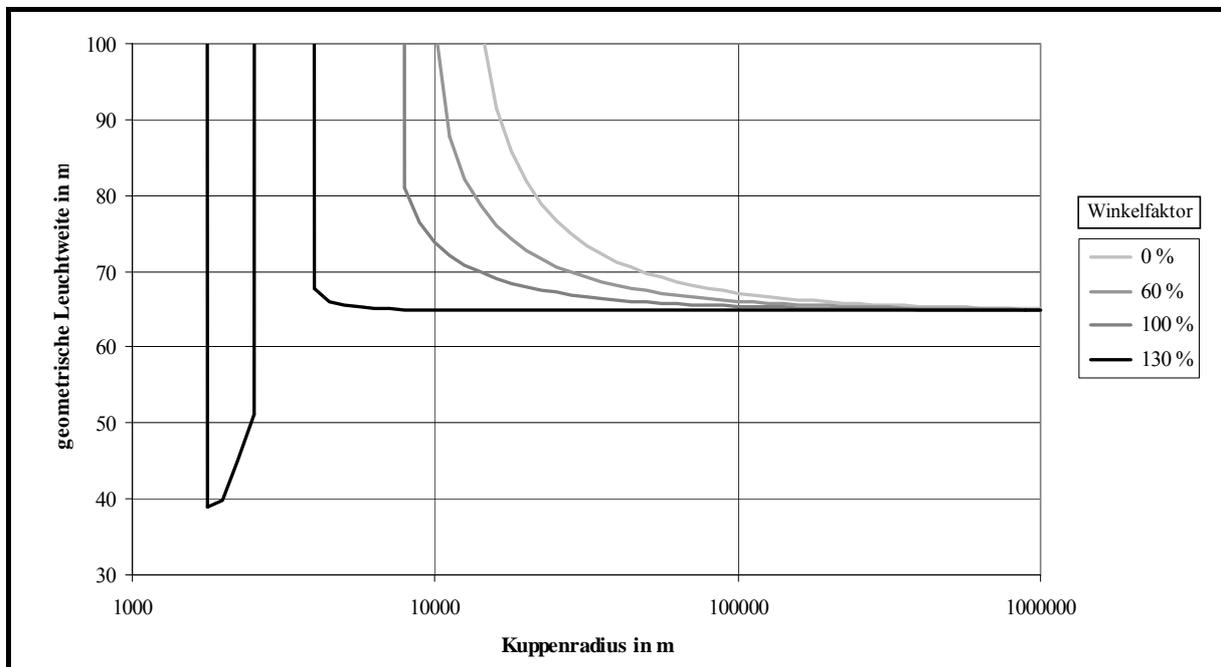


Bild 5.4: Vergleich der geometrischen Leuchtweiten auf Kuppen

Der Verlauf der Leuchtweiten auf **Kuppen** mit verschiedenen Radien ist in Bild 5.4 dargestellt. Je stärker die Scheinwerfer an die Straßenform angepasst werden, desto kleiner ist der Kuppenradius, bei dem die Hell-Dunkel-Grenze die Fahrbahnoberfläche nicht mehr berührt und die Leuchtweite gegen den Wert „unendlich“ strebt.

Bei allen vier Versionen steigt die Leuchtweite kontinuierlich mit abnehmendem Kuppenradius. Einzige Ausnahme ist die Variante mit dem Winkelfaktor 130% , die auf engen Kuppen im Bereich zwischen $1800\text{ m} < R_v < 3000\text{ m}$ die Scheinwerferachse offensichtlich zu stark absenkt und einen Schnitt der Hell-Dunkel-Grenze mit der Fahrbahnoberfläche in sehr kurzer Entfernung bewirkt. Für die anderen beiden Varianten (60% und 100%) gilt daher, dass sie trotz der Absenkung der Scheinwerferachse eine größere Leuchtweite bieten als die normale Abblendlichtverteilung auf einer ebenen Straße.

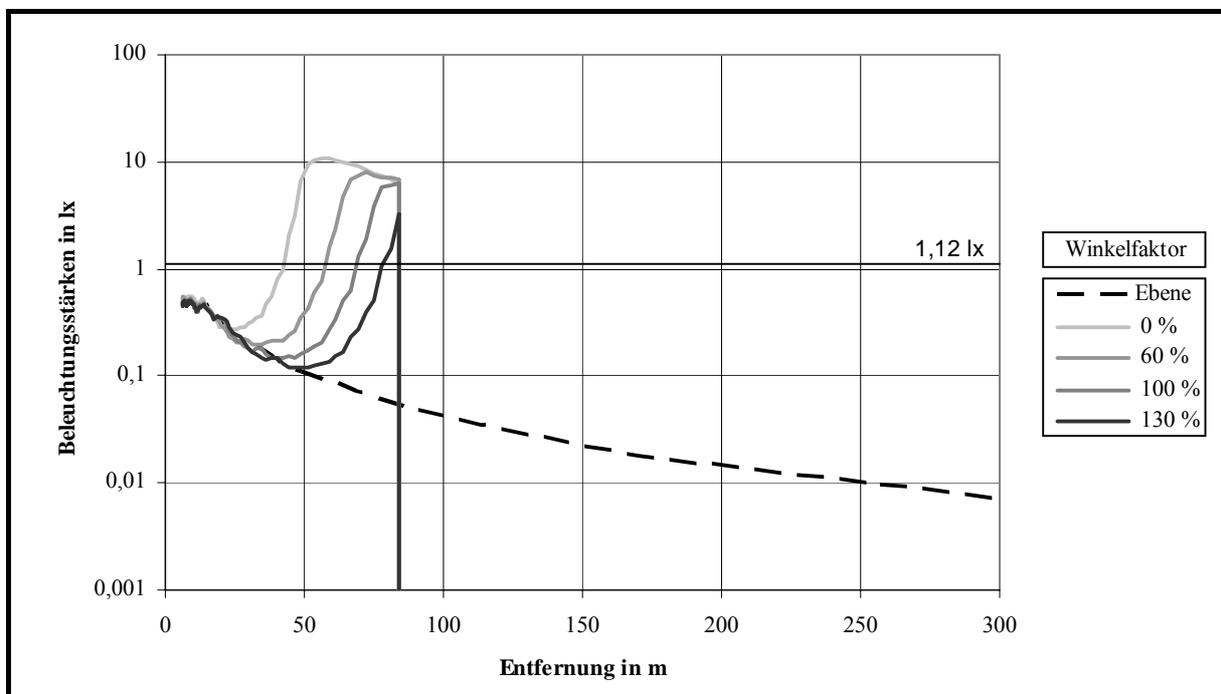


Bild 5.5: Augenbeleuchtungsstärken auf einer Kuppe mit $R_v = 1000\text{ m}$

Der Vorteil, den eine abgesenkte Lichtverteilung auf der Kuppe bietet, zeigt sich bei einem Blick auf Bild 5.5, welches die Beleuchtungsstärken am entgegenkommenden Fahrerauge während einer Begegnung auf einer Kuppe mit Radius $R_v = 1000\text{ m}$ darstellt.

Im Diagramm sind die Blendimpulse zu sehen, die dann entstehen, wenn der Fahrer das erste Mal in die Scheinwerfer des entgegenkommenden Fahrzeugs blicken kann. In größeren Entfernungen gibt es keine Blendbeleuchtungsstärken, weil die Kuppe die direkte Sichtverbindung zwischen Scheinwerfer und Fahrerauge unterbricht.

Je stärker die optische Scheinwerferachse abgesenkt ist, desto kleiner sind die Dauer und der Betrag des Blendimpulses. Daher stellt der Flächenunterschied zwischen den Impulsen ein Maß für die Blendungsreduktion durch die adaptive Leuchtweitenregulierung dar.

Unter der Annahme, dass eine Blendung bei Augenbeleuchtungsstärken $E_A > 1,12 \text{ lx}$ auftritt und dass beide Fahrzeuge mit etwa $v_x = 70 \text{ km/h}$ fahren, reduziert sich die Blendimpulsdauer auf der Kuppe mit $R_v = 1000 \text{ m}$ von etwa $1,1 \text{ s}$ bei herkömmlicher Lichtverteilung auf $0,3 \text{ s}$ bei einer Anpassung der Lichtverteilung mit Winkelfaktor 100% . Das Maximum der Augenbeleuchtungsstärken verringert sich dabei von $E_A \approx 11 \text{ lx}$ auf $E_A \approx 6,3 \text{ lx}$. Dadurch verkleinert sich die Fläche des Blendimpulses um den Faktor 7.

Wie ein Vergleich zwischen Bild 5.5 und Bild 5.6 zeigt, nähern sich zwar auf Kuppen mit größeren Radien die Beträge der Augenbeleuchtungsstärken zwischen den Versionen mit und ohne angepasster Lichtverteilung an, jedoch vergrößert sich der Unterschied in den Impulsdauern, da bereits in größeren Entfernungen eine direkte Sichtverbindung zwischen Scheinwerfern und Gegenverkehr besteht. Somit ermöglicht die Absenkung der Scheinwerferachse mit Winkelfaktor 100% auf einer Kuppe mit $R_v = 2000 \text{ m}$ eine Reduktion der Fläche des Blendimpulses um Faktor 68^{144} .

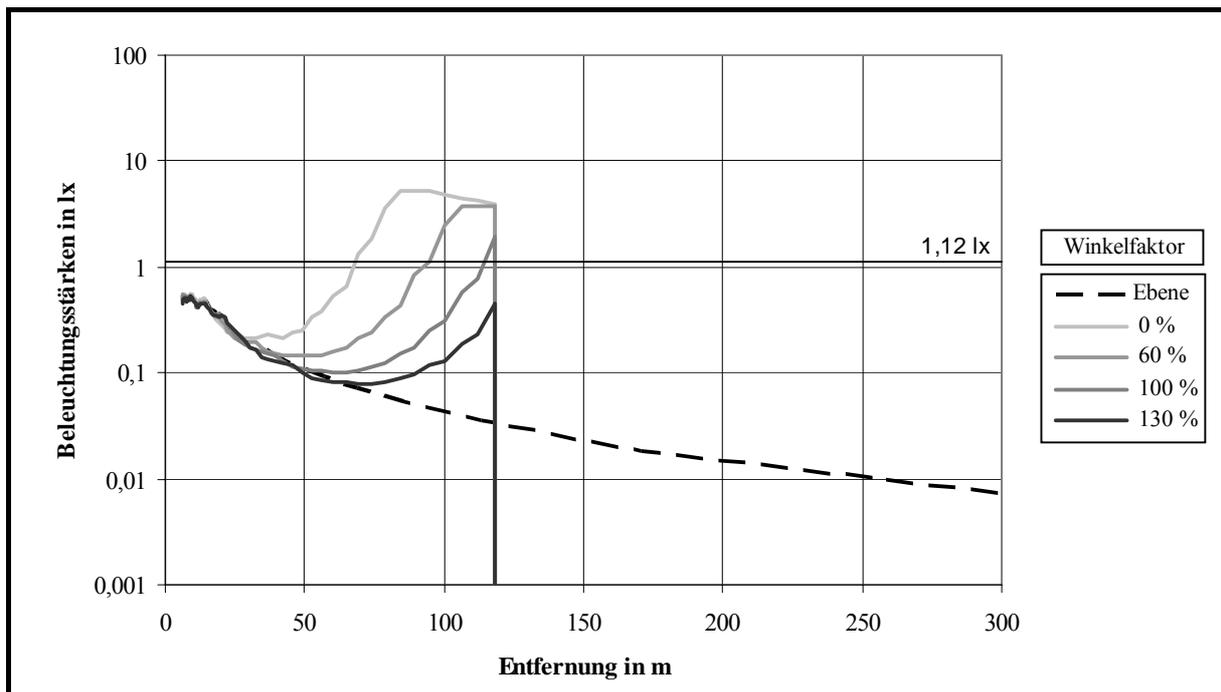


Bild 5.6: Augenbeleuchtungsstärken auf einer Kuppe mit $R_v = 2000 \text{ m}$

¹⁴⁴ Im Abschnitt 8.4.6 ab Seite 183 im Anhang befinden sich zahlreiche Diagramme, die die Augenbeleuchtungsstärken auf Kuppen mit verschiedenen Radien und bei verschiedenen Winkelfaktoren darstellen.

Die Beleuchtungsstärken am entgegenkommenden Fahrerauge auf Kuppen belegen die positive Wirkung einer abgesenkten Lichtverteilung auf die Wahrnehmungsbedingungen des Gegenverkehrs. Ihre Wirkung für den Fahrer des Fahrzeugs mit der adaptiven Leuchtweitenregulierung ist damit noch nicht geklärt. Hilfestellung hierfür können die reflektierten Fahrbahnleuchtdichten leisten (siehe Bild 5.7).

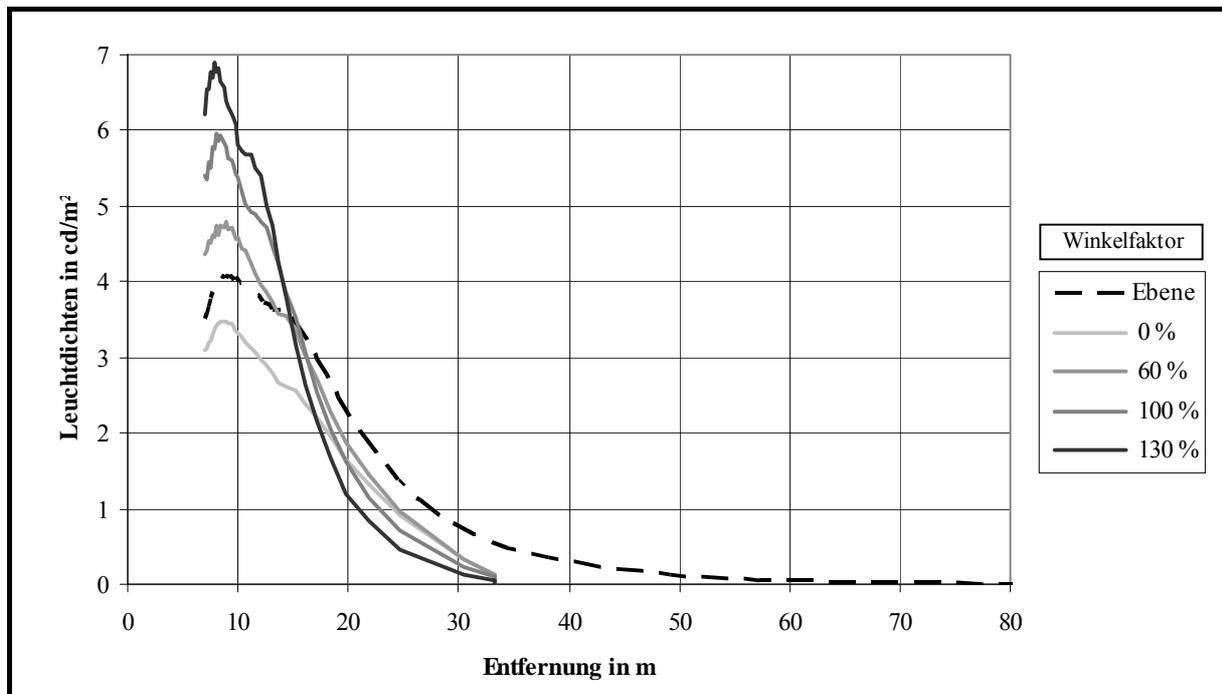


Bild 5.7: Reflektierte Leuchtdichten auf einer Kuppe mit $R_v = 1000 \text{ m}$

Die Kurven im Leuchtdichtediagramm zeigen, dass die Leuchtdichteverteilung der Fahrbahnoberfläche umso inhomogener ist, je mehr die Scheinwerferachse abgesenkt wird. Dieser Effekt deutet auf einen möglichen Nachteil in den Wahrnehmungsbedingungen des Fahrers hin, welcher durch die Anpassung der Lichtverteilung auf Kuppen verursacht wird. Dieser Effekt ist zwar auf Kuppen mit größeren Radien weniger stark ausgeprägt, seine genaue Analyse ist dennoch erforderlich.

Bild 5.8 zeigt in einem Überblick die beiden wesentlichen Eigenschaften der Lichtverteilung, nämlich die Leuchtweite und die Blendung des Gegenverkehrs, wenn sie mit verschiedenen Verstellfaktoren an Kuppen und Wannern angepasst wird. Je stärker die Lichtverteilung in Wannern angehoben wird, desto weniger nimmt zwar die Leuchtweite ab, desto höher ist jedoch die Gefahr der Blendung anderer Verkehrsteilnehmer. Auf Kuppen führt eine Absenkung der Lichtverteilung einerseits zu einer geringeren Blendung des Gegenverkehrs und andererseits nur zu einem niedrigen Ansteigen der Leuchtweite mit abnehmendem Kuppenradius.

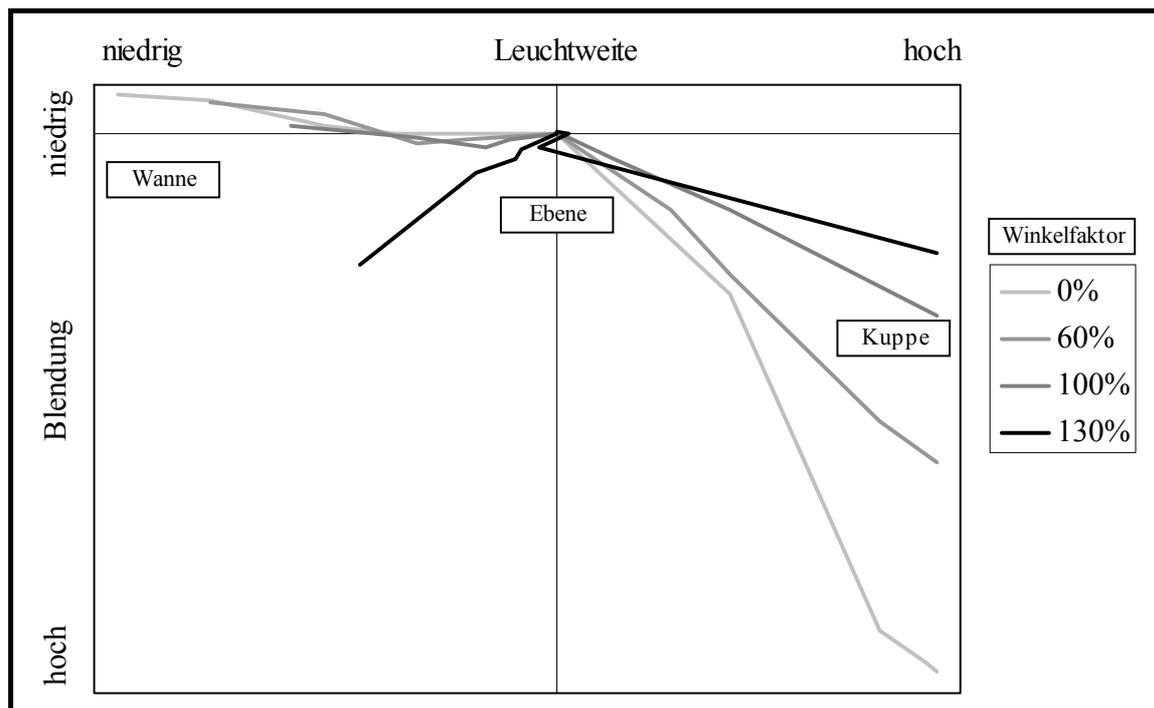


Bild 5.8: Eigenschaften der Lichtverteilung bei Anpassung an Kuppen und Wannen

Zusammenfassend zeigen die geometrischen Berechnungen und Simulationen folgende Effekte einer angepassten Lichtverteilung:

- In Wannen bewirkt die Anhebung der Scheinwerferachse eine höhere geometrische Leuchtweite sowie eine bessere Homogenität der Leuchtdichteverteilung auf der Fahrbahnoberfläche. Erfolgt die Anhebung nach der Vorgabe des entwickelten Algorithmus mit Winkel faktor 100 %, wird dabei der Gegenverkehr nicht stärker geblendet als bei einer Begegnung auf einer ebenen Straße.
- Auf Kuppen ermöglicht die adaptive Leuchtweitenregulierung eine Reduktion der Blendung des Gegenverkehrs. Zwar wird dadurch die geometrische Leuchtweite im Vergleich zu einer nicht angepassten Lichtverteilung verkürzt, sie bleibt jedoch größer als der Referenzwert, den sie auf einer ebenen Straße erreicht. Dennoch deuten die großen Unterschiede im Verlauf der reflektierten Fahrbahnleuchtdichten auf mögliche Nachteile in den Wahrnehmungsbedingungen des Fahrers hin. Mit Hilfe von weiterführenden Untersuchungen (z.B. auf einer Teststrecke oder an einer Modellstraße) muss geklärt werden, ob sich dadurch die Bedingungen des Fahrzeugführers tatsächlich verschlechtern.

5.2 Untersuchungen an der Modellstraße

Die Modellstraße stellt einen 50 m langen geraden Straßenabschnitt im Maßstab 1:5 dar. Sie wurde im Rahmen einer Diplomarbeit für Untersuchungen zur Wirkung der adaptiven Leuchtweitenregulierung aufgebaut¹⁴⁵.



Bild 5.9: Blick auf die Modellstraße aus der Fahrerperspektive

Eine Wand am Ende der Modellstraße ergänzt den weiteren Verlauf der Straße bis zum Horizont.

Die Probanden saßen während der Versuche am gegenüberliegenden Ende der Straße und blickten aus der Perspektive eines Fahrers auf die Straßenszene (siehe Bild 5.9). Ein Pixellicht-Scheinwerfer simulierte die Abblendlichtverteilung des Fahrzeugs der Probanden. Da das Labor ansonsten verdunkelt wurde, ergab sich ein mesopisches Adaptationsniveau wie im nächtlichen Straßenverkehr.

Mit Hilfe einer Hydraulik konnte die Fahrbahn zu einer Kuppe oder zu einer Wanne bis zu einem vertikalen Radius $R_v = 500\text{ m}$ verformt werden.

¹⁴⁵ GÜNZEL 2004 [50], S. 18 f.

5.2.1 Erkennbarkeit von Objekten

Die Simulationsergebnisse der Leuchtdichten, die von der Fahrbahn reflektiert werden, zeigen eine inhomogene Verteilung, wenn die optische Scheinwerferachse durch die adaptive Leuchtweitenregulierung auf einer Kuppe abgesenkt wird. Das Absenken der Lichtverteilung bewirkt außerdem eine reduzierte Höhe der Hell-Dunkel-Grenze und verkleinert somit die hell beleuchtete Fläche von vertikalen Objekten auf der Fahrbahn.

Um den Einfluss dieser beiden Effekte auf die Wahrnehmbarkeit von Objekten und Hindernissen im Verkehrsraum zu untersuchen, war es erforderlich, ihre Erkennbarkeit auf Kuppen bei einer abgesenkten Lichtverteilung (Winkelfaktor 100 %) sowie auf einer ebenen Straße zu bestimmen und die Ergebnisse miteinander zu vergleichen.

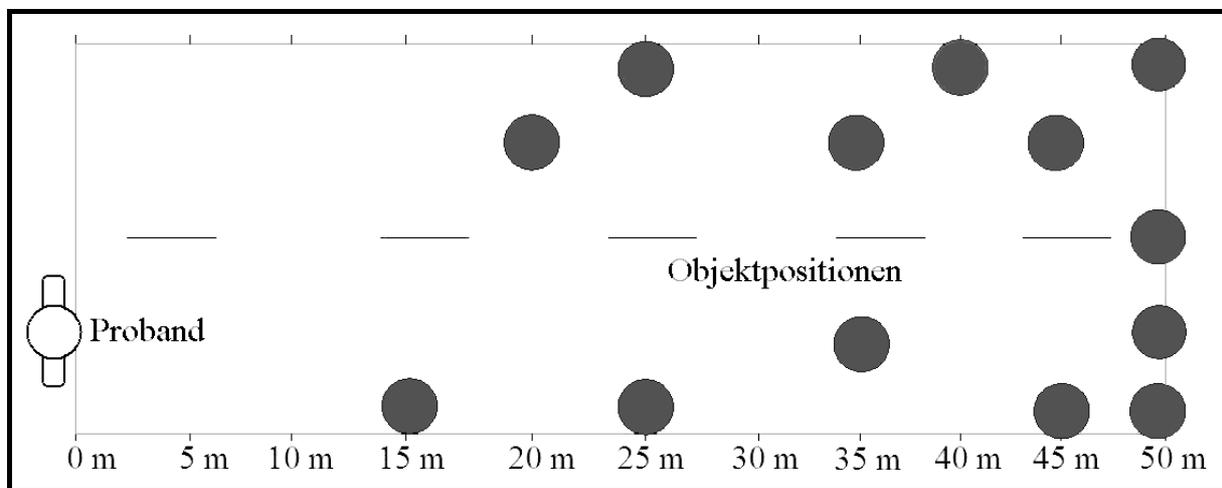


Bild 5.10: Objektpositionen auf der Modellstraße

Zu diesem Zweck wurden im Rahmen einer Diplomarbeit den insgesamt 24 Probanden nacheinander verschiedene Objekte an verschiedenen Positionen auf der Modellstraße dargeboten und die Zeiten gemessen, die jeder Proband bis zum Erkennen der Objekte und ihrer Positionen auf dem Straßenabschnitt benötigte¹⁴⁶. Jede Person nahm an vier Versuchsreihen mit verschiedenen vertikalen Krümmungen ($R_v = 500\text{ m}$, 2000 m , 5000 m , $unendlich$) der Fahrbahn teil, wobei in jeder Versuchsreihe die gleichen Objektpositionen (siehe Bild 5.10) und ähnliche Objekte verwendet wurden.

Wie stark sich die gemessenen Zeiten zwischen den vertikalen Radien unterscheiden, hängt maßgeblich von den Objektpositionen ab. So lässt sich anhand Bild 5.11 erkennen, dass im Nahbereich bis 25 m Entfernung nur geringe Unterschiede in der Erkennbarkeit der Objekte auf den verschiedenen vertikalen Krümmungen existieren. Mit Hilfe eines statistischen Tests

¹⁴⁶ GÜNZEL 2004 [50], S. 20 ff.

werden diese Unterschiede paarweise auf Signifikanz geprüft¹⁴⁷. Keines der getesteten Paare weist signifikante Unterschiede im arithmetischen Mittel auf.

Da die Objekte aufgrund der geringen Entfernung überschwellige Leuchtdichten besitzen, ist ihr Median mit $t_E \approx 0,8$ s im Gesamtvergleich zu allen anderen Objektpositionen unterdurchschnittlich gering.

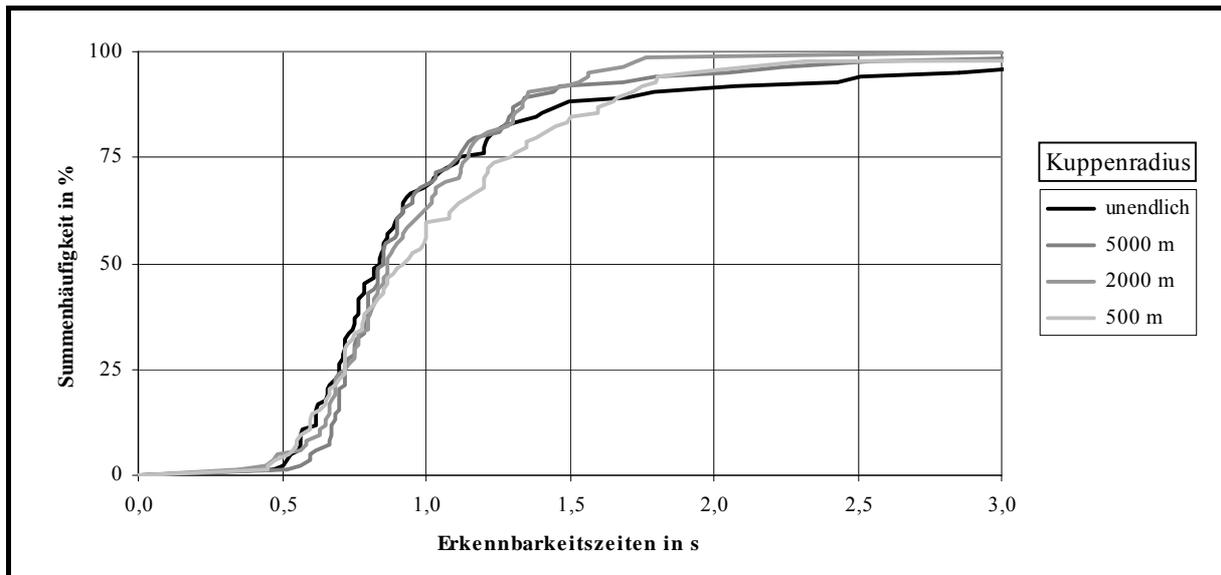


Bild 5.11: Summenhäufigkeit der Erkennbarkeitszeiten im Nahbereich

¹⁴⁷ Der verwendete statistische Test überprüft zwei Stichproben auf die Differenz ihrer beiden arithmetischen Mittel. Eine Stichprobe wird aus den gemessenen Zeiten aller Probanden an einer Objektposition oder einer Gruppe von Objektpositionen bei einem der vier vorgegebenen Krümmungsradien gebildet. Daraus ergeben sich für alle Objekte und Objektgruppen vier Stichproben, die paarweise auf ihre Differenz geprüft werden. Mithilfe der Varianzen $s_{i,j}^2$, der arithmetischen Mittelwerte $\bar{x}_{i,j}$ und der Anzahl der Messungen $n_{i,j}$ in zwei Stichproben i,j wird die Prüfgröße z berechnet:

$$z = (\bar{x}_i - \bar{x}_j) / \sqrt{\frac{s_i^2}{n_i} + \frac{s_j^2}{n_j}}$$

Da die Prüfgröße asymptotisch standardnormal verteilt ist, ergibt sich bei einem Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$ ein kritischer Wert $z_c = 1,96$. Ist $|z| > z_c$ dann gibt es einen signifikanten Unterschied zwischen den Mittelwerten der beiden mit Stichproben getesteten Grundgesamtheiten. Ansonsten muss auf die Gleichheit ihrer Mittelwerte geschlossen werden. Weitere Informationen zu diesem Test befinden sich in BLEYMÜLLER/GEHLERT et al. 1996 [13], S. 109 ff.

Im mittleren Entfernungsbereich zwischen 25 m und 45 m zeigen sich größere Unterschiede in den Erkennbarkeitszeiten zwischen den vertikalen Krümmungen nur bei den Objekten auf der Fahrspur des Gegenverkehrs (siehe Bild 5.12).

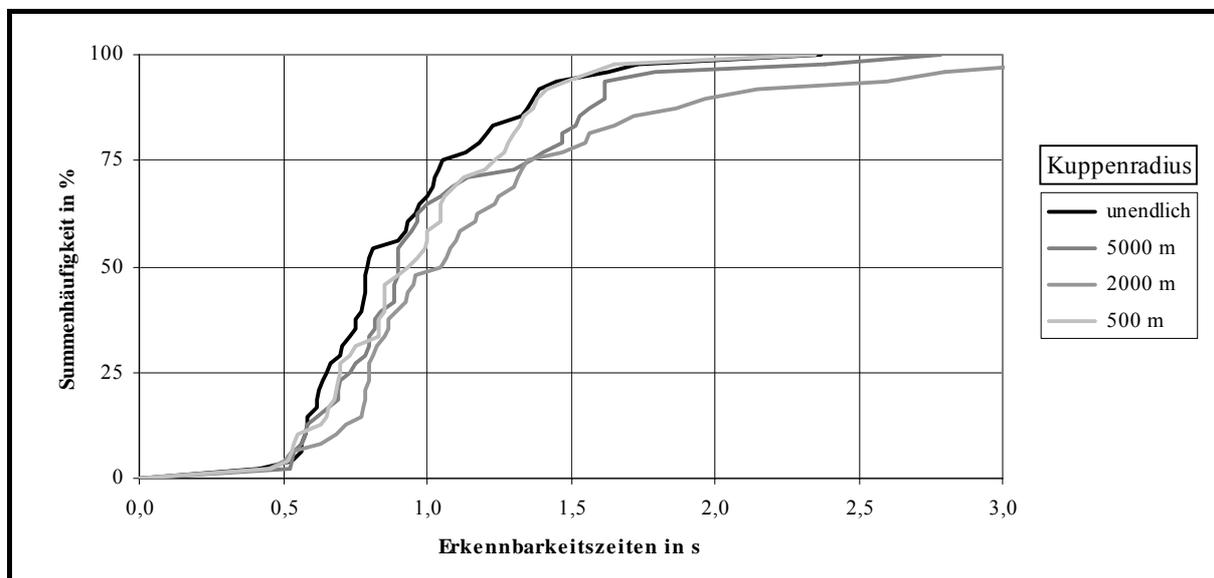


Bild 5.12: Summenhäufigkeit der Erkennbarkeitszeiten im mittleren Entfernungsbereich auf der Fahrspur des Gegenverkehrs

Der oben vorgestellte statistische Test berechnet für diese Objektpositionen einen signifikant größeren Mittelwert der Erkennbarkeitszeiten bei einem Kuppenradius $R_v = 2000$ m im Vergleich zu den anderen Krümmungen. Der Median steigt im Vergleich zu den ermittelten Zeiten auf einer Ebene $t_{E \infty m} = 0,79$ s auf $t_{E 2000 m} = 1,05$ s. Auf der genannten Kuppe verwendet der Algorithmus der adaptiven Leuchtweitenregulierung die Zielentfernung $d_2 = 50$ m. Wie Bild 5.13 zeigt, bewirkt eine konstante Höhe der Hell-Dunkel-Grenze in dieser Zielentfernung auf Kuppen einen geringen vertikalen Abstand der Hell-Dunkel-Grenze zur Fahrbahnoberfläche in kleineren Entfernungen zwischen 25 m und 45 m.

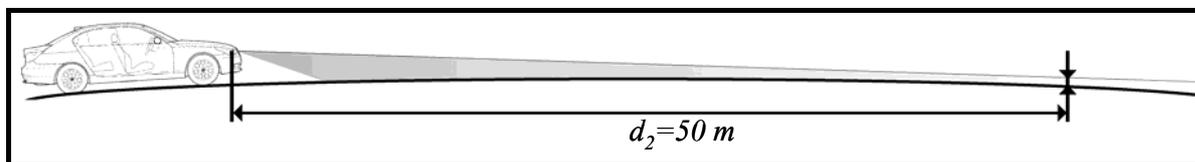


Bild 5.13: Abstand der Hell-Dunkel-Grenze zur Fahrbahnoberfläche

Dieser Effekt führt dazu, dass die Objekte in solchen Entfernungen nur in einer niedrigen Höhe hohe Leuchtdichten aufweisen. Einige Objekte lassen sich dadurch nur schwer erkennen (siehe Bild 5.14).



Bild 5.14: Objekt auf der linken Fahrspur der Modellstraße bei einem Kuppenradius mit $R_v = 2000 \text{ m}$

Da bei sehr engen vertikalen Kuppen ($R_v < 2000 \text{ m}$) der Algorithmus der adaptiven Leuchtweitenregulierung auf die variable Zielentfernung d_5 umschaltet, ändert sich der Winkel der optischen Scheinwerferachse nur noch mit kleinen Werten. Dadurch nimmt der Abstand der Hell-Dunkel-Grenze zur Fahrbahnoberfläche im mittleren Entfernungsbereich wieder zu und die hell beleuchtete Fläche auf den Objekten vergrößert sich. Die niedrigen Erkennbarkeitszeiten in Bild 5.12 für den Kuppenradius $R_v = 500 \text{ m}$ belegen diese Aussage.

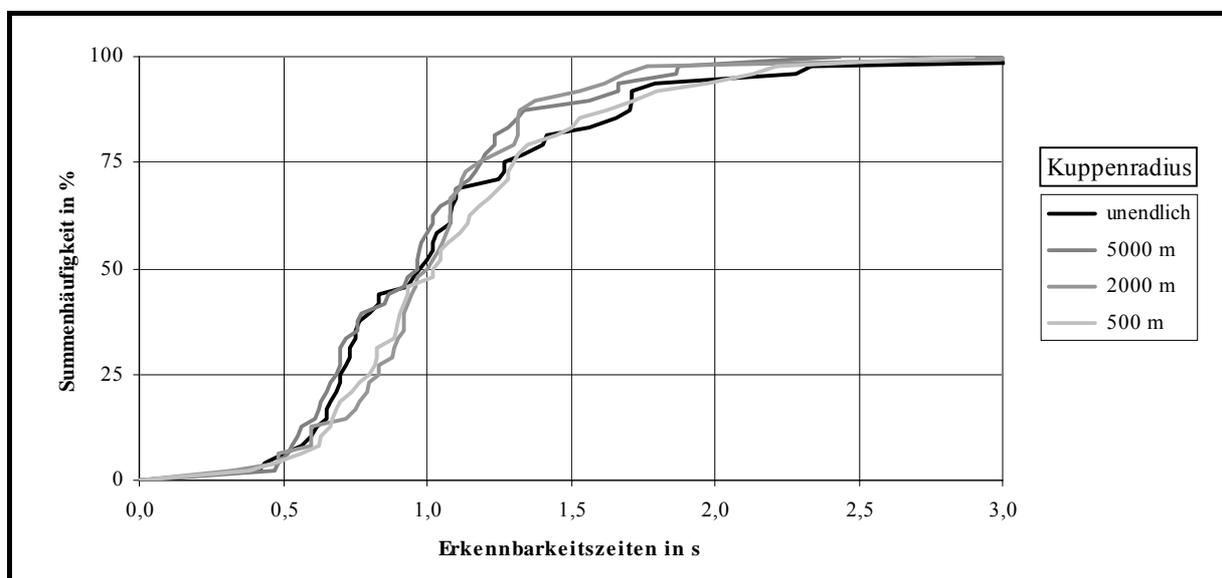


Bild 5.15: Summenhäufigkeit der Erkennbarkeitszeiten im mittleren Entfernungsbereich auf der eigenen Fahrspur

In der rechten Hälfte der Abblendlichtverteilung steigt die Hell-Dunkel-Grenze an. Dadurch bleibt auf der rechten Fahrspur ihr Abstand zur Fahrbahnoberfläche groß genug, um auf allen Kuppenradien gute Erkennbarkeitszeiten zu ermöglichen. Die gemessenen Zeiten weisen daher für diese Objektpositionen keine signifikanten Unterschiede auf (siehe Bild 5.15). Der Median der Zeiten liegt für die Objekte im mittleren Entfernungsbereich bei $t_E \approx 1,0$ s.

Bei Betrachtung von Bild 5.16 fallen zwei Gruppen von Erkennbarkeitszeiten auf, deren Mediane sich um rund $\Delta t_E \approx 0,26$ s unterscheiden.

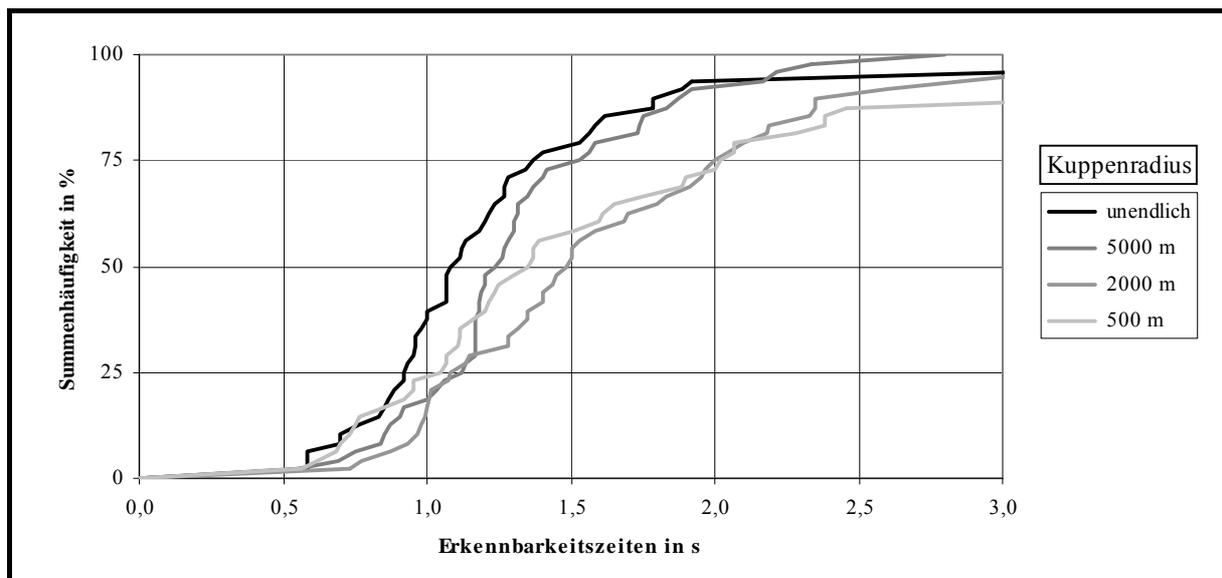


Bild 5.16: Summenhäufigkeit der Erkennbarkeitszeiten im Fernbereich

Damit sind die gemessenen Zeiten auf der ebenen Straße und der Kuppe mit Radius $R_v = 5000$ m signifikant kleiner als die Erkennbarkeitszeiten auf den engen Kuppen ($R_v = 2000$ m und $R_v = 500$ m).

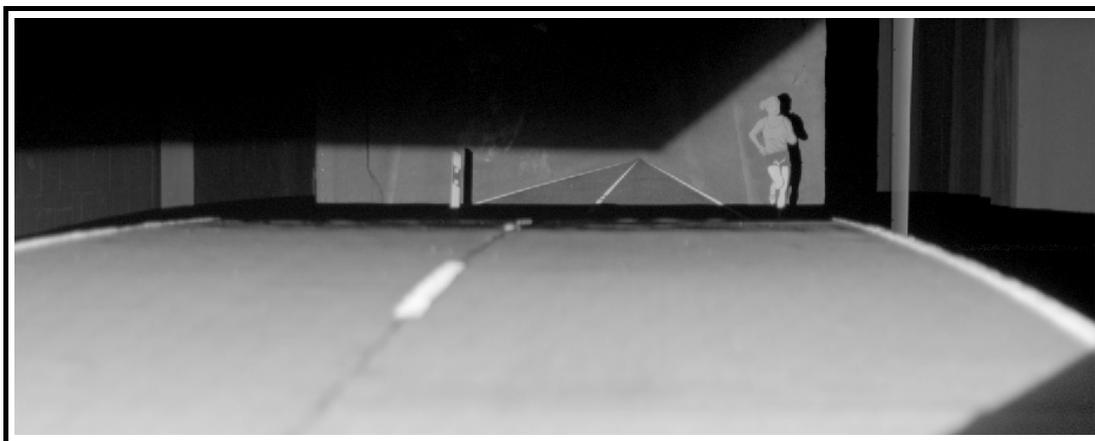


Bild 5.17: Objekte im Fernbereich auf Kuppen

Die schlechtere Erkennbarkeit wird durch die Kuppenkrümmung selbst verursacht, die bei kleinen Radien einen von unten ansteigenden Schatten auf die Objekte im Fernbereich wirft (vgl. Bild 5.17).

Aufgrund der großen Entfernung sinken die wahrgenommenen Leuchtdichten der Objekte und bewirken ein Ansteigen des Medians der Erkennbarkeitszeiten auf $t \approx 1,1 s$ bis $t \approx 1,5 s$.

Zusammengefasst lieferte die Untersuchung zur Erkennbarkeit von vertikalen Objekten auf der Fahrbahn folgende Ergebnisse:

- Die adaptive Leuchtweitenregulierung bewirkt in einem Teilbereich der Kuppenradien um $R_v \approx 2000 m$ auf der Fahrspur des Gegenverkehrs in Entfernungen zwischen $25 m$ und $45 m$ eine Zunahme der Erkennbarkeitszeiten.
- Mit zunehmender Krümmung wirft die Kuppe einen von unten her ansteigenden Schatten auf Objekte in größeren Distanzen und verschlechtert ihre Erkennbarkeit in Entfernungen ab $45 m$ auf beiden Fahrspuren.
- Die Messungen ergeben keine signifikanten Unterschiede in den Erkennbarkeitszeiten zwischen den verschiedenen vertikalen Krümmungen für Objekte in Entfernungen bis $25 m$ auf der Fahrspur des Gegenverkehrs und in Entfernungen bis $45 m$ auf der eigenen Fahrspur.
- Der Median der Erkennbarkeitszeiten steigt bei allen Krümmungsformen mit zunehmender Objektentfernung an.

Die Zunahme der Erkennbarkeitszeiten von Objekten auf engen Kuppen im Entfernungsbereich zwischen $25 m$ und $45 m$ auf der Fahrspur des Gegenverkehrs kann verringert oder verhindert werden, wenn der Verstellwinkel der adaptiven Leuchtweitenregulierung reduziert wird (z.B. auf 60%). Wie bereits die Simulationsergebnisse in Abschnitt 5.1 zeigen, bewirkt ein reduzierter Winkelfaktor eine geringere Abnahme der Blendbeleuchtungsstärken am entgegenkommenden Fahrerauge auf Kuppen. Wie stark sich dabei die tatsächliche Leistungsfähigkeit des Auges ändert, soll mit einer weiteren Untersuchung an der Modellstraße geklärt werden.

Eine vollständige Darstellung aller Messungen zur Bestimmung der Erkennbarkeitszeiten befindet sich in der Diplomarbeit von Günzel¹⁴⁸.

5.2.2 Blendung des Gegenverkehrs

Aus den Simulationsläufen ist bekannt, dass die adaptive Leuchtweitenregulierung auf Kuppen und in Wannen das Niveau der Beleuchtungsstärken am entgegenkommenden

¹⁴⁸ GÜNZEL 2004 [50], S. 31 ff.

Fahrerauge verändert. Das Ziel der physiologischen Blenduntersuchung ist es, den Einfluss der veränderten Beleuchtungsstärken am Auge auf dessen optischen Wahrnehmungsfähigkeiten zu bestimmen.

Die Untersuchung erfolgte im Rahmen einer Diplomarbeit und bestand aus zwei Versuchen¹⁴⁹:

- einem statischen Sehtest mit Landoltringen zur Bestimmung des Visus und
- einem dynamischen Blendversuch zur Messung der Readaptationszeiten.

Mit dem **statischen Sehtest** sollte ermittelt werden, wie stark sich die Sehleistung des Menschen während einer Blendung reduziert. Diese Untersuchung entsprach dem klassischen Sehtest mit Landoltringen¹⁵⁰, jedoch wurden die Probanden bei ansonsten mesopischen Umfeldbedingungen von einer Lichtquelle geblendet.

Der Proband saß an der Modellstraße und blickte auf eine Tafel mit Landoltringen, die auf der Modellstraße in einer Entfernung von knapp 10 m stand. Der Raumwinkel, unter dem die Ringe betrachtet wurden, bzw. das Verhältnis von Ringgröße zur Beobachtungsentfernung wird durch die Visuskennziffer beschrieben. Die Visusgröße der kleinsten Ringe, die mit mindestens 60% erkannt wurden, bestimmen die Sehschärfe des Probanden. Jede Tafel zeigte acht horizontale Reihen mit Landoltringen. Jede Reihe besaß einen Visus, der von dem Wert $0,32$ in der obersten Reihe bis zum Wert $1,0$ in der untersten Reihe anstieg.

Jedem Probanden wurden - ausgehend von mesopischen Umfeldbedingungen und ohne Blendung - nacheinander verschiedene Tafeln gezeigt. Er musste auf jeder Tafel die Öffnungen der Landoltringe erkennen, wobei die Blendbeleuchtungsstärken mit jeder neuen Tafel schrittweise bis zur Augenbeleuchtungsstärke $E_A = 23\text{ lx}$ erhöht wurden.

In Bild 5.18 ist die Anzahl der von allen Probanden korrekt erkannten Öffnungen der Landoltringe bei gegebenen Visusgrößen in Abhängigkeit von den Augenbeleuchtungsstärken dargestellt. Es zeigt sich, dass die geringen Augenbeleuchtungsstärken $E_A < 1\text{ lx}$, die durch nächtliche Begegnungssituationen zweier Fahrzeuge in Wannen oder auf einer ebenen Straße entstehen, nur einen unwesentlichen Einfluss auf die Sehleistung besitzen.

Wird auf Kuppen die optische Scheinwerferachse nach Vorgabe der adaptiven Leuchtweitenregulierung (Winkelfaktor 100%) abgesenkt, dann steigen bei Kuppenradien $R_v > 2000\text{ m}$ die Augenbeleuchtungsstärken kaum über $E_A = 1\text{ lx}$ (siehe Berechnungen in Abschnitt 5.1). Dadurch kann die volle Sehleistung des entgegenkommenden Fahrerauges erhalten werden.

¹⁴⁹ ANTPÖHLER 2005 [4], S. 55 ff.

¹⁵⁰ DIN 58220 1997 [28], S. 1 f.

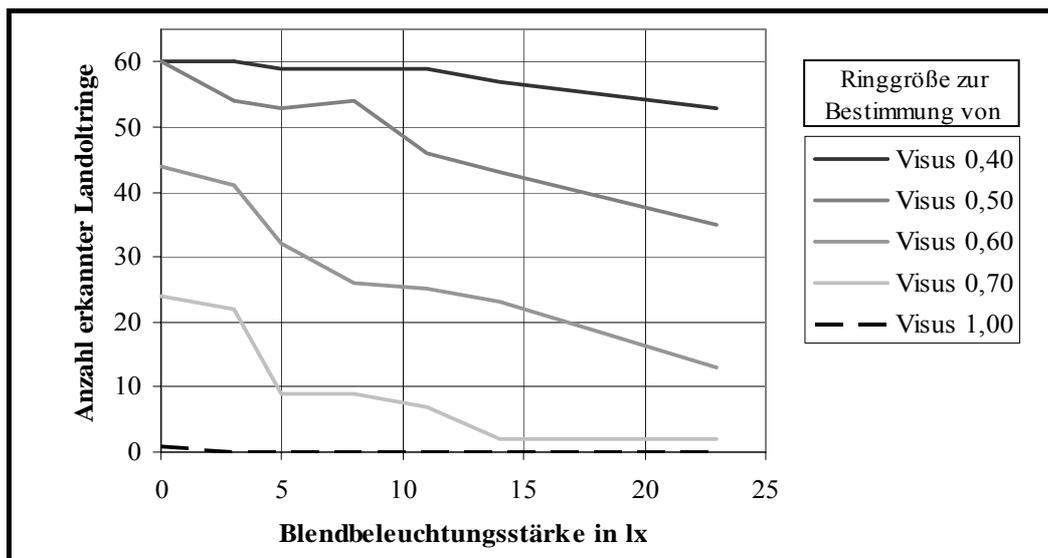


Bild 5.18: Ergebnisse des statischen Blendversuchs

Auf engen Kuppen mit Radius $R_v < 2000 \text{ m}$ können trotz der angepassten Lichtverteilung die Blendbeleuchtungsstärken auf rund $E_A = 6 \text{ lx}$ ansteigen. Dennoch nimmt die Sehleistung im Vergleich zur nicht angepassten Lichtverteilung in einem geringeren Maße ab, da normalerweise Begegnungssituationen auf solchen Kuppen Augenbeleuchtungsstärken von knapp über $E_A = 10 \text{ lx}$ verursachen. Unter solchen Bedingungen sinkt die Anzahl der Landoltringe, deren Öffnungsrichtung korrekt erkannt wurde, für mittlere Ringgrößen (Visus 0,5 bis 0,7) um 23 % bis 70 %. Hier gibt es offensichtlich einen Bereich von Visusgrößen, deren Erkennbarkeit sich ab einem bestimmten Beleuchtungsstärkewert stark verschlechtert, wobei dieser Schwellenwert mit Zunahme der Visuskennziffer kleiner wird.

Die Öffnungen sehr kleiner Ringe (Visus = 1,0) werden unter den mesopischen Umfeldleuchtdichten auch ohne Blendung kaum richtig wahrgenommen. Die Richtung der Öffnungen großer Ringe mit Visus $\leq 0,4$ ist dagegen trotz starker Blendung bis $E_A = 11 \text{ lx}$ sehr gut erkennbar.

Im Gegensatz zum statischen Sehtest geht es beim **dynamischen Blendversuch** um die menschliche Sehleistung direkt nach einem Blendimpuls, welche über die Readaptationszeit bewertet wird. Das Vorgehen von Rosenhahn in seiner Blendungsuntersuchung diente als Vorlage für den Ablauf und den Aufbau dieses Versuchs¹⁵¹, den Bild 5.19 zeigt.

Am Ende der Modellstraße befindet sich auf einem schwarzen Hintergrund ein Sichtziel, dessen Leuchtdichte verändert werden kann. Nach einer Adaptationsphase an das mesopische Umfeld wurde die Leuchtdichte des Sichtziels vom ausgeschalteten Zustand aus langsam erhöht, bis es der Proband wahrnehmen konnte bzw. bis dessen Wahrnehmungsschwelle erreicht war.

¹⁵¹ ROSENHAHN 1999 [101], S. 35 ff.

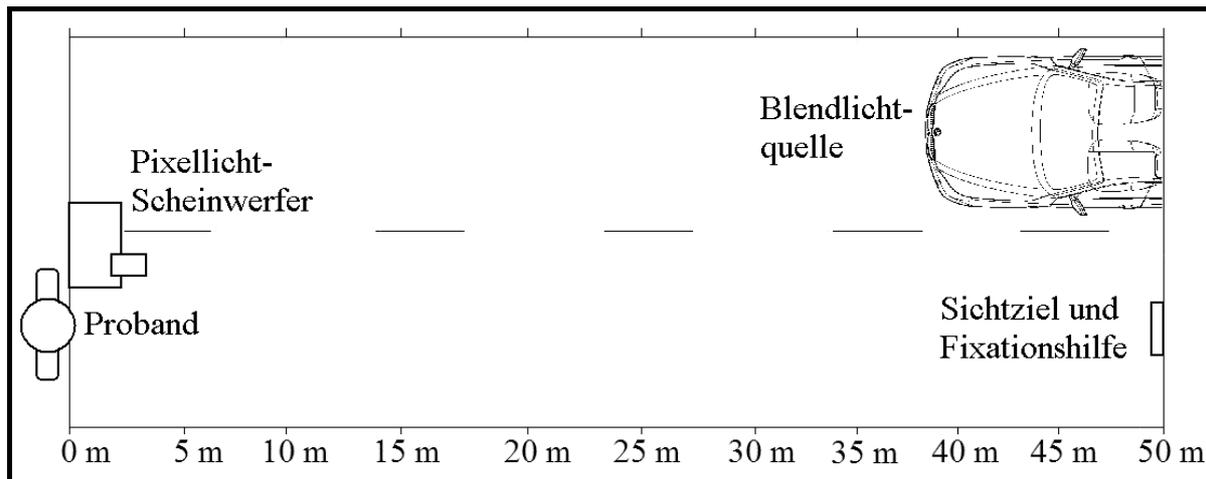


Bild 5.19: Aufbau des dynamischen Blendversuchs

Zur Bestimmung der Readaptationszeit wurde nach einem definierten Blendimpuls die Zeitspanne gemessen, die der Proband benötigte, bis er das Sichtziel wieder wahrnehmen konnte. Der zeitliche Verlauf des Blendimpulses erfolgte in einer Form, die dem Verlauf der Augenbeleuchtungsstärken bei einer Begegnung zweier Fahrzeuge auf einer Straße mit einer festgelegten vertikalen Krümmung entsprach.

Folgende Begegnungssituationen wurden durch Blendimpulse nachgestellt:

- Eine ebene Straße mit normaler Einstellung der Lichtverteilung.
- Kuppen mit den Radien $R_v = 500\text{ m}$, $R_v = 1000\text{ m}$, $R_v = 2000\text{ m}$ und $R_v = 5000\text{ m}$, wobei die optische Scheinwerferachse nach Vorgabe der adaptiven Leuchtweitenregulierung mit den Winkelfaktoren 0 %, 60 % und 100 % eingestellt wurde.
- Wannen mit den Radien $R_v = 500\text{ m}$, $R_v = 1000\text{ m}$, $R_v = 2000\text{ m}$ und $R_v = 5000\text{ m}$. Auch hier wurde die optische Scheinwerferachse nach Vorgabe der adaptiven Leuchtweitenregulierung mit den Winkelfaktoren 0 %, 100 % und 130 % an die Krümmung angepasst.

Nach jedem Blendimpuls und der darauf folgenden Messung der Readaptationszeit musste eine zweiminütige Pause eingehalten werden, damit sich die Augen des Probanden wieder vollständig an die mesopischen Umfeldbedingungen adaptieren konnten.

Die folgenden Diagramme zeigen einen Ausschnitt aus den gemessenen Readaptationszeiten. Für eine vollständige Darstellung aller Messergebnisse wird auf die Diplomarbeit von Antpöhler verwiesen¹⁵².

¹⁵² ANTPÖHLER 2005 [4], S. 61 ff.

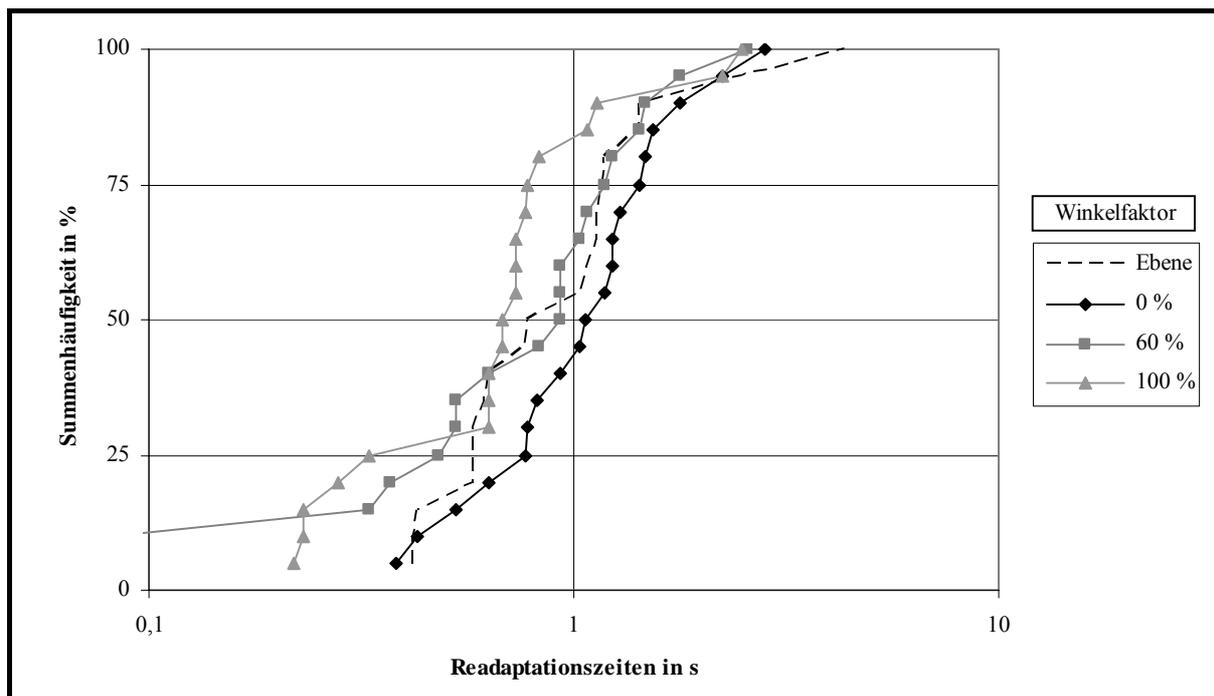


Bild 5.20: Summenhäufigkeit der Readaptationszeiten auf einer Kuppe mit $R_v = 1000 \text{ m}$

Bild 5.20 zeigt die Ergebnisse aus dem Blendversuch mit den Lichtimpulsen, die eine Begegnungssituation auf einer Kuppe mit Radius $R_v = 1000 \text{ m}$ bei verschiedenen Winkelfaktoren der adaptiven Leuchtweitenregulierung wiedergeben. Zu Vergleichszwecken werden zudem die Readaptationszeiten dargestellt, die dann entstehen, wenn der Verlauf der Augenbeleuchtungsstärken eine Begegnung zweier Fahrzeuge auf einer ebenen Straße nachbildet.

Anhand des Diagramms wird ersichtlich, dass der Durchschnitt der gemessenen Zeiten auf der Kuppe ($R_v = 1000 \text{ m}$) umso kürzer ist, je stärker die Lichtverteilung an die Krümmung angepasst wird. Der Unterschied der mittleren Readaptationszeiten ($t_{R 100\%} = 0,8 \text{ s}$ und $t_{R 0\%} = 1,2 \text{ s}$) ist nach dem in Abschnitt 5.2.1 vorgestellten statistischen Test signifikant.

Erstaunlicherweise sind die durchschnittlichen Readaptationszeiten auf einer solchen Kuppe mit 100 % Winkelfaktor geringer als die gemessenen Zeiten auf einer ebenen Straße. Zwar ist auf der Kuppe der Betrag der maximalen Augenbeleuchtungsstärke größer als auf einer Ebene, aber die Dauer des Blendimpulses ist deutlich kürzer, da der Fahrer das entgegenkommende Fahrzeug und damit dessen Scheinwerfer nur in geringen Entfernungen $d_x < 84 \text{ m}$ sehen kann. In größeren Entfernungen tritt daher keine Blendung auf (vgl. die senkrechten Flanken in Bild 5.5 auf Seite 85). Die Wirkung dieses Effekts auf die Readaptationszeiten ist umso kleiner, je größer der Kuppenradius ist.

Ein Vergleich zwischen Bild 5.20 und Bild 5.21 zeigt, dass sich die Readaptationszeiten mit zunehmendem Kuppenradius annähern. Zwar ist auch auf der Kuppe mit $R_v = 5000 \text{ m}$ der Mittelwert der gemessenen Zeiten mit 100 % Verstellung der optischen Scheinwerferachse kürzer als ohne Anpassung der Lichtverteilung, dieser Unterschied ist aber nicht signifikant.

Durch die adaptive Leuchtweitenregulierung sinkt der Median der Readaptationszeiten um rund 20 % von $t_{R0\%} = 0,93\text{ s}$ auf $t_{R100\%} = 0,73\text{ s}$.

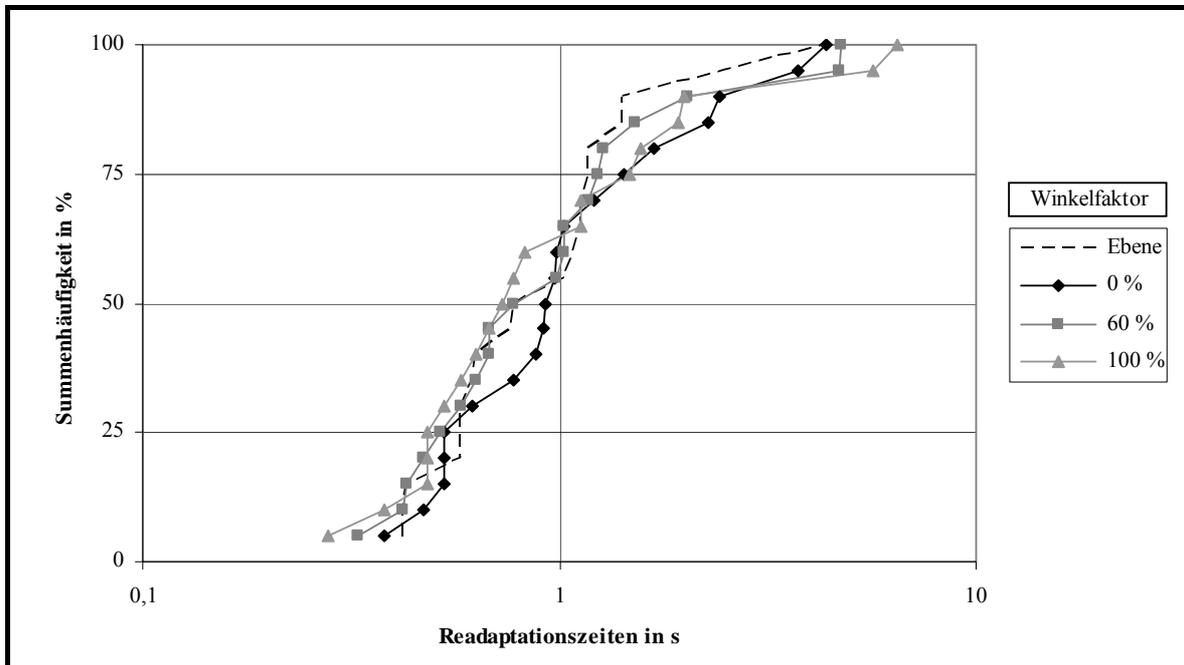


Bild 5.21: Summenhäufigkeit der Readaptationszeiten auf einer Kuppe mit $R_v = 5000\text{ m}$

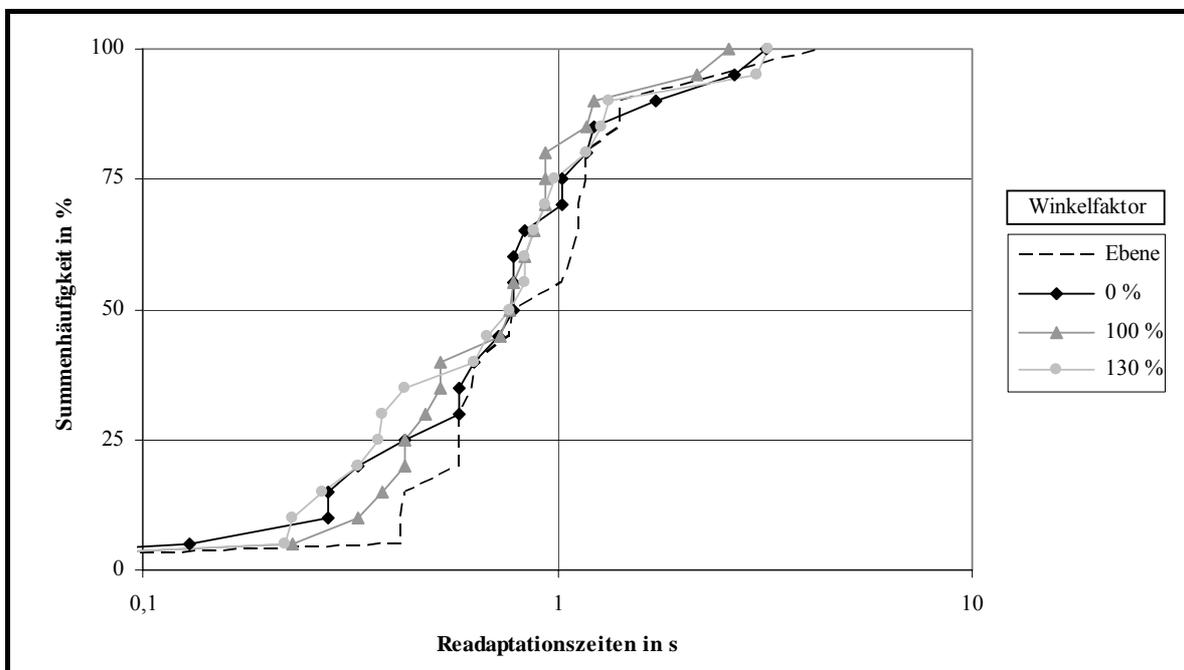


Bild 5.22: Summenhäufigkeit der Readaptationszeiten in einer Wanne mit $R_v = 2000\text{ m}$

In Bild 5.22 und Bild 5.23 ist ein Teil der Ergebnisse aus den Blendversuchen dargestellt, die Begegnungssituationen in Wannen nachbilden. Sie verdeutlichen, dass es mit der adaptiven Leuchtweitenregulierung gelingt, die Leuchtweite zu erhöhen, ohne die Wahrnehmungsbedingungen des Gegenverkehrs zu beeinträchtigen. Selbst in einer engen Wanne mit $R_v = 1000\text{ m}$ sind keine signifikanten Unterschiede in den Readaptationszeiten erkennbar (siehe Bild 5.23).

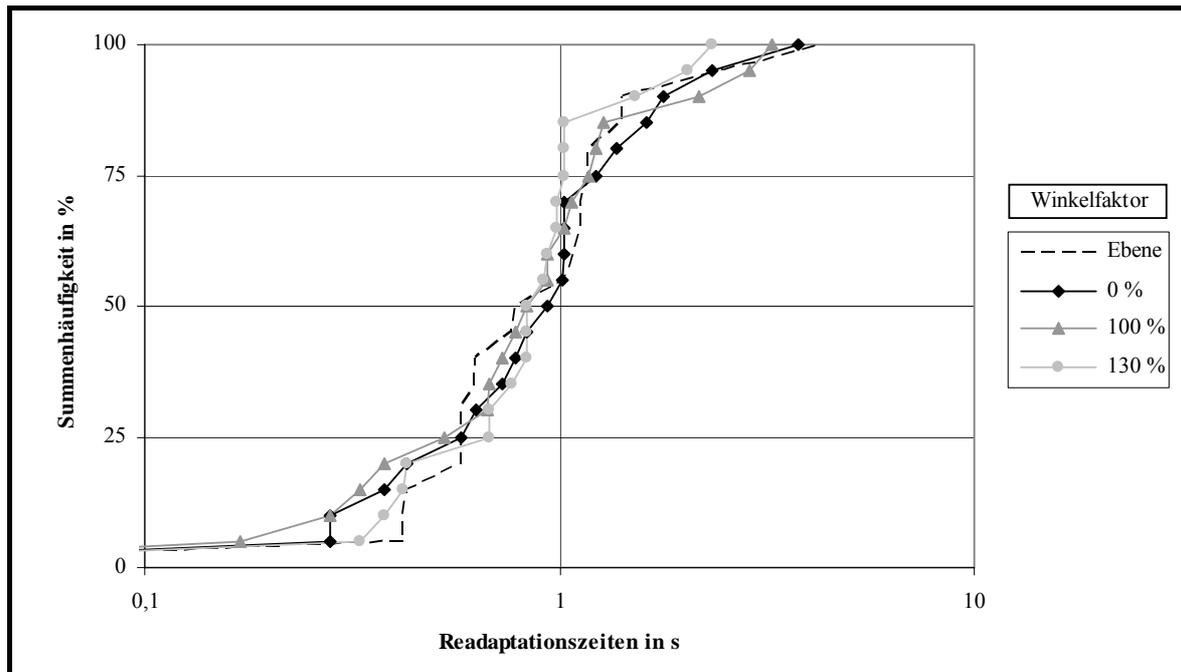


Bild 5.23: Summenhäufigkeit der Readaptationszeiten in einer Wanne mit $R_v = 1000\text{ m}$

Die Ergebnisse der Blendversuche lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Das Absenken der Lichtverteilung auf Kuppen führt tatsächlich zu einer Abnahme der Blendung des Gegenverkehrs. Wie die Messungen der Readaptationszeiten zeigen, kann durch die adaptive Leuchtweitenregulierung die Blendung auf ein Niveau reduziert werden, das sogar geringer ist als bei einer Begegnung auf einer ebenen Straße.
- Die Anhebung der Lichtverteilung führt zu keiner Erhöhung des Blendungsniveaus und ist daher unter dem Aspekt der Gegenverkehrsblendung unkritisch.

Der Nachteil von Versuchen im Labor ist, dass sich der Fahrzeugführer durch die fehlende Fahraufgabe voll auf den Versuch konzentrieren kann. Dadurch können insbesondere bei Versuchen zur Erkennbarkeit von Objekten Abweichungen zur Realität entstehen.

5.3 Nachtfahrten im realen Straßenverkehr

Für die Versuchsfahrten wurde eine Strecke im Alpenvorland ausgewählt, die viele vertikale und wenige horizontale Kurven besitzt sowie wenig befahren ist. Das ausgewählte Landstraßenstück der L2064 ist etwa 4 km lang und verbindet die Autobahnausfahrt der A96 „Seeshaupt“ mit der Ortschaft Beuerberg. In Bild 5.24 ist das Höhenprofil des Streckenabschnitts dargestellt.

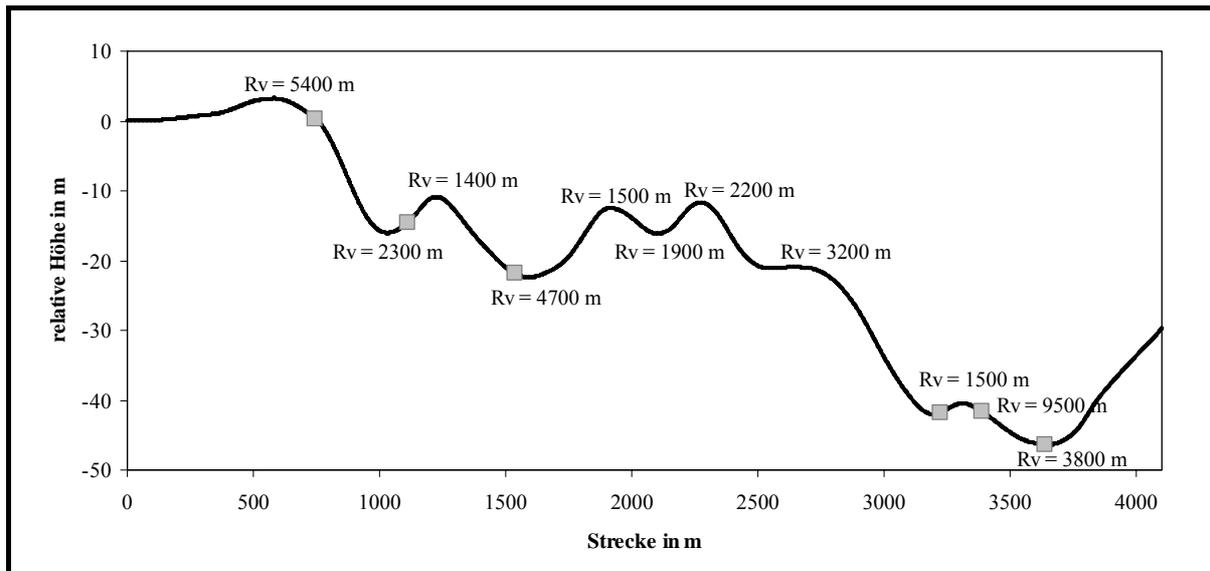


Bild 5.24: Höhenprofil der Teststrecke

Das Fahrzeug für die Testfahrten verfügte über ein Sensorsystem mit einer erweiterten Fahrzeugdynamikauswertung (siehe Abschnitt 3.1 ab Seite 41). Dieses Sensorsystem erlaubte jedoch keine Anpassung der Lichtverteilung an die vertikalen Straßenkrümmungen in Echtzeit. Um dem Probanden dennoch eine echtzeitfähige Scheinwerfersteuerung zu bieten, wurde das Krümmungsprofil der Strecke für beide Fahrtrichtungen im System der adaptiven Leuchtweitenregulierung abgespeichert. Die gespeicherten Krümmungsdaten konnten mit einem beliebigen Vorlauf in das System eingespielt werden.

Um eine korrekte Zuordnung der gespeicherten Daten zur aktuellen Fahrzeugposition sicherzustellen, befand sich am Anfang und Ende der Strecke je ein Initialpunkt, bei dem für jede einzelne Testfahrt der Streckenzähler auf null gesetzt wurde.

Entsprechend der abgespeicherten vertikalen Krümmungsdaten berechnete die adaptive Leuchtweitenregulierung beim Fahren den vertikalen Sollwinkel der optischen Scheinwerferachse nach dem in Abschnitt 4.3 ausgewählten Algorithmus. Dieser Sollwert wurde wie bei den Laborversuchen mit einem Faktor multipliziert, der während der Testfahrten zwischen vier Werten (0 %, 60 %, 100 %, 130 %) variierte.

Zur Bewertung der adaptiven Leuchtweitenregulierung anhand eines Fragenkatalogs (siehe Abschnitt 5.3.3) wurden neben den Verstellfaktoren zusätzliche Parameter in der Software der Leuchtweitenregulierung verändert, welche die Bewegungsgeschwindigkeit und Bewegungsgleichmäßigkeit der Scheinwerfer sowie den Vorlauf der gespeicherten Daten zum aktuellen Standort des Fahrzeugs auf der Teststrecke beeinflussten. Um möglichst einheitliche Versuchsbedingungen zu erhalten, sollten alle Probanden das Fahrzeug während der Versuche mit Hilfe eines Tempomaten mit einer konstanten Geschwindigkeit $v = 70 \text{ km/h}$ fahren.

5.3.1 Erkennbarkeitsentfernung von Objekten

Im Höhenprofil der Teststrecke in Bild 5.24 sind insgesamt sechs graue Kästchen zu erkennen, welche die Positionen der Sehobjekte auf dem Streckenabschnitt markieren. Die Objekte befanden sich entweder am Ende einer Kuppe, einer Wanne oder einem nahezu ebenen Teilstück der Strecke. Jeweils drei dieser Objekte dienten zur Bestimmung der Erkennbarkeitsentfernung für eine der beiden Fahrrichtungen. Die Sehobjekte bestanden aus $40 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$ großen, diffus reflektierenden Quadraten, welche in 10 cm Höhe am rechten Fahrbahnrand angebracht wurden. Der Reflektionsgrad aller Objekte betrug 6% . Diese Eigenschaften ermöglichten einen Vergleich zu den Sehobjekten, die Ewerhart zur Bewertung eines Kurvenlichtsystems verwendete¹⁵³. Aufgrund des geringen Reflexionswertes waren die Schilder sehr unauffällig und wurden selbst nach mehreren Runden von Probanden übersehen, obwohl sie die Position der Schilder kannten. Dennoch wurden die Ergebnisse der ersten beiden Runden jedes Probanden auf der Teststrecke nicht ausgewertet, um mögliche Lerneffekte auszuschliessen.

Die Probanden hatten bei diesem Versuch die Aufgabe, eine Taste am Lenkrad des Fahrzeugs zu drücken, sobald sie ein Sehobjekt erkannten. Der Rechner speicherte dabei den Stand des Streckenzählers im Fahrzeug. Die Differenz aus dem gespeicherten Zählerstand und der Position des Sehobjekts ergab dessen Erkennbarkeitsentfernung.

Einen Überblick der Ergebnisse aus einem **Vorversuch** mit 14 Probanden, der im Winter auf trockenen Straßen stattfand, geben Bild 5.25 bis Bild 5.27.

Offensichtlich besitzt zu dieser Jahreszeit der Bewuchs am Fahrbahnrand ähnliche Reflexionseigenschaften wie die Sehobjekte und führt zu einem niedrigen Kontrast der Schilder zu ihrer Umgebung. Die Ergebnisse aus dem Vorversuch weisen nämlich für das ebene Teilstück mit einem Median von rund $d_E = 27 \text{ m}$ deutlich geringere Erkennbarkeitsentfernungen auf, als sie Ewerhart in seiner Untersuchung ermittelte. Dagegen entsprechen die Ergebnisse der Versuche mit den vier Winkelfaktoren den Erwartungen. Da die adaptive Leuchtweitenregulierung auf einer Ebene keinen Sollwert zur Verstellung der optischen Scheinwerferachse

¹⁵³ EWERTHART 2002 [40], S. 77 ff.

vorgibt, müssen die Kurven der Summenhäufigkeit für alle vier Winkelfaktoren in Bild 5.25 ähnlich sein.

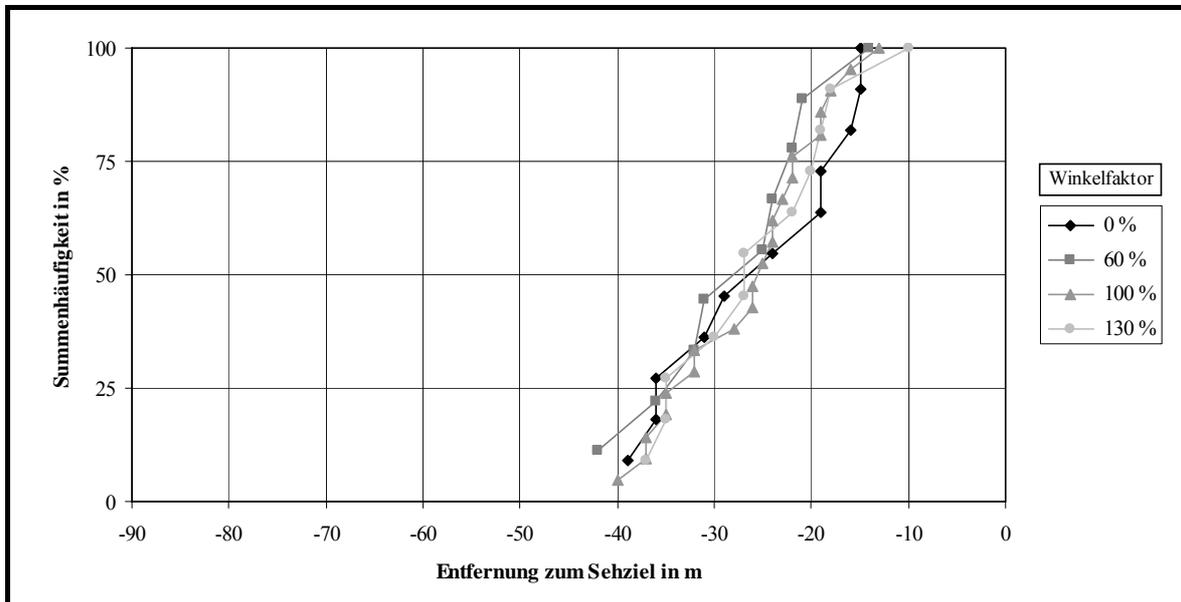


Bild 5.25: Erkennbarkeitsentfernung auf einem ebenen Streckenabschnitt

Ein Vergleich zwischen Bild 5.26 und Bild 5.25 verdeutlicht, dass die Erkennbarkeitsentfernung ohne Anpassung der Lichtverteilung auf engen Kuppen stark ansteigt.

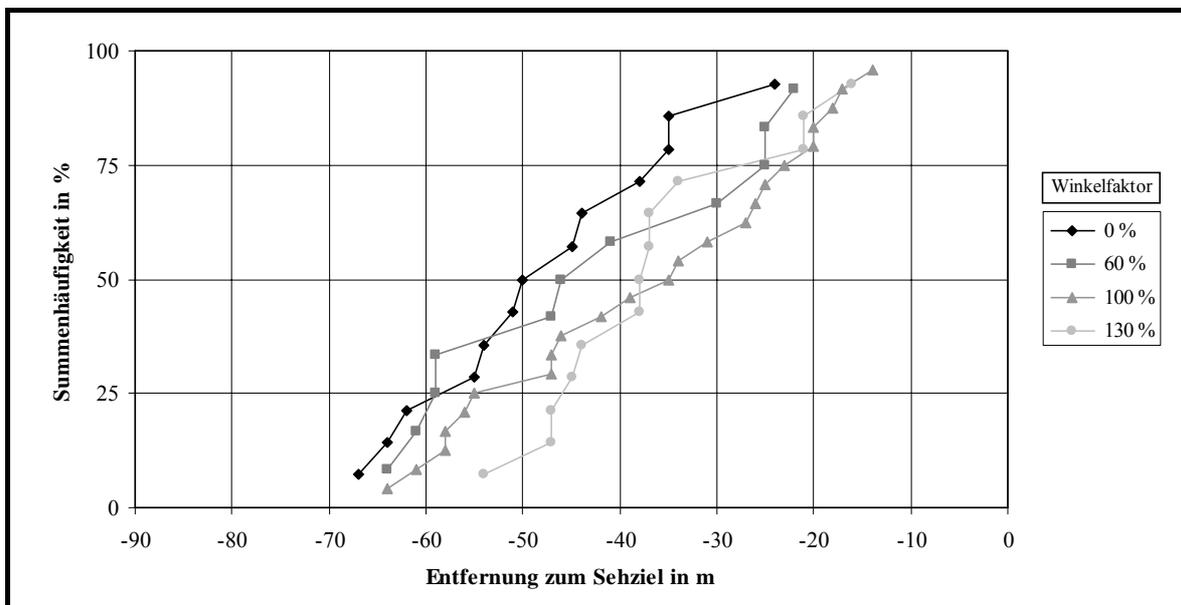


Bild 5.26: Erkennbarkeitsentfernung auf einer Kuppe mit $R_v = 1500$ m

Ist dagegen die adaptive Leuchtweitenregulierung aktiv (Winkelfaktor: 60 %, 100 % oder 130 %), dann ergibt sich nur ein moderates Ansteigen der Erkennbarkeitsentfernung. Die Ergebnisse auf der Kuppe weisen jedoch für alle vier Winkelfaktoren große Streuungen auf, die Quartilsabstände (Differenz zwischen 1. und 3. Quartil) liegen zwischen $QA_{130\%} = 18\text{ m}$ und $QA_{60\%} = 34\text{ m}$.

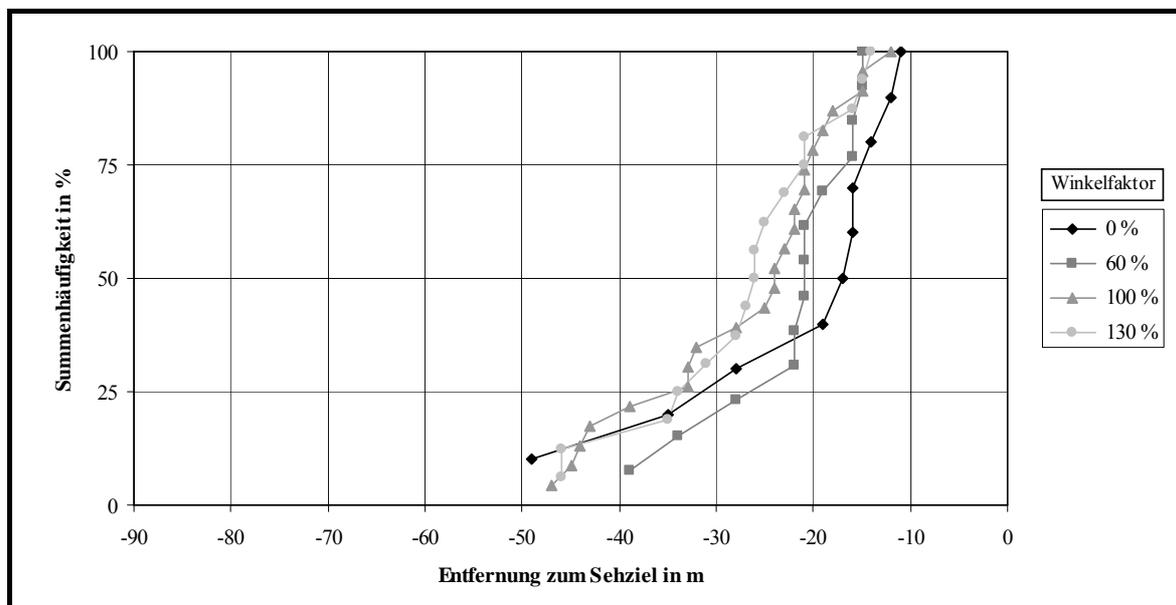


Bild 5.27: Erkennbarkeitsentfernung in einer Wanne mit $R_v = 2300\text{ m}$

In Bild 5.27 sind die Summenhäufigkeiten der Erkennbarkeitsentfernungen in einer Wanne mit Radius $R_v = 2300\text{ m}$ dargestellt. Es wird deutlich, dass mit der adaptiven Leuchtweitenregulierung eine Abnahme der Erkennbarkeitsentfernung, wie sie ohne Anpassung der Lichtverteilung auftritt, vermindert werden kann.

Die geringen durchschnittlichen Entfernungen, die im Vorversuch ermittelt wurden, lassen sich auf einen niedrigen Kontrast der Sehobjekte zu ihrer Umgebung zurückführen. Die schwierige Erkennbarkeit der Sehziele und die geringe Anzahl der ermittelten Entfernungen begründen die zum Teil große Streuung der Ergebnisse.

Daher wurde ein **zweiter Versuch** zur Ermittlung der Erkennbarkeitsentfernungen durchgeführt. Dieser Versuch fand im späten Frühjahr statt, weil anzunehmen war, dass der Bewuchs am Fahrbahnrand zu dieser Jahreszeit andere Reflexionseigenschaften aufweist. Zusätzlich wurden die Positionen der Sehobjekte um wenige Meter verändert. Am zweiten Versuch nahmen insgesamt 16 Personen im Alter zwischen 24 und 45 Jahren teil. Etwa die Hälfte der Probanden sind Mitarbeiter des Fachgebiets Lichttechnik der BMW AG. Im Durchschnitt ergaben sich für jedes Sehobjekt und jeden Winkelfaktor 29 gültige Messungen der Erkennbarkeitsentfernung.

Ein Vergleich der Ergebnisse zwischen den Mitarbeitern des Fachgebiets Lichttechnik als Lichttechnikexperten und den anderen Probanden zeigte keine wesentlichen Unterschiede.

Die durchschnittlichen Erkennbarkeitsentfernungen sind tatsächlich angestiegen, wie ein Vergleich zwischen Bild 5.28 und Bild 5.25 auf Seite 104 verdeutlicht. Der Median ist bei allen vier Verstelfaktoren mit $d_E = 40\text{ m}$ deutlich größer als im Vorversuch. Erwartungsgemäß sind die Unterschiede zwischen den vier Summenhäufigkeiten sehr gering und nicht signifikant. Zudem zeigen insbesondere alle Messungen, die zwischen dem 1. Quartil (25 %) und 3. Quartil (75 %) liegen, einen sehr geringen Quartilsabstand $QA < 5\text{ m}$.

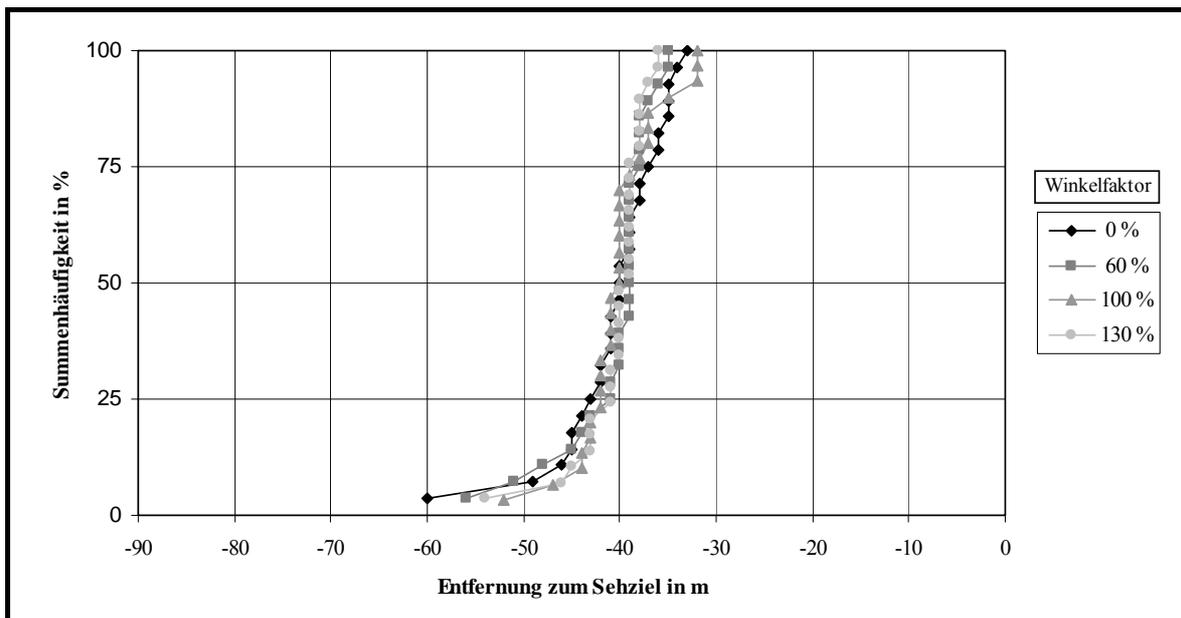


Bild 5.28: Erkennbarkeitsentfernung auf einem ebenen Streckenabschnitt

Die folgenden drei Diagramme zeigen die Ergebnisse für die Sehziele, die am Ende dreier verschiedener Kuppen positioniert sind.

Wie in Bild 5.29 zu sehen ist, ähneln sich die Summenhäufigkeiten der Entfernungen, die für das Sehziel am Ende der Kuppe mit dem durchschnittlichen Radius $R_v = 1500\text{ m}$ ermittelt wurden. Die Unterschiede der mittleren Entfernungen zwischen den Faktoren 0 % bis 100 % sind nicht signifikant. Diese Tatsache lässt sich damit begründen, dass auf solchen Kuppen die adaptive Leuchtweitenregulierung mit der variablen Zielentfernung d_5 arbeitet und die optische Scheinwerferachse nur in einem relativ geringen Winkel nach unten verstellt wird. Daher befindet sich das Sehziel bereits im hellen Bereich der Lichtverteilung, wenn es aus der Sicht des Fahrers auf der Kuppe erscheint und bewirkt hohe Mediane der Erkennbarkeitsentfernungen um $d_{E\ 0\% - 100\%} = 54\text{ m}$. Die einzige Ausnahme stellt die Summenhäufigkeitsverteilung der adaptiven Leuchtweitenregulierung mit Winkelfaktor 130 % dar. Sie senkt die Lichtverteilung offensichtlich zu stark ab und reduziert damit ihren Median um rund 10 m. Der Signifikanztest (vorgestellt in Abschnitt 5.2.1) ergibt für diesen Faktor einen signifikant kleineren Mittelwert der Erkennbarkeitsentfernung im Vergleich zu den anderen Versionen.

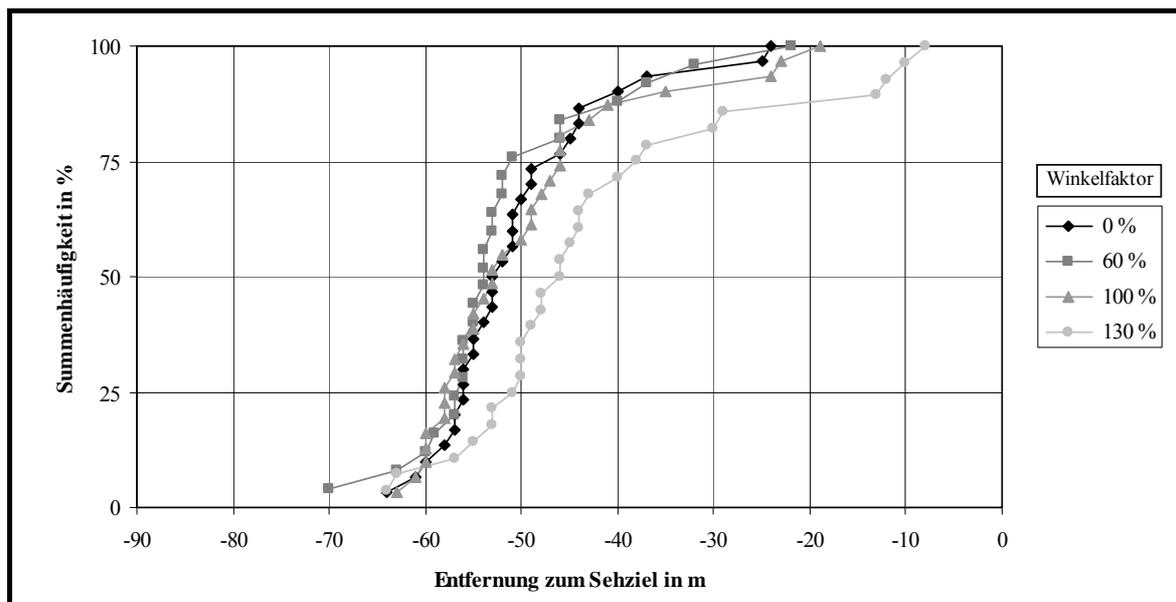


Bild 5.29: Erkennbarkeitsentfernung auf einer Kuppe mit $R_v = 1500 \text{ m}$

Die Ergebnisse mit diesem Sehzziel unterscheiden sich deutlich von den entsprechenden Ergebnissen aus dem Vorversuch (siehe Bild 5.26 auf Seite 104). Hier zeigt sich der gestiegene Kontrast des Sehzziels zu seinem Umfeld, der durch den mit der Jahreszeit veränderten Bewuchs am Straßenrand verursacht wurde. Die Quartilsabstände (Differenz zwischen 1. und 3. Quartil) im zweiten Versuch haben sich mit Werten zwischen $QA_{130\%} = 17 \text{ m}$ und $QA_{60\%} = 6 \text{ m}$ im Vergleich zum Vorversuch halbiert. Daher sind die Ergebnisse aus dem zweiten Versuch aussagekräftiger.

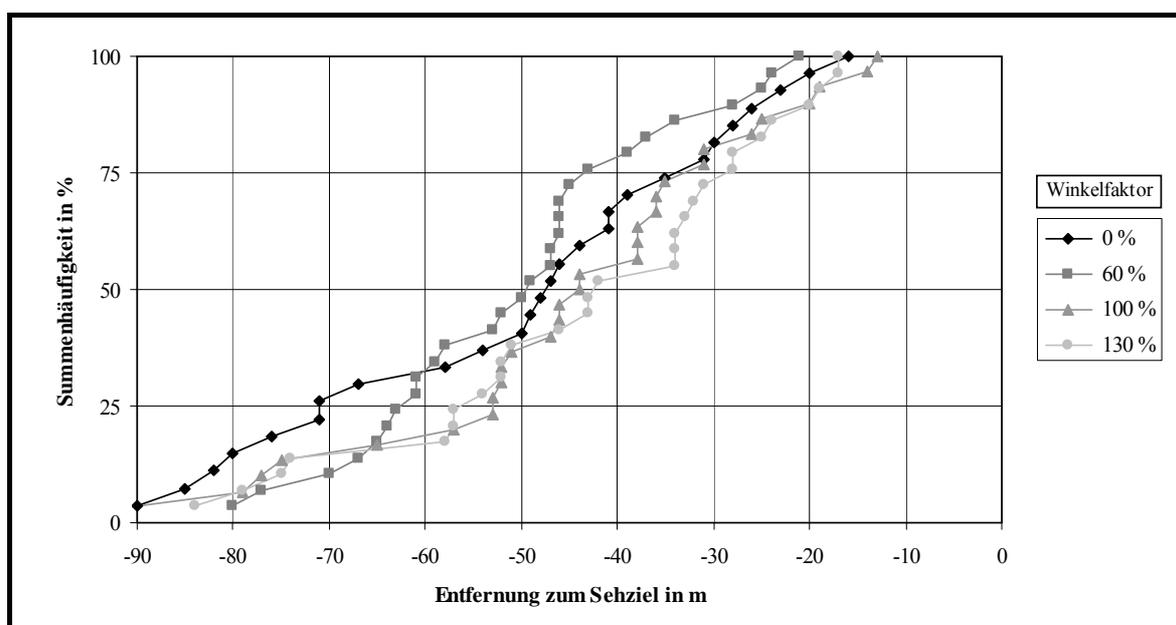


Bild 5.30: Erkennbarkeitsentfernung auf einer Kuppe mit $R_v = 5400 \text{ m}$

Bild 5.30 zeigt die Ergebnisse für das Sehobjekt auf der Kuppe mit einem durchschnittlichen vertikalen Radius $R_v = 5400 \text{ m}$. Die Lage der Kurven deutet auf eine Abhängigkeit vom Winkelfaktor der adaptiven Leuchtweitenregulierung hin. Je größer dieser Faktor ist, desto kürzer werden die durchschnittlichen Erkennbarkeitsentfernungen. Wie hohe Quartilsabstände zwischen $Q_{A0\%} = 37 \text{ m}$ und $Q_{A100\%} = 20 \text{ m}$ belegen, besitzen die Daten eine große Streuung. Daher sind die Unterschiede in den mittleren Erkennbarkeitsentfernungen nicht signifikant.

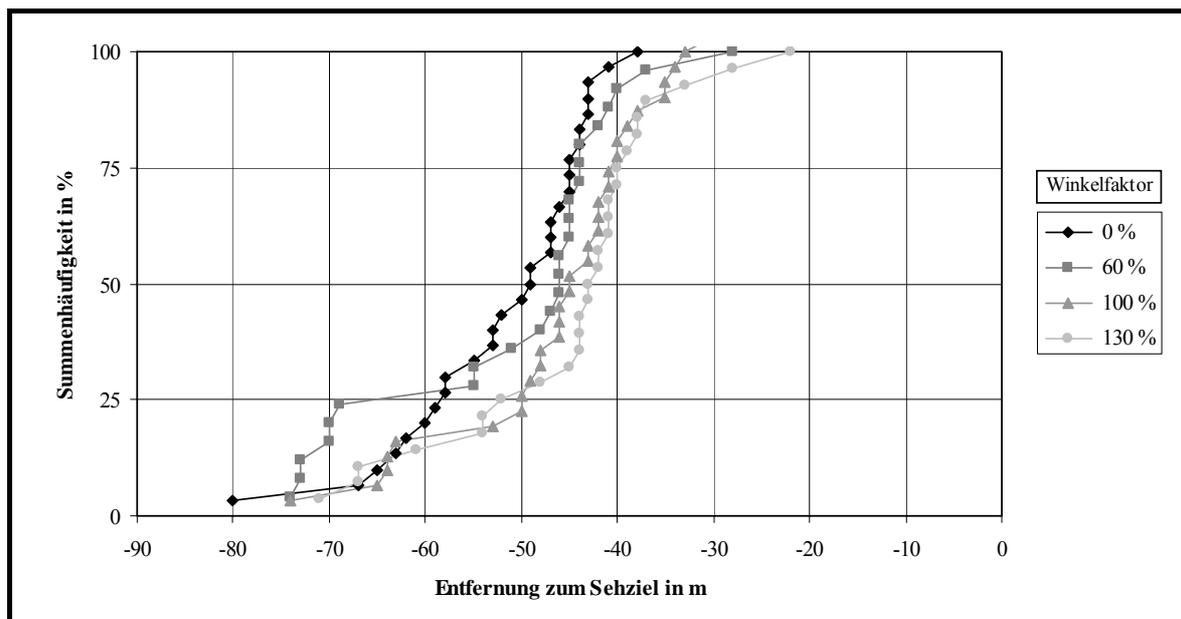


Bild 5.31: Erkennbarkeitsentfernung auf einer Kuppe mit $R_v = 9500 \text{ m}$

Deutlicher lässt sich die Abhängigkeit der Erkennbarkeitsentfernung vom Winkelfaktor der Leuchtweitenregulierung in Bild 5.31 erkennen, welches die gemessenen Entfernungen des Sehobjekts auf der Kuppe mit Radius $R_v = 9500 \text{ m}$ darstellt. Die Mediane erreichen Werte zwischen $d_{E130\%} = 43 \text{ m}$ und $d_{E0\%} = 50 \text{ m}$. Die Mittelwerte der Entfernungen zum Sehziel zwischen den Winkelfaktoren 100% und 0% sowie 130% und 0% weisen eine signifikante Differenz auf. Die Unterschiede zwischen allen anderen Mittelwertspaaren sind dagegen nicht signifikant.

Anhand der drei Diagramme für die Sehobjekte auf Kuppen lässt sich erkennen, dass die Mediane der Erkennbarkeitsentfernungen durch die adaptive Leuchtweitenregulierung (Faktor 100%) bei großen Kuppenradien um bis zu 4 m verkürzt werden. Dieser Differenzbetrag verringert sich mit sinkendem Kuppenradius soweit, dass der Signifikanztest keinen Unterschied erkennen lässt. Ein Vergleich der Ergebnisse auf Kuppen mit den Referenzwerten einer ebenen Straße belegt, dass unabhängig vom Winkelfaktor der adaptiven Leuchtweitenregulierung die ermittelten Entfernungen auf Kuppen größer sind als auf dem ebenen Streckenabschnitt. Dieser Effekt begründet sich in der Tatsache, dass auf Kuppen die Objekte am rechten Fahrbahnrand von unten her im Sichtfeld des Fahrers auftauchen und dabei direkt in den

Bereich der Lichtverteilung mit hohen Lichtstärken gelangen, wodurch ihre Relativbewegung zum Fahrzeug sehr auffällig ist.

Die Erkennbarkeitsentfernungen zum Sehziel am Ende der Wanne mit $R_v = 2300 \text{ m}$ sind in Bild 5.32 zu sehen. Mit zunehmendem Verstellwinkel der Leuchtweitenregulierung steigen die Mediane der gemessenen Entfernungen an. Im Vergleich zur herkömmlichen Lichtverteilung wird mit Hilfe der adaptiven Leuchtweitenregulierung (Faktor 100% oder 130%) das Sehziel 5 m früher erkannt. Diese Differenz ist aufgrund der geringen Streuung der Daten mit einem maximalen Quartilsabstand $QA < 8 \text{ m}$ signifikant.

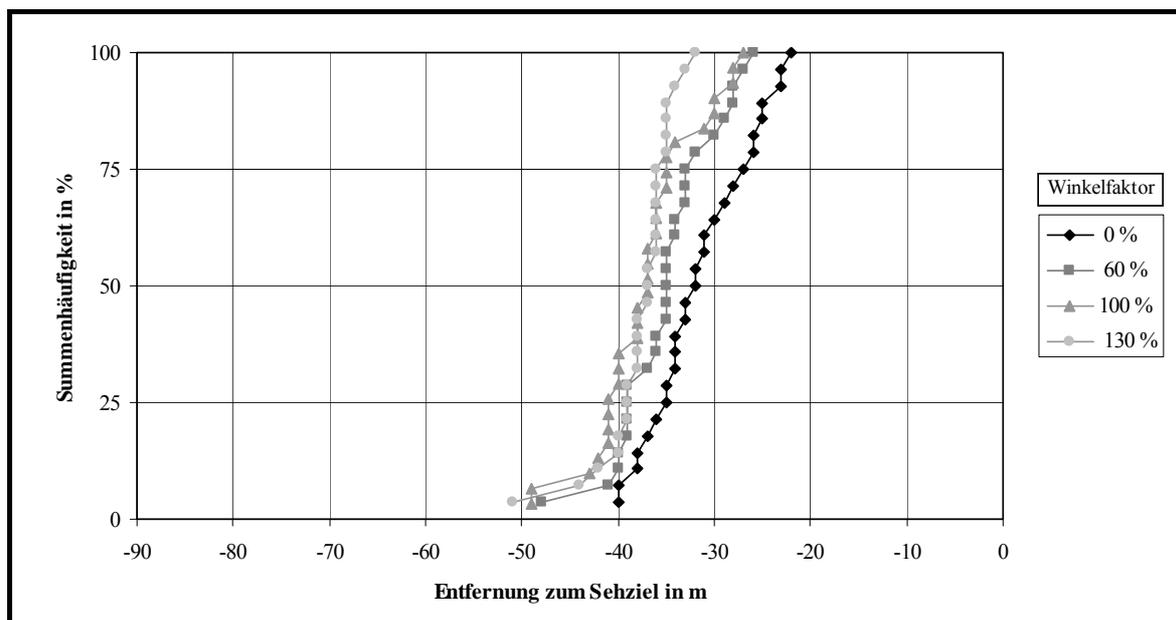


Bild 5.32: Erkennbarkeitsentfernung in einer Wanne mit $R_v = 2300 \text{ m}$

Erstaunlicherweise zeigen sich nur kleine Unterschiede in den ermittelten Entfernungen zum Sehziel am Ende einer Wanne mit Radius $R_v = 3800 \text{ m}$. Ein möglicher Grund für dieses Ergebnis in Bild 5.33 stellt die Linkskurve in dieser Wanne dar. Die Hell-Dunkel-Grenze wandert daher nicht in vertikaler Richtung über das Sehobjekt, sondern in einer horizontalen Bewegung mit ihrem schrägen Anstieg in der rechten Hälfte der Lichtverteilung. Der Einfluss der adaptiven Leuchtweitenregulierung auf die Erkennbarkeitsentfernung wird dadurch verringert. Im Vergleich zum Sehziel im ebenen Teilstück der Strecke (siehe Bild 5.28 auf Seite 106) sind die Mediane zum Sehobjekt an dieser Position mit $d_E = 29 \text{ m}$ um etwa 25% kürzer.

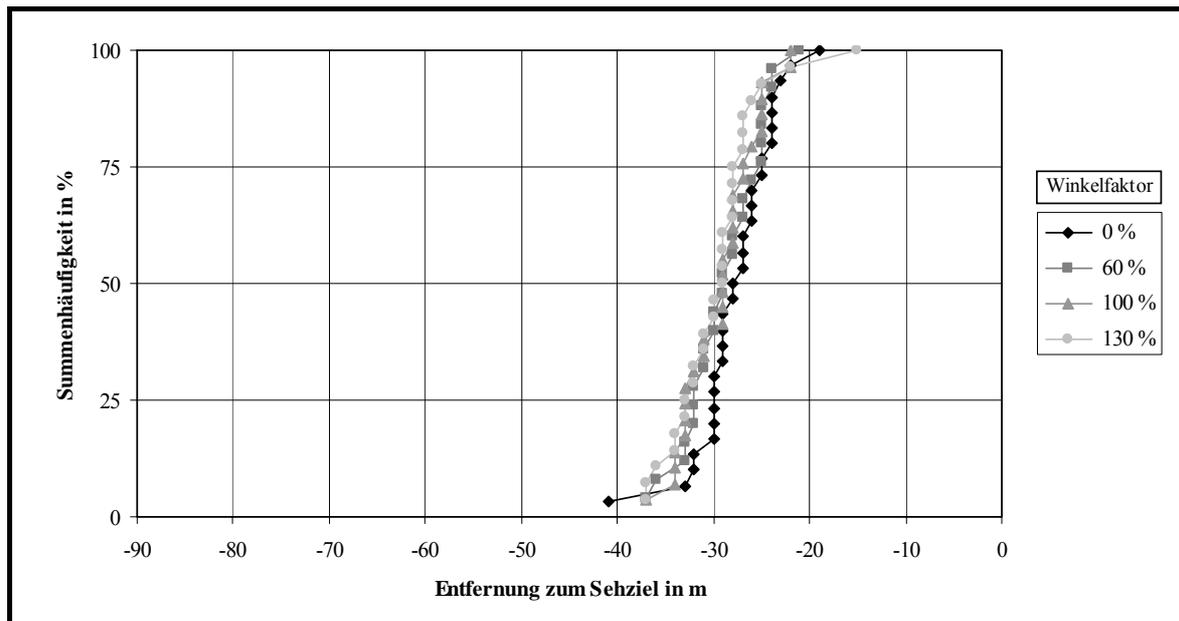


Bild 5.33: Erkennbarkeitsentfernung in einer Wanne mit $R_v = 3800$ m

Folgende Schlüsse lassen sich aus den Ergebnissen des Fahrversuchs zur Ermittlung der Erkennbarkeitsentfernungen ziehen:

- Je stärker die Lichtverteilung durch die adaptive Leuchtweitenregulierung an vertikale Kurven angepasst wird, desto weniger verändern sich die Erkennbarkeitsentfernungen im Vergleich zur ebenen Straße.
- Aus diesem Grund ergeben sich auf Kuppen bei Fahrzeugen ohne Anpassung der Lichtverteilung größere Erkennbarkeitsentfernungen als bei Fahrzeugen mit adaptiver Leuchtweitenregulierung. Unabhängig vom Grad der Anpassung sind die Erkennbarkeitsentfernungen auf Kuppen größer als auf ebenen Straßen.
- In Wannen zeigt sich der Vorteil von Fahrzeugen mit adaptiver Leuchtweitenregulierung. Sie erreichen dort größere Erkennbarkeitsentfernungen als Fahrzeuge ohne Anpassung der Lichtverteilung.

5.3.2 Blickverhalten des Fahrers

Wie bereits in Abschnitt 2.1.4 beschrieben, konzentrieren sich die Blicke des Fahrers im nächtlichen Straßenverkehr auf den hell beleuchteten Bereich der Fahrbahn vor dem Fahrzeug. Adaptive Scheinwerfer können durch eine Anpassung der Lichtverteilung an den Straßenverlauf das Blickverhalten des Fahrers so steuern, dass der Schwerpunkt seines Blickverhaltens in die Richtung des Straßenverlaufs verschoben wird.

Ob diese Vermutung für die adaptive Leuchtweitenregulierung zutrifft, soll mit Hilfe eines Eye-Tracking-Systems überprüft werden.

Das Eye-Tracking-System wurde vom L-LAB, Paderborn zur Verfügung gestellt und in das Versuchsfahrzeug eingebaut. Die Messungen des Blickverhaltens erfolgten auf der gleichen Teststrecke wie die Fahrversuche zur Bestimmung der Erkennbarkeitsentfernungen. Vor dem Fahrversuch musste das Eye-Tracking-System auf jeden Probanden eingestellt und kalibriert werden.

Während der Fahrt wurden meterweise folgende Daten aufgezeichnet:

- Zeitstempel des Datensatzes,
- Stand des Streckenzählers,
- vertikale Krümmung der Fahrbahn,
- vertikaler Winkel der optischen Scheinwerferachse
- Winkelfaktor (0 %, 60 %, 100 %, 130 %) der adaptiven Leuchtweitenregulierung,
- Vorlauf der gespeicherten Krümmungsdaten zur aktuellen Fahrzeugposition,
- horizontaler Blickwinkel,
- vertikaler Blickwinkel und
- Pupillendurchmesser.

Die Probanden hatten die Aufgabe, die Teststrecke unter Verwendung des Tempomaten mit einer konstanten Geschwindigkeit $v = 70 \text{ km/h}$ abzufahren. Trotzdem wurde bei der Auswertung der Daten anhand der Zeitdifferenz zwischen aufeinanderfolgender Datensätze die Geschwindigkeit überprüft und die Daten bei großen Geschwindigkeitsänderungen (Beschleunigungen) gelöscht, da sie durch den dynamischen Nickwinkel der Fahrzeugkarosserie verfälscht waren. Der Einfluss des statischen Nickwinkels der Fahrzeugkarosserie wurde bereits bei der Kalibrierung eliminiert.

Die Aufzeichnung des Pupillendurchmessers, der sich durch das Scheinwerferlicht des Gegenverkehrs verkleinert, diente zur Überprüfung, ob bei der Aufzeichnung eines Datensatzes ein entgegenkommendes Fahrzeug vorhanden war und den Blick des Fahrers ablenkte. Die entsprechenden Datensätze wurden vor der Auswertung gelöscht.

Ebenso nicht ausgewertet wurden Datensätze, die aufgrund extremer horizontaler oder vertikaler Blickwinkel den Schluss zulassen, dass der Fahrer nicht die Straße, sondern andere Objekte, wie z.B. Gegenstände neben der Fahrbahn, den Innenspiegel oder die Fahrzeuginstrumente betrachtete.

Ein Vergleich des vertikalen Krümmungsprofils der Teststrecke mit den aufgezeichneten vertikalen Blickwinkeln während einer Testfahrt bei aktivierter Leuchtweitenregulierung in Bild 5.34 zeigt eine gute Korrelation zwischen beiden Datenreihen. Lediglich im Blickwinkelprofil fallen an zufälligen Stellen (z.B. zwischen Zählerstand 2200 m und 2300 m) Daten

auf, die mit hoher Häufigkeit einem konstanten Blickwinkel von $-1,3^\circ$ aufweisen und offensichtlich nicht zum Krümmungsprofil passen. Ein möglicher Grund für diese offenbar fehlerhaften Daten ist eine Fehlfunktion des Eye-Tracking-Systems, das bei starker Kopfbewegung des Probanden oder bei einem längeren Lidschlag das erfasste Auge verliert und keine gültigen Blickwinkel-daten erzeugen kann. Solche fehlerhaften Daten lassen sich nicht mit den genannten Filterverfahren (Geschwindigkeitsänderung, Pupillendurchmesser, extreme Winkelwerte) löschen, sondern müssen per Hand aus den Datensätzen herausgenommen werden.

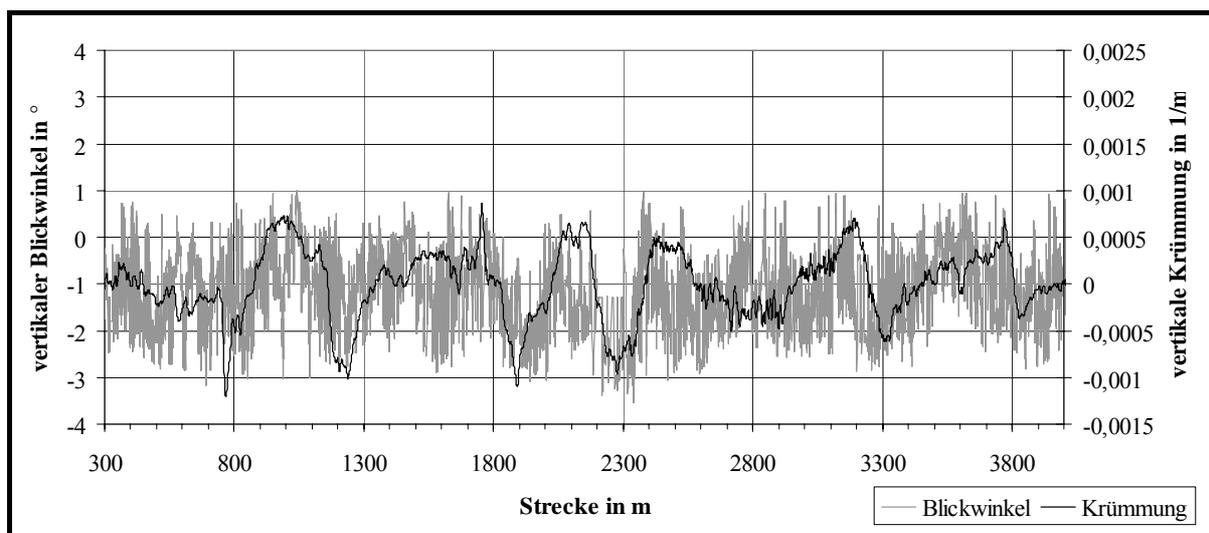


Bild 5.34: Blickwinkel- und Krümmungsprofil einer Versuchsfahrt auf der Teststrecke

Auffällig am Blickwinkelprofil sind seine starken Schwankungen, die sich mit dem Blickverhalten des Menschen begründen lassen. Beim Fahren fixiert der Fahrer einen Punkt im Verkehrsraum vor dem Fahrzeug und verfolgt ihn, solange er optische Informationen aufnimmt. Anschließend lässt er seinen Blick auf einen anderen Punkt springen (Sakkade) und bewirkt damit einen Wechsel des vertikalen Blickwinkels.

Die folgenden Diagramme stellen die Häufigkeitsverteilungen der vertikalen Blickwinkel von allen 14 Probanden für bestimmte Streckenabschnitte auf der Teststrecke in Abhängigkeit von den vier Verstellfaktoren der adaptiven Leuchtweitenregulierung dar.

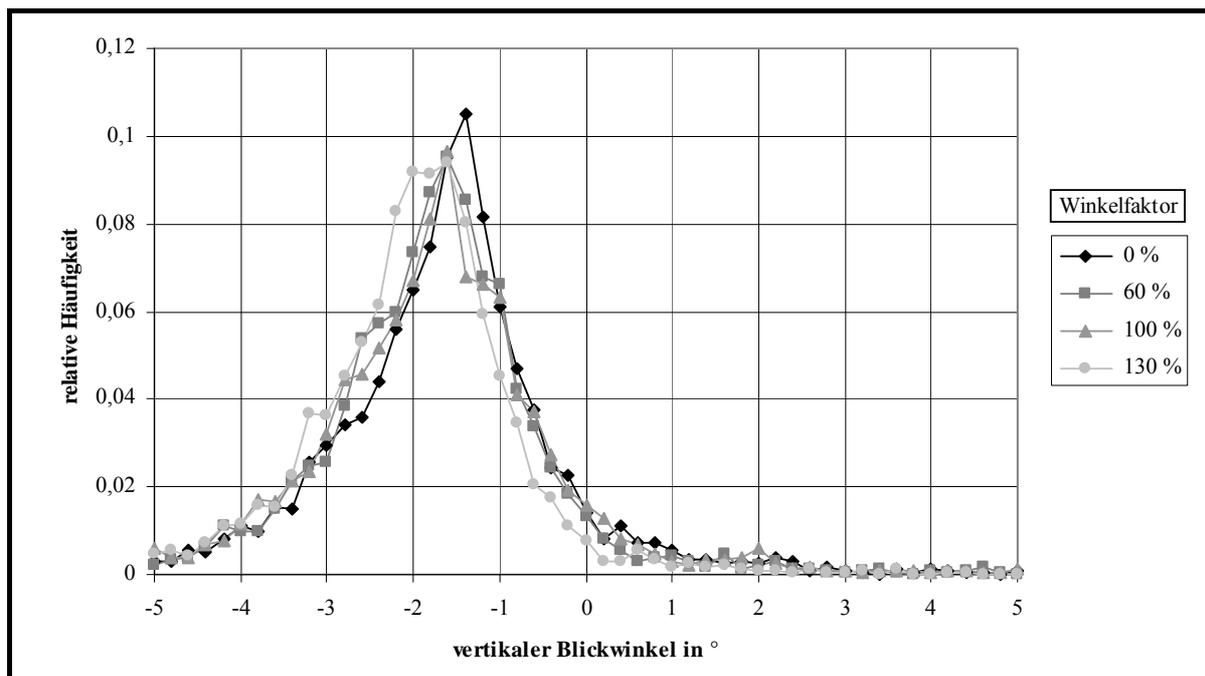


Bild 5.35: Häufigkeitsverteilung der vertikalen Blickwinkel auf einer Kuppe mit $R_v = 5400 \text{ m}$

In Bild 5.35 sind die Häufigkeitsverteilungen der vertikalen Blickwinkel auf der Kuppe mit Radius $R_v = 5400 \text{ m}$ zu sehen. Da im Diagramm die Häufigkeitsverteilungen aller Probanden zusammengefasst wurden, ergeben sich eindeutige Maxima für alle Winkelfaktoren der adaptiven Leuchtweitenregulierung, obwohl in den Häufigkeitsverteilungen einzelner Personen aufgrund der Sakkaden mehrere Maxima pro Winkelfaktor möglich sind. Das Diagramm zeigt, dass mit zunehmendem Winkelfaktor der häufigste Blickwinkel um etwa $0,2^\circ$ nach unten gelenkt wird. Diese Differenz ist nach dem statistischen Test nicht signifikant.

Werden die vertikalen Blickwinkel auf ihre Fixationsentfernungen umgerechnet, ergibt sich Bild 5.36. Die Fixationsentfernung entspricht dem Abstand des Fahrzeugs zu dem Punkt, bei dem der Blick eines Probanden die Fahrbahnoberfläche schneidet.

Es stellt sich heraus, dass auch mit angepasster Lichtverteilung die Probanden mit einem Teil ihrer Blickwinkel Punkte oberhalb der Fahrbahnoberfläche fixieren, da sich die Tangente zur Fahrbahnoberfläche knapp oberhalb der Maxima befindet. Die Entfernung der Maxima reduziert sich durch die Absenkung der Lichtverteilung (Winkelfaktor 100%) auf der Kuppe um etwa $\Delta d_F = 13 \text{ m}$.

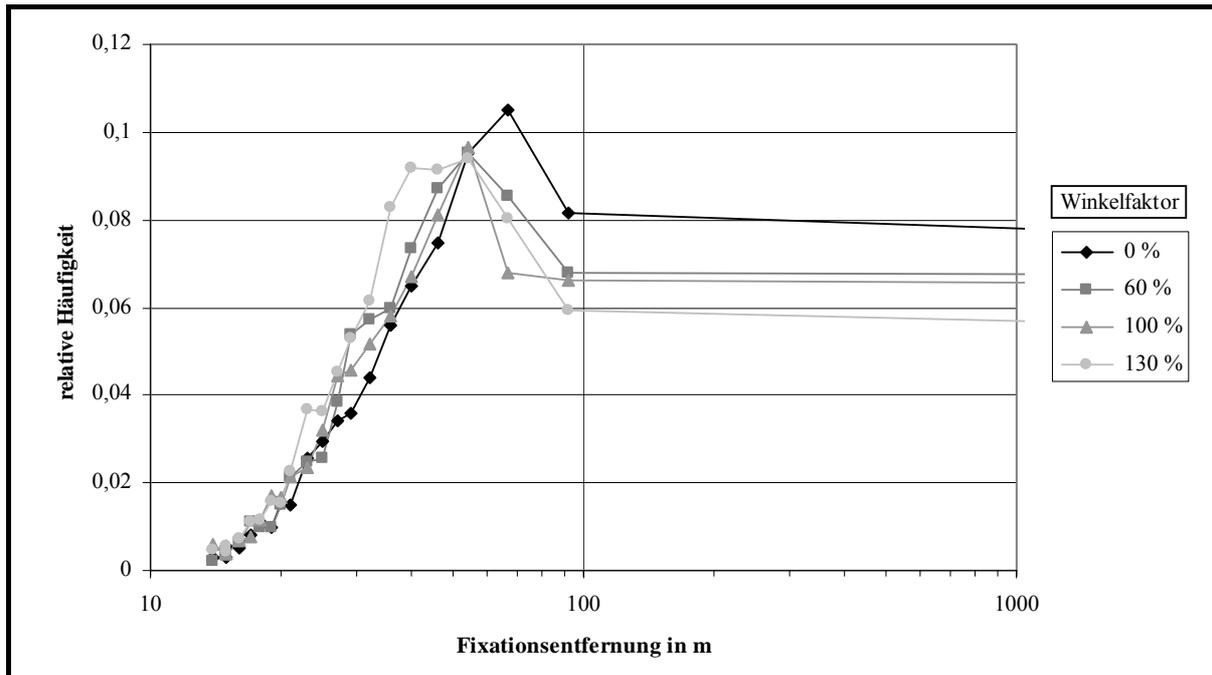


Bild 5.36: Häufigkeitsverteilung der Fixationsentfernungen auf einer Kuppe mit $R_v = 5400 \text{ m}$

Die Ergebnisse des Blickverhaltens auf einer engen Kuppe mit Radius $R_v = 1400 \text{ m}$ sind in Bild 5.37 dargestellt.

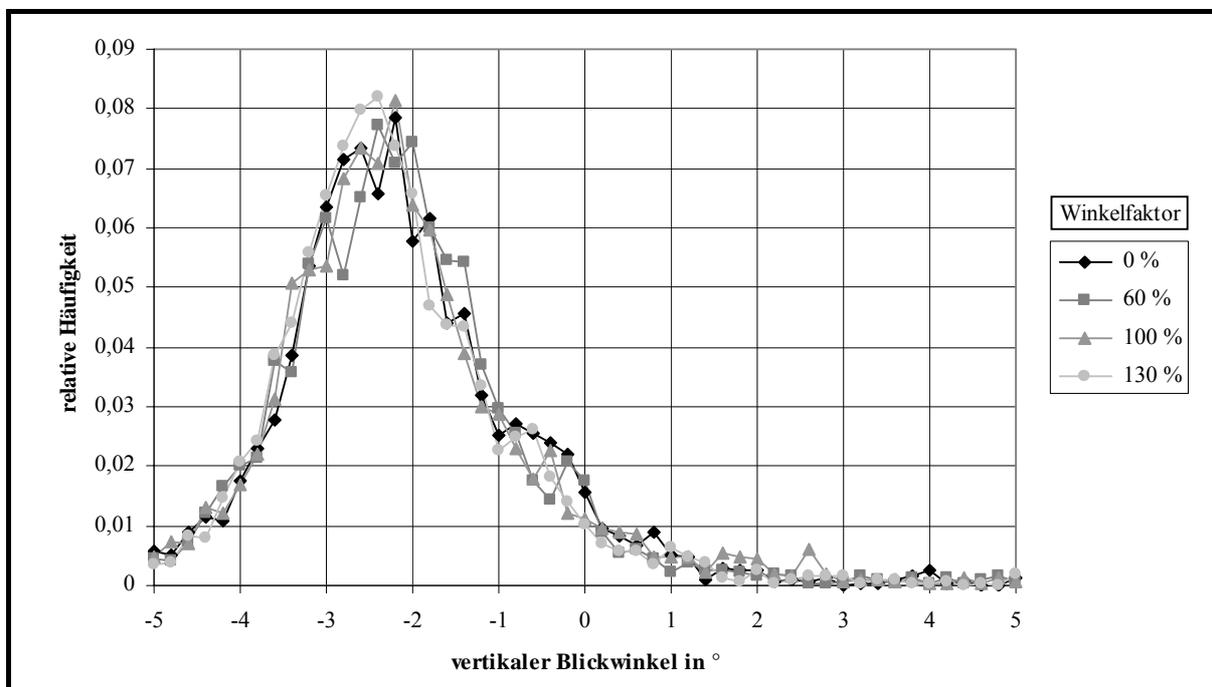


Bild 5.37: Häufigkeitsverteilung der vertikalen Blickwinkel auf einer Kuppe mit $R_v = 1400 \text{ m}$

Die Unterschiede zwischen den einzelnen Häufigkeitsverteilungen sind minimal und nicht signifikant. Auf solchen engen Kuppen besitzt die Hell-Dunkel-Grenze bei den Winkelfaktoren 60 % und 100 % einen großen vertikalen Abstand zur Fahrbahnoberfläche. Für den Probanden ergibt sich daher kein Unterschied in der Verteilung der reflektierten Fahrbahnleuchtdichten. Daher findet auf engen Kuppen keine Lenkung des Blickverhaltens durch die adaptive Leuchtweitenregulierung statt. Eine Ausnahme bildet die Häufigkeitsverteilung mit dem Winkelfaktor 130 %, bei dem die Höhe der Hell-Dunkel-Grenze über der Fahrbahnoberfläche sehr niedrig ist. Dadurch wird der Blick der Probanden offensichtlich um einen kleinen Betrag nach unten gelenkt.

Die Häufigkeitsverteilungen der Fixationsentfernungen auf dieser Kuppe zeigen, dass sich die Blicke auf die Tangente zur Fahrbahnoberfläche konzentrieren (siehe Bild 5.38), da etwa die Hälfte aller Blickwinkel eine unendliche Fixationsentfernung besitzen.

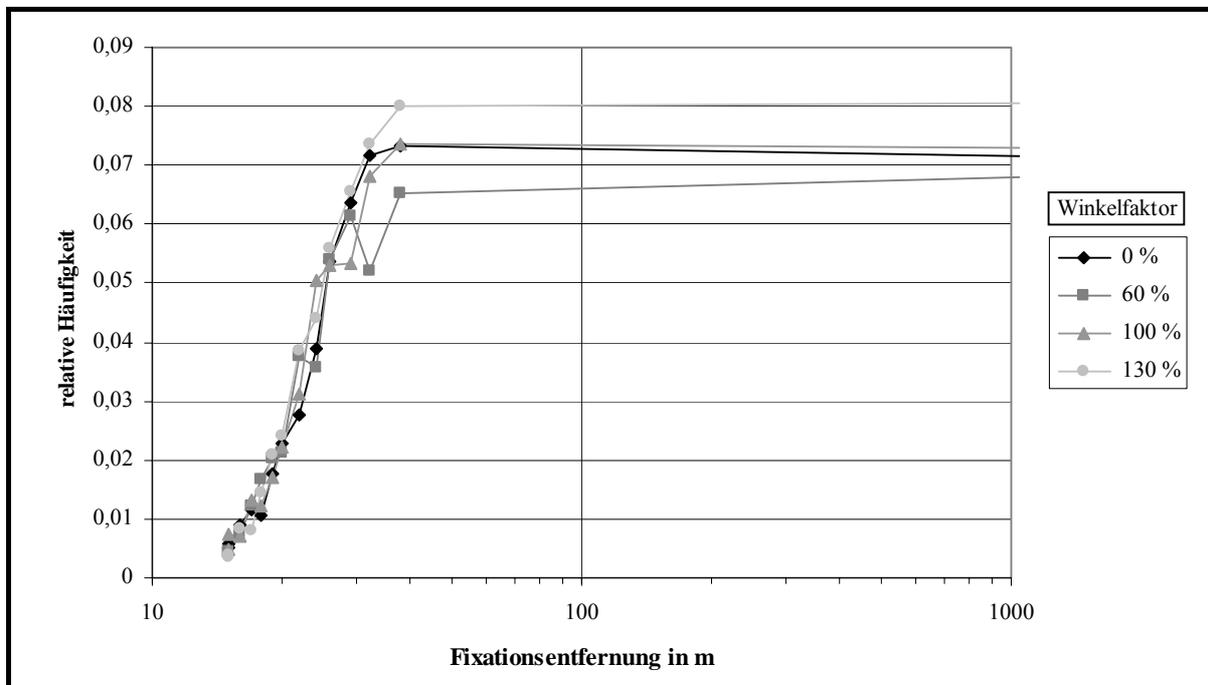


Bild 5.38: Häufigkeitsverteilung der Fixationsentfernungen auf einer Kuppe mit $R_v = 1400 \text{ m}$

Anhand der Häufigkeitsverteilungen in Bild 5.39, welches das Blickverhalten der Probanden in der Wanne mit Radius $R_v = 4700 \text{ m}$ repräsentiert, lässt sich ein Lenkungseffekt durch eine angepasste Lichtverteilung erkennen.

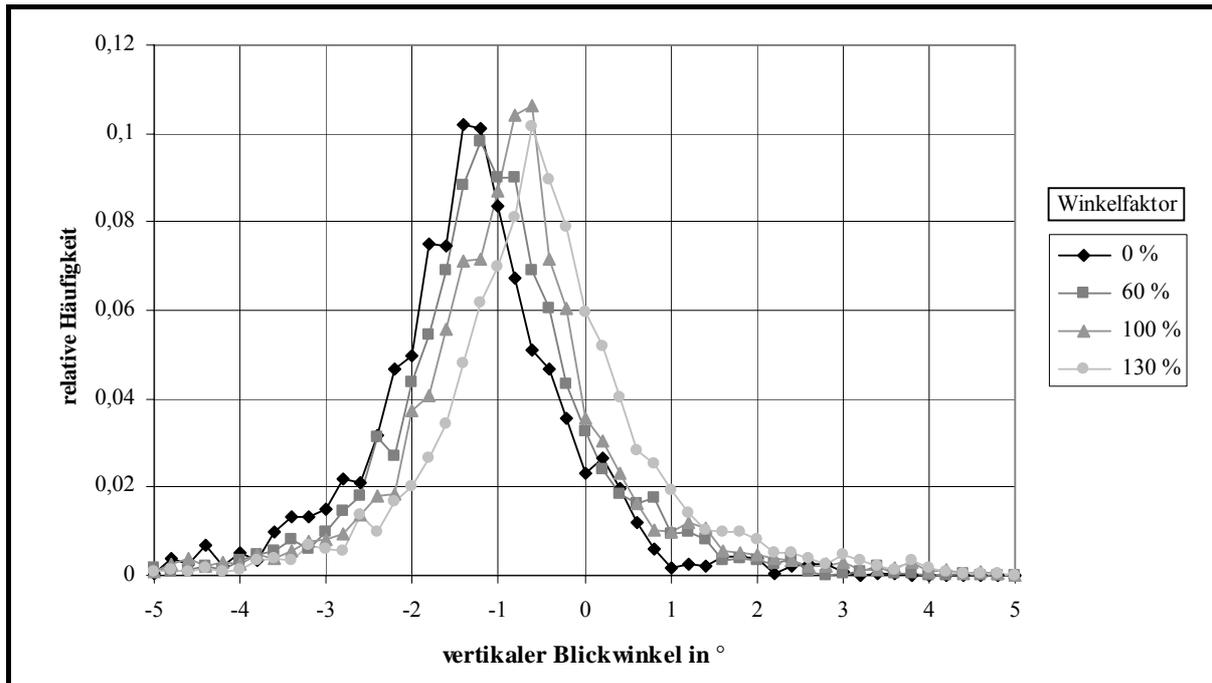


Bild 5.39: Häufigkeitsverteilung der vertikalen Blickwinkel in einer Wanne mit $R_v = 4700 \text{ m}$

Dieser Lenkungseffekt entsteht durch den Wirkmechanismus der adaptiven Leuchtweitenregulierung, die eine höhere geometrische Leuchtweite bietet und damit den Bereich hoher Fahrbahnleuchtdichten vergrößert. Da sich die Blicke der Menschen auf diese Fläche konzentrieren, verschiebt sich mit zunehmendem Winkelfaktor die Häufigkeitsverteilung zu größeren vertikalen Blickwinkeln. Die Unterschiede zwischen den mittleren Blickwinkeln sind jedoch bis auf die der beiden Extremwerte (0 % und 130 %) nicht signifikant. Nach Umrechnung der Blickwinkel in Fixationsentfernungen wird deutlich, dass die häufigsten Blickwinkel beim Fahren mit der adaptiven Leuchtweitenregulierung (100 %) in einer um rund $\Delta d_F = 20 \text{ m}$ größeren Entfernung die Fahrhahnoberfläche schneiden, als bei Fahrzeugen ohne Anpassung der Lichtverteilung (siehe Bild 5.40).

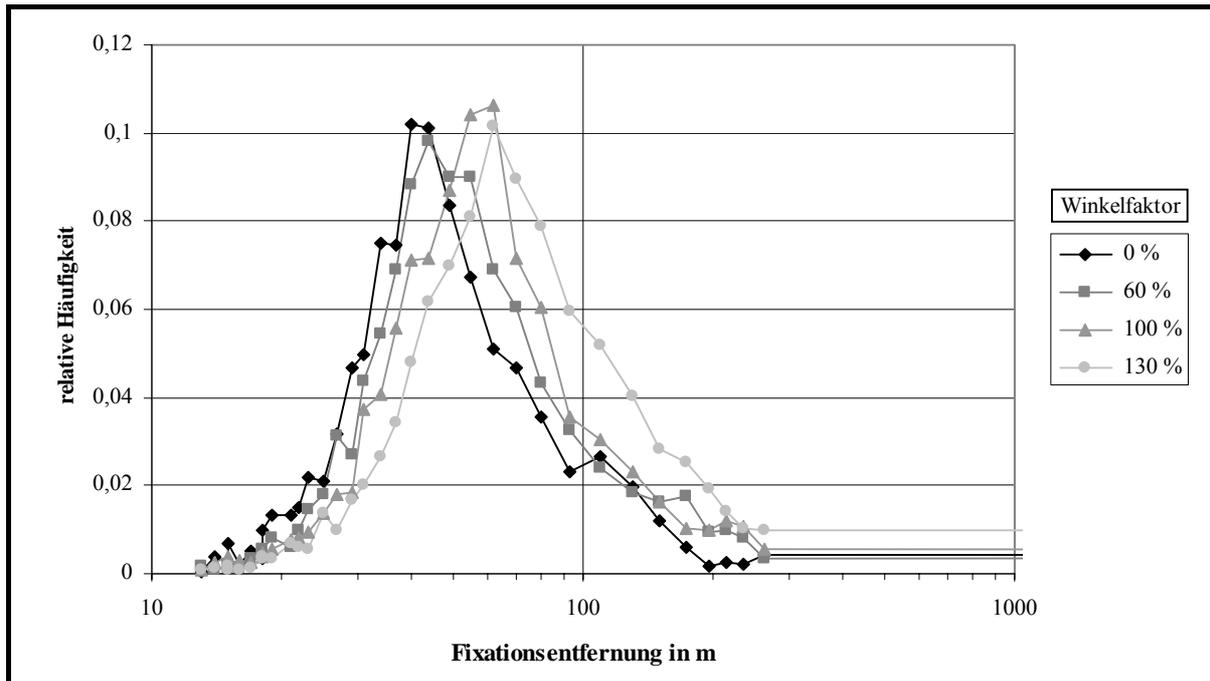


Bild 5.40: Häufigkeitsverteilung der Fixationsentfernungen in einer Wanne mit $R_v = 4700$ m

Die Unterschiede zwischen den mittleren Blickwinkeln der vier Verstellfaktoren werden größer, je kleiner der Wannradius ist (siehe Bild 5.41).

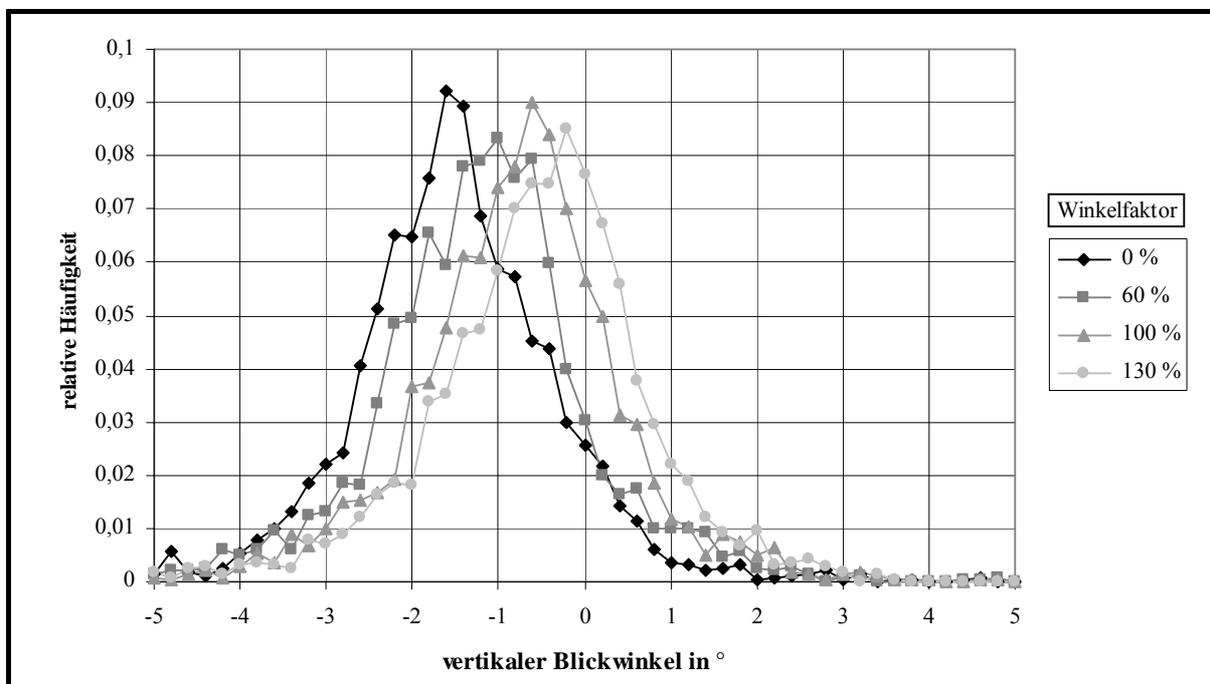


Bild 5.41: Häufigkeitsverteilung der vertikalen Blickwinkel in einer Wanne mit $R_v = 1900$ m

Wie das Diagramm jedoch zeigt, weisen die Ergebnisse eine hohe Streuung der vertikalen Blickwinkel auf. Daher sind auch hier nur die Differenzen der durchschnittlichen Blickwinkel zwischen der Anpassung der Lichtverteilung mit Faktor 130 % und ohne Anpassung (0 %) signifikant.

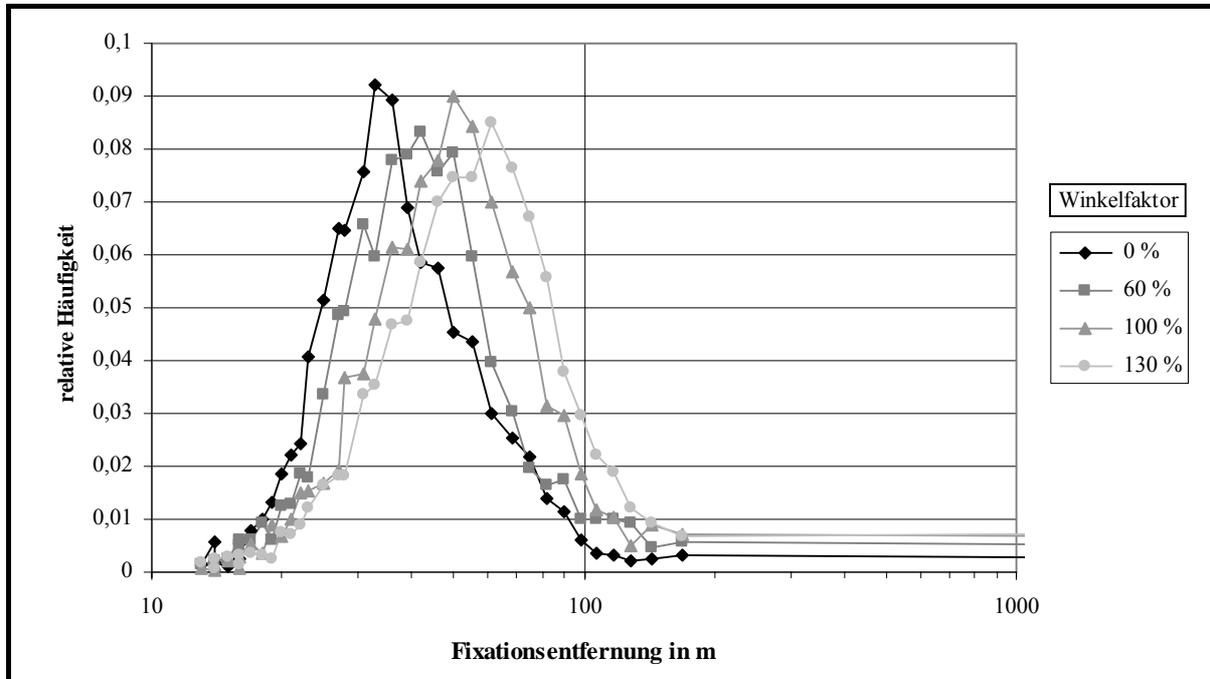


Bild 5.42: Häufigkeitsverteilung der Fixationsentfernungen in einer Wanne mit $R_v = 1900$ m

Bei Betrachtung der zugehörigen Fixationsentfernungen in Bild 5.42, fällt auf, dass in engen Wannen große Blickwinkeldifferenzen zu kleineren Unterschieden in den Fixationsentfernungen führen als in Wannen mit größeren Radien. Daher beträgt die Differenz der häufigsten Fixationsentfernungen zwischen dem Verstellwinkel 0 % und 100 % lediglich $\Delta d_F = 15$ m, obwohl sich die Maxima der Blickwinkel um rund 1° unterscheiden.

Weitere Diagramme, welche das Blickverhalten auf den anderen Kuppen und Wannen der Teststrecke zeigen, sind im Anhang 8.5 dargestellt.

Die folgenden Punkte fassen die Messungen des Blickverhaltens mit dem Eye-Tracking-System zusammen:

- Auf Kuppen mit großen Radien bewirkt die adaptive Leuchtweitenregulierung eine geringe Abnahme der vertikalen Blickwinkel bzw. der Fixationsentfernungen.
- Beim Fahren über Kuppen mit kleinen Radien kann keine Beeinflussung des Blickverhaltens durch die Anpassung der Lichtverteilung festgestellt werden.
- In Wannen wird das Blickverhalten durch die Leuchtweitenregulierung positiv beeinflusst. Die Blickwinkel und Fixationsentfernungen steigen.

5.3.3 Subjektive Bewertung der Leuchtweitenregulierung

Ein wichtiges Kriterium für die Akzeptanz einer Lichtfunktion ist ihre subjektive Bewertung aus der Sicht des Fahrers. Dabei ist neben den quasistatischen Eigenschaften wie zum Beispiel Reichweite und Helligkeitseindruck auch das dynamische Schwenkverhalten adaptiver Scheinwerfer von besonderem Interesse. Zudem soll ermittelt werden, wie verschiedene Fahrzeugführer das Fahren mit der adaptiven Leuchtweitenregulierung empfinden.

Um Aussagen von Probanden zu diesen Eigenschaften zu erhalten, wurde ein Fragenkatalog zusammengestellt, der folgende Eigenschaften der Lichtverteilung abfragt:

- Reichweite der Lichtverteilung,
- Helligkeitseindruck der Lichtverteilung,
- Bewegungsgeschwindigkeit der Scheinwerfer,
- Bewegungsgleichmäßigkeit der Scheinwerfer,
- Zeitpunkt der Scheinwerferbewegung,
- allgemeines Empfinden beim Fahren mit der Lichtverteilung,
- Sicherheitsgefühl beim Fahren mit der Lichtverteilung,
- Ablenkung des Fahrer durch Scheinwerferbewegungen,
- Sichtverhältnisse auf Kuppen und
- Sichtverhältnisse in Wannen.

Die Probanden hatten die Aufgabe, das Fahrzeug auf der Teststrecke zu steuern und einen Teil der Fragen während der Fahrt zu beantworten. Zur Bewertung der adaptiven Leuchtweitenregulierung mit den vier Winkelfaktoren (0 %, 60 %, 100 % und 130 %) musste der Fragenkatalog insgesamt viermal abgefragt werden.

Für die Fragen zur Bewertung der Scheinwerferdynamik wurde zusätzlich eine DämpfungsvARIABLE in der Software der Leuchtweitenregulierung in vier Stufen (50 %, 80 %, 100 % und 130 %) verändert, die zum einen die Scheinwerfergeschwindigkeit und zum anderen die Gleichmäßigkeit der Bewegungen beeinflusste. Ein großer Wert der Dämpfungsvariablen bewirkte langsame und gleichmäßige Scheinwerferbewegungen.

Um den Zeitpunkt der Scheinwerferbewegungen zu verändern und bewerten zu lassen, konnte der Vorlauf der abgespeicherten Krümmungsdaten im System der adaptiven Leuchtweitenregulierung in vier Stufen (25 m, 30 m, 35 m, 40 m) variiert werden. Ein großer Vorlauf bewirkte eine frühzeitige Bewegung der Scheinwerfer beim Ein- und Ausfahren aus einer Kuppe oder Wanne, ein kleiner Vorlauf führte dagegen zu verspäteten Bewegungen.

Die Probanden wurden zwar über die verschiedenen Parameter und ihre Auswirkungen auf die Scheinwerferbewegungen und die Lichtverteilung informiert. Sie wussten aber nicht, wann welche Parameter während der Fahrt aktiviert wurden.

Insgesamt beteiligten sich 27 Probanden im Alter zwischen 24 und 45 Jahren an der Befragung. Neun von ihnen benötigen Sehhilfen, drei von ihnen sind weiblichen Geschlechts. Am Anfang des Versuchs wurde den Probanden die Funktion der adaptiven Leuchtweitenregulierung erklärt, und sie wurden darauf hingewiesen, zur Bewertung der Lichtfunktion nur auf die vertikalen Bewegungen der Lichtverteilung zu achten.

Zur Beantwortung der Fragen diente die neunstufige Bewertungsskala von De Boer und Schmidt-Clausen¹⁵⁴. Sie wurde sowohl als einseitige Skala z.B. zur Bewertung der Reichweite, als auch als zweiseitige Skala zur Bewertung des Helligkeitseindrucks verwendet¹⁵⁵:

$w=1$	2	3	4	5	6	7	8	9
sehr gut		gut		befriedigend		ausreichend		mangelhaft

Tabelle 5.1: 9-stufige Skala zur Bewertung der Reichweite der Lichtverteilung

$w=1$	2	3	4	5	6	7	8	9
zu dunkel		dunkel		optimal		hell		zu hell

Tabelle 5.2: 9-stufige Skala zur Bewertung des Helligkeitseindrucks der Lichtverteilung

In den folgenden Diagrammen sind die Ergebnisse der subjektiven Bewertungen dargestellt.

Bild 5.43 zeigt das Urteil der Probanden zur Reichweite der Lichtverteilung mit den verschiedenen Winkelfaktoren der Leuchtweitenregulierung. Die Ergebnisse sind getrennt nach der vertikalen Krümmung der Straße dargestellt. Die vier Säulen auf der linken Seite im Diagramm spiegeln die Bewertungen der Reichweite auf den Kuppen wider. Während die drei Versionen der Leuchtweitenregulierung mit den niedrigen Winkelfaktoren (0 %, 60 % und 100 %) als „gut“ bis „sehr gut“ bewertet werden, erreicht die Lichtverteilung mit dem Faktor 130 % nur eine „befriedigende“ Einstufung. Offensichtlich wird das zu starke Absenken der

¹⁵⁴ DE BOER/SCHMIDT-CLAUSEN 1971 [18]

¹⁵⁵ Eine Darstellung des Fragenkatalogs mit den neunstufigen Bewertungsskalen für jede Eigenschaft befindet sich in Abschnitt 8.6 ab Seite 197 im Anhang.

Lichtverteilung auf Kuppen von den Probanden bemerkt. Die subjektiven Bewertungen der ebenen Teilstücke weisen erwartungsgemäß keine signifikanten Unterschiede auf. Im Durchschnitt wünschen die Probanden eine höhere Leuchtweite, da die vorhandene Lichtverteilung in dieser Eigenschaft nur mit „gut bis befriedigend“ eingestuft wird.

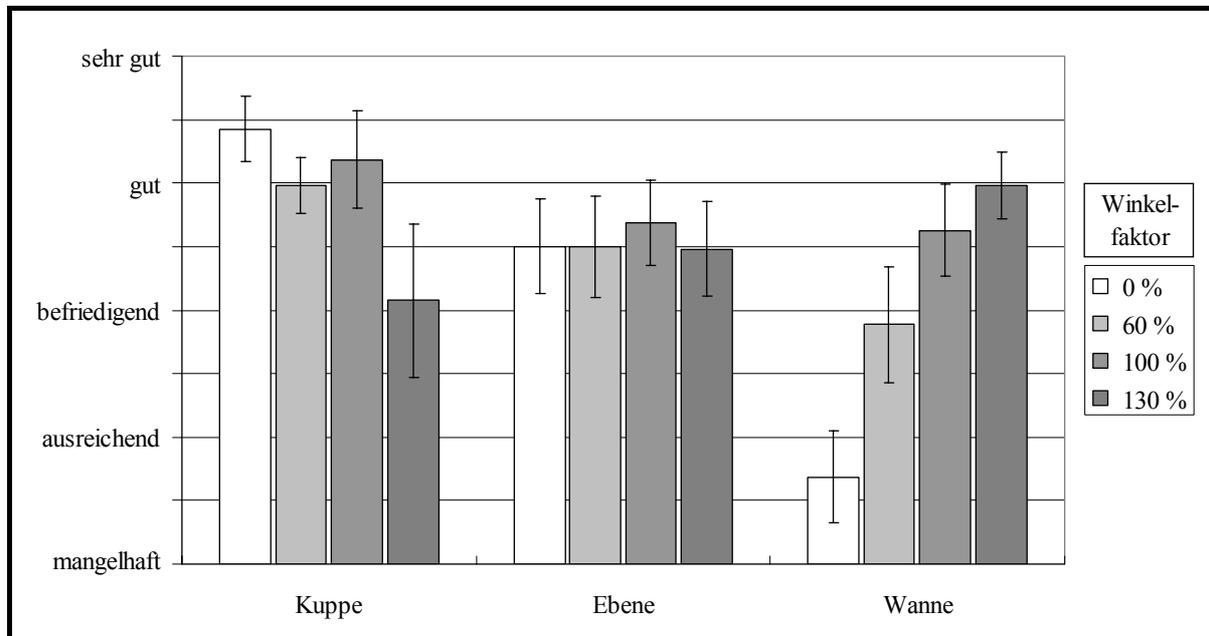


Bild 5.43: Bewertung der Reichweite der Lichtverteilung

Große Unterschiede finden sich dagegen bei der Beurteilung der Reichweite in Wannen. Die Lichtverteilung wird umso besser bewertet, je stärker sie in den Wannen angehoben wird. Insbesondere die Lichtverteilung ohne Anpassung der Leuchtweite schneidet mit einem „ausreichend bis mangelhaft“ signifikant schlechter ab als die anderen Versionen.

Die Mittelwerte der Helligkeitsbewertung in Bild 5.44 zeigen nahezu keine Unterschiede, weder zwischen den vier Winkelfaktoren, noch zwischen den vertikalen Krümmungsformen. Im Durchschnitt wird der Helligkeitseindruck der Lichtverteilung als „optimal“ eingestuft. Zwar fällt die Beurteilung der Helligkeit in einer Wanne ohne Anpassung der Lichtverteilung etwas dunkler aus als beim Rest, diese Abweichung ist jedoch nicht signifikant.

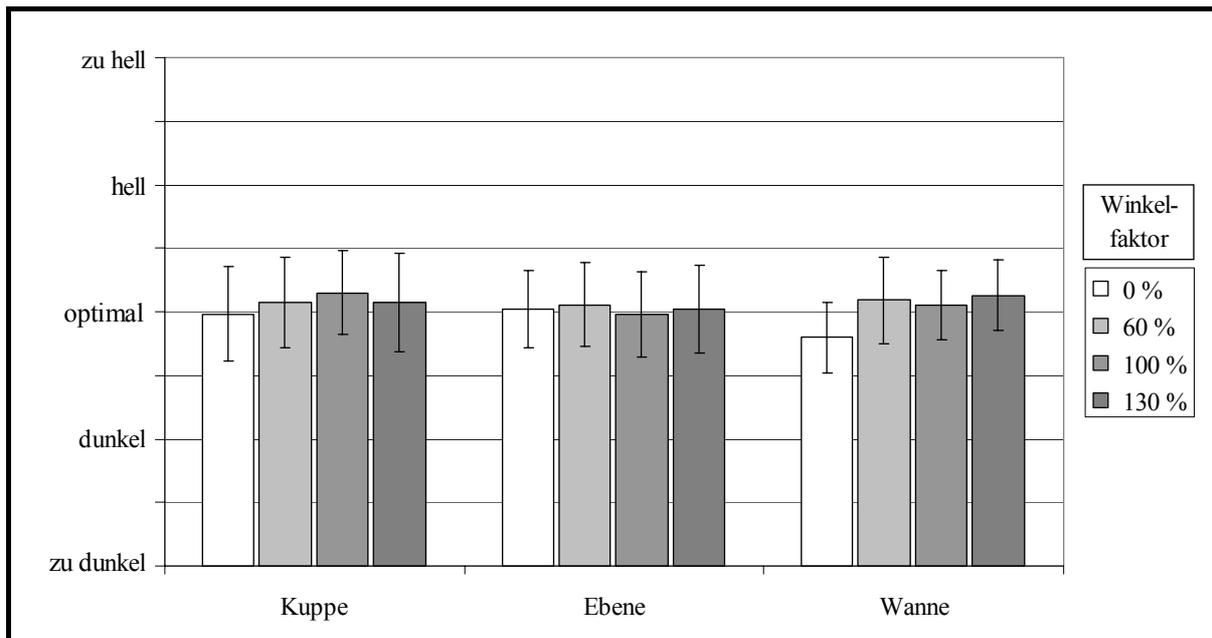


Bild 5.44: Bewertung der Helligkeit der Lichtverteilung

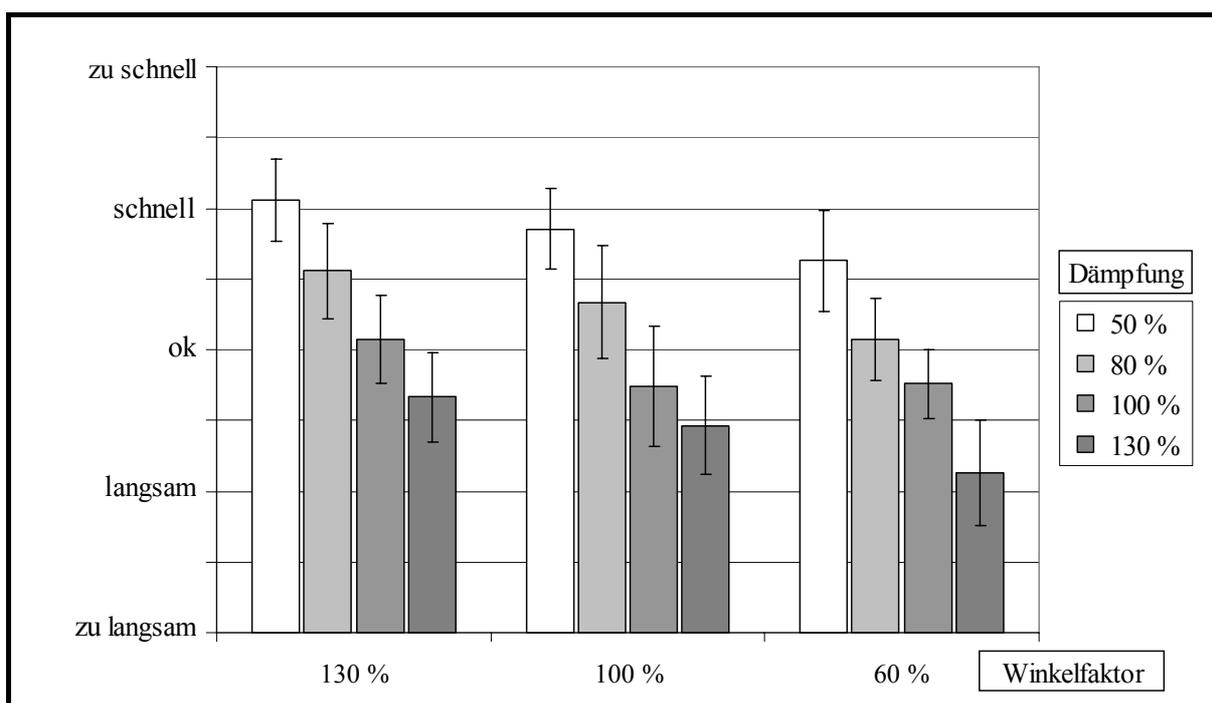


Bild 5.45: Bewertung der Bewegungsgeschwindigkeit der Scheinwerfer

Anhand der Geschwindigkeitsbeurteilung in Bild 5.45 kann den Probanden eine hohe Bewertungsqualität bescheinigt werden. Die qualitative Einstufung der Geschwindigkeiten entspricht der Wirkung der Dämpfungsvariablen. Sogar die kleinen Unterschiede der Bewegungsgeschwindigkeiten, die durch die verschiedenen Winkelfaktoren verursacht werden,

wurden erkannt und korrekt bewertet. Bei Verwendung der Leuchtweitenregulierung mit Winkelfaktor 100 % ergibt sich für die Dämpfungsvariable ein optimaler Wert von 90 %.

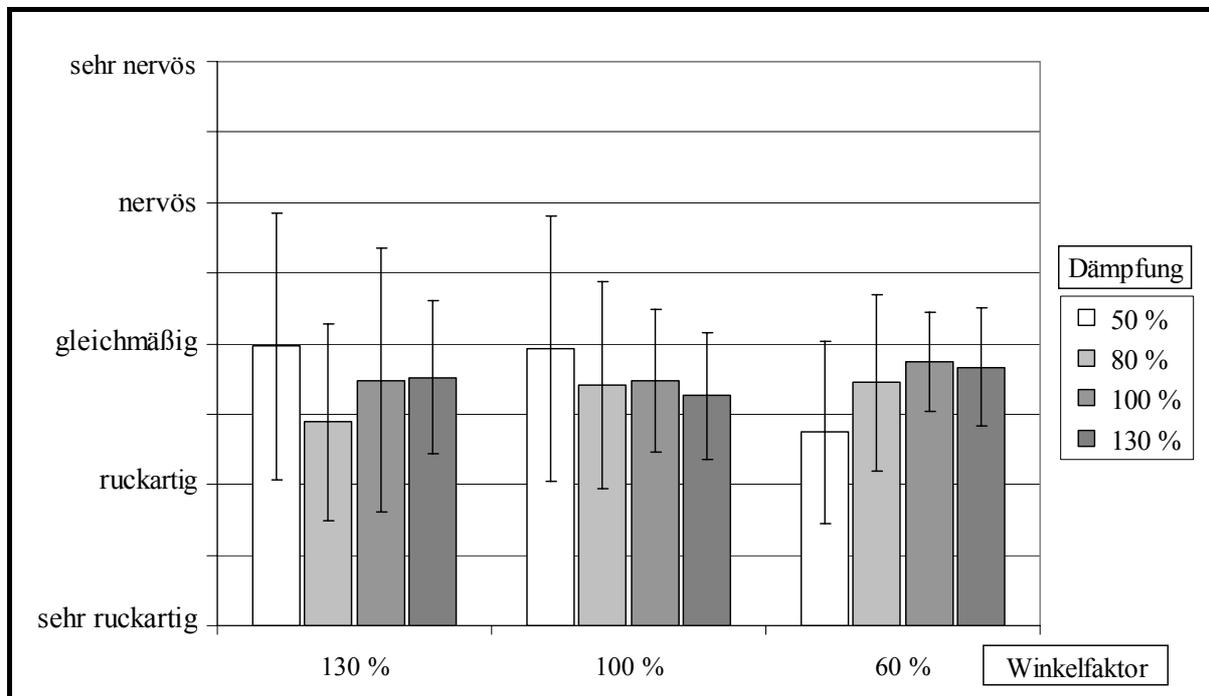


Bild 5.46: Bewertung der Gleichmäßigkeit der Scheinwerferbewegungen

Aufgrund der großen Streuung der Ergebnisse in Bild 5.46 lassen sich keine eindeutigen Aussagen zu Gleichmäßigkeit der Scheinwerferbewegungen treffen. Unabhängig von der Dämpfungsvariablen und dem Winkelfaktor im System der adaptiven Leuchtweitenregulierung zeigt sich anhand der Mittelwerte, dass die Bewegungen tendenziell als „gleichmäßig bis ruckartig“ eingestuft werden.

Die Bewertungen des Zeitpunktes, wann sich beim Ein- und Ausfahren aus einer Kuppe oder Wanne die Scheinwerfer bewegen, weisen auf dem ersten Blick eine hohe Beurteilungsqualität auf (vgl. Bild 5.47). Je kleiner der Vorlauf der gespeicherten Krümmungsdaten zur Fahrzeugposition ist, desto später erfolgt auch die Scheinwerferbewegung in der Wahrnehmung der Probanden. Ein Vergleich der Bewertungen zwischen den Winkelfaktoren zeigt jedoch, dass die Einstufungen durch die Verstellwinkel der Leuchtweitenregulierung beeinflusst werden. Mit abnehmendem Verstellfaktor scheint die Bewegung später zu erfolgen. Dieser Vorgang lässt sich leicht anhand der Scheinwerferbewegung beim Einfahren in eine Wanne erklären. Erfolgt die Bewegung zu 100 % und zum richtigen Zeitpunkt, dann verändert sich die geometrische Leuchtweite nicht. Erfolgt die Bewegung zu spät, dann reduziert sich zunächst die Leuchtweite und steigt anschließend wieder auf das ursprüngliche Niveau. Wird die Leuchtweitenregulierung mit Verstellfaktor 60 % betrieben, reduziert sich ebenso die geometrische Leuchtweite beim Einfahren in Wannen. Da sich beide Effekte in der Wahrnehmung sehr ähneln, kommt es zur falschen Einschätzung des Bewegungszeitpunktes.

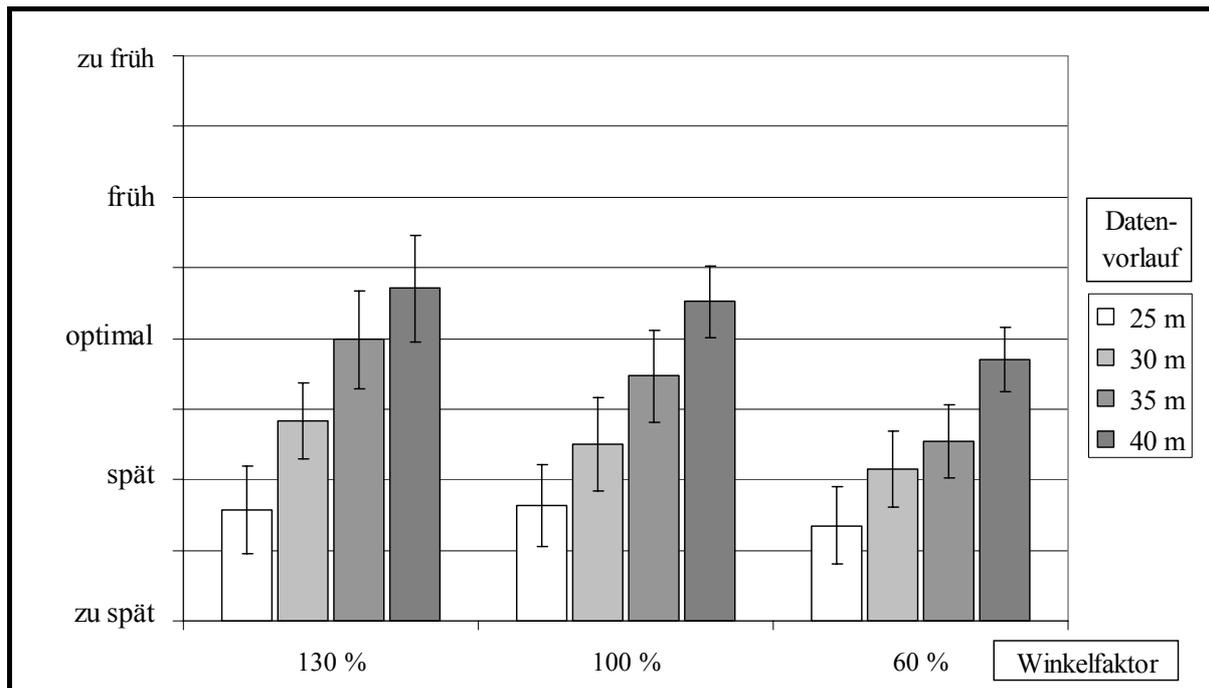


Bild 5.47: Bewertung des Bewegungszeitpunktes

Beim Betrieb der adaptiven Leuchtweitenregulierung mit Winkelfaktor 100% wird ein Vorlauf der Krümmungsdaten zur Fahrzeugposition zwischen $d = 35\text{ m}$ und $d = 40\text{ m}$ als „optimal“ eingestuft. Dieser Wert ist vor allem für die Entwicklung von Sensorsystemen relevant, die für die adaptive Leuchtweitenregulierung den Verlauf der Fahrbahn vor dem Fahrzeug erfassen sollen (siehe Abschnitt 3.2 ab Seite 51).

Im Anschluss an die Bewertung der Scheinwerferdynamik sollten die Probanden noch drei weitere Runden mit den Winkelfaktoren 0% , 60% und 100% auf der Teststrecke fahren und nach jeder Runde ihren Eindruck vermitteln, wie angenehm und sicher sie die Fahrten mit der Lichtverteilung empfanden. Außerdem wurden sie gefragt, ob ihre Aufmerksamkeit durch die Scheinwerferbewegungen abgelenkt wurde. Ein abschließendes Urteil über die Sichtverhältnisse auf Kuppen und in Wannen sollte die subjektiven Bewertungen abrunden.

Anhand der Bewertungen in Bild 5.48 lässt sich erkennen, dass das Fahren mit der adaptiven Leuchtweitenregulierung deutlich angenehmer und sicherer empfunden wird, als Fahrten mit einer herkömmlichen Lichtverteilung. Unabhängig vom verwendeten Winkelfaktor werden die Probanden von den Bewegungen der Scheinwerfer kaum abgelenkt.

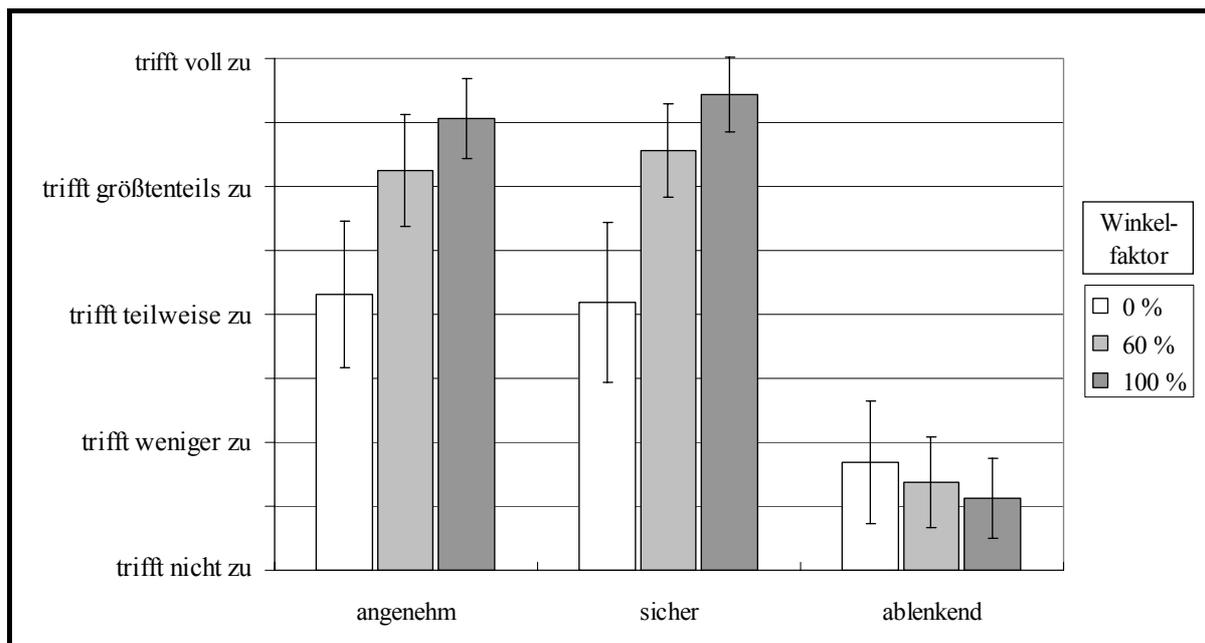


Bild 5.48: Bewertung verschiedener Eigenschaften der Lichtverteilung

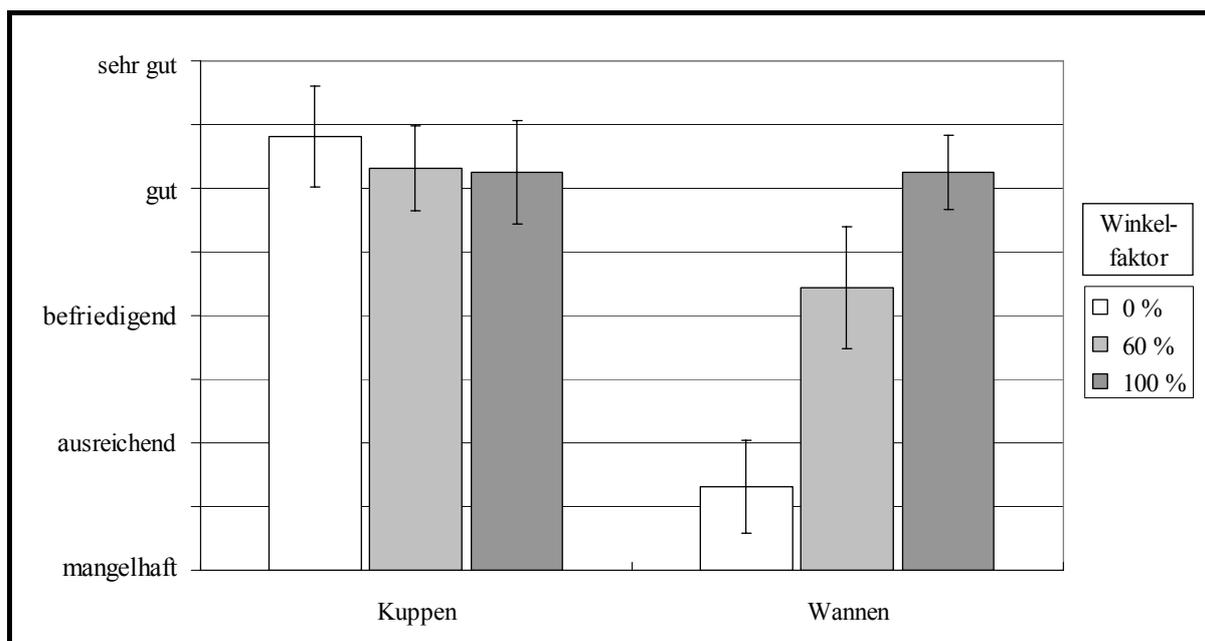


Bild 5.49: Bewertung des Sichtverhältnisse

Bild 5.49 stellt die Bewertungen der Sichtverhältnisse auf Kuppen und in Wannen dar. Auf Kuppen ergeben sich mit einem leichten Vorteil für den Winkelfaktor 0 % keine signifikanten Beurteilungsunterschiede. In Wannen sind dagegen große Differenzen in den Bewertungen zwischen den Winkelfaktoren 60 % und 100 % auf der einen Seite und Faktor 0 % auf der anderen Seite erkennbar. Während die adaptive Leuchtweitenregulierung (100 %) in Wannen

als „gut“ bewertet wird, erhält die herkömmliche Lichtverteilung eine Einstufung zwischen „ausreichend und mangelhaft“.

Die subjektiven Bewertungen der Probanden lassen sich mit folgenden Punkten zusammenfassen:

- Die Bewertungen der Reichweite zeigen, dass sich diese Eigenschaft aus der Sicht der Fahrer auf Kuppen nicht verschlechtert, wenn die Hell-Dunkel-Grenze dort moderat (Winkelfaktor bis 100 %) abgesenkt wird. In Wannen kann mit der Leuchtweitenregulierung ein wahrnehmbarer Reichweitengewinn erzielt werden.
- Der Helligkeitseindruck einer Lichtverteilung wird durch die adaptive Leuchtweitenregulierung kaum beeinflusst. Lediglich in engen Wannen kann damit eine Verbesserung erzielt werden. Insgesamt wird eine hellere Lichtverteilung gewünscht.
- Die Basisvariante der adaptiven Leuchtweitenregulierung (Winkelfaktor 100 %, Dämpfungsvariable 100 %) bewegt die Scheinwerfer aus der Sicht der Probanden geringfügig zu langsam. Wird die Leuchtweitenregulierung mit einem kleineren Winkelfaktor betrieben, soll die Bewegungsgeschwindigkeit der Scheinwerfer erhöht werden.
- Werden die Daten eines vorausschauenden Sensorsystems zur Steuerung der Leuchtweitenregulierung verwendet, dann sollte dieser Sensor die Krümmung der Straße in Entfernungen bis knapp 40 m erfassen.
- Die Akzeptanz der adaptiven Leuchtweitenregulierung ist sehr hoch, das Fahren mit ihr wird im Vergleich zur herkömmlichen Lichtverteilung als deutlich angenehmer und sicherer empfunden.
- Die vertikalen Bewegungen der Scheinwerfer führen zu keiner erhöhten Ablenkung der Probanden.
- Die wahrgenommenen Sichtverhältnisse auf Kuppen werden durch die adaptive Leuchtweitenregulierung nicht beeinträchtigt. Dagegen lässt sich in Wannen dieser Lichtfunktion eine deutliche Verbesserung der Sichtverhältnisse erreichen.

5.4 Schlussfolgerungen

Die Abblendlichtverteilung stellt einen Kompromiss dar, der nur auf ebenen Straßen gleichzeitig akzeptable Wahrnehmungsbedingungen für den Fahrer und den Gegenverkehr bietet. Beim Fahren über Kuppen erhöhen sich einerseits die Beleuchtungsstärken am entgegenkommenden Fahrerrauge und können zu dessen Blendung führen. Andererseits verschlechtern sich beim Durchfahren von Wannen die Wahrnehmungsbedingungen des Fahrers durch eine zu kurze Leuchtweite. Die Aufgabe der adaptiven Leuchtweitenregulierung ist es, auch auf Kuppen und in Wannen für beide Seiten die gleichen Wahrnehmungsbedingungen zu bieten wie auf ebenen Straßen.

Aus diesem Grund dienen die Wahrnehmungsbedingungen, welche die Abblendlichtverteilung auf ebenen Straßen erzeugt, als Referenz für die Auslegung der Steueralgorithmen im System der adaptiven Leuchtweitenregulierung.

Die Berechnungen der Beleuchtungsstärken am entgegenkommenden Fahrerauge sowie die Blendungsuntersuchungen an der Modellstraße zeigen, dass im Vergleich zur herkömmlichen Lichtverteilung die Blendung des Gegenverkehrs auf **Kuppen** durch eine Absenkung der optischen Scheinwerferachse um bis zum Faktor 68 reduziert werden kann¹⁵⁶. Trotz dieser Anpassung der Lichtverteilung können die maximalen Augenbeleuchtungsstärken auf Kuppen mit kleinen Radien größer sein als auf einer ebenen Straße. Der statische Sehtest liefert als Ergebnis für solche Blendungssituationen eine reduzierte Sehleistung des entgegenkommenden Fahrerauges. Wie der dynamische Blendversuch belegt, sind die Blendimpulse auf der Kuppe mit der adaptiven Leuchtweitenregulierung (Winkelfaktor 100 %) jedoch so kurz, dass die durchschnittlichen Readaptationszeiten um maximal 0,3 s kleiner sind als bei der Begegnung zweier Fahrzeuge auf einer Ebene. Daraus ergibt sich die Möglichkeit, die Verstellwinkel des ursprünglichen Algorithmus der adaptiven Leuchtweitenregulierung auf 60 % zu reduzieren. Bei diesem Winkelfaktor entsprechen die Readaptationszeiten den Referenzwerten auf einer ebenen Straße.

Der Vorteil des reduzierten Verstellwinkels der adaptiven Leuchtweitenregulierung zeigt sich für den Fahrer vor allem bei der Erkennbarkeit vertikaler Objekte auf Kuppen (siehe Untersuchung an der Modellstraße in Abschnitt 5.2.1), die bei einem Winkelfaktor 60 % dem Niveau auf einer ebenen Straße entspricht. Die Messungen der Erkennbarkeitsentfernungen zeigen zwar eine leichte Verschlechterung im Vergleich zur herkömmlichen Lichtverteilung, doch sind die Entfernungen immer noch größer als auf einer ebenen Straße. Zudem wird diese Verschlechterung aus Fahrersicht kaum wahrgenommen, wie die gute Bewertung der Reichweite und Sichtverhältnisse anhand des Fragenkatalogs belegt. Ein Einfluss der adaptiven Leuchtweitenregulierung auf das Blickverhalten auf Kuppen konnte nur bei großen Radien festgestellt werden. Die Unterschiede in den Fixationsentfernungen sind jedoch nicht signifikant.

Wie die geometrischen Berechnungen zeigen, verringert sich normalerweise die Leuchtweite der Abblendlichtverteilung in **Wannen**. Dadurch verschlechtern sich die Erkennbarkeitsentfernungen von Objekten im Verkehrsraum. Durch das Anheben der optischen Scheinwerferachse in Wannen können diese Nachteile vermieden werden. Die Fahrversuche zur Ermittlung der Erkennbarkeitsentfernungen und zur Messung des Blickverhaltens der Fahrer belegen die Vorteile, die mit der adaptiven Leuchtweitenregulierung im Vergleich zur herkömmlichen Lichtverteilung erzielt werden. Die um maximal 20 m gestiegene geometrische Leuchtweite

¹⁵⁶ Die Fläche des Blendimpulses als Produkt aus Augenbeleuchtungsstärken oberhalb der Blendungsschwelle $E_A = 1,12 \text{ lx}$ sowie der Dauer der Blendung während einer Begegnungssituation auf einer Kuppe mit Radius $R_v = 2000 \text{ m}$ wird durch die adaptive Leuchtweitenregulierung um den Faktor 68 verkleinert (vgl. Abschnitt 5.1).

führt in Wannen zu größeren Erkennbarkeitsentfernungen von Objekten und zu einer Lenkung des Blickverhaltens hin zu maximal 15 m höheren mittleren Fixationsentfernungen. Diese Vorteile werden aus der Sicht der Fahrer wahrgenommen und führen zu einer guten Einstufung der adaptiven Leuchtweitenregulierung in den Eigenschaften Reichweite und Sichtverhältnisse beim Durchfahren von Wannen.

Diese Verbesserungen gegenüber einer herkömmlichen Lichtverteilung werden ohne Beeinträchtigung der Wahrnehmungsbedingungen des Gegenverkehrs erreicht, wie die Simulationen der Beleuchtungsstärken am Auge des Gegenverkehrs selbst in engen Wannen zeigen. Bestätigt werden diese Berechnungen durch die beiden Blendversuche an der Modellstraße, mit denen nachgewiesen wurde, dass weder eine Reduktion der Sehleistung noch längere Readaptationszeiten am entgegenkommenden Fahrerauge auftreten. Zwar ist auch die Version der adaptiven Leuchtweitenregulierung mit Winkelfaktor 130% hinsichtlich der Blendung des Gegenverkehrs unkritisch, sie kann jedoch zu extremen Blendimpulsen führen, wenn sich das entgegenkommende Fahrerauge in einer unterdurchschnittlichen Höhe befindet oder das Fahrzeug beim Durchfahren von Wannen durch Bodenwellen zu Nickbewegungen angeregt wird, die von der adaptiven Leuchtweitenregulierung nicht ausgeglichen werden. Die Version mit Winkelfaktor 100% bieten hierfür einen Puffer.

Im Vergleich zur herkömmlichen, starren Lichtverteilung wird das Fahren mit der adaptiven Leuchtweitenregulierung als deutlich sicherer eingestuft und als angenehmer empfunden. Die vertikalen Schwenkbewegungen wurden so ruhig ausgelegt, dass keine zusätzliche Ablenkung oder Irritationen auftreten. Daher kann mit einer hohen Akzeptanz der dynamisch an Kuppen und Wannen angepassten Lichtverteilung gerechnet werden. Es ist daher sinnvoll die optische Scheinwerferachse nach dem in Kapitel 4 entwickelten Algorithmus an Kuppen und Wannen anzupassen, wobei der Verstellwinkel für Kuppen auf 60% reduziert wird.

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung

Die maßgebliche Lichtverteilung beim nächtlichen Fahren außerhalb geschlossener Ortschaften ist das Abblendlicht der Fahrzeuge. Seit der Einführung der Xenon-Scheinwerfer steht dem Fahrer ein wesentlich höherer Lichtstrom zur Verfügung, der die nächtlichen Wahrnehmungsbedingungen des Fahrers deutlich verbessert. Bewegliche Scheinwerfer ermöglichen den Ausgleich der Fahrzeugnickbewegungen und eine Adaption der Lichtverteilung an horizontale Kurven. Bisher fehlt jedoch eine vertikale Anpassung an Kuppen und Wannen.

Aus diesem Grund wurden der Einfluss vertikaler Fahrbahnkrümmungen auf die Abblendlichtverteilung untersucht und die Folgen betrachtet, die daraus für den Fahrer und den Gegenverkehr entstehen.

In einem Versuchsfahrzeug wurde ein System einer adaptiven Leuchtweitenregulierung installiert, das die Lichtverteilung an Kuppen und Wanne anpasst. Das System besteht im Wesentlichen aus drei Komponenten, den Aktoren, den Sensoren und einem Steuergerät.

Als Aktoren werden Scheinwerfer benötigt, deren optische Achsen elektrisch in vertikaler Richtung einstellbar sind. Da bereits die heute vorhandene dynamische Leuchtweitenregulierung den Verstellwinkel von $\beta_{min/max} = \pm 2,5^\circ$ abdeckt, kann dieses System auch alle Anforderungen erfüllen, die aus der adaptiven Leuchtweitenregulierung in Kuppen und Wannen resultieren. Die Schrittmotoren für die vertikale Verstellung der optischen Scheinwerferachse entsprechen den Motoren der horizontalen Kurvenlichtfunktion. Daher sind keine Probleme bezüglich ihrer Lebensdauer zu erwarten.

Zur Erfassung der Krümmungsdaten von Fahrbahnen wurde die Eignung verschiedener Sensorsysteme untersucht und bewertet. Die technisch einfachste Lösung bieten Sensoren, welche die Eigenbewegungen des Fahrzeugs im Raum registrieren. Es wurde gezeigt, dass sich mit einer aufwändigen Filterung und Aufbereitung der Daten aus der Fahrzeugdynamik die Krümmung der Straße bestimmen läßt. Ein Nachteil dieses Sensorsystems ist, dass damit eine Anpassung der Lichtverteilung an vertikale Kurven in Echtzeit nicht möglich ist. Dieser Nachteil kann durch Sensoren vermieden werden, welche die Umgebung, insbesondere die Straßenkrümmung im Fahrzeugvorfeld erfassen. Aufgrund der Entwicklung und Markteinführung komplexer Fahrerassistenzsysteme werden zukünftig solche Sensoren im Fahrzeug zur Verfügung stehen. Als weitere Möglichkeit lassen sich Systeme einsetzen, welche die Position und Fahrtrichtung des Fahrzeugs bestimmen und dessen jeweiliger Position einen bereits gespeicherten Krümmungswert der Fahrbahn zuordnen können.

Zentrale Aufgabe bei der Entwicklung der adaptiven Leuchtweitenregulierung war die Erzeugung der Algorithmen zur Berechnung des Winkels, um den die optische Scheinwerferachse zur Anpassung der Lichtverteilung verstellt werden muss. Dazu wurde das Konzept der

Zielentfernungen verwendet, die einen konstanten Abstand der Hell-Dunkel-Grenze zur Fahrbahnoberfläche in einer bestimmten Entfernung zum Fahrzeug bewirken. Mit geometrischen Berechnungen der Leuchtweiten und dem Höhenverlauf der Hell-Dunkel-Grenze bezogen auf die Fahrbahnoberfläche sowie mit der Bestimmung möglicher Blendungsbereiche konnten Zielentfernungen gefunden werden, die eine Verbesserung der Wahrnehmungsbedingungen von Fahrer und Gegenverkehr in vertikalen Kurven versprechen.

Die Simulation lichttechnischer Größen sowie Untersuchungen an einer Modellstraße und im Fahrversuch zeigen die Wirkung der entwickelten Algorithmen zur Anpassung der Lichtverteilung an Kuppen und Wannen. Es gelingt damit, die geometrische Leuchtweite in Wannen zu erhöhen und dadurch die Wahrnehmungsbedingungen des Fahrers zu verbessern, ohne dabei den Gegenverkehr stärker zu blenden als bei einer Begegnung auf einer ebenen Straße. Auf Kuppen wird durch das Absenken der optischen Scheinwerferachse die Blendung des Gegenverkehrs reduziert. Zwar zeigte der entwickelte Algorithmus geringe Nachteile bezüglich der Erkennbarkeit vertikaler Objekte aus der Sicht des Fahrers, doch durch eine Reduktion der vertikalen Schwenkwinkel auf 60 % ist es möglich, ohne Beeinträchtigung der Wahrnehmungsbedingungen des Fahrers die Blendung des Gegenverkehrs auf Kuppen zu verringern.

Die subjektiven Bewertungen dieser Lichtfunktion lassen eine hohe Akzeptanz der adaptiven Leuchtweitenregulierung bei den Fahrzeugführern erwarten.

6.2 Ausblick

Die Einführung der adaptiven Leuchtweitenregulierung erfordert die Berücksichtigung sämtlicher technologischer, gesetzlicher und wahrnehmungsphysiologischer Fragen.

Die Komponenten, die zur Realisierung der neuen Scheinwerferfunktion benötigt werden, sind bereits in den heute zur Verfügung stehenden Fahrzeugen vorhanden oder werden in naher Zukunft verfügbar sein. Aus technischer Sicht spricht daher nichts gegen die Einführung der adaptiven Leuchtweitenregulierung.

Offen ist dagegen noch die Frage, ob das Gesetz zur Einführung dieser Lichtfunktion geändert werden muss. Die Funktionalität der vertikalen Anpassung der Lichtverteilung ist mit den heutigen Komponentenvorschriften nicht prüfbar, da im Prüfablauf lediglich vermessen wird, ob die Scheinwerferneigung auch bei einem durch Beladung veränderten statischen Nickwinkel innerhalb der gesetzlich definierten Grenzen liegt. Nach Aussage des Kraftfahrtbundesamtes werden bei der Prüfung von Scheinwerfern dynamische Effekte des Fahrbetriebs und damit ihr zeitliches Verhalten nicht berücksichtigt¹⁵⁷.

¹⁵⁷ KBA 1997 [67] zitiert in LEHNERT 2001 [83], S. 12

In der vorliegenden Arbeit wurden die wahrnehmungsphysiologischen Eigenschaften einer vertikal angepassten Lichtverteilung auf trockenen Straßen untersucht. Anschlussuntersuchungen bei ungünstigen Witterungsbedingungen können dazu beitragen, den Einfluss der adaptiven Leuchtweitenregulierung auf die Wahrnehmungsbedingungen der Verkehrsteilnehmer bei schlechtem Wetter zu klären. So ist z.B. noch offen, ob das Absenken der Scheinwerferachse auf Kuppen bei Regen zur erhöhten Blendung des Gegenverkehrs über Spiegelungen auf der nassen Fahrbahnoberfläche führt oder ob das Anheben der Lichtverteilung in Wannenscheinwerfern eine Eigenblendung bei Nebel verursacht.

Mit der nachgewiesenen Verbesserung der Wahrnehmungsbedingungen auf trockenen Straßen stellt die adaptive Leuchtweitenregulierung neben den heutigen Kurvenlichtsystemen einen weiteren Schritt zur Entwicklung optimaler Lichtsysteme dar, die zu mehr Komfort und Sicherheit beim nächtlichen Fahren führen. Unter Verwendung der Abblendlichtverteilung stellen diese Systeme nur einen Kompromiss dar und können noch nicht alle Anforderungen erfüllen. Langfristig könnte jedoch die Entwicklung aktiver lichttechnischer Systeme, z.B. auf der Basis von Pixellicht, zu einer Lösung dieser Anforderungen führen¹⁵⁸. Kurzfristig erscheinen unter automobilen Randbedingungen jedoch Lösungen auf der Basis vollbeweglicher Abblendlichtscheinwerfer Erfolg versprechender.

¹⁵⁸ ENDERS 2001 [39], S. 234 ff. und ROSLAK 2005 [102]

7 Literaturverzeichnis

- [1] ABEL, B.; LABAHN, N.: *Prädiktive Steuerung von dynamischen Kurvenlichtsystemen*. In: *Elektronik im Kraftfahrzeug*, VDI Berichte Nr. 1547, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 2000, S. 1085-1097
- [2] ADRIAN, W.: *The Visibility Concept and its Metric*. In: *Progress in Automobile Lighting*, Symposium der TH Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik, Technische Hochschule Darmstadt, 1995, S. 14-20
- [3] ADRIAN, W.: *The Influence of Age on Vision under Driving Conditions*. In: *Progress in Automobile Lighting*, Symposium der TU Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik, Technische Universität Darmstadt, Herbert Utz Verlag GmbH, München, 1999, S. 1-8
- [4] ANTPÖHLER, T.: *Ermittlung und Vergleich der Readaptationszeiten beim Gegenverkehr auf einer vertikal gekrümmten Straße für Fahrzeuge mit und ohne adaptiver Leuchtweitenregulierung*. Diplomarbeit, Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg 2005
- [5] ARMBRUSTER, D.: *Optimierung der visuellen Informationsübermittlung durch adaptive Kraftfahrzeugsignalleuchten*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2001
- [6] AULBACH, J.: *Lichttechnische Anforderungen an die visuelle Information von Signalbildern für die Verkehrsführung*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 1998
- [7] BAER, R.: *Beleuchtungstechnik Grundlagen*. Verlag Technik GmbH, Berlin, 2. Auflage, 1996
- [8] BÄUMLER, H.: *Bei Nacht und Nebel – Unfälle bei Dunkelheit und durch mangelhafte Beleuchtung*. In: *GDV – Werkstattgespräch 98*. Freiburg im Preisgau, 1998
- [9] BENZ, C.: *Untersuchungen über die psychologische Blendung bei Umfeldleuchtdichten im mesopischen Bereich*. Dissertation, Universität Karlsruhe, 1966
- [10] BERTRAM, T.; HILLER, M.; OPGEN-RHEIN, P.; TROWITZSCH, C.; THIEMANN, M.; MELZIG, M.: *Entwicklung einer dynamischen Leuchtweitenregulierung mit einem komplexen, dreidimensionalen Fahrzeugmodell*. In: *Elektronik im Kraftfahrzeug*, VDI Berichte Nr. 1547, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 2000, S. 1099-1124
- [11] BILZ, F.: *Adaptives Kurvenlicht in allen BMW Fahrzeugbaureihen*. In: *Elektronik im Kraftfahrzeug*, VDI Berichte Nr. 1789, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 2003, S. 959-972

- [12] BLACKWELL, H.R.: *Contrast Thresholds of the Human Eye*. In: *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 36, 1946, S. 624-643
- [13] BLEYMÜLLER, J.; GEHLERT, G.; GÜLICHER, H.: *Statistik für Wirtschaftswissenschaftler*. Verlag Franz Vahlen, München, 10. Auflage, 1996
- [14] BOCKELMANN, W.D.: *Visual Perception and Aging under Ophthalmological Aspects*. In: *Progress in Automobile Lighting*, Symposium der TH Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik, Technische Hochschule Darmstadt, 1997, S. 82-89
- [15] BOEHLAU, CHR.: *Einsatz optischer Sensoren zur Umfelderkennung*. In: *Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik*, VDI Berichte Nr. 1731, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 2003, S. 15-24
- [16] BÖRNCHEN, T.: *Zur Entwicklung dynamischer Komponenten für variables Kraftfahrzeug-Scheinwerferlicht*. Dissertation, Universität Paderborn, 2001
- [17] BRONSTEIN, I.N.; SEMENDJAJEW, K.A.: *Taschenbuch der Mathematik*. B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig, 25. Auflage, 1991
- [18] DE BOER, J.B.; SCHMIDT-CLAUSEN, H.-J.: *Über die zulässige Blendung in der Kraftfahrzeugbeleuchtung*. In: *Proceedings CIE*, XVII Session, Barcelona, 1971
- [19] BOYNTON, R.M.; ENOCH, J.M.; BUSH, W.R.: *Physical Measures of Stray Light in excised Eyes*. In: *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 22, No. 11, 1954, S. 879-886
- [20] CARRARO, U.: *Bestimmung der Leuchtdichtekoeffizienten q für flache Beobachtungs- und Beleuchtungswinkel*. Messbericht im Auftrag des L-LAB Paderborn, Dresden, 2004
- [21] COHEN, A.S.: *Blickverhalten und Informationsaufnahme von Kraftfahrern*. Bericht zum Forschungsprojekt 8306/3, Institut für Verhaltenswissenschaft, ETH Zürich Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 1987
- [22] DAHLEM, T.: *Methoden zur Bewertung von Kraftfahrzeugscheinwerfern*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2001
- [23] DAMASKY, J.: *Lichttechnische Entwicklung von Anforderungen an Kraftfahrzeug-Scheinwerfer*. Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, 1995
- [24] DAMASKY, J.; HOSEMANN, A.: *The Influence of the Light Distribution of Headlamps on Drivers Fixation Behaviour at Nighttime*. In: *Progress in Automobile Lighting*, Symposium der TH Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik, Technische Hochschule Darmstadt, 1997, S. 129-136

- [25] DICKMANN, D.: *Rahmensystem für visuelle Wahrnehmung veränderlicher Szenen durch Computer*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Shaker Verlag, Aachen, 1998
- [26] DIEM, C.: *Einfluss der Variation der Ansteuerparameter von Scheinwerfern mit Kurvenlichtfunktion auf das Blickverhalten von Kraftfahrern und die subjektive Bewertung*. Forschungsprojekt FO 79 / 02 im Auftrag der BMW AG, unveröffentlicht, Fachgebiet Lichttechnik, Technische Universität Darmstadt, 2002
- [27] DIEM, C.; SCHMIDT-CLAUSEN, H.-J.; LÖWENAU, J.; BERNASCH, J.: *Analysis of Eye-Movement Behaviour Using Movable Headlamps*. In: *Progress in Automobile Lighting*, Symposium der TU Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik, Technische Universität Darmstadt, Herbert Utz Verlag GmbH, München, 1999, S. 185-207
- [28] DIN – DEUTSCHE INDUSTRIENORM 58.220-5: *Sehschärfbestimmung, Teil 5: Allgemeiner Sehtest*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1997
- [29] DIN – DEUTSCHE INDUSTRIENORM 70.000: *Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten*. Deutsche Übersetzung mit Modifizierungen, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1994
- [30] ECE – ECONOMIC COMMISSION OF EUROPE R1: *Scheinwerfer für asymmetrisches Abblend- und / oder Fernlicht mit Glühlampen*. Kirschbaum Verlag, Bonn, 2001
- [31] ECE – ECONOMIC COMMISSION OF EUROPE R8: *H-Scheinwerfer für asymmetrisches Abblend- oder Fernlicht oder beides*. Kirschbaum Verlag, Bonn, 2003
- [32] ECE – ECONOMIC COMMISSION OF EUROPE R20: *H4 - Scheinwerfer für asymmetrisches Abblend- oder Fernlicht oder beides*. Kirschbaum Verlag, Bonn, 2001
- [33] ECE – ECONOMIC COMMISSION OF EUROPE R48: *Anbau der Beleuchtungs- und Lichtsignaleinrichtungen*. Kirschbaum Verlag, Bonn, 2002
- [34] ECE – ECONOMIC COMMISSION OF EUROPE R98: *Scheinwerfer mit Gasentladungslichtquellen*. Kirschbaum Verlag, Bonn, 2003
- [35] ECE – ECONOMIC COMMISSION OF EUROPE R112: *Asymmetrisches Abblend- / Fernlicht für Scheinwerfer mit Glühlampen*. Kirschbaum, Bonn, 2002
- [36] ECKERT, M.: *Lichttechnik und optische Wahrnehmungssicherheit im Straßenverkehr*. Verlag Technik GmbH, Berlin, 1. Auflage, 1993
- [37] EHMANN, D.; NEUNZIG, D.; WALLENTOWITZ, H.; WEILKES, M.; BÖLLING, F.; STEINAUER, B.; RICHTER, A.; GAUPP, W.: *Sicherheitsanalyse der Systeme zum automatischen Fahren*. In: *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen*, Heft F35, Bergisch Gladbach, 2001

- [38] EICHHORN, K.; LACHMAYER, R.: *Synergien von Licht und Mechatronik im Scheinwerferbereich*. In: *Elektronik im Kraftfahrzeug*, VDI Berichte Nr. 1789, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 1998, S. 55-64
- [39] ENDERS, M.: *Pixel Light*. In: *Progress in Automobile Lighting*, Symposium der TU Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik, Technische Universität Darmstadt, Herbert Utz Verlag GmbH, München, 2001, S. 234-239
- [40] EWERHART, F.: *Entwicklung und vergleichende Bewertung einer videobasierten Kurvenlichtsteuerung für adaptive Kraftfahrzeugscheinwerfer*. Dissertation, Technische Universität Ilmenau, 2002
- [41] EYSEL, U.: *Sehsystem*. In: *Klinke, R.; Silbernagl, S. (Hrsg.): Lehrbuch der Physiologie*, Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 1996, S. 585-610
- [42] FLECK, H.-J.: *Zur peripheren Wahrnehmung von Sehzeichen*. Dissertation, Universität Karlsruhe, 1986
- [43] FRY, G.A.: *Response of the Eye to a Flash of Light*. In: *American Journal of Optometry and Archives of American Academy of Optometry*, Vol. 50, No. 5, 1973, S. 355-376
- [44] GÄRTNER, A.; SAEGER, M.: *Simulationsumgebung zur Untersuchung aktiver Wankstabilisierung in Verbindung mit einer Fahrdynamikregelung*. In: *Proceedings zur Tagung Simulation in der Fahrzeugdynamik*, Essen, 2003
- [45] GALLERY, N.: *Kapitel Erfassung von Blickbewegungen*. In: *Kunert, H. (Hrsg.): Symposium Orientierung im Straßenverkehr bei Nachtfahrten, Schriftenreihe der Forschungsgemeinschaft Auto – Sicht – Sicherheit*, Verlag TÜV Rheinland, Köln, 1988, S. 115-132
- [46] GERDES, H.-R.: *Das Wahrnehmen von Lichtreizen an der achromatischen und chromatischen Schwelle*. Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, 1979
- [47] GREGOR, R.; BATEN, S.; VON HOLT, V.; LÜTZELER, M.; MAURER, M.; RIEDER, A.; DICKMANN, E.D.: *A Low-Cost Vision System for Automotive Applications*. In: *Proceedings zur 30th ISATA*, Florenz, 1997, S. 195-201
- [48] GREULE, R.: *Kontrastschwellen bei transientscher Adaptation*. Dissertation, Universität Karlsruhe, 1993
- [49] GÖDECKE, A.; HANEY, D.: *Fahrerassistenzsystem zur Aufmerksamkeitskontrolle*. In: *Proceedings zur 10. Iff-Tagung*, Braunschweig, 2003, S. 223-234
- [50] GÜNZEL, D.: *Untersuchung der Wahrnehmungsbedingungen für den Fahrer beim Absenken der Lichtverteilung des Abblendlichtes auf Kuppen*. Diplomarbeit, Westsächsische Hochschule Zwickau (FH), 2004

- [51] HAMM, M.: *Adaptives Licht: Innovative Vernetzung von Systemen in der Lichttechnik*. In: *Elektronik im Kraftfahrzeug*, VDI Berichte Nr. 1547, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 2000, S. 1125-1134
- [52] HAMM, M.; FRIEDRICH, A.: *Intelligente, adaptive Scheinwerfersysteme: Die Fahrzeug-Außenbeleuchtung der Zukunft*. In: *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift Jg. 102*, Vol. 12, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Wiesbaden, 2000, S. 1042-1047
- [53] HARTMANN, E.: *Untersuchungen zur physiologischen Blendung*. Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität München, 1961
- [54] HARTMANN, E.: *Die Sofortadaptation und ihre Bedeutung für den Sehvorgang*. Habilitationsschrift, Ludwig-Maximilians-Universität München, 1968
- [55] HARTMANN, E.: *Reaktionszeit von Kraftfahrern*. Sonderdruck der Technischen Universität Berlin, 1979
- [56] HECHT, S.: *The Nature of Foveal Dark Adaptation*. In: *Marine Biological Laboratory*, Woods Hole, 1921, S. 113-139
- [57] HELLA KG HUECK & CO. (HRSG.): *Hella Lighting Technology - Research and Development Review 2000*. Lippstadt, 2000
- [58] HENDRISCHK, W.; WENDT, F.-K.: *Xenon-Licht in der Fahrzeugbeleuchtung – Drei Generationen von Scheinwerfern mit Xenonlicht und Ausblick in die Zukunft*. In: *Elektronik im Kraftfahrzeug*, VDI Berichte Nr. 1287, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 1996, S. 769-786
- [59] HOFMANN, U.; RIEDER, A.; DICKMANN, E.D.: *Radar and Vision Data Fusion for Hybrid Adaptive Cruise Control on Highways*. In: *Computer Vision Systems, Lecture Notes in Computer Science 2095*, Springer Verlag, Berlin, 2001, S. 125-138
- [60] HOLLADAY, L.L.: *The Fundamentals of Glare and Visibility*. In: *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 12, 1926, S. 271-319
- [61] HUHNS, W.: *Anforderungen an eine adaptive Lichtverteilung für Kraftfahrzeugscheinwerfer im Rahmen der ECE-Regelungen*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 1998
- [62] IBRAHIM, F.; SCHMIDT, CHR.; KLEIN, M.: *Predictive Advanced Front Lighting System*. In: *International Symposium on Automotive Lighting*, Symposium der TU Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik, Technische Universität Darmstadt, 2005, S. 290-296
- [63] KAYSER, H.J.; HEB, M.: *Die Abhängigkeit des Blickverhaltens des Kraftfahrers von der gefahrenen Geschwindigkeit und der Straßenraumgestaltung*, In: *Derkum, H.*

- (Hrsg.): *Sicht und Sicherheit im Straßenverkehr*, Verlag TÜV Rheinland, 1990, S. 103-108
- [64] KLASCHE, G.: *Fahrspurerkennung durch Bildsensorik*. In: *Elektronik Automotive*, Vol. 4, WEKA Fachzeitschriften-Verlag GmbH, Poing, 2003
- [65] KNOLL, P.M.; ESCHLER, J.; GRIMM, D.; LOPEZ, E.: *Verbesserung der Nachtsicht mit nahem Infrarot – Simulation und Realisierung*. In: *Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik*, VDI Berichte Nr. 1731, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 2003, S. 161-171
- [66] KOJIMA, S.A.: *A Recommendation for the U.S. Lower – Beam Pattern for Visual/Optically Amiable Headlamp*, In: *SAE Technical Paper Series*, No. 2002-01-0260, 2002, S. 57-61
- [67] KRAFTFAHRT-BUNDESAMT: *Bündelneigung von Abblend-, Fern- und Nebellicht*. In: *Informationssystem des Kraftfahrtbundesamtes*, Typgenehmigungsverfahren, Nr. 18-97, 1997
- [68] KREBSCHULL, W.: *Die Reflexion trockener und feuchter Straßenbeläge*. Dissertation, Technische Universität Berlin, 1968
- [69] KUHN, A.; RABE, M.: *Simulation in der Produktion und Logistik - Fallbeispielsammlung*, Berlin u.a., 1. Auflage, 1998
- [70] KUHL, P.: *Programmierung einer Steuerung für Scheinwerfer und physiologische Untersuchungen von existierenden Scheinwerfern*. Studienarbeit, Technische Universität Darmstadt, 1998
- [71] LABAHN, N.: *Vision-System zur Scheinwerfersteuerung*. In: *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift (System Partners)*, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Wiesbaden, 2000, S. 34-37
- [72] LABAHN, N.; BOEHLAU, CHR.: *Unterstützung des Fahrers durch Umweltsensorik und intelligente Lichtsteuerung*. In: *Der Fahrer im 21. Jahrhundert*. VDI Berichte Nr. 1613, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 2001, S. 315-331
- [73] LACHENMAYR, B.: *Beeinflussung des peripheren Sehvermögens durch foveale Beanspruchung der Aufmerksamkeit*. Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität München, 1981
- [74] LACHENMAYR, B.: *Sehen und gesehen werden: Sicher unterwegs im Straßenverkehr*. Verlag Shaker, Aachen, 1995
- [75] LAFRENTZ R.W.: *Robotik I/II*. Skript zur Vorlesung Robotik I und Robotik II, Institut für parallele und verteilte Systeme (IPVS), Universität Stuttgart, 2002

- [76] LAND, M.F.; HORWOOD, J.: *Which Parts of the Road Guide Steering?* In: *Nature* 377, 1995, S. 339-340
- [77] LAND, M.F.; LEE, D.N.: *Where we look when we steer.* In: *Nature* 369, 1994, S. 742-744
- [78] LANGHEIM, J.; LARRIEU, L.; HEINRICHS-BARTSCHER, S.: *Radar basiertes ACC und weitere zukünftige Fahrerassistenzsysteme.* In: *11. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik*, 2002, S. 1-11
- [79] LANGWIEDER, K.: *Auftretensformen und Risiken bei Nachtunfällen.* In: *Progress in Automobile Lighting*, Symposium der TH Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik, Technische Hochschule Darmstadt, 1995, S. 105-113
- [80] LANGWIEDER, K.; BÄUMLER, H.: *Charakteristik von Nachtunfällen.* In: *Progress in Automobile Lighting*, Symposium der TH Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik, Technische Hochschule Darmstadt, 1997, S. 326-339
- [81] LAUFFER, J.: *Richtlinienüberprüfung in VESTRA „Hannover“.* In: *Profile*, Vol. 2-3, 2000, S. 22-23
- [82] LAW, A.M.; KELTON, W.D.: *Simulation Modelling and Analysis.* McGraw-Hill, Boston u.a., 3. Auflage, 2000
- [83] LEHNERT, P.: *Auswirkungen der Fahrzeugdynamik auf die Lichtverteilung von Scheinwerfern.* Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2001
- [84] LORENZ, P.: *Modelle und Modellierung.* In: *Simulation & Animation.* Aus dem Internet: <http://isgwww.cs.uni-magdeburg.de/~pelo/s1g/sa1/sa1.shtml>, 2002, S. 1-12
- [85] MATSCHINSKY, W.: *Die Radführungen der Straßenfahrzeuge – Analyse, Synthese, Elasto-Kinematik.* In: *Mitschke, M.; Frederich, F. (Hrsg.): Fahrzeugtechnische Schriftenreihe*, Verlag TÜV Rheinland, Köln, 1. Auflage, 1987
- [86] MAYER, H.W.: *Fernlicht senkt das Unfallrisiko.* In: *VDI-Nachrichten*, 2000, S.34
- [87] MÖRBE, M.; ILLING, M.: *Drehratensensoren für Kraftfahrzeuganwendungen.* In: *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift (Automotive Electronics)*, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Wiesbaden, 2001, S. 56-59
- [88] MORTIMER, R.G.; JORGESON, C.M.: *Eye Fixations of Drivers in Night Driving with three Headlamp Beams.* In: *Proceedings of the Automotive Safety Emission and Fuel Economic*, 1974, S. 81-88
- [89] MÜHLENBERG, M.; KAPHINGST, J.: *Vision Sensors and Image Processing – a Contribution to Intelligent Light Function Control.* In: *Progress in Automobile Lighting*,

Symposium der TU Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik, Technische Universität Darmstadt, Herbert Utz Verlag GmbH, München, 2001, S. 695-702

- [90] MÜHLENBERG, M.; SEUBERT, T.: *Fahrerassistenzsysteme basierend auf Bildsensorik*. In: *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift Jg. 104*, Vol. 7-8, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Wiesbaden, 2002, S. 658-663
- [91] NAAB, K.: *Kalmanfilter in der Automobiltechnik – Spezielle Aufgabenstellungen, Modellierung, Erfahrungen*. Vortrag auf einem Seminar der Carl-Cranz-Gesellschaft, Oberpfaffenhofen, 2003
- [92] NAVTEQ: *AAS Coverage*. PowerPoint-Präsentation, 2005
- [93] NEUNZIG, D.; LACHMAYER, R.: *Licht und Fahrerassistenz als Systeme zur Verbesserung der Fahrzeugsicherheit*. In: *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift Jg. 104*, Vol. 6, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Wiesbaden, 2002, S. 574-582
- [94] OWENS, D.A.; SIVAK, M.: *The Role of reduced Visibility in Nighttime Road Fatalities*. The University of Michigan Transportation Research Institute. Report No. UMTRI-93-33, 1993
- [95] OWENS, D.A.; SIVAK, M.: *Differentiation of Visibility and Alcohol as Contributors to Twilight Road Fatalities*. In: *Human Factors*, Vol. 38 (4), 1996, S. 680-689
- [96] O.V.: *Robert Bosch GmbH (Hrsg.): Kraftfahrzeugtechnisches Taschenbuch*. Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Wiesbaden, 21. Auflage, 1991
- [97] RAS: *Richtlinie für die Anlage von Straßen - Teil: Linienführung RAS-L*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Straßenentwurf, Bonn, 1995.
- [98] RIPPERGER, J.: *Lichttechnische Anforderungen an Schluss- und Bremsleuchten für Kraftfahrzeuge*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2001
- [99] RODDEWIG, W.: *Bedeutung der Readaptationszeit für den nächtlichen Straßenverkehr*. In: *Licht*, No. 10, 1983, S. 540-542
- [100] ROPER, V.J.; HOWARD, E.A.: *Seeing with Motor Car Headlamps*. In: *Transactions Illuminating Engineering Society*, 1938
- [101] ROSENHAHN, E.-O.: *Entwicklung von lichttechnischen Anforderungen an Kraftfahrzeugscheinwerfer für Schlechtwetterbedingungen*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 1999
- [102] ROSLAK, J.: *Entwicklung eines aktiven Scheinwerfersystems zur blendungsfreien Ausleuchtung des Verkehrsraums*. Dissertation, Universität Paderborn, 2005

- [103] RUMAR, K.: *Intensity of High-Beam Headlights*. In: *Progress in Automobile Lighting*, Symposium der TU Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik, Technische Universität Darmstadt, Herbert Utz Verlag GmbH, München, 2001, S. 829-848
- [104] SCHAL, S.; HUGEMANN, W.: *Fahrbahnschwellen – verkehrsberuhigend oder verkehrsfährdend?* In: *Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik*, Vol. 30, 1992, S. 265-267
- [105] SCHMIDT-CLAUSEN, H.-J.: *Über das Wahrnehmen verschiedenartiger Lichtimpulse bei veränderlichen Umfeldleuchtdichten*. Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, 1968
- [106] SCHMIDT-CLAUSEN, H.-J.; BINDELS, J.: *Assessment of discomfort Glare in Motor Vehicle Lighting*. In: *Lighting Research and Technology*, Vol. 6, 1974, S. 79-88
- [107] SCHMIDT-CLAUSEN, H.-J.; DAMASKY, J.: *Further Improvement for Motorcar-Headlighting Systems*. In: *Society of Automotive Engineers SAE paper 960924*. Warrendale, Society of Automotive Engineers, 1996
- [108] SCHMIDT-CLAUSEN, H.-J.; FINSTERER, H.: *Der Einfluss der Scheinwerferanbauhöhe und –einstellung auf die Erkennbarkeit von Objekten*. In: *Projekt Nr. 1.8604 des FG Lichttechnik der TH Darmstadt*, 1989
- [109] SCHMIDT, R.F.; THEWS, G.; LANG, F.: *Physiologie des Menschen*. Springer-Verlag, Berlin, 28. Auflage, 2000
- [110] SCHRAUT, M.: *Umgebungserfassung auf Basis lernender digitaler Karten zur vorausschauenden Konditionierung von Fahrerassistenzsystemen*. Dissertation, Technische Universität München, 2000
- [111] STÜKER, D.; SCHMIDT, R.: *Potenzial optischer Sensoren zur Fahrumgebungserfassung*. In: *Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik*, VDI Berichte Nr. 1731, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 2003, S. 41-50
- [112] SULLIVAN, J.M.; FLANNAGAN, M.J.: *Assessing the potential Benefit of adaptive Head lighting using Crash Databases*. The University of Michigan Transportation Research Institute. Report No. UMTRI-99-21, 1999
- [113] THIEMANN, M.; STRYSCHIK, D.; HOBEIN, D.: *Neue Konzepte der automatischen Leuchtweitenregulierung auf Basis eines innovativen, induktiven Drehwinkelsensors*. In: *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 100*, Vol. 11, 1998, S. 820-826
- [114] VDA: *Auto Jahresbericht 2003*, Verband der Automobilindustrie e.V., Frankfurt, 2003
- [115] VON CAMPENHAUSEN, C.: *Die Sinne des Menschen*. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 2. Auflage, 1993

- [116] VON HOFFMANN, A.: *Lichttechnische Anforderungen an adaptive Kraftfahrzeugscheinwerfer für trockene und nasse Fahrbahnoberflächen*. Dissertation, Technische Universität Ilmenau, 2003
- [117] WAMBSGANß, H.: *Bestimmung und messtechnische Erfassung des Reflexionsverhaltens von Fahrbahnoberflächen bei kfz-eigener Beleuchtung*. In: *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*. Bundesministerium für Verkehr, Abteilung Straßenbau, Heft 699, Bonn-Bad Godesberg, 1995
- [118] WALLASCHEK, J.: *Modellierung und Simulation als Beitrag zur Verkürzung der Entwicklungszeiten mechatronischer Produkte*. In: *Simulation in der Praxis – Neue Produkte effizienter entwickeln*, VDI Berichte Nr. 1215, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 1995, S. 35-50
- [119] WALLASCHEK, J.; KAUSCHKE, R.; EICHHORN, K.: *Aktive Lichtsysteme für das Kraftfahrzeug*. In: *5. VDI-Mechatroniktagung 2003 – Innovative Produktentwicklung*, VDI Berichte Nr. 1753, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 2003, S. 21-42
- [120] WALLASCHEK, J.; ROSLAK, J.: *Aktive KFZ-Lichtverteilungen zur kollektiven Ausleuchtung des Verkehrsraumes*. In: *Gausemeier, J.; Lückel, J.; Wallaschek, J. (Hrsg.): Intelligente mechatronische Systeme*, Proceedings zum 1. Paderborner Workshop, Bonifatius GmbH, Paderborn, 2003, S. 29-38
- [121] WENZEL, L.: *Kalman-Filter Teil 1*. In: *Elektronik*, Vol. 6, 2000, S. 64-75
- [122] WENZEL, L.: *Kalman-Filter Teil 2*. In: *Elektronik*, Vol. 8, 2000, S. 50-55
- [123] WEIDNER, T.; HAHN, W.; WINNER H.: *Architektur eines Nachtsichtsystems mit Bildfusion*. In: *Tagungsband des VDI-Kongresses Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenz*, Wolfsburg, 2004
- [124] WIESNER, S.; SCHULZ, R.: *Der Weg zum automotiven IR-Laserscanner – Technische Ergebnisse eines partnerschaftlichen Entwicklungsprozesses*. In: *Elektronik im Kraftfahrzeug*, VDI Berichte Nr. 1287, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 2003, S. 389-401
- [125] WÖRDENWEBER, B.; LACHMAYER R.; WITT, U.: *Intelligente Frontbeleuchtung*. In: *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift Jg. 98*, Vol. 10, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Wiesbaden, 1996, S. 546-551
- [126] WÖRDENWEBER, B.: *Bei Nacht und Nebel – Neue Technologien senken das Unfallrisiko*. In: HELLA KG HUECK & CO. (HRSG.): *Hella Lighting Technology - Research and Development Review 1996*. Lippstadt, 1996
- [127] ZOMOTOR, A.: *Fahrwerktechnik: Fahrverhalten*. Vogel-Verlag, Würzburg, 1. Auflage, 1987

8 Anhang

8.1 Verteilung von Kuppen- und Wannensradien

8.1.1 Route zur Aufzeichnung der Kuppen- und Wannensradien

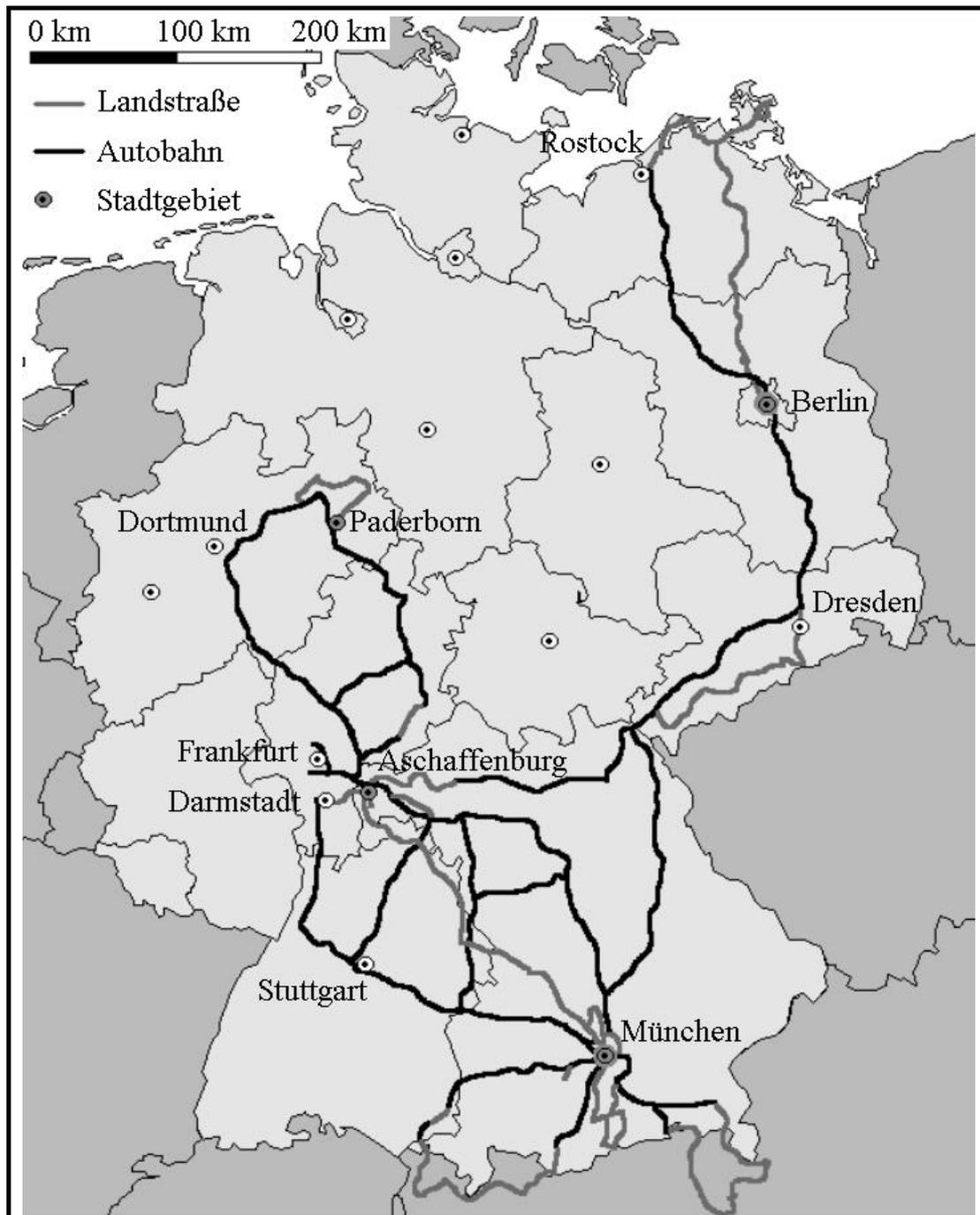


Bild 8.1: Fahrtroute zur Aufzeichnung vertikaler Straßenkrümmungen

8.1.2 Ausgewählte Verteilungen von Kuppen- und Wannennradien

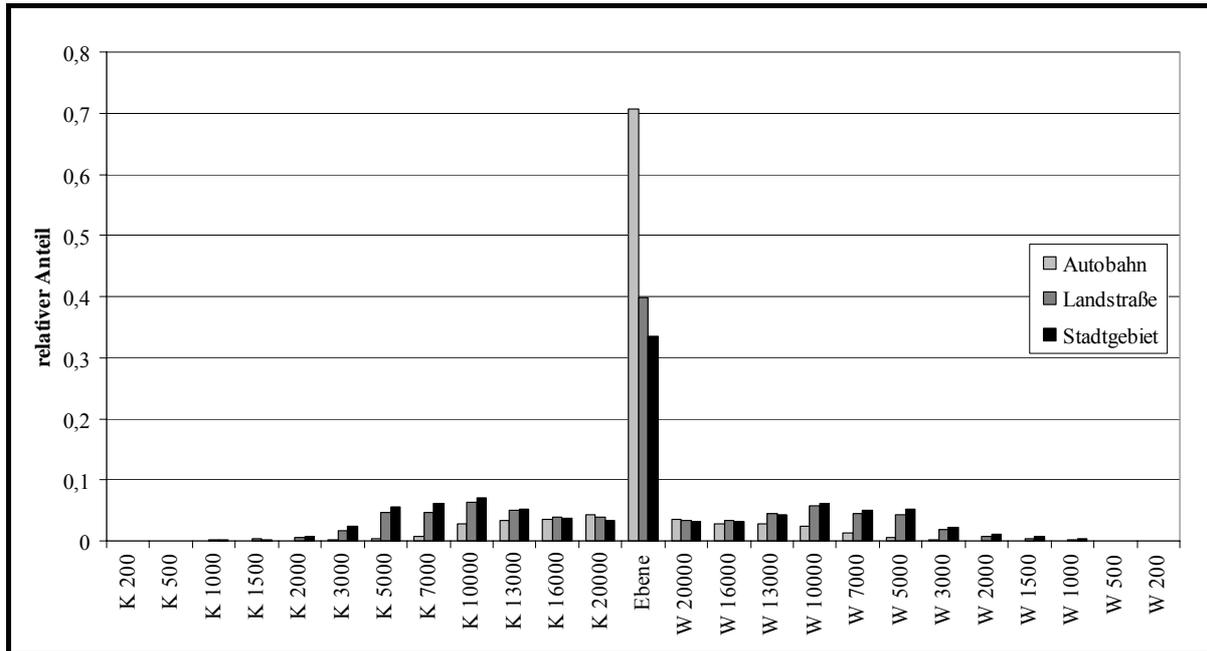


Bild 8.2: Verteilung der Kuppen- und Wannennradien in den Straßenkategorien

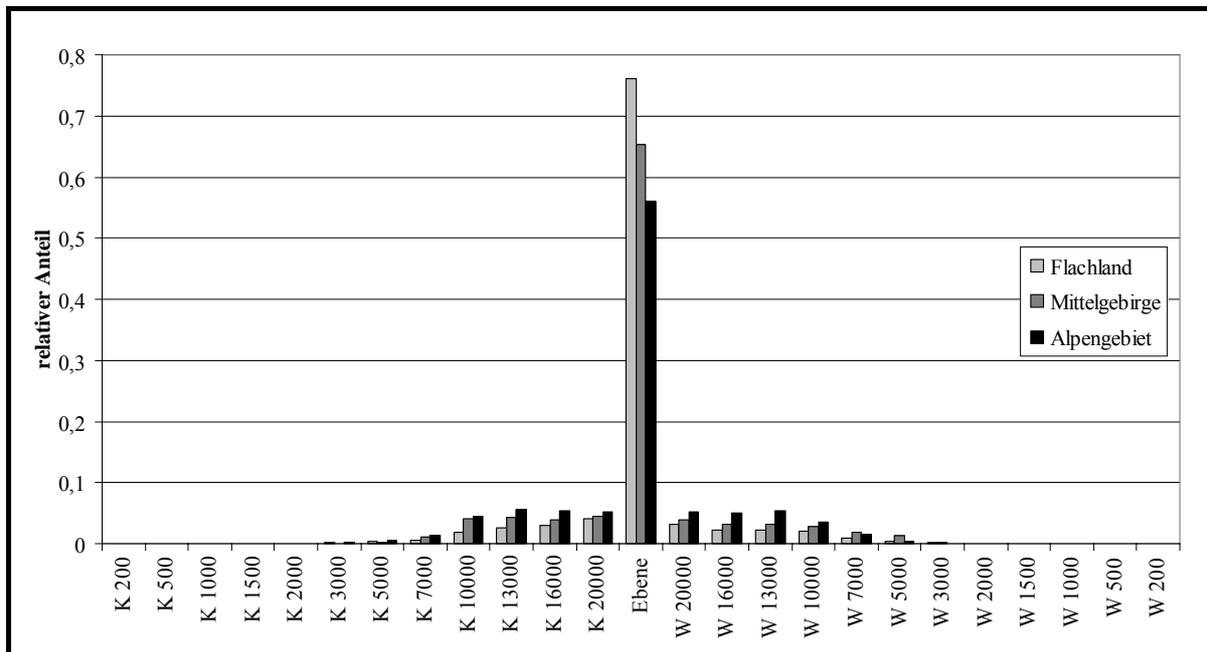


Bild 8.3: Verteilung der Kuppen- und Wannennradien auf Autobahnen nach Topologie

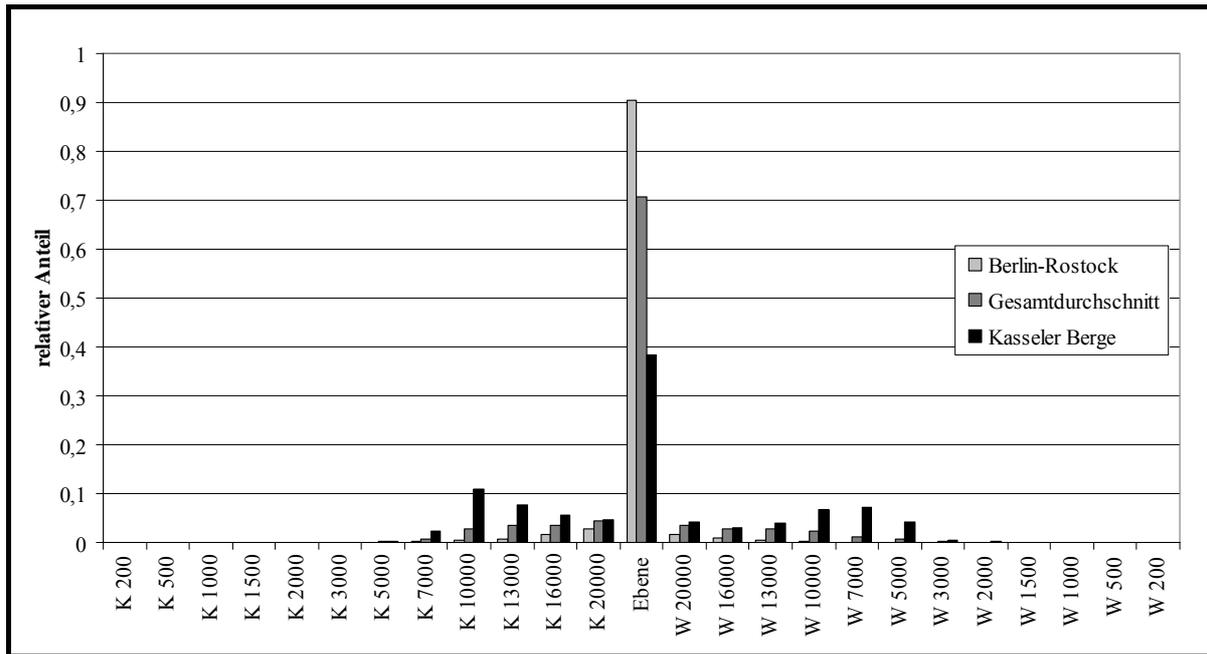


Bild 8.4: Extreme Verteilungen der Kuppen- und Wannenzadien auf Autobahnen

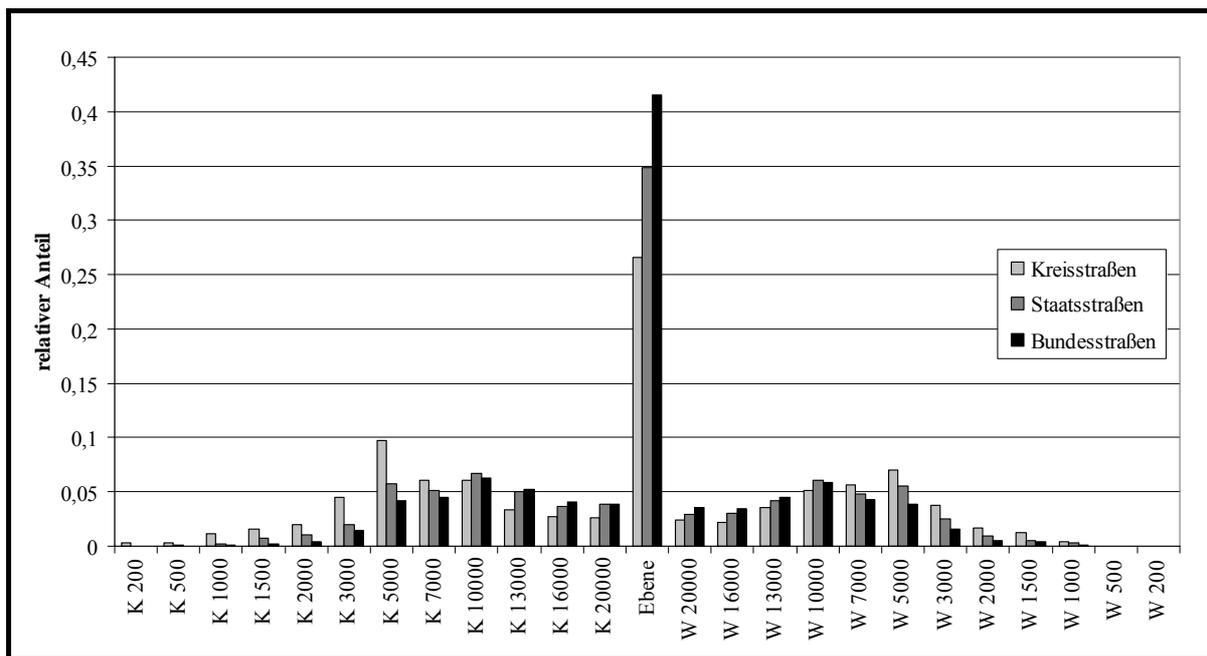


Bild 8.5: Verteilung der Kuppen- und Wannenzadien auf Landstraßen nach Straßentyp

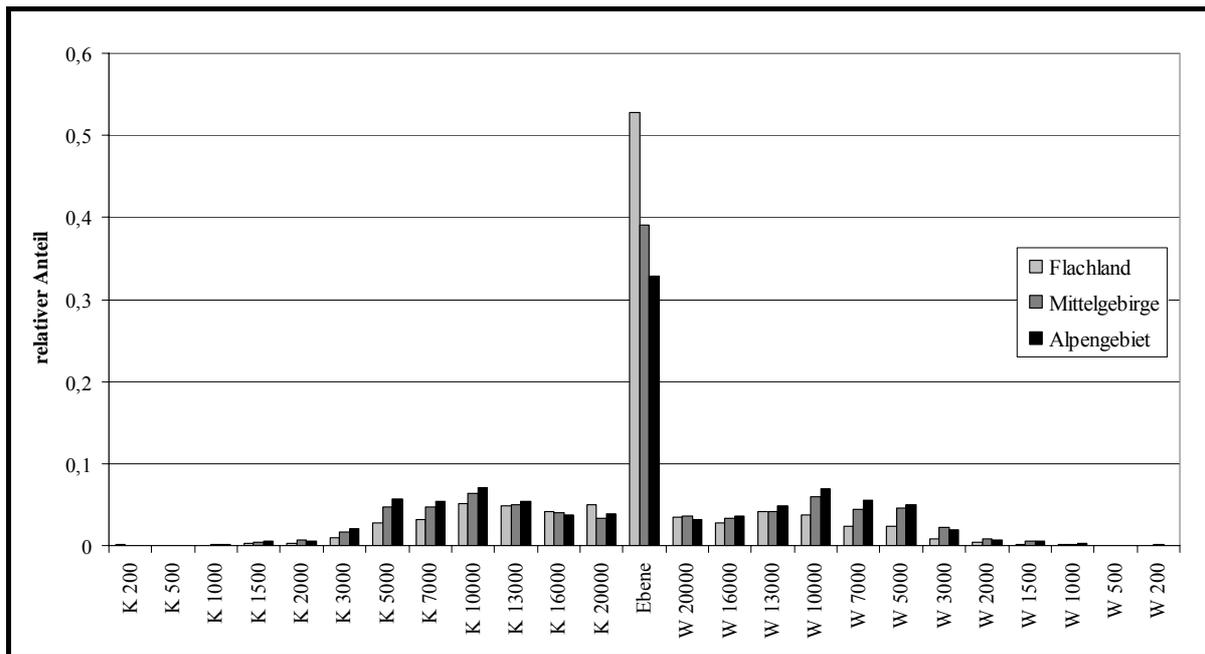


Bild 8.6: Verteilung der Kuppen- und Wannenradien auf Landstraßen nach Topologie

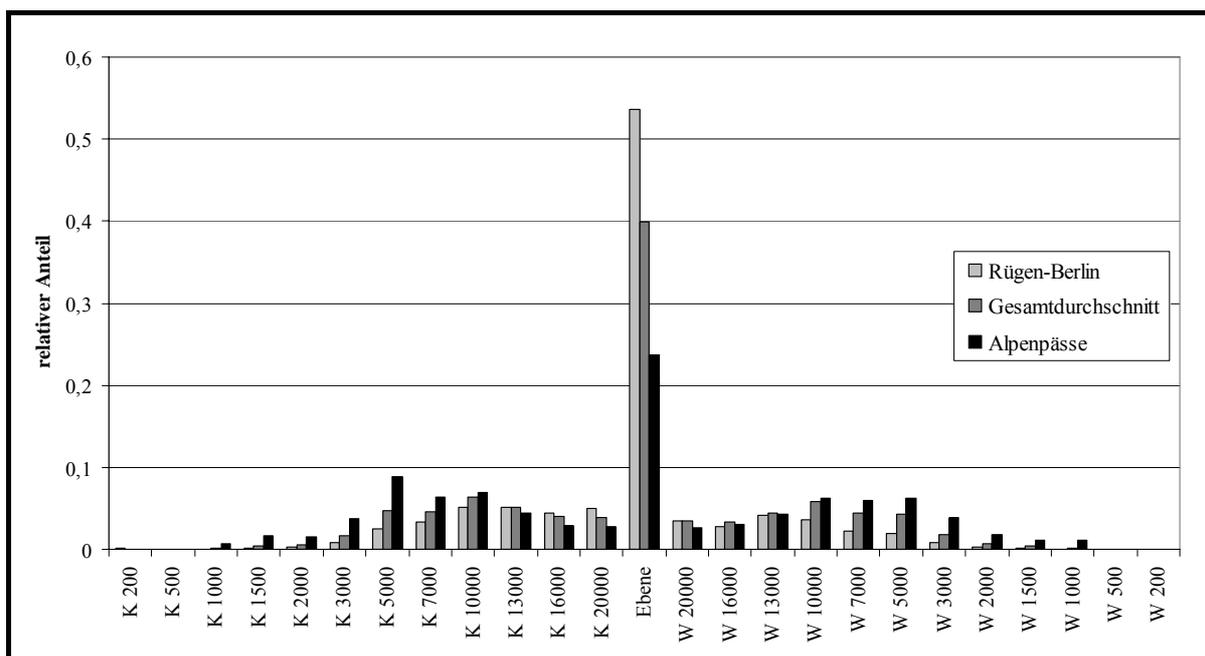


Bild 8.7: Extreme Verteilungen der Kuppen- und Wannenradien auf Landstraßen

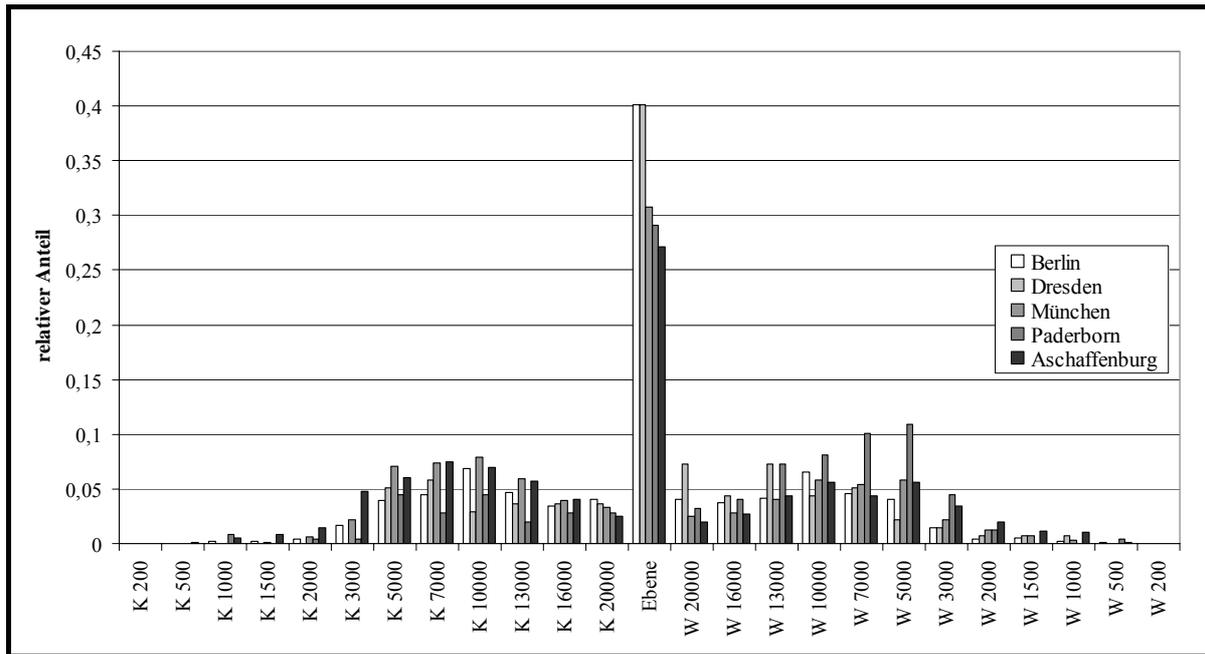


Bild 8.8: Verteilung der Kuppen- und Wannennradien in verschiedenen Städten

8.2 Einfluss der vertikalen Straßenkrümmung auf die Wirkung der Lichtverteilung

Um den Einfluss der vertikalen Straßenkrümmung auf die Wirkung der Lichtverteilung zu untersuchen, werden die geometrischen Gegebenheiten auf einer Kuppe und in einer Wanne bei konstantem Radius betrachtet.

Zu diesem Zweck wird der Ursprung des Koordinatensystems auf die Fahrbahnoberfläche unterhalb des Scheinwerfers gelegt und der Verlauf der Fahrbahnoberfläche sowie die Lage und Steigung der Hell-Dunkel-Grenze (HDG) im Koordinatensystem berechnet.

Die Kurve $z_W(x)$ einer Wanne im Koordinatensystem wird durch eine Kreisgleichung beschrieben:

$$z_W = R_v \cdot \left(1 - \cos \left(\arcsin \frac{x}{R_v} \right) \right) \quad (8.1)$$

Die Gleichung $z_K(x)$ für die Kuppe ist bis auf das negative Vorzeichen identisch:

$$z_K = -R_v \cdot \left(1 - \cos \left(\arcsin \frac{x}{R_v} \right) \right) \quad (8.2)$$

Die Geradengleichung $z_{HDG}(x)$ der Hell-Dunkel-Grenze ergibt sich aus deren Steigungswinkel $\beta_{w/k}$ und der Höhe der Scheinwerfer $h_{SWw/k}$ über der Fahrbahnoberfläche:

$$z_{HDG} = h_{SWw/k} - x \cdot \tan \beta_{w/k} \quad (8.3)$$

In Bild 8.9 ist ein Fahrzeug beim Durchfahren einer Wanne dargestellt.

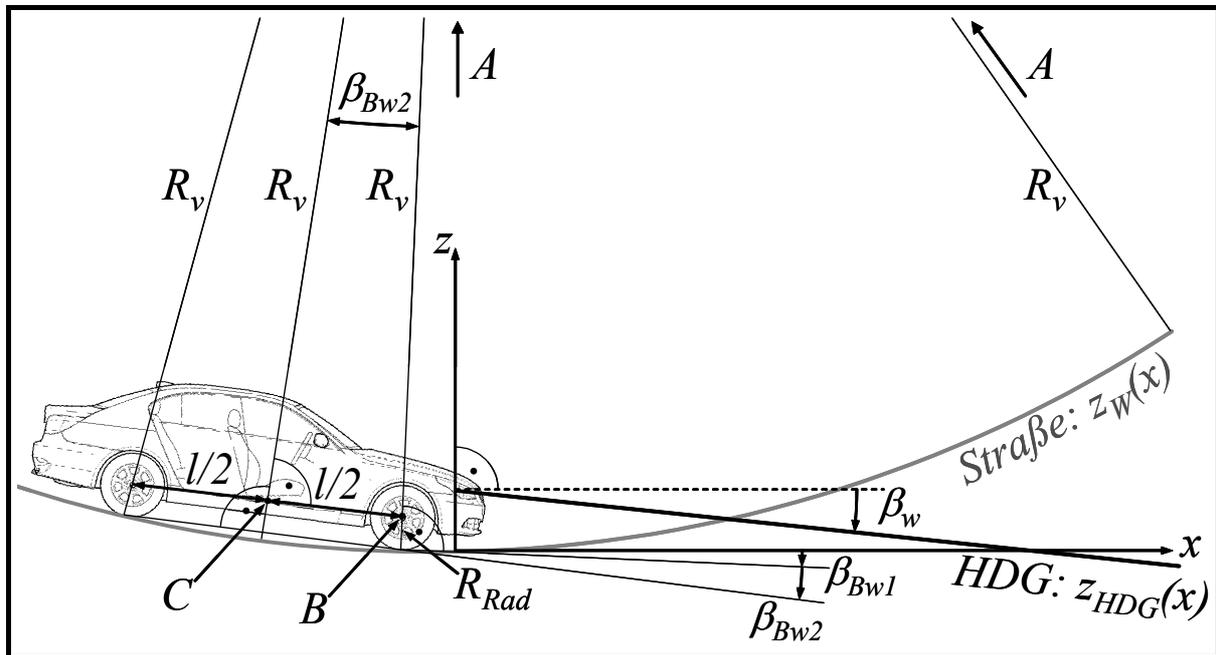


Bild 8.9: Steigung der Hell-Dunkel-Grenze in einer Wanne

Der Steigungswinkel β_w der Hell-Dunkel-Grenze wird durch die Neigung der Fahrzeuglängsachse in einer Wanne verändert. Er berechnet sich als Summe aus der Grundeinstellung β_0 der Scheinwerfer und dem Basisneigungswinkel β_{Bw} . Der Basisneigungswinkel entspricht der Neigung der Fahrzeuglängsachse im Koordinatensystem beim Durchfahren einer vertikalen Kurve und ergibt sich aus der Addition der Tangentensteigung β_{Bw1} der Fahrbahnoberfläche an der Vorderachse und der zusätzlichen Neigung der Fahrzeuglängsachse β_{Bw2} gegenüber der Fahrbahnoberfläche am vorderen Radaufstandspunkt:

$$\beta_w = \beta_0 + \beta_{Bw} = \beta_0 + (\beta_{Bw1} + \beta_{Bw2}) \quad (8.4)$$

Die Neigung der Fahrzeuglängsachse gegenüber der Fahrbahntangente an der Vorderachse berechnet sich aus dem rechtwinkligen Dreieck (A-B-C), das vom Zentrum der Wannenkürmung A, der Vorderachse B und vom Schnittpunkt C des Wannennradius mit dem halben Radstand aufgespannt wird (siehe Bild 8.9):

$$\beta_{Bw2} = \arcsin\left(\frac{l}{2 \cdot (R_v - R_{Rad})}\right) \quad (8.5)$$

Bild 8.10 zeigt, wie aus dem Überhang \ddot{u}_{SW} der Scheinwerfer zur Vorderachse, ihrer Anbauhöhe h_{SW} und aus dem Wannennradius R die Tangentensteigung β_{Bw1} der Fahrbahnoberfläche an der Vorderachse sowie die Höhe h_{SWw} der Scheinwerfer über der Fahrbahn berechnet werden:

$$\beta_{Bw1} = \arctan\left(\frac{\ddot{u}_{SW}}{R_v - h_{SW}}\right) \quad (8.6)$$

$$h_{SWw} = R_v - \sqrt{(R_v - h_{SW})^2 + \ddot{u}_{SW}^2} \quad (8.7)$$

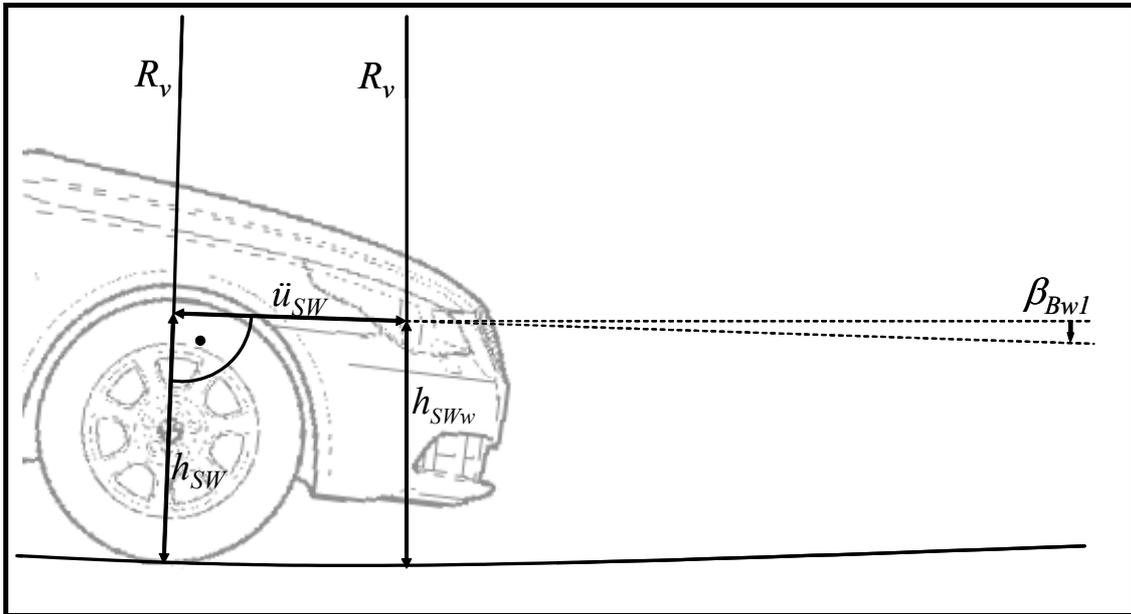


Bild 8.10: Tangentensteigung der Fahrbahn an der Vorderachse und Scheinwerferhöhe

Die entsprechenden Formeln zur Beschreibung der Geometrie auf einer Kuppe lauten:

$$\beta_k = \beta_0 - \beta_{Bk} = \beta_0 - (\beta_{Bk1} + \beta_{Bk2}) \quad (8.8)$$

$$\beta_{Bk1} = \arctan\left(\frac{\ddot{u}_{SW}}{R_v + h_{SW}}\right) \quad (8.9)$$

$$\beta_{Bk2} = \arcsin\left(\frac{l}{2 \cdot (R_v + R_{Rad})}\right) \quad (8.10)$$

$$h_{SWk} = \sqrt{(R_v + h_{SW})^2 + \ddot{u}_{SW}^2} - R_v \quad (8.11)$$

8.2.1 Vertikale Straßenkrümmung und Leuchtweite

Die geometrische Leuchtweite d_{HDG} entspricht der Abszisse des Schnittpunkts der Fahrbahnoberfläche mit der Hell-Dunkel-Grenze im oben definierten Koordinatensystem. Durch Gleichsetzen der Geradengleichung $z_{HDG}(x)$ für die Hell-Dunkel-Grenze mit der Kreisgleichung $z_W(x)$ oder $z_K(x)$ für die Straßenkrümmung und durch Auflösen der Gleichung nach der

Abszisse x ergeben sich die folgenden Formeln zur Berechnung der geometrischen Leuchtweite d_{HDG} :

$$d_{HDG\ Wanne} = \frac{2 \cdot (h_{SWw} - R_v) \cdot \tan \beta_w + \sqrt{4 \cdot (R_v - h_{SWw})^2 \cdot (\tan \beta_w)^2 - 4 \cdot h_{SWw}^2 + 8 \cdot h_{SWw} \cdot R_v}}{2 + 2 \cdot (\tan \beta_w)} \quad (8.12)$$

$$d_{HDG\ Kuppe} = \frac{2 \cdot (h_{SWk} + R_v) \cdot \tan \beta_k - \sqrt{4 \cdot (R_v - h_{SWk})^2 \cdot (\tan \beta_k)^2 - 4 \cdot h_{SWk}^2 - 8 \cdot h_{SWk} \cdot R_v}}{2 + 2 \cdot (\tan \beta_k)} \quad (8.13)$$

Ist folgende Bedingung erfüllt:

$$R_v \leq \frac{h_{SWk}}{(\tan \beta_k)^2} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + (\tan \beta_k)^2}\right), \quad (8.14)$$

dann wird der Term unter der Wurzel in der Formel 8.13 negativ. Dies bedeutet, dass die Hell-Dunkel-Grenze die Fahrbahnoberfläche auf der Kuppe nicht mehr berührt. Rechnerisch ergibt sich daraus eine unendlich große geometrische Leuchtweite d_{HDG} .

Die Abhängigkeit der geometrischen Leuchtweite vom vertikalen Radius der Straße bei einer gegebenen Anbauhöhe der Scheinwerfer $h_{SW} = 655 \text{ mm}$ und einer Grundeinstellung $\tan \beta_0 = 1 \%$ zeigt Bild 8.11.

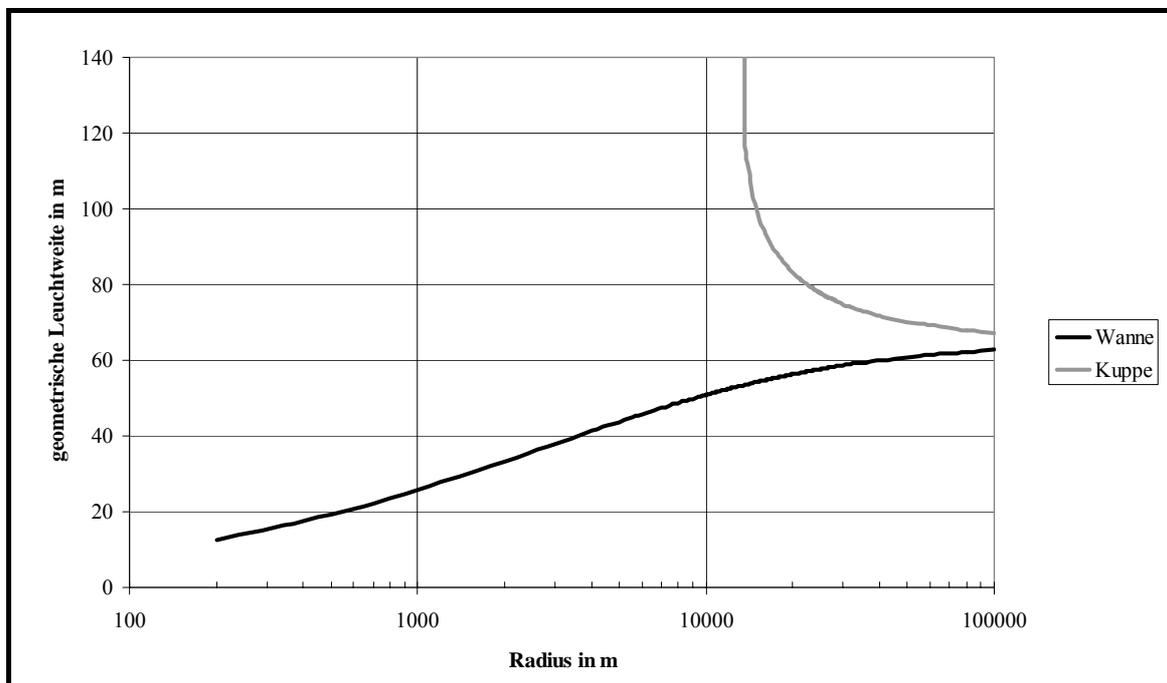


Bild 8.11: Geometrische Leuchtweite auf Kuppen und in Wannen

8.2.2 Abstand der Hell-Dunkel-Grenze zur Fahrbahnoberfläche

Neben der geometrischen Leuchtweite lässt sich der Einfluss der vertikalen Straßenkrümmung auf die Lichtverteilung mit der Höhe $h_{HDG}(d)$ der Hell-Dunkel-Grenze gegenüber der Fahrbahnoberfläche in einer festgelegten Entfernung d vor dem Fahrzeug darstellen¹⁵⁹:

$$h_{HDG\ Wanne}(d) = z_{HDG}(d) - z_W(d) = h_{SW_w} - d \cdot \tan \beta_w - R_v \cdot \left(1 - \cos \left(\arcsin \frac{d}{R_v} \right) \right) \quad (8.15)$$

$$h_{HDG\ Kuppe}(d) = z_{HDG}(d) - z_K(d) = h_{SW_k} - d \cdot \tan \beta_k + R_v \cdot \left(1 - \cos \left(\arcsin \frac{d}{R_v} \right) \right) \quad (8.16)$$

Bild 8.12 zeigt beispielhaft die Höhe der Hell-Dunkel-Grenze über der Fahrbahn für eine Entfernung von 50 m vor dem Fahrzeug in Abhängigkeit vom vertikalen Krümmungsradius.

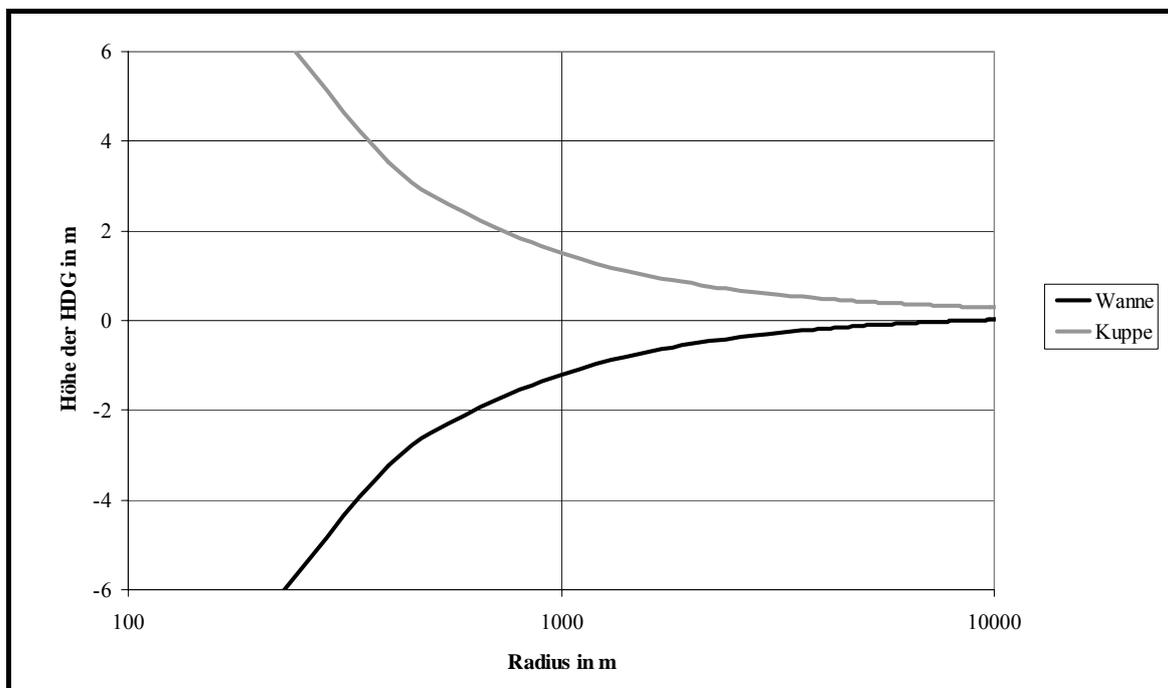


Bild 8.12: Höhe der Hell-Dunkel-Grenze in 50m Entfernung

¹⁵⁹ Die Höhe der Hell-Dunkel-Grenze wird an der vertikalen Achse durch den HV-Punkt gemessen.

8.3 Fahrwerkmodell und Kalmanfilter

Im Fahrbetrieb wird die Karosserie eines Fahrzeugs zu Hub-, Nick- und Wankschwingungen angeregt. Mit einem mechanischen Feder-Dämpfer-System lässt sich darstellen, wie solche Bewegungen durch äußere Kräfte am Fahrzeug entstehen¹⁶⁰.

8.3.1 Einspurmodell des Fahrwerks

Einen sichtbaren Einfluss auf die Lichtverteilung besitzen die Hub- und Nickschwingungen des Fahrzeugs. Zur Beschreibung dieser Bewegungen genügt ein Einspurmodell des Fahrwerks, wie es in Bild 8.13 gezeigt wird. Die Feder- und Dämpferkräfte der Räder werden bei diesem Modell vernachlässigt¹⁶¹. Durch diese Vereinfachung entstehen bei extremen Fahrbahnunebenheiten, welche eine hohe Vertikaldynamik erzeugen, Abweichungen zwischen dem Zustand im Modell und im realen Fahrzeug. Wie bereits in Abschnitt 2.4 beschrieben, ist eine Scheinwerfersteuerung zum Ausgleich der Fahrzeugnickbewegungen, die durch Unebenheiten angeregt werden, in Echtzeit technisch nur mit sehr großem Aufwand möglich. Eine verzögerte Reaktion könnte sogar zu antizyklischen Bewegungen der Scheinwerfer führen. Daher ist ein Ausgleich der Nickbewegungen bei extremen Unebenheiten nicht sinnvoll. Zudem treten eine starke Vertikaldynamik und die Zustandsabweichungen im normalen Fahrbetrieb nur selten auf, sodass die Fehler durch die Vereinfachung bei der Modellbildung vernachlässigbar sind.

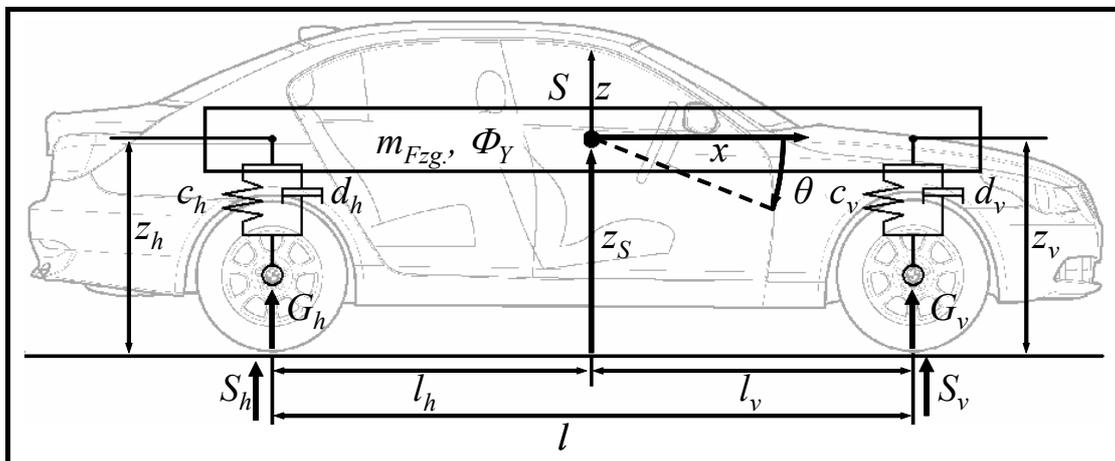


Bild 8.13: Einspurmodell zur Beschreibung der Hub- und Nickbewegungen

¹⁶⁰ GÄRTNER/SAEGER 2003 [44], S. 5 f.

¹⁶¹ NAAB 2003 [91], S. 15

Die Bewegungsgleichungen für die Gesamtkarosserie werden durch den Impuls- und Drallsatz beschrieben. In einem stationären Fahrzustand sind alle Kräfte der Vertikaldynamik im Gleichgewicht:

$$-m_{Fzg.} \cdot g + G_v + G_h = 0 \quad (8.17)$$

$$\Phi_Y \cdot \ddot{\theta} + G_v \cdot l_v - G_h \cdot l_h = 0 \quad (8.18)$$

Ausgehend davon erzeugen Fahrbahnunebenheiten die Störkräfte S_v und S_h , welche die Karosserie zu Hubbewegungen und über den Abstand $l_{v/h}$ der Achsen zum Fahrzeugschwerpunkt zu Nickbewegungen anregen:

$$m_{Fzg.} \cdot \Delta \ddot{z} = \Delta G_v + \Delta G_h + S_v + S_h \quad (8.19)$$

$$\Phi_Y \cdot \Delta \ddot{\theta} = \Delta G_h \cdot l_h - \Delta G_v \cdot l_v + S_h \cdot l_h - S_v \cdot l_v \quad (8.20)$$

Die Fahrbahnunebenheiten und die Bewegungen der Karosserie beeinflussen außerdem die Federbeinlängen $z_{v/h}$ an den beiden Achsen:

$$\Delta z_v = \Delta z - l_v \cdot \sin \Delta \theta \quad (8.21)$$

$$\Delta z_h = \Delta z + l_h \cdot \sin \Delta \theta \quad (8.22)$$

Sowohl die Länge als auch die Längenänderung der Federbeine erzeugen die so genannten Feder-Dämpfer-Kräfte:

$$\Delta G_v = -c_v \cdot \Delta z_v - d_v \cdot \Delta \dot{z}_v \quad (8.23)$$

$$\Delta G_h = -c_h \cdot \Delta z_h - d_h \cdot \Delta \dot{z}_h \quad (8.24)$$

Diese Kräfte $\Delta G_{v/h}$ stellen die Gegenkräfte zur ursprünglichen Anregung $S_{v/h}$ dar.

8.3.2 Erweiterung des Einspurmodells

Bei einem Brems- oder Beschleunigungsvorgang greifen zusätzliche Kräfte am Fahrzeug an. Betätigt z.B. der Fahrer die Betriebsbremse des Fahrzeugs ($a_x < 0$), wirken an den Radaufstandspunkten der Räder die Bremskräfte F_{Bvx} und F_{Bhx} entgegen der Fahrtrichtung (siehe Bild 8.14). Durch die Verzögerung entsteht am Fahrzeug die Massenverzögerungskraft F_B . Ihr Wert entspricht der negativen Summe der Bremskräfte an den Rädern:

$$F_B = -m_{Fzg.} \cdot a_x = -F_{Bvx} - F_{Bhx} \quad (8.25)$$

Die Massenverzögerungskraft greift auf der Höhe z_S des Schwerpunkts am Fahrzeug an. Durch die Höhendifferenz dieser Kraft zu den Bremskräften an den Radaufstandspunkten

entsteht ein Nickmoment, welches über den Radstand l eine Radlastverlagerung F_{Bvz} und F_{Bhz} von der Hinter- zur Vorderachse bewirkt¹⁶²:

$$F_{Bvz} = +F_B \cdot \frac{z_S}{l}; \quad F_{Bhz} = -F_B \cdot \frac{z_S}{l} \quad (8.26)$$

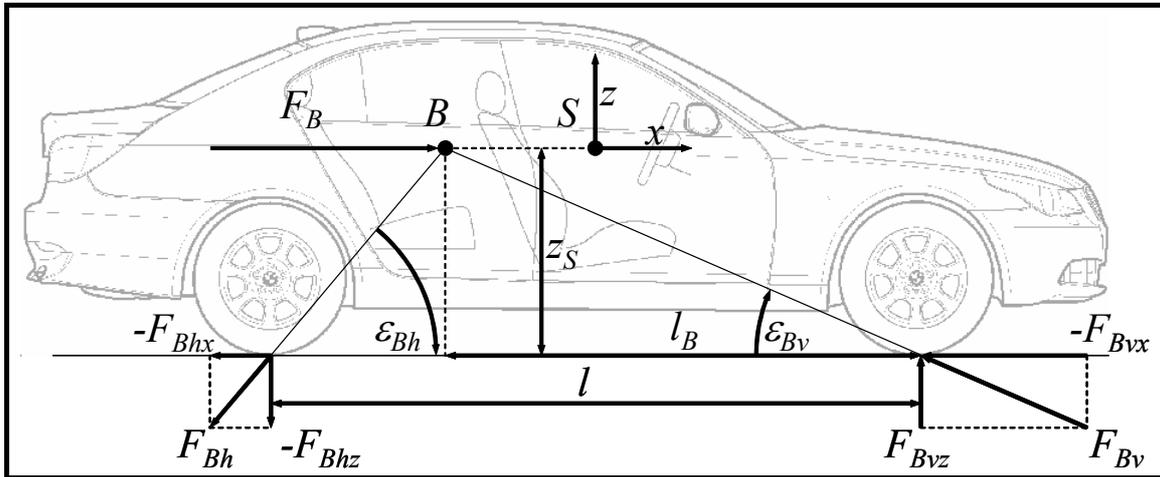


Bild 8.14: Zusätzliche Kräfte bei einem Bremsvorgang¹⁶³

Die horizontal wirkenden Bremskräfte und die vertikal gerichteten Kräfte der Radlastverlagerung bilden an den Radaufstandspunkten die schräg gerichteten resultierenden Kräfte F_{Bv} und F_{Bh} . Diese beiden Kräfte schneiden sich mit der Massenverzögerungskraft F_B am Bremsmittelpunkt B auf der Höhe des Schwerpunkts. Die Lage l_B des Bremsmittelpunkts in Längsrichtung wird durch die Verteilung α der Bremskräfte auf Vorder- und Hinterachse bestimmt:

$$F_{Bvx} = -\alpha \cdot F_B; \quad F_{Bhx} = -(1-\alpha) \cdot F_B \quad \text{mit } \alpha \in [0,1] \quad (8.27)$$

$$l_B = \alpha \cdot l \quad (8.28)$$

Der Bremskraftanteil α bestimmt außerdem die Winkel der Kräfte F_{Bv} und F_{Bh} :

$$\tan \varepsilon_{Bv} = \frac{z_S}{l_B} = \frac{z_S}{\alpha \cdot l} \quad (8.29)$$

$$\tan \varepsilon_{Bh} = \frac{z_S}{(1-\alpha) \cdot l} \quad (8.30)$$

¹⁶² MATSCHINSKY 1987 [85], S. 114

¹⁶³ MATSCHINSKY 1987 [85], S. 114

Je größer der Anteil α der Bremskraft an der Vorderachse ist, desto weiter hinten befindet sich der Bremsmittelpunkt B im Fahrzeug.

Bei einem Beschleunigungsmanöver entstehen ebenso zusätzliche Kräfte am Fahrzeug wie beim Bremsen. Bis auf die resultierenden Kräfte F_{Bv} und F_{Bh} an den Radaufstandspunkten wirken alle anderen Zusatzkräfte beim Beschleunigen in eine Richtung, die der beim Bremsen entgegengesetzt ist. Die Richtung der resultierenden Kräfte an den Radaufstandspunkten wird durch die Lage des Beschleunigungsmittelpunkts (analog zum Bremsmittelpunkt beim Bremsen) bestimmt, welcher bei Einachsantrieb immer über der nicht angetriebenen Achse auf der Höhe des Schwerpunkts liegt. Bei Allradantrieb hängt sie von der Drehmomentverteilung der Antriebsachsen ab.

Im oben vorgestellten Feder-Dämpfer-Modell (siehe Abschnitt 8.3.1 und Bild 8.13) können sich die Federbeine nur in vertikaler Richtung bewegen¹⁶⁴. Daher wirken die vertikal gerichteten Kräfte der Radlastverlagerung direkt auf die Federbeine und erzeugen ein Einfedern der Vorderachse und ein Ausfedern der Hinterachse. Die Fahrzeugkarosserie beginnt dadurch zu nicken.

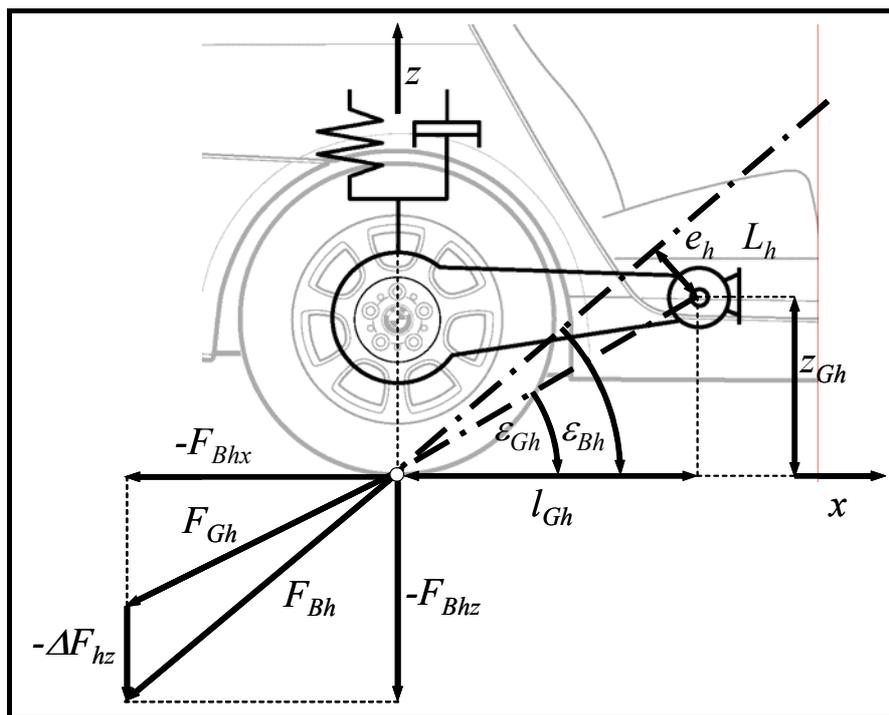


Bild 8.15: Zusätzliche Kräfte am hinteren Radaufstandspunkt beim Bremsen

¹⁶⁴ GÄRTNER/SAEGER 2003 [44], S. 5

Die Fahrwerke moderner Fahrzeuge sind jedoch so konstruiert, dass sie auch bei starken Brems- und Beschleunigungsmanövern nur zu kleinen Nickbewegungen angeregt werden. Um dieses Verhalten auch im Einspurmodell zu berücksichtigen, muss es um Längslenker an jeder Achse erweitert werden. Die Längslenker verbinden die Achse mit der Karosserie. Der Anschlusspunkt zur Karosserie stellt den Drehpunkt (Längspol $L_{v/h}$) dar, um den die Achse beim Ein- und Ausfedern schwenkt. Moderne Fahrzeuge besitzen mehrere Längslenker pro Radaufhängung, dadurch lassen sich virtuelle Längspole konstruieren, die außerhalb des Fahrzeugs liegen können.

Die Wirkung der Längslenker wird beispielhaft an der Hinterachse bei einem Bremsvorgang erklärt. Bild 8.15 zeigt die Kräfte, die beim Bremsen am Aufstandspunkt des Hinterrades angreifen. Wie bereits beschrieben, bilden die Bremskraft F_{Bhx} und die Radlastverlagerung F_{Bhz} die resultierende Kraft F_{Bh} , die unter dem Winkel ε_{Bh} am Radaufstandspunkt wirkt.

Beim Bremsen wird das Rad kraftschlüssig mit dem Längslenker verbunden. Dessen drehbares Lager an der Karosserie bildet den Längspol L_h . Dadurch können Kräfte F_{Gh} , die unter dem Winkel ε_{Gh} wirken, über den Längslenker vollständig an der Karosserie abgestützt werden. Sie besitzen dann keinen Einfluss auf die Feder-Dämpfer-Elemente und erzeugen keine Nickbewegungen der Fahrzeugkarosserie. Der ideale Bremsstützwinkel ε_{Gh} ist abhängig von der Konstruktion des Lenkers sowie der aktuellen Einfederung der Achse und berechnet sich nach folgender Formel:

$$\tan \varepsilon_{Gh} = \frac{z_{Gh} + \Delta z_h}{l_{Gh}}; \quad (\text{Vorderachse: } \tan \varepsilon_{Gv} = \frac{z_{Gv} + \Delta z_v}{l_{Gv}}) \quad (8.31)$$

Wurde die Lage des Längslenkers konstruktiv so bestimmt, dass der ideale Abstützwinkel ε_{Gh} kleiner ist als der Winkel ε_{Bh} , dann erzeugt die resultierende Bremskraft F_{Bh} über den Hebelarm e_h ein Drehmoment am Längspol L_h . Am Radaufstandspunkt entsteht dabei die vertikal gerichtete Kraft ΔF_{hz} , welche zu einem Ausfedern Δz_h der Hinterachse führt:

$$\begin{aligned} \Delta F_{hz} &= F_{Bhx} \cdot \tan \varepsilon_{Bh} - F_{Bhx} \cdot \tan \varepsilon_{Gh} \\ &= m_{Fzg} \cdot \ddot{x} \cdot \left(\frac{z_S}{l} - (1-\alpha) \cdot \frac{z_{Gh}}{l_{Gh}} - (1-\alpha) \cdot \frac{\Delta z + l_h \cdot \sin \Delta \theta}{l_{Gh}} \right); \quad \text{wenn : } \ddot{x} < 0 \end{aligned} \quad (8.32)$$

Die vertikale Kraft ΔF_{vz} , welche an der Vorderachse ein Einfedern Δz_v bewirkt, wird auf ähnliche Weise berechnet:

$$\begin{aligned} \Delta F_{vz} &= F_{Bvx} \cdot \tan \varepsilon_{Bv} - F_{Bvx} \cdot \tan \varepsilon_{Gv} \\ &= m_{Fzg} \cdot \ddot{x} \cdot \left(-\frac{z_S}{l} + \alpha \cdot \frac{z_{Gv}}{l_{Gv}} + \alpha \cdot \frac{\Delta z - l_v \cdot \sin \Delta \theta}{l_{Gv}} \right); \quad \text{wenn : } \ddot{x} < 0 \end{aligned} \quad (8.33)$$

Dadurch nähert sich der Winkel ε_{Bh} der resultierenden Bremskraft dem idealen Stützwinkel ε_{Gh} an, und das Drehmoment am Längspol wird kleiner. Sind beide Winkel gleich, wird die komplette resultierende Kraft F_{Bh} und damit sowohl die Bremskraft F_{Bhx} als auch die Radlast-

verlagerung F_{Bhz} über den Längslenker an der Karosserie abgestützt. Auf diese Weise erzeugt der Längslenker einen progressiven Bremsnickausgleich und begrenzt den maximalen Nickwinkel der Karosserie beim Bremsen.

Beim Beschleunigen gelingt ein Abstützen der resultierenden Kräfte an der Karosserie über die Längslenker nur an der Antriebsachse. So greift bei Hinterradantrieb ($\alpha=0$) an der Vorderachse nur die senkrecht gerichtete Radlastverlagerung an, die direkt auf die Feder-Dämpfer-Elemente wirkt:

$$\begin{aligned}\Delta F_{hz} &= F_{Bhx} \cdot \tan \varepsilon_{Bh} - F_{Bhx} \cdot \tan \varepsilon_{Gh} \\ &= m_{Fzg} \cdot \ddot{x} \cdot \left(\frac{z_S}{l} - \frac{z_{Gh}}{l_{Gh}} - \frac{\Delta z + l_h \cdot \sin \Delta \theta}{l_{Gh}} \right); \quad \text{wenn : } \ddot{x} > 0\end{aligned}\quad (8.34)$$

$$\begin{aligned}\Delta F_{vz} &= F_{Bvx} \cdot \tan \varepsilon_{Bv} - F_{Bvx} \cdot \tan \varepsilon_{Gv} \\ &= -\frac{z_S}{l} m_{Fzg} \cdot \ddot{x}; \quad \text{wenn : } \ddot{x} > 0\end{aligned}\quad (8.35)$$

Die Beschleunigungskraft wird nur an der Antriebsachse abgestützt. Da aber Kräfte beim Beschleunigen des Fahrzeugs geringer sind als beim Bremsen, gelingt es trotzdem, den Nickwinkel auf kleine Beträge zu begrenzen. Damit lässt sich bei der Berechnung der Federbeinlängen der Sinus des Nickwinkels durch den Nickwinkel selbst approximieren:

$$z_v = \Delta z - l_v \cdot \sin \Delta \theta \text{ approximiert durch: } z_v = \Delta z - l_v \cdot \Delta \theta \quad (8.36)$$

$$z_h = \Delta z + l_h \cdot \sin \Delta \theta \text{ approximiert durch: } z_h = \Delta z + l_h \cdot \Delta \theta \quad (8.37)$$

Anhand der Formeln 8.31 bis 8.34 ist erkennbar, dass der Einfluss vom Brems- und Beschleunigungsvorgängen auf die Vertikaldynamik des Fahrzeugs vom aktuellen Zustand des Fahrzeugs Δz und $\Delta \theta$ abhängt.

8.3.3 Kalmanfilter

Der Kalmanfilter besteht aus mehreren mathematischen Gleichungen zur Beschreibung eines Systems und dessen zeitlichen Verhaltens¹⁶⁵. Er ermöglicht die Schätzung von vergangenen, aktuellen und zukünftigen Systemzuständen. In der Regel wird der Kalmanfilter als zeitdiskreter Filter eingesetzt. Der neue Systemzustand x_{k+1} ergibt sich aus dem alten Zustand x_k über die Zustandsübergangsmatrix A_k . Zudem wirken Steuerungseinflüsse u_k über die Matrix B auf das System ein¹⁶⁶. Ungenauigkeiten in der Systembeschreibung und externe Störungen werden durch den Vektor w_k dargestellt:

¹⁶⁵ NAAB 2003 [91], S. 13 f.

¹⁶⁶ WENZEL 2000 [121], S. 64

$$x_{k+1} = A_k \cdot x_k + B \cdot u_k + w_k \quad (8.38)$$

Häufig kann der Systemzustand x_k nicht direkt gemessen werden. Dafür lassen sich andere Parameter y_k messen, aus denen der Systemzustand bestimmt werden kann. Den Zusammenhang zwischen Mess- und Zustandsgrößen bildet die Matrix C_k . In der Regel unterliegen die Messungen einem Rauschen v_k :

$$y_k = C_k \cdot x_k + v_k \quad (8.39)$$

Aus dem aktuellen Systemzustand wird anhand Formel 8.38 der nächste Zustand geschätzt (geschätzte Werte werden im Folgenden mit einem Apostroph gekennzeichnet):

$$\hat{x}'_{k+1} = A_k \cdot \hat{x}'_k + B \cdot u_k \quad (8.40)$$

Im nächsten Zeitschritt des Systems (aus $k+1$ wird k) wird die Schätzung des Systemzustands \hat{x}'_k unter der Berücksichtigung der Messungen y_k verfeinert¹⁶⁷:

$$\hat{x}_k = \hat{x}'_k + K_k \cdot (y_k - C_k \cdot \hat{x}'_k) \quad (8.41)$$

Das Residuum $y_k - C_k \cdot \hat{x}'_k$ beschreibt den Unterschied zwischen dem vorhergesagten Messwert $C_k \cdot \hat{x}'_k$ und dem tatsächlichen Messwert y_k . Dieser Unterschied wird mit dem Kalmanfaktor K_k gewichtet¹⁶⁸. Die Größe des Faktors gibt an, wie stark der Schätzung oder der Messung vertraut wird. Der Kalmanfaktor ist daher abhängig von der Schätzung der Fehlervarianz P'_k sowie von der Kovarianzmatrix R_k der Messfehler:

$$K_k = \frac{P'_k \cdot C_k^T}{C_k \cdot P'_k \cdot C_k^T + R_k} \quad (8.42)$$

Die erwartete Fehlervarianz P'_{k+1} im nächsten Zeitschritt $k+1$ wird ebenfalls geschätzt und hängt von der Kovarianzmatrix Q_k der Systemstörungen ab:

$$P'_{k+1} = A_k \cdot P_k \cdot A_k^T + Q_k \quad (8.43)$$

$$P_k = (I - K_k \cdot C_k) \cdot P'_k \quad (8.44)$$

Der Kalmanfilter arbeitet iterativ. Zunächst erfolgt eine initiale Schätzung des Systemzustands \hat{x}'_0 , der Kovarianzmatrizen für Störungen Q_0 und Messfehler R_0 sowie der Fehlervarianz P'_0 . Da in der Regel sowohl die Messfehler v als auch die Systemstörungen w unabhängig vom Zustand des Systems sind, bleiben die Matrizen Q und R häufig konstant. Wie in Bild 8.16 dargestellt, wiederholen sich die Rechenschritte des Kalmanfilters mit jedem Zeitschritt.

¹⁶⁷ LAFRENZ 2002 [75], S. 6.76 f.

¹⁶⁸ WENZEL 2000 [122], S. 51

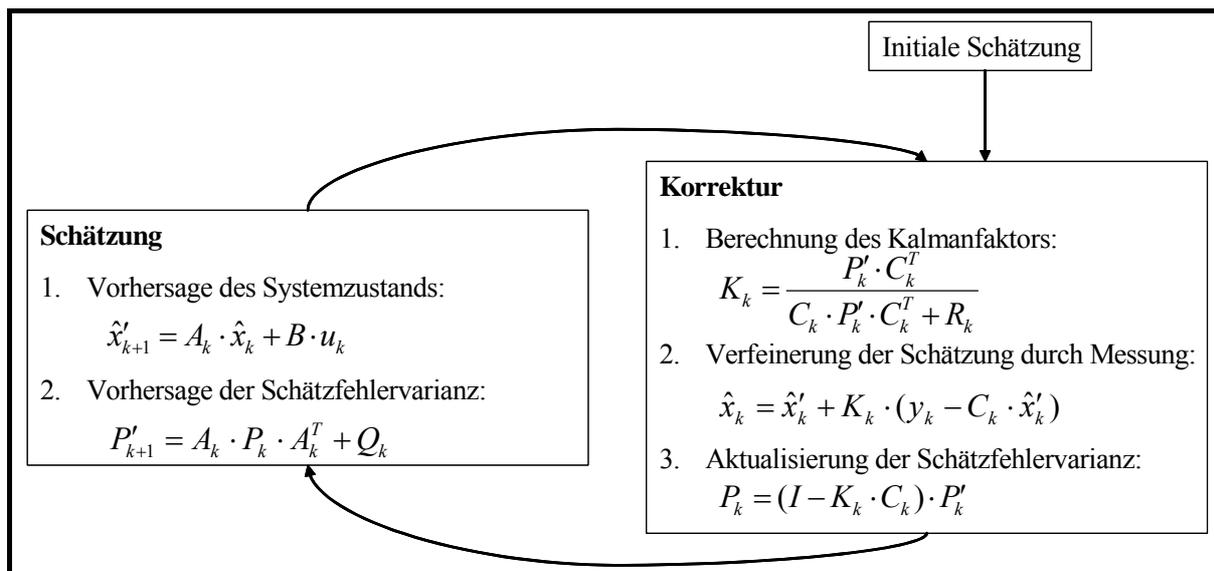


Bild 8.16: Iterationsschritte des Kalmanfilters¹⁶⁹

8.3.4 Integration des Fahrwerkmodells in den Kalmanfilter

Zur Integration des Fahrwerkmodells in den Kalmanfilter müssen sämtliche Zustandsvariablen des Einspurmodells bestimmt werden. Diese sind die Hubhöhe z und die Hubgeschwindigkeit \dot{z} der Karosserie sowie deren Nickwinkel θ und Nickrate $\dot{\theta}$:

$$x = \begin{bmatrix} \Delta z \\ \Delta \dot{z} \\ \Delta \theta \\ \Delta \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (8.45)$$

Da das Modell ein passives Fahrwerk repräsentiert, kann der Fahrer nur über Brems- und Beschleunigungsmanöver den Zustand des Modells beeinflussen:

$$u = [a_x] \quad (8.46)$$

Störungen treten als Fahrbahnunebenheiten auf, die direkt auf die Federbeine wirken und mit den Höhenstandssensoren gemessen werden:

$$y = \begin{bmatrix} \Delta z_v \\ \Delta z_h \end{bmatrix} \quad (8.47)$$

Die Matrix A beschreibt den Übergang von einem Systemzustand zum nächsten. Die Grundlage zur Entwicklung dieser Matrix bilden die Taylorformeln:

¹⁶⁹ LAFRENZ 2002 [75], S. 6.82

$$s(t + \Delta t) = s_0(t) + v(t) \cdot \Delta t + 0,5 \cdot a(t) \Delta t^2 \quad (8.48)$$

$$v(t + \Delta t) = v_0(t) + a(t) \cdot \Delta t \quad (8.49)$$

Da der Kalmanfilter die Zustände nur zu diskreten Zeitpunkten berechnet, müssen die Taylorformeln diskretisiert werden. Für eine Taktzeit $\Delta t = 1 \text{ s}$ gilt:

$$s_{k+1} = s_k + v_k + 0,5 \cdot a_k \quad (8.50)$$

$$v_{k+1} = v_k + a_k \quad (8.51)$$

Übertragen auf das Einspurmodell berechnen die Taylorformeln die Zustandsgrößen des Modells zum nächsten Zeitpunkt $k+1$:

$$\Delta z_{k+1} = \Delta z_k + \Delta \dot{z}_k + 0,5 \cdot \Delta \ddot{z}_k \quad \text{sowie} \quad \Delta \dot{z}_{k+1} = \Delta \dot{z}_k + \Delta \ddot{z}_k \quad (8.52)$$

$$\Delta \theta_{k+1} = \Delta \theta_k + \Delta \dot{\theta}_k + 0,5 \cdot \Delta \ddot{\theta}_k \quad \text{sowie} \quad \Delta \dot{\theta}_{k+1} = \Delta \dot{\theta}_k + \Delta \ddot{\theta}_k \quad (8.53)$$

Das Einsetzen der Formeln 8.23 und 8.24 zur Bestimmung der Feder-Dämpfer-Kräfte in die Formeln 8.19 und 8.20, die den Impuls- und Drallsatz repräsentieren, ergibt die mathematische Darstellung des Wirkmechanismus, der das Modell in den nächsten Zustand versetzt, wenn keine äußeren Einflüsse vorhanden sind:

$$m_{Fzg.} \cdot \Delta \ddot{z} = -c_v \cdot \Delta z_v - d_v \cdot \Delta \dot{z}_v - c_h \cdot \Delta z_h - d_h \cdot \Delta \dot{z}_h \quad (8.54)$$

$$\Phi_Y \cdot \Delta \ddot{\theta} = (-c_h \cdot \Delta z_h - d_h \cdot \Delta \dot{z}_h) \cdot l_h - (-c_v \cdot \Delta z_v - d_v \cdot \Delta \dot{z}_v) \cdot l_v \quad (8.55)$$

Der Modellzustand wird hier über die Federbeinlängen Δz_v und Δz_h der beiden Achsen angegeben. Werden diese nach den Formeln 8.36 und 8.37 durch die Hubhöhe und den Nickwinkel der Karosserie ersetzt, ergeben sich folgende Abhängigkeiten:

$$\begin{aligned} m_{Fzg.} \cdot \Delta \ddot{z} &= -c_v \cdot (\Delta z - l_v \cdot \Delta \theta) - d_v \cdot (\Delta \dot{z} - l_v \cdot \Delta \dot{\theta}) - c_h \cdot (\Delta z + l_h \cdot \Delta \theta) - d_h \cdot (\Delta \dot{z} + l_h \cdot \Delta \dot{\theta}) \\ \Rightarrow \Delta \ddot{z} &= -(c_v + c_h) \cdot \frac{\Delta z}{m_{Fzg.}} - (d_v + d_h) \cdot \frac{\Delta \dot{z}}{m_{Fzg.}} + (c_v \cdot l_v - c_h \cdot l_h) \cdot \frac{\Delta \theta}{m_{Fzg.}} + (d_v \cdot l_v - d_h \cdot l_h) \cdot \frac{\Delta \dot{\theta}}{m_{Fzg.}} \end{aligned} \quad (8.56)$$

$$\begin{aligned} \Phi_Y \cdot \Delta \ddot{\theta} &= c_v l_v \cdot (\Delta z - l_v \cdot \Delta \theta) + d_v l_v \cdot (\Delta \dot{z} - l_v \cdot \Delta \dot{\theta}) - c_h l_h \cdot (\Delta z + l_h \cdot \Delta \theta) - d_h l_h \cdot (\Delta \dot{z} + l_h \cdot \Delta \dot{\theta}) \\ \Rightarrow \Delta \ddot{\theta} &= (c_v l_v - c_h l_h) \cdot \frac{\Delta z}{\Phi_Y} + (d_v l_v - d_h l_h) \cdot \frac{\Delta \dot{z}}{\Phi_Y} - (c_v \cdot l_v^2 + c_h \cdot l_h^2) \cdot \frac{\Delta \theta}{\Phi_Y} - (d_v \cdot l_v^2 + d_h \cdot l_h^2) \cdot \frac{\Delta \dot{\theta}}{\Phi_Y} \end{aligned} \quad (8.57)$$

Die beiden Formeln zur Hub- und Winkelbeschleunigung ergeben zusammen mit den Taylorformeln für die Vertikaldynamik die Übergangsmatrix A im Kalmanfilter:

$$A = \begin{bmatrix} 1 - \frac{c_v + c_h}{2m_{Fzg.}} & 1 - \frac{d_v + d_h}{2m_{Fzg.}} & \frac{c_h l_h - c_v l_v}{2m_{Fzg.}} & \frac{d_h l_h - d_v l_v}{2m_{Fzg.}} \\ -\frac{c_v + c_h}{m_{Fzg.}} & 1 - \frac{d_v - d_h}{m_{Fzg.}} & \frac{c_h l_h - c_v l_v}{m_{Fzg.}} & \frac{d_h l_h - d_v l_v}{m_{Fzg.}} \\ \frac{c_v l_v - c_h l_h}{2\Phi_y} & \frac{d_v l_v - d_h l_h}{2\Phi_y} & 1 - \frac{c_v l_v^2 + c_h l_h^2}{2\Phi_y} & 1 - \frac{d_v l_v^2 + d_h l_h^2}{2\Phi_y} \\ \frac{c_v l_v - c_h l_h}{\Phi_y} & \frac{d_v l_v - d_h l_h}{\Phi_y} & -\frac{c_v l_v^2 + c_h l_h^2}{\Phi_y} & 1 - \frac{d_v l_v^2 + d_h l_h^2}{\Phi_y} \end{bmatrix} \quad (8.58)$$

Ein Brems- oder Beschleunigungsvorgang \ddot{x} des Fahrzeugs wird im Kalmanfilter als Steuerungseinfluss modelliert. Dabei entstehen zusätzliche Kräfte am Fahrzeug, die zum Teil über Längslenker an der Karosserie abgestützt werden. Übrig bleiben die Kräfte ΔF_{vz} und ΔF_{hz} , welche die Vertikaldynamik beeinflussen:

$$m_{Fzg.} \cdot \Delta \ddot{z} = \Delta F_{vz} + \Delta F_{hz} \quad (8.59)$$

$$\Phi_y \cdot \ddot{\theta} = \Delta F_{hz} \cdot l_h - \Delta F_{vz} \cdot l_v \quad (8.60)$$

Werden in diese beiden Formeln die Berechnungsvorschriften für die vertikalen Kräfte ΔF_{vz} und ΔF_{hz} eingesetzt, ergibt sich der Zusammenhang \ddot{x} zwischen der Längsbeschleunigung entlang der x-Achse sowie der Vertikalbeschleunigung \ddot{z} und der Winkelbeschleunigung $\ddot{\theta}$ um die Nickachse:

$$\Delta \ddot{z} = \ddot{x} \left(\frac{\alpha \cdot z_{Gv}}{l_{Gv}} + \frac{\alpha \cdot z_{Gh}}{l_{Gh}} - \frac{z_{Gh}}{l_{Gh}} + \Delta z \left(\frac{\alpha}{l_{Gv}} + \frac{\alpha}{l_{Gh}} - \frac{1}{l_{Gh}} \right) + \Delta \theta \left(\frac{\alpha \cdot l_h}{l_{Gh}} - \frac{\alpha \cdot l_v}{l_{Gv}} - \frac{l_h}{l_{Gh}} \right) \right) \quad (8.61)$$

$$\ddot{\theta} = \ddot{x} \frac{m_{Fzg.}}{\Phi_y} \left(\frac{\alpha \cdot z_{Gh} \cdot l_h}{l_{Gh}} - \frac{\alpha \cdot z_{Gv} \cdot l_v}{l_{Gv}} - z_s + \Delta z \left(\frac{\alpha \cdot l_h}{l_{Gh}} - \frac{\alpha \cdot l_v}{l_{Gv}} - \frac{l_h}{l_{Gh}} \right) + \Delta \theta \left(\frac{\alpha \cdot l_h^2}{l_{Gh}} + \frac{\alpha \cdot l_v^2}{l_{Gv}} - \frac{l_h^2}{l_{Gh}} \right) \right) \quad (8.62)$$

Es zeigt sich, dass der Einfluss der Längsbeschleunigung auf die Vertikaldynamik vom aktuellen Zustand Δz und $\Delta \theta$ des Modells abhängt. Daher besteht die Matrix B nicht aus einer einzelnen Matrix, sondern aus einem Vektor, der den zustandsunabhängigen Teil repräsentiert und einer Matrix, die zuvor mit dem Zustandsvektor des Modells multipliziert wird.

Da das Modell ein Fahrzeug mit Hinterradantrieb darstellt, unterscheidet sich die Kraftverteilung beim Bremsen ($\alpha > 0,5$) und beim Beschleunigen ($\alpha = 0$). Daher werden für Brems- und Beschleunigungsmanöver getrennte Matrizen B_{neg} und B_{pos} aufgestellt:

$$B_{neg} = \begin{bmatrix} \frac{\alpha \cdot z_{Gv}}{2 \cdot l_{Gv}} + \frac{\alpha \cdot z_{Gh}}{2 \cdot l_{Gh}} - \frac{z_{Gh}}{2 \cdot l_{Gh}} \\ \frac{\alpha \cdot z_{Gv}}{l_{Gv}} + \frac{\alpha \cdot z_{Gh}}{l_{Gh}} - \frac{z_{Gh}}{l_{Gh}} \\ \frac{\alpha \cdot z_{Gh} \cdot l_h}{2 \cdot l_{Gh}} - \frac{\alpha \cdot z_{Gv} \cdot l_v}{2 \cdot l_{Gv}} - \frac{z_s}{2} \\ \frac{\alpha \cdot z_{Gh} \cdot l_h}{l_{Gh}} - \frac{\alpha \cdot z_{Gv} \cdot l_v}{l_{Gv}} - z_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\alpha}{2 \cdot l_{Gv}} + \frac{\alpha}{2 \cdot l_{Gh}} - \frac{1}{2 \cdot l_{Gh}} & 0 & \frac{\alpha \cdot l_h}{2 \cdot l_{Gh}} - \frac{\alpha \cdot l_v}{2 \cdot l_{Gv}} - \frac{l_h}{2 \cdot l_{Gh}} & 0 \\ \frac{\alpha}{l_{Gv}} + \frac{\alpha}{l_{Gh}} - \frac{1}{l_{Gh}} & 0 & \frac{\alpha \cdot l_h}{l_{Gh}} - \frac{\alpha \cdot l_v}{l_{Gv}} - \frac{l_h}{l_{Gh}} & 0 \\ \frac{m_{Fzg.}}{\Phi_y} \left(\frac{\alpha \left(\frac{l_h}{l_{Gh}} - \frac{l_v}{l_{Gv}} \right) - \frac{l_h}{2 \cdot l_{Gh}}}{2 \cdot l_{Gh}} \right) & 0 & \frac{m_{Fzg.}}{\Phi_y} \left(\frac{\alpha \left(\frac{l_h^2}{l_{Gh}} + \frac{l_v^2}{l_{Gv}} \right) - \frac{l_h^2}{2 \cdot l_{Gh}}}{2 \cdot l_{Gh}} \right) & 0 \\ \frac{m_{Fzg.}}{\Phi_y} \left(\alpha \left(\frac{l_h}{l_{Gh}} - \frac{l_v}{l_{Gv}} \right) - \frac{l_h}{l_{Gh}} \right) & 0 & \frac{m_{Fzg.}}{\Phi_y} \left(\alpha \left(\frac{l_h^2}{l_{Gh}} + \frac{l_v^2}{l_{Gv}} \right) - \frac{l_h^2}{l_{Gh}} \right) & 0 \end{bmatrix} \cdot x \quad (8.63)$$

$$B_{pos} = \begin{bmatrix} \frac{z_{Gh}}{2 \cdot l_{Gh}} \\ -\frac{z_{Gh}}{l_{Gh}} \\ -\frac{z_S}{2} \\ -z_S \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{2 \cdot l_{Gh}} & 0 & -\frac{l_h}{2 \cdot l_{Gh}} & 0 \\ -\frac{1}{l_{Gh}} & 0 & -\frac{l_h}{l_{Gh}} & 0 \\ \frac{m_{Fzg} \cdot l_h}{2 \cdot \Phi_Y \cdot l_{Gh}} & 0 & -\frac{m_{Fzg} \cdot l_h^2}{2 \cdot \Phi_Y \cdot l_{Gh}} & 0 \\ \frac{m_{Fzg} \cdot l_h}{\Phi_Y \cdot l_{Gh}} & 0 & -\frac{m_{Fzg} \cdot l_h^2}{\Phi_Y \cdot l_{Gh}} & 0 \end{bmatrix} \cdot x \quad (8.64)$$

Für die Messmatrix C wird wieder die Approximation des Sinus des Nickwinkels durch den Nickwinkel selbst angewendet:

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -l_v & 0 \\ 1 & 0 & l_h & 0 \end{bmatrix} \quad (8.65)$$

Auf das System wirken Fahrbahnunebenheiten als vertikale Störbeschleunigung w_z und als Drehbeschleunigung w_θ um die Querachse. Über die Taylorformeln ergibt sich daraus die Kovarianzmatrix Q des Systemfehlers als 4x4 Matrix:

$$Q = \begin{bmatrix} 0,25w_z & 0,5w_z & 0 & 0 \\ 0,5w_z & w_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,25w_\theta & 0,5w_\theta \\ 0 & 0 & 0,5w_\theta & w_\theta \end{bmatrix} \quad (8.66)$$

Die Kovarianzmatrix R für das Messrauschen ist eine 2x2 Matrix:

$$R = \begin{bmatrix} v_v & 0 \\ 0 & v_h \end{bmatrix} \quad (8.67)$$

8.4 Simulation der Blendbeleuchtungsstärken und Leuchtdichten

Die Simulation ist ein Hilfsmittel, mit dem ohne den Aufbau teurer Prototypen das Verhalten eines Systems bereits in der frühen Entwurfs- und Entwicklungsphase untersucht werden kann¹⁷⁰.

¹⁷⁰ WALLASCHEK 1995 [118], S. 35

Übertragen auf das System zur Anpassung der Lichtverteilung an die vertikale Straßenform sollen mit Hilfe einer Simulationssoftware zwei für die Fahrzeugführer relevante lichttechnische Größen berechnet werden:

- die Beleuchtungsstärken am entgegenkommenden Fahrerauge als Maß für die Blendung und
- die Leuchtdichten, die von der Fahrbahnoberfläche bei Beleuchtung durch die Fahrzeugscheinwerfer zurück zum Fahrer reflektiert werden.

Im Rahmen von Experimenten werden die Eingangsparameter der Simulation verändert und anhand der Ergebnisse der Einfluss der Parameter auf die berechneten Größen untersucht.

Die beiden wichtigsten Eingangsparameter sind die vertikale Straßenkrümmung und die Wahl der Verstellstrategie, welche den Winkel β der optischen Scheinwerferachse zur Anpassung der Lichtverteilung verändert. Als weitere Eingangsparameter dienen die Fahrbahnbreite und die Oberflächenbeschaffenheit der Straße, die Fahrzeuggeometrie sowie die Lichtverteilung des Abblendlichtes.

In der Lichttechnik gibt es bereits zahlreiche Simulationsprogramme. Diese dienen entweder zur Visualisierung einer Lichtverteilung im Straßenverkehr, zur Bestimmung von Sichtweiten und Erkennbarkeitsentfernungen aus einer gegebenen Lichtverteilung oder zur Berechnung einer Scheinwerferlichtverteilung anhand der verbauten Optiken und der Form des Reflektors¹⁷¹. Eine analytische Auswertung der Lichtverteilung unter Berücksichtigung der vertikalen Straßenform fehlt bisher.

Das Ziel der hier vorgestellten Simulationssoftware ist es daher, Erkenntnisse über den Einfluss einer vertikal angepassten Lichtverteilung auf die Wahrnehmungsbedingungen der Fahrzeugführer beim Fahren durch vertikale Kurven zu gewinnen.

8.4.1 Simulationsmodell

Zur Durchführung einer Simulation wird das System aus der Realität in einem Modell abgebildet. Die im Modell verwendeten Objekte müssen den Objekten im realen System ähnlich sein, wobei sich die Ähnlichkeit auf diejenigen Eigenschaften bezieht, die bezüglich des Untersuchungsgegenstandes wesentlich sind¹⁷². Wichtig bei der Modellierung ist die Wahl des Detaillierungsgrades. Zu viele Details erhöhen den Zeitbedarf bei der Modellerstel-

¹⁷¹ Eine Übersicht über den Stand der Simulationsprogramme in der Fahrzeuglichttechnik befindet sich in VON HOFFMANN 2003 [116], S. 40 f.

¹⁷² LORENZ 2002 [84], S. 3

lung und die Rechenzeit im Computer bei den Experimenten. Eine geringe Detaillierung führt dagegen nur zu groben Ergebnissen und damit zu kaum verwertbaren Erkenntnissen¹⁷³.

Das Simulationsmodell besteht aus drei Objekten:

- dem Straßenraum,
- der Fahrzeuggeometrie und
- der Lichtverteilung der Scheinwerfer.

Die relevanten Eigenschaften des **Straßenraums** sind die vertikale Straßenkrümmung, der seitliche Abstand der Fahrspur des entgegenkommenden Fahrzeugs und die Beschaffenheit der Fahrbahnoberfläche. Der Gegenstand der Untersuchung ist die vertikale Anpassung der Lichtverteilung. Daher gibt es keine horizontalen Kurven im Straßenraum des Modells und es gilt die Annahme, dass sich die Fahrzeuge mittig in ihren Fahrspuren bewegen. Da das Nachbilden des Reflexionsverhaltens der Fahrbahnoberfläche für verschiedene Wetterbedingungen einen sehr großen Aufwand verursachen würde, werden nur trockene Straßen betrachtet.

In der **Fahrzeuggeometrie** werden die Anbauhöhe und der seitliche Abstand der Scheinwerfer am Fahrzeug beschrieben. Ein weiterer Parameter ist die Lage des Fahrerkopfes im Fahrzeug, welche durch die Höhe und den lateralen Abstand zur Fahrzeugmitte definiert ist.

Die **Lichtverteilung** bzw. der Lichtbündelquerschnitt der Scheinwerfer wird durch die Beleuchtungsstärken E in Abhängigkeit vom horizontalen und vertikalen Winkel dargestellt (siehe Bild 8.17). Der Ursprung des Koordinatensystems entspricht der optischen Scheinwerferachse. Die Beleuchtungsstärken E werden mit dem Goniometer in einer Entfernung von $d = 25 \text{ m}$ gemessen und lassen sich daher direkt in Lichtstärken I umrechnen¹⁷⁴. Eine vertikale Winkelverstellung der optischen Scheinwerferachse bewirkt eine senkrechte Verschiebung des Lichtbündelquerschnitts.

¹⁷³ KUHN/RABE 1998 [69], S. 3

¹⁷⁴ $I = \frac{(d)^2}{\Omega_0} \cdot E$ mit Einheitsraumwinkel Ω_0

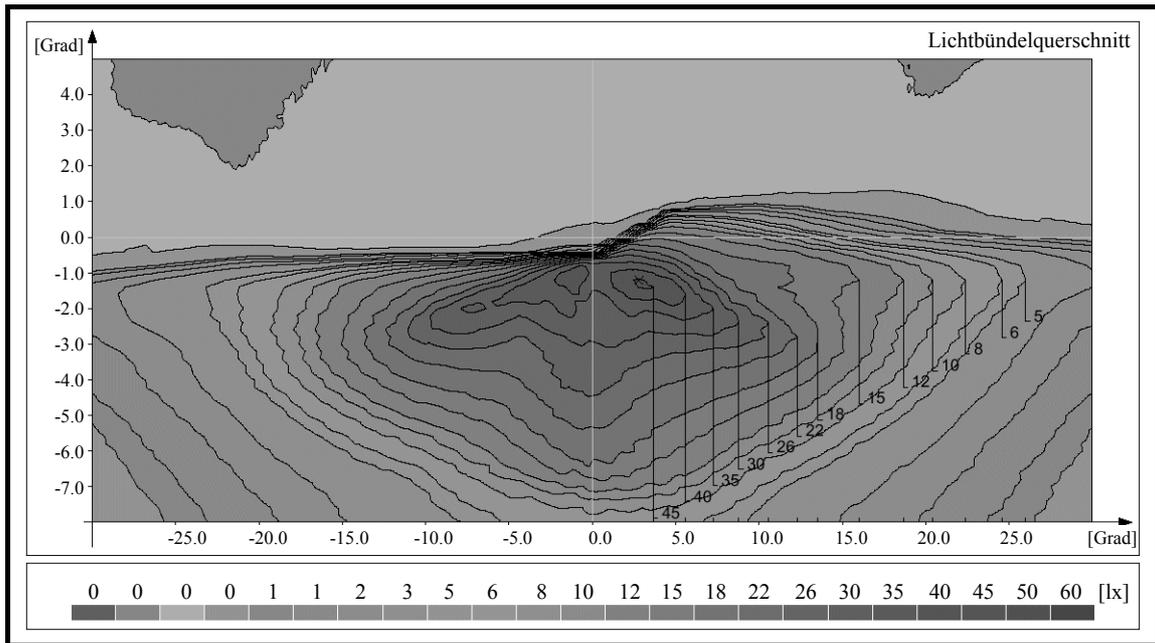


Bild 8.17: Lichtbündelquerschnitt eines Xenon-Scheinwerfers

8.4.2 Berechnung der Winkelkoordinaten

Aus den Geometriedaten des Fahrzeugs und den Informationen über den Straßenraum lässt sich der Verlauf der Straße in den Lichtbündelquerschnitt eines Scheinwerfers projizieren.

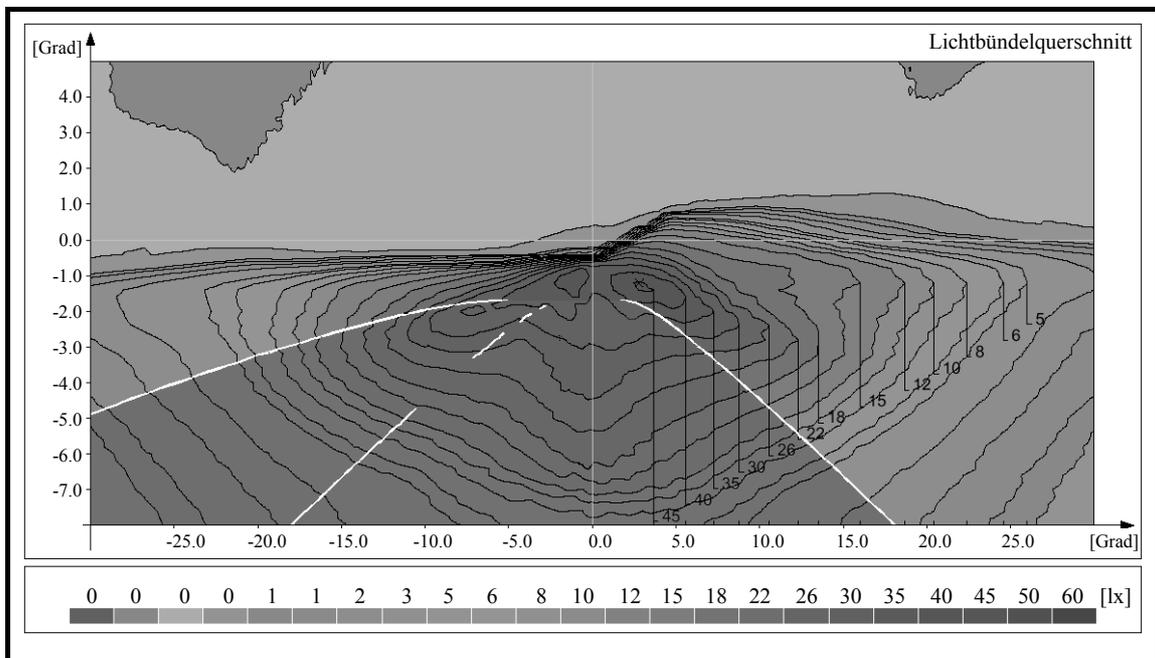


Bild 8.18: Lichtbündelquerschnitt mit Straßenprojektion

Bild 8.18 zeigt eine solche Projektion und stellt den Blick aus einem Scheinwerfer auf eine Kuppe dar. Ein beliebiger Punkt auf der Fahrbahnoberfläche in einer bestimmten Entfernung d_x zum Fahrzeug und mit einem bestimmten Abstand d_y zur Mitte der Fahrspur lässt sich eindeutig einem Winkelpaar (σ, ρ) im Koordinatensystem des Scheinwerfers zuordnen. Der vertikale Winkel ρ berechnet sich nach folgenden Formeln:

$$\rho_{Kuppe} = -\arctan\left(\frac{R_v + h_{SWk} - R_v \cdot \cos\left(\frac{d_x \cdot 180^\circ}{R_v \cdot \pi}\right)}{R_v \cdot \sin\left(\frac{d_x \cdot 180^\circ}{R_v \cdot \pi}\right)}\right) \quad (8.68)$$

$$\rho_{Wanne} = -\arctan\left(\frac{h_{SWw} - R_v + R_v \cdot \cos\left(\frac{d_x \cdot 180^\circ}{R_v \cdot \pi}\right)}{R_v \cdot \sin\left(\frac{d_x \cdot 180^\circ}{R_v \cdot \pi}\right)}\right) \quad (8.69)$$

$$\rho_{Ebene} = -\arctan\left(\frac{h_{SW}}{d_x}\right) \quad (8.70)$$

Der horizontale Winkel σ ergibt sich aus der Entfernung d_x und dem seitlichen Abstand des Punktes zur Fahrspurmitte d_y , sowie dem lateralen Abstand der Scheinwerfer d_{SW} zueinander:

$$\sigma_{\text{linker SW}} = \arctan\left(\frac{d_y + 0,5 \cdot d_{SW}}{d_x}\right) \quad (8.71)$$

$$\sigma_{\text{rechter SW}} = \arctan\left(\frac{d_y - 0,5 \cdot d_{SW}}{d_x}\right) \quad (8.72)$$

Diese Winkelkoordinaten für beliebige Punkte auf der Fahrbahnoberfläche werden zur Berechnung der dort reflektierten Leuchtdichten benötigt.

Zur Analyse der Blendung müssen zudem die Winkelpaare bestimmt werden, die der Lage des entgegenkommenden Fahrerauges während der Annäherung entsprechen.

Sind die Daten (Höhe und seitlicher Abstand zur Fahrzeugmitte) des Fahrerauges im entgegenkommenden Fahrzeug gegeben, dann ist es möglich, in den Lichtbündelquerschnitt des Scheinwerfers eine Linie einzuzichnen, die alle Orte des entgegenkommenden Fahrerauges während der Annäherung repräsentiert (siehe Bild 8.19).

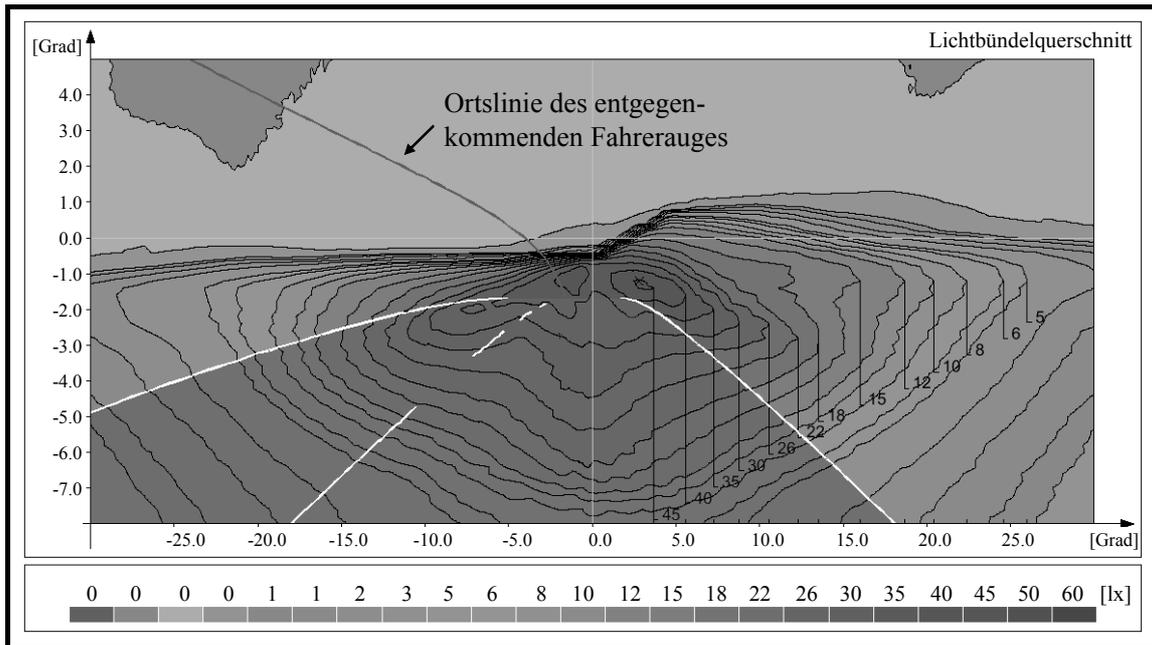


Bild 8.19: Lichtbündelquerschnitt mit Straßenprojektion und Ortslinie des entgegenkommenden Fahrerauges

Die Zuordnung dieser Ortslinie zur vertikalen Winkelkoordinate ρ erfolgt nach folgenden Formeln:

$$\rho_{Kuppe} = -\arctan \left(\frac{R_v + h_{SWk} - (R_v + h_A) \cdot \cos \left(\frac{d_x \cdot 180^\circ}{R_v \cdot \pi} \right)}{(R_v + h_A) \cdot \sin \left(\frac{d_x \cdot 180^\circ}{R_v \cdot \pi} \right)} \right) \quad (8.73)$$

$$\rho_{Wanne} = -\arctan \left(\frac{h_{SWw} - R_v + (R_v + h_A) \cdot \cos \left(\frac{d_x \cdot 180^\circ}{R_v \cdot \pi} \right)}{(R_v + h_A) \cdot \sin \left(\frac{d_x \cdot 180^\circ}{R_v \cdot \pi} \right)} \right) \quad (8.74)$$

$$\rho_{Ebene} = -\arctan \left(\frac{h_{SW} - h_A}{d_x} \right) \quad (8.75)$$

Der horizontale Winkel σ berechnet sich aus dem Verhältnis von seitlichem Abstand zwischen Scheinwerfer und Auge zur Entfernung d_x . Der seitliche Abstand setzt sich dabei aus dem Fahrspurabstand d_{Str} , der halben Entfernung der Scheinwerfer $d_{SW}/2$ zueinander und dem Abstand d_A des entgegenkommenden Fahrerauges zur Fahrspurmitte zusammen:

$$\sigma_{\text{lin ker SW}} = \arctan \left(\frac{d_A - d_{Str} + 0,5 \cdot d_{SW}}{d_x} \right) \quad (8.76)$$

$$\sigma_{\text{rechter SW}} = \arctan\left(\frac{d_A - d_{Str} - 0,5 \cdot d_{SW}}{d_x}\right) \quad (8.77)$$

Anhand der gezeigten Formeln lässt sich aus den Eingangsparametern und der Entfernung d_x jedem Punkt auf der Fahrbahnoberfläche und auf der Ortslinie des entgegenkommenden Fahrerrauges einem Winkelpaar (σ, ρ) zuordnen, welches der Blickrichtung aus dem Scheinwerfer zu dem Punkt entspricht. Die Bestimmung des Winkelpaars erfolgt für jeden der beiden Scheinwerfer getrennt.

8.4.3 Berechnung der Beleuchtungsstärken am Fahrerraug

Aus dem berechneten Winkelpaaren (σ, ρ) und der vertikalen Verstellung β der Scheinwerfer¹⁷⁵ lassen sich mit den Goniometerdaten die Beleuchtungsstärken $E(\sigma, \rho + \beta)$ - bezogen auf eine Entfernung 25 m - bestimmen und daraus die Lichtstärken $I(\sigma, \rho + \beta)$ berechnen, die der Scheinwerfer zu jedem Punkt auf der Augelinie des Gegenverkehrs abstrahlt:

$$I(\sigma, \rho + \beta) = \frac{(25\text{m})^2}{\Omega_0} \cdot E(\sigma, \rho + \beta) \quad (8.78)$$

Aus der Lichtstärke I , der Entfernung d_x und dem Winkelpaar (σ, ρ) ergibt sich die Blendbeleuchtungsstärke E_A am entgegenkommenden Fahrerraug:

$$E_A = E_{A \text{ lin ker SW}} + E_{A \text{ rechter SW}} \quad (8.79)$$

$$E_{A \text{ lin ker SW}} = \frac{I_{\text{lin ker SW}}(\sigma, \rho + \beta)}{d_x^2 \cdot (1 + \tan^2(\sigma_{\text{lin ker SW}}) + \tan^2(\rho))} \quad (8.80)$$

$$E_{A \text{ rechter SW}} = \frac{I_{\text{rechter SW}}(\sigma, \rho + \beta)}{d_x^2 \cdot (1 + \tan^2(\sigma_{\text{rechter SW}}) + \tan^2(\rho))} \quad (8.81)$$

Die berechneten Beleuchtungsstärken E_A während der Annäherung zweier Fahrzeuge lassen sich über die Entfernung d_x zwischen beiden Fahrzeugen in einem Diagramm darstellen. Bei einer Begegnung auf einer Kuppe muss berücksichtigt werden, dass in größeren Entfernungen keine Beleuchtungsstärken am entgegenkommenden Fahrerraug entstehen, weil die Fahrbahnoberfläche der Kuppe die direkte Sichtverbindung zwischen Scheinwerfer und Auge unterbricht. Dadurch entstehen senkrechte Anstiege im Verlauf der Beleuchtungsstärken (vgl. Bild 8.20). Zu Vergleichszwecken zeigt das Diagramm zudem die Kurve der Beleuchtungsstärken bei einer Annäherung auf einer ebenen Straße.

¹⁷⁵ Die Verstellung dient der Anpassung der Lichtverteilung an Kuppen und Wannen.

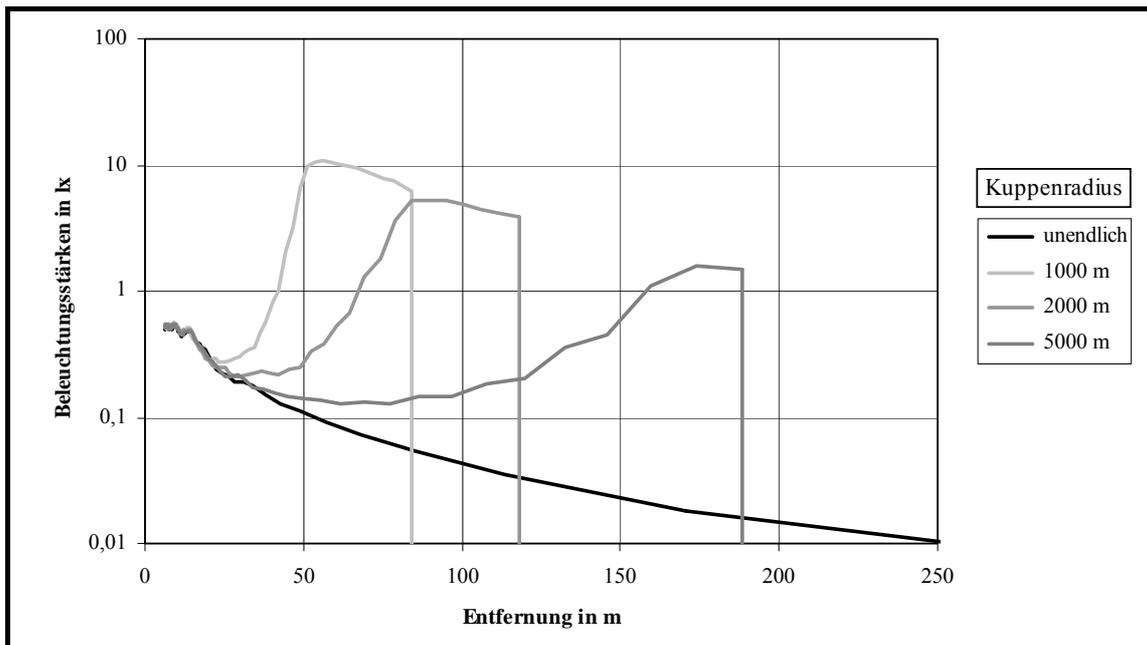


Bild 8.20: Beleuchtungsstärken am entgegenkommenden Fahrerauge auf Kuppen

Bild 8.21 zeigt beispielhaft die Beleuchtungsstärken am Auge des Gegenverkehrs bei einer Begegnung in Wannen mit verschiedenen Radien.

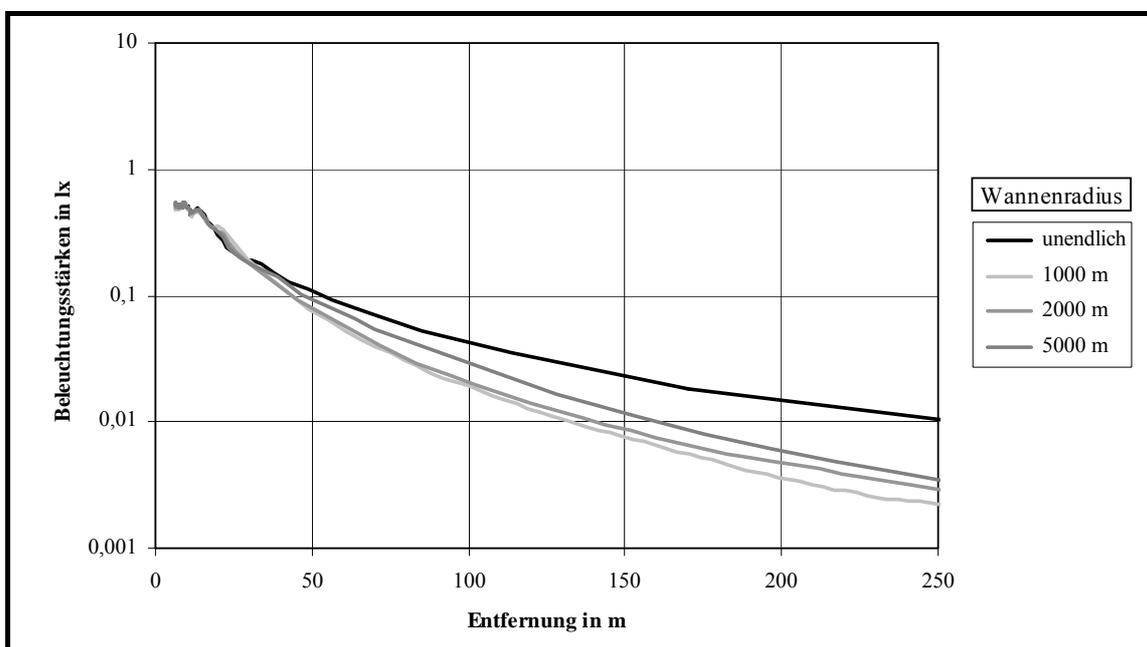


Bild 8.21: Beleuchtungsstärken am entgegenkommenden Fahrerauge in Wannen

Durch Variation der vertikalen Verstellung β der optischen Scheinwerferachse lässt sich der Einfluss einer angepassten Lichtverteilung auf die Blendung des Gegenverkehrs bestimmen. Mit dieser Simulationssoftware werden lediglich die Beleuchtungsstärken berechnet, die

direkt vom Scheinwerfer aus auf das Auge wirken. Die Reflexionen auf der Fahrbahnoberfläche lassen sich nur mit großem Aufwand mathematisch erfassen¹⁷⁶. Sie sind zudem von der Beschaffenheit der Fahrbahnoberfläche und von Umweltbedingungen abhängig. Da in der vorliegenden Arbeit nur trockene Fahrbahnen betrachtet werden, beträgt der Anteil des Streulichts an den gesamten Augenbeleuchtungsstärken rund 10 %¹⁷⁷ und ist daher vernachlässigbar¹⁷⁸.

8.4.4 Berechnung der reflektierten Leuchtdichten

Wie für jeden Punkt auf der Ortslinie des entgegenkommenden Fahrerauges ist auch für jeden Punkt auf der Fahrbahnoberfläche die Bestimmung der dorthin abgestrahlten Lichtstärken $I(\sigma, \rho + \beta)$ aus den Winkelkoordinaten (σ, ρ) und der vertikalen Scheinwerferverstellung β möglich. Über die Entfernung des Punktes lässt sich ebenso die Beleuchtungsstärke E_{\perp} an dem Punkt berechnen:

$$E_{\perp} = E_{\text{lin ker SW}} + E_{\text{rechter SW}} \quad (8.82)$$

$$E_{\text{lin ker SW}} = \frac{I_{\text{lin ker SW}}(\sigma, \rho + \beta)}{d_x^2 \cdot (1 + \tan^2(\sigma_{\text{lin ker SW}}) + \tan^2(\rho))} \quad (8.83)$$

$$E_{\text{rechter SW}} = \frac{I_{\text{rechter SW}}(\sigma, \rho + \beta)}{d_x^2 \cdot (1 + \tan^2(\sigma_{\text{rechter SW}}) + \tan^2(\rho))} \quad (8.84)$$

Der Wert entspricht den Beleuchtungsstärken E_{\perp} auf einer Ebene, deren Flächennormale parallel zur Einfallrichtung der Lichtstärken liegt.

Die reflektierte Leuchtdichte ist das Produkt aus Beleuchtungsstärke und Leuchtdichtekoeffizient R_R für Rückreflexion:

$$L = E_{\perp} \cdot R_R(\alpha_v, \alpha_h, \beta) \quad (8.85)$$

Der Leuchtdichtekoeffizient ist abhängig vom Straßenbelag, vom vertikalen Anleuchtungswinkel β sowie vom vertikalen und horizontalen Beobachtungswinkel $\alpha_{v/h}$.

In der Simulationssoftware werden die Leuchtdichtekoeffizienten auf verschiedene Arten bestimmt:

¹⁷⁶ KREBSCHULL 1968 [68], S. 44 ff.

¹⁷⁷ LEHNERT 2001 [83], S. 63

¹⁷⁸ VON HOFFMANN 2003 [116], S. 41

- Mathematische Beschreibung des Reflexionsverhaltens nach Wambsganß für trockene Fahrbahnoberflächen¹⁷⁹ und
- Interpolation von Labormessungen an trockenen Straßenproben¹⁸⁰.

Die mathematische Approximation des Reflexionsverhaltens erfolgt für die Abhängigkeit des Leuchtdichtekoeffizienten von Anleuchtungs- und vertikalen Beobachtungswinkel in Form einer Hyperbel und für den horizontalen Beobachtungswinkel als Gerade¹⁸¹:

$$R_R = C_1 \cdot \frac{\beta}{\alpha_v} - C_2 \cdot \frac{\alpha_h}{1^0} \quad (8.86)$$

Die Koeffizienten C_1 und C_2 für werden jeden Straßenbelag aus den Messwerten unter verschiedenen Anleuchtungs- und Beobachtungswinkel berechnet und gemittelt.

Zur Bestimmung des Reflexionsverhaltens aus den Labormessungen an zwei trockenen Straßenproben wurden die Messwerte für jede Straßenprobe mit ungewichteten Splines interpoliert, um einen kontinuierlichen Verlauf des Leuchtdichtekoeffizienten über die Anleuchtungs- und vertikalen Beobachtungswinkel zu erhalten.

Bild 8.22 und Bild 8.23 zeigen beispielhaft die Simulationsergebnisse für verschiedene Kuppen- und Wannennradien bei Beleuchtung mit zwei Halogen-Scheinwerfern und bei Reflexion auf einem Fahrbahnbelag aus Diabas und Luxovit.

¹⁷⁹ WAMBSGANß 1993 [117], S. 31 ff.

¹⁸⁰ CARRARO 2004 [20], S. 7 ff.

¹⁸¹ WAMBSGANß 1993 [117], S. 25

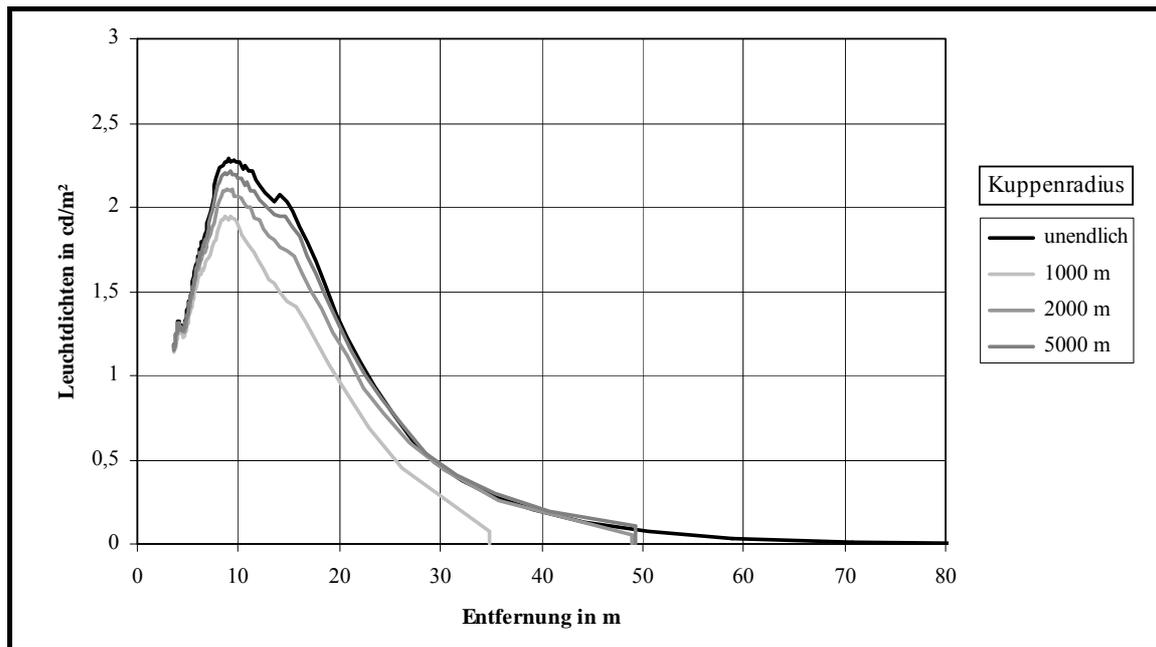


Bild 8.22: Reflektierte Leuchtdichten auf Kuppen

Als Referenz sind in beiden Diagrammen die Leuchtdichten dargestellt, die von einer ebenen Straße reflektiert werden.

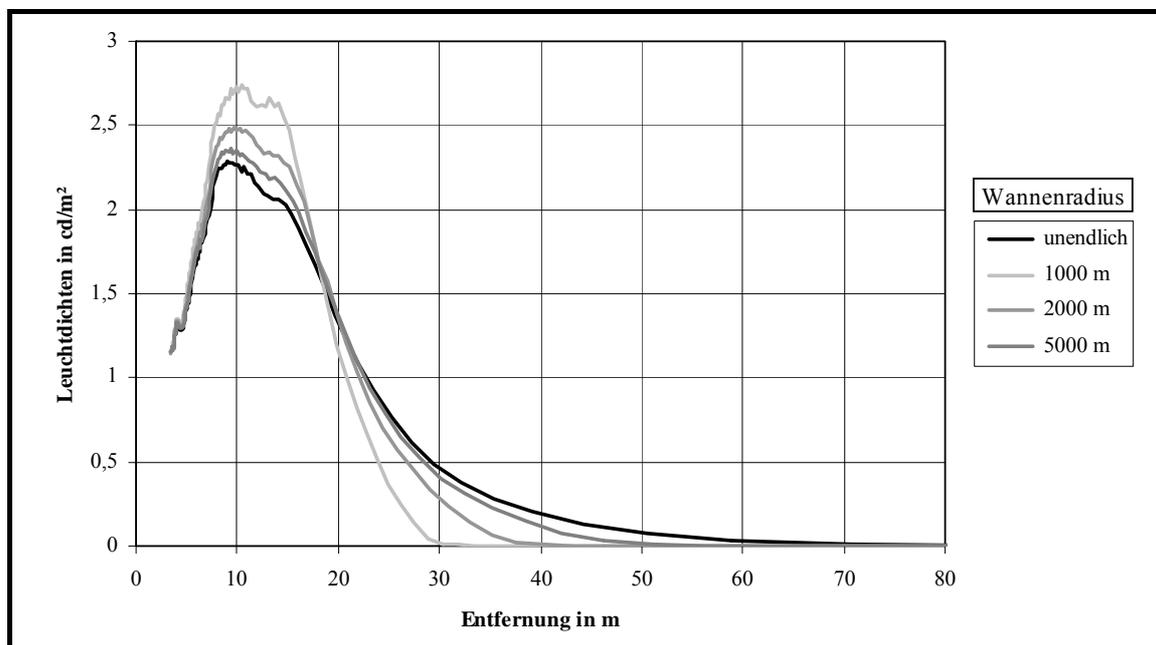


Bild 8.23: Reflektierte Leuchtdichten in Wannern

8.4.5 Validierung

Ziel der Validierung ist die Überprüfung des gesamten Simulationsmodells mit den darin umgesetzten Annahmen. Durch einen Vergleich der Daten, die das Simulationsmodell liefert, mit den Messwerten aus dem realen System lassen sich Rückschlüsse auf die Richtigkeit der Modellannahmen sowie auf die Funktionalität des Modells ziehen¹⁸².

Zur Validierung der **Blendbeleuchtungsstärken** am entgegenkommenden Fahrerauge musste eine Begegnungssituation zweier Fahrzeuge auf einer Kuppe oder in einer Wanne nachgestellt werden. An der Position des entgegenkommenden Fahrerauges wurde der Messkopf des Beleuchtungsstärkemessers befestigt (siehe Bild 8.24). Für den Verlauf der Beleuchtungsstärken über die Entfernung d_x zwischen den beiden Fahrzeugen spielt es keine Rolle, ob sich beide Fahrzeuge bewegen, oder ob ein Fahrzeug steht und das andere mit der Differenzgeschwindigkeit zwischen beiden Fahrzeugen fährt. Daher wurde das Beleuchtungsstärkemessgerät an einer Position fixiert und nur das Blendfahrzeug bewegt.

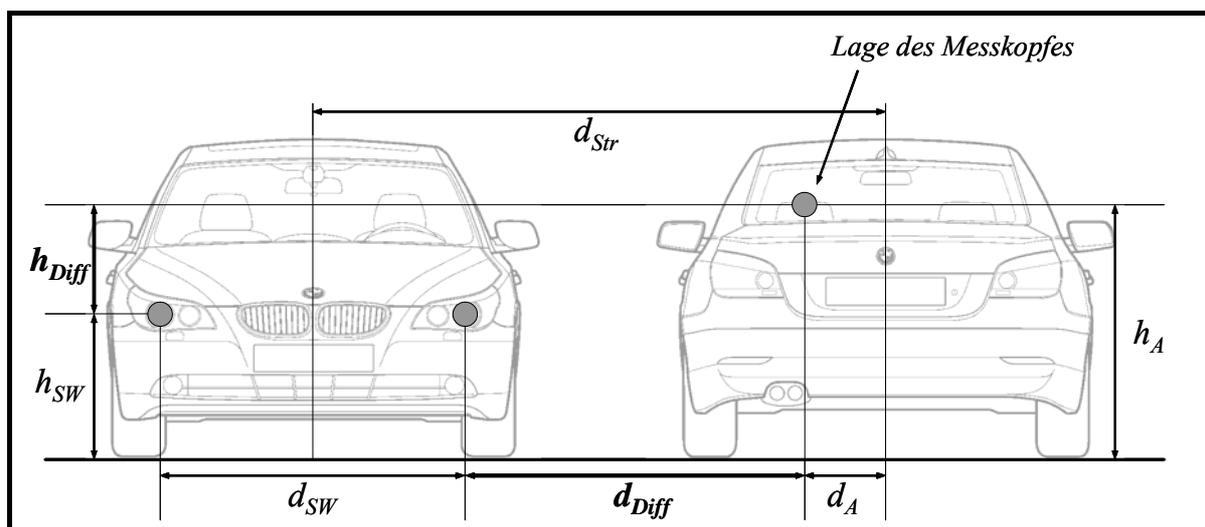


Bild 8.24: Messaufbau zur Validierung der Blendbeleuchtungsstärken vor der Drehung

In der Simulationssoftware gilt die Annahme, dass die vertikalen Radien während der Begegnungsphase der beiden Fahrzeuge konstant sein müssen. Daher wurden zur Validierung vertikale Kurven mit fest vorgegebenen und konstanten Radien benötigt. Da solche vertikalen Krümmungen in der Realität nicht vorkommen, wurden ersatzweise horizontale Kurven verwendet und die gesamte Fahrzeug- und Messgeometrie um 90° gedreht. Horizontale Kurven lassen sich auf fest vorgegebenen Radien abfahren und ermöglichen so einen Vergleich zu dem Modell der vertikalen Kurven in der Simulationssoftware.

¹⁸² LAW/KELTON 2000 [82], S. 264

Die Drehung der Fahrzeuggeometrie erfolgte durch eine vertikale Anordnung der Scheinwerfer an einem Rack an der Fahrzeugfront. Wie Bild 8.25 zeigt, wurde die Lage des Beleuchtungsstärkemessers so angepasst, dass seine relative Position zu den Scheinwerfern unverändert blieb.

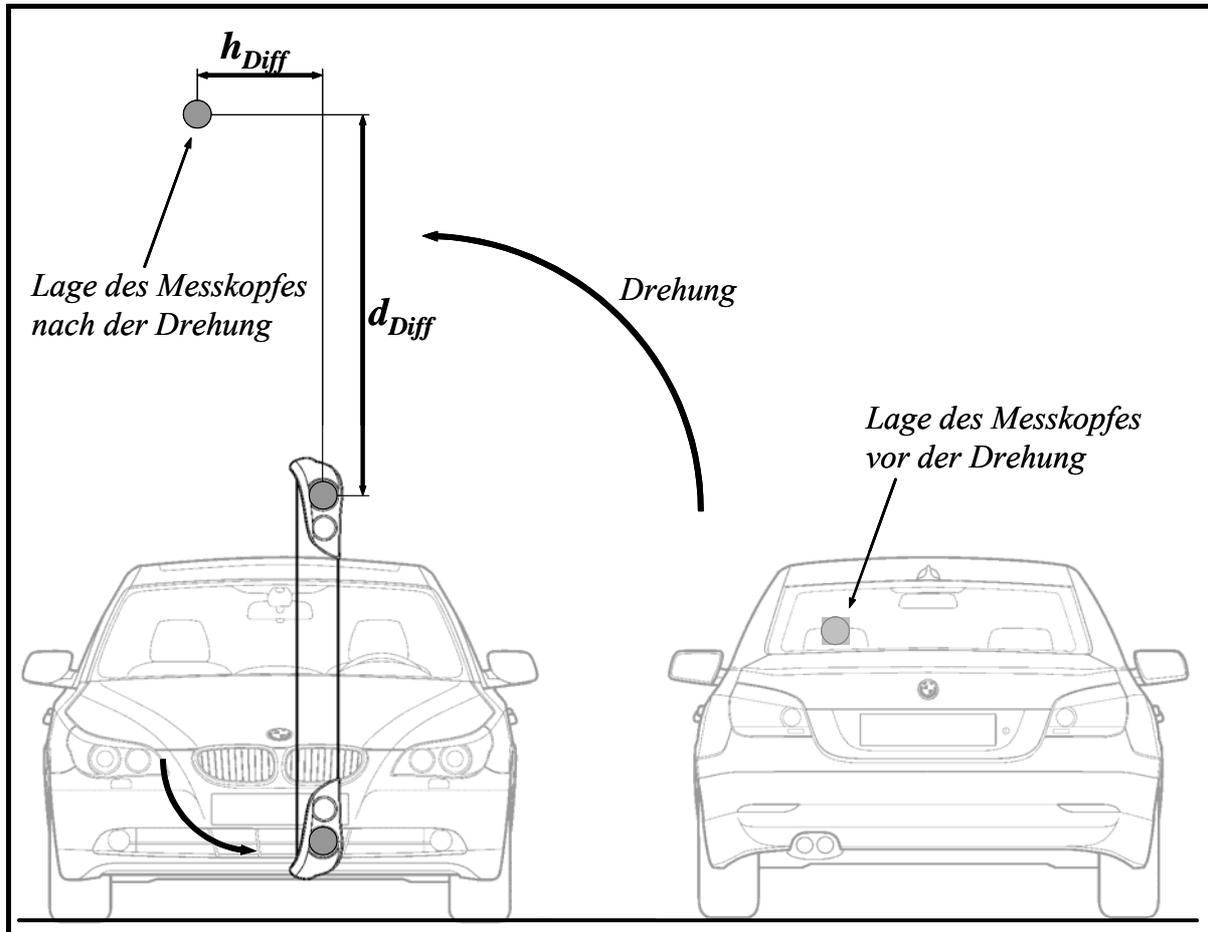


Bild 8.25: Messaufbau zur Validierung der Blendbeleuchtungsstärken nach der Drehung

Die Messungen der Blendbeleuchtungsstärken erfolgten für verschiedene Kuppen- und Wannensradien ($R_v = 1000\text{ m}$, 2000 m und 5000 m) in verschiedenen Entfernungen zwischen $d_x = 5\text{ m}$ und $d_x = 40\text{ m}$. Die Abstände zwischen den Messpunkten betrugen $\Delta d_x = 5\text{ m}$. Messungen in größeren Entfernungen waren aufgrund der begrenzten Länge des Lichtkanals nicht möglich. Um den Messaufwand zu reduzieren, wurden lediglich die Beleuchtungsstärken des linken (bzw. nach der Drehung oberen) Scheinwerfers gemessen. Die Berechnung der simulierten Beleuchtungsstärken erfolgte daher auch nur mit dem linken Scheinwerfer. Spezielle Blenden vor dem Scheinwerfer verhinderten Streulicht, welches über Boden, Decke und Wände zum Messkopf gelangen konnte.

Die folgenden Diagramme zeigen den Vergleich der Messungen an einem Xenon-Scheinwerfer mit den Beleuchtungsstärken, welche die Simulationssoftware berechnet.

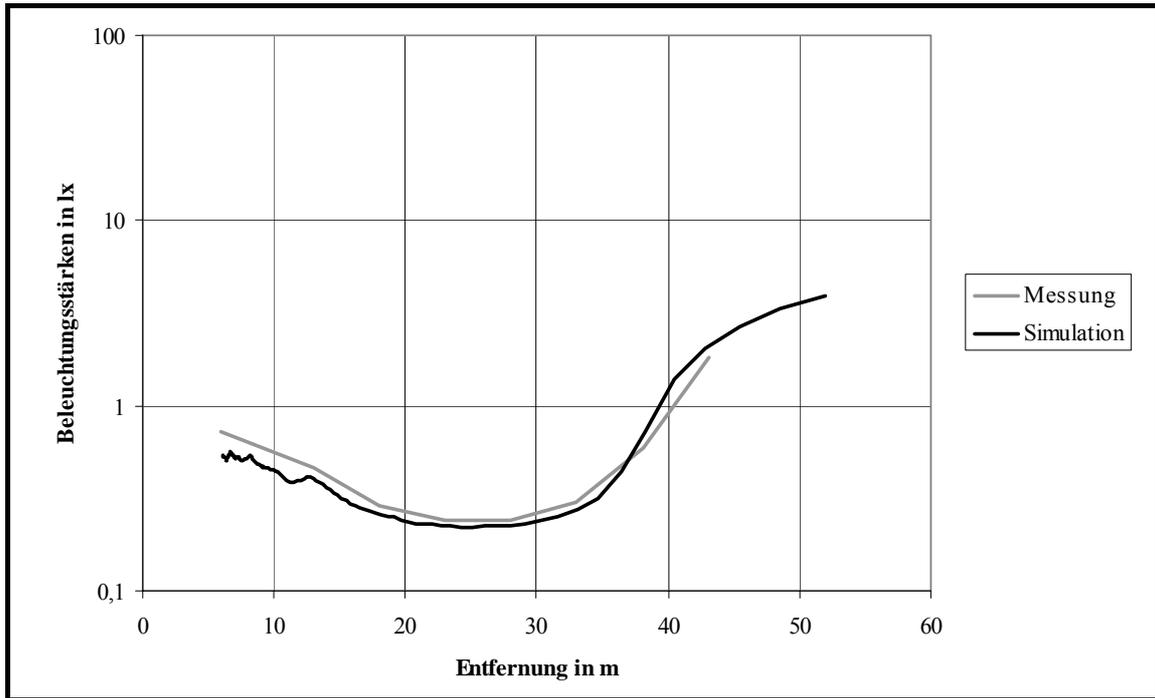


Bild 8.26: Beleuchtungsstärken auf einer Kuppe mit $R_v = 1000 \text{ m}$

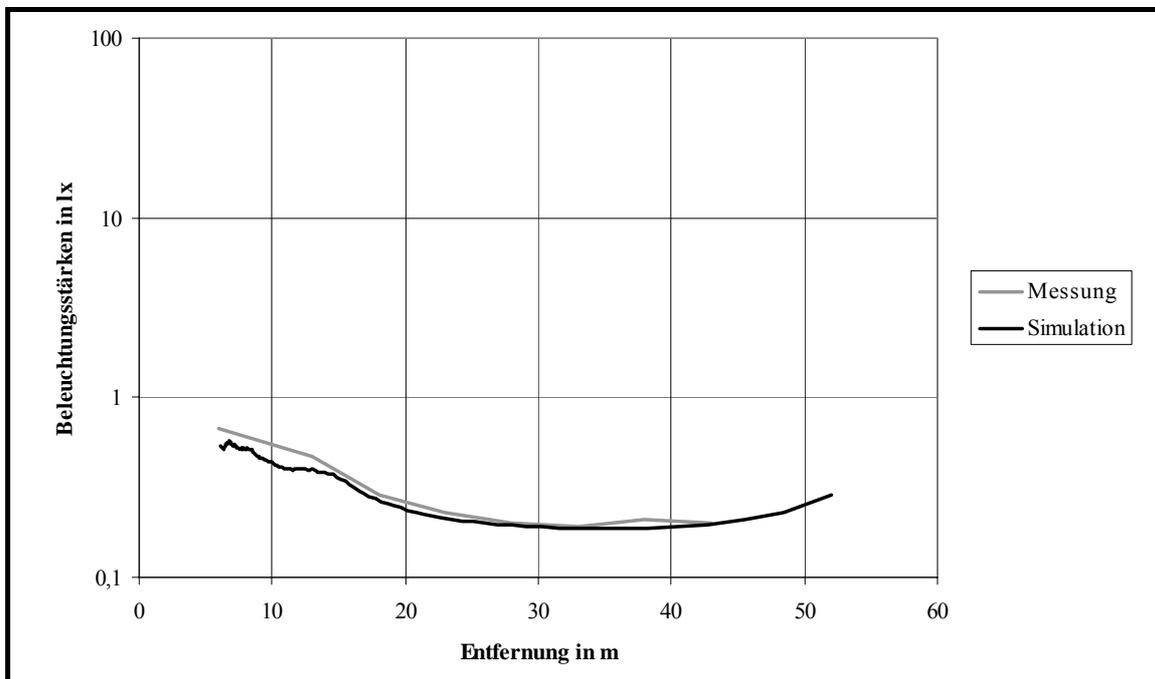


Bild 8.27: Beleuchtungsstärken auf einer Kuppe mit $R_v = 2000 \text{ m}$

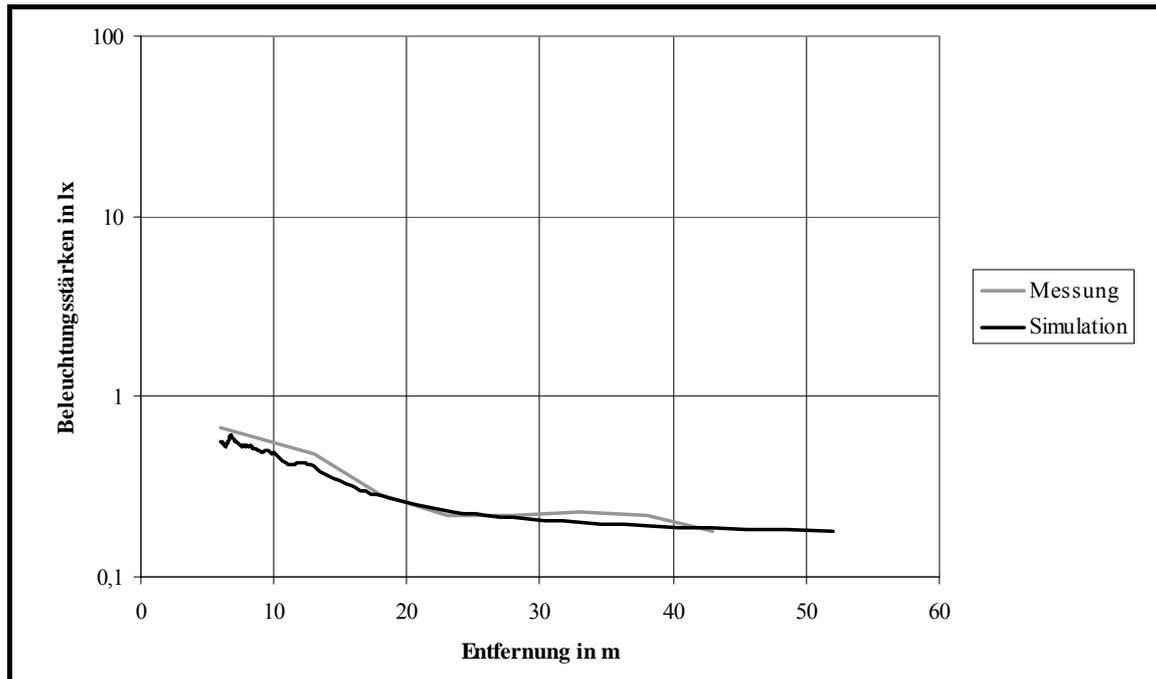


Bild 8.28: Beleuchtungsstärken auf einer Kuppe mit $R_v = 5000$ m

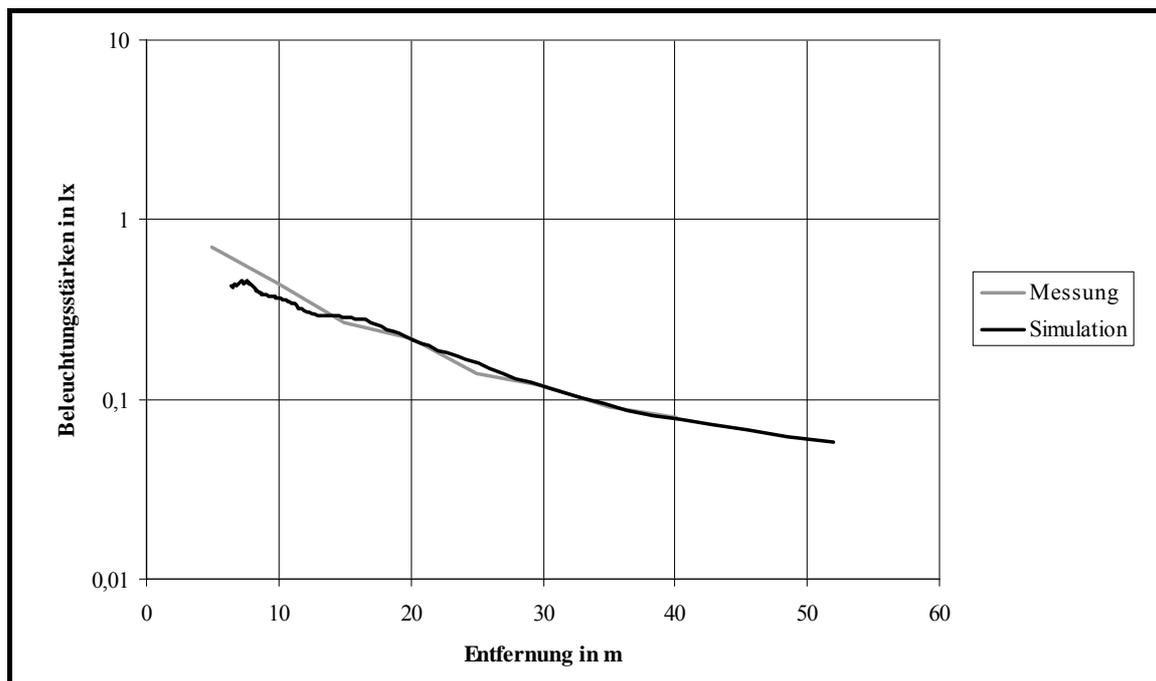


Bild 8.29: Beleuchtungsstärken in einer Wanne mit $R_v = 1000$ m

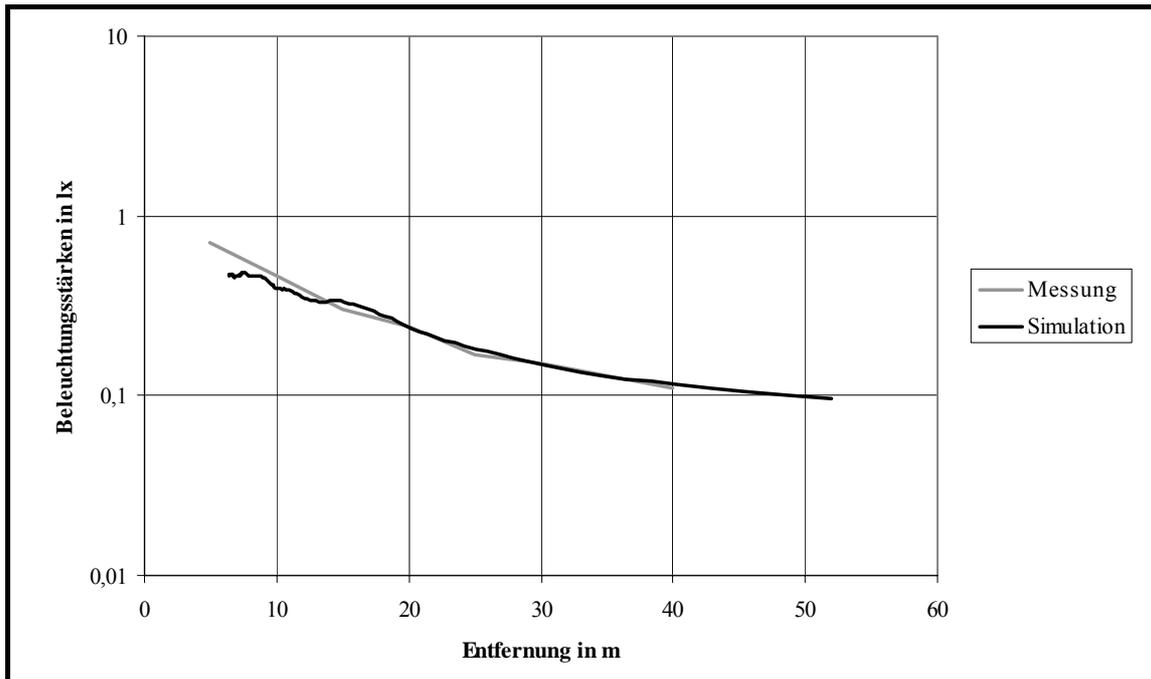


Bild 8.30: Beleuchtungsstärken in einer Wanne mit $R_v = 2000\text{ m}$

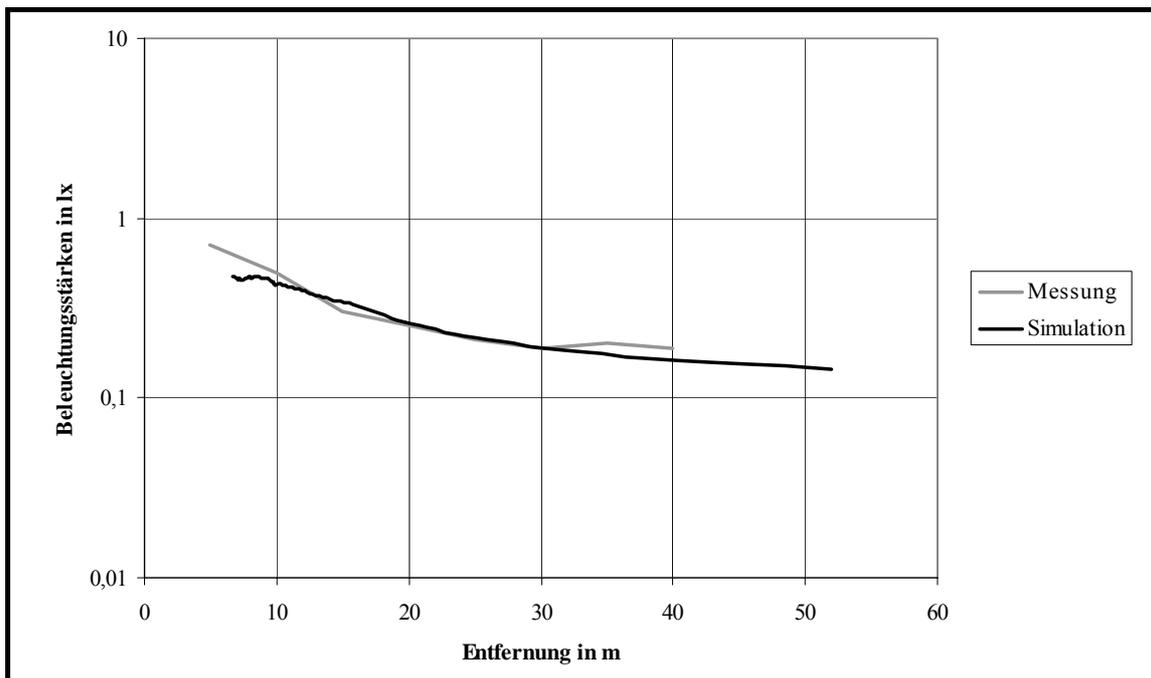


Bild 8.31: Beleuchtungsstärken in einer Wanne mit $R_v = 5000\text{ m}$

Die Diagramme in Bild 8.26 bis Bild 8.31 zeigen geringe Abweichungen zwischen den gemessenen und berechneten Beleuchtungsstärken am entgegenkommenden Fahrerauge. Die Unterschiede entstehen zum einen durch Vereinfachungen im Simulationsmodell und zum anderen durch Messfehler:

1. Die berechneten Beleuchtungsstärken berücksichtigen nur den direkten Anteil des Scheinwerferlichtes. Bei den Messungen lässt sich der Einfluss von Streulicht durch Abschatten zwar reduzieren, aber nicht ganz vermeiden. Der Fehler, der durch das indirekte, reflektierte Licht entsteht, ist ein systematischer Fehler, der die Messungen im Vergleich zur Simulation um einen geringen Prozentsatz erhöht.
2. Zur Berechnung der Blendbeleuchtungsstärken wird in der Simulationssoftware das photometrische Entfernungsgesetz angewendet:

$$I(\sigma, \rho + \beta) = \frac{d_x^2}{\Omega_0} \cdot E(\sigma, \rho + \beta) \quad (8.87)$$

Das Gesetz gilt nur für punktförmige Lichtquellen. Bei räumlich ausgedehnten Lichtquellen (z.B. Scheinwerfer) entsteht ein Fehler, der mit zunehmender Entfernung kleiner wird. Die Entfernung, bei der dieser Fehler so gering ist, dass er akzeptiert werden kann, wird als photometrische Grenzentfernung bezeichnet. Lehnert zeigt, dass für die meisten Fahrzeugscheinwerfer ab einer Entfernung $d_x \geq 20 \text{ m}$ das photometrische Entfernungsgesetz erfüllt wird¹⁸³.

3. Für die Messungen der Beleuchtungsstärken muss das Fahrzeug auf der vorgegebenen Kurve ausgerichtet werden. Dabei entstehen Positionierungsfehler, die insbesondere in größeren Entfernungen die Messungen verfälschen können.

Die Fehler, die durch die Vereinfachungen im Modell entstehen, wirken sich auf alle berechneten Blendbeleuchtungsstärken aus, unabhängig vom verwendeten Algorithmus zur Anpassung der Lichtverteilung. Auf die Bewertung und Kategorisierung der Verstellstrategien anhand der Beleuchtungsstärken haben diese Fehler daher keinen Einfluss und erlauben die Verwendung der Simulationssoftware zu diesem Zweck. Aussagen, die sich auf die absoluten Werte der Beleuchtungsstärken beziehen, sind nur bedingt möglich. Dazu müssten die Transmissionsgrade von Windschutzscheiben und Brillengläsern, das Streulicht im Verkehrsraum und die wetterabhängigen Sichtbedingungen berücksichtigt werden.

Die Validierung der reflektierten **Leuchtdichten** erfolgte an einer Modellstraße im Maßstab 1:5 mit Hilfe eines frei programmierbaren Scheinwerfers (Pixellicht). Die Modellstraße bildet ein 50 m langes Straßenstück nach und wurde im Rahmen einer Diplomarbeit aufgebaut¹⁸⁴. Sie lässt sich mit einer Hydraulik kontinuierlich zu Kuppen und Wannen mit konstanten vertikalen Radien R_v verformen.

Zur Validierung der Leuchtdichten wurde der Pixellicht-Scheinwerfer so programmiert, dass die Reflexionen der Fahrbahnoberfläche auf der ebenen Modellstraße den Simulationsergebnis-

¹⁸³ LEHNERT 2001 [83], S. 64

¹⁸⁴ GÜNZEL 2004 [50], S. 18 f.

sen für eine Ebene mit einem Halogen-Scheinwerfer und einer Fahrbahnoberfläche aus Diabas mit groben Luxovitkörnern entsprechen. Anschließend erfolgte die Verformung der Modellstraße zu Kuppen und Wannen und es wurden Simulationsläufe mit den gleichen vertikalen Krümmungen gestartet. Für eine gültige Validierung müssen die Änderungen im Verlauf der gemessenen und berechneten Leuchtdichten übereinstimmen. Die Programmierung des Scheinwerfers wurde dabei nicht mehr verändert¹⁸⁵. Die folgenden Diagramme zeigen die Messwerte und die Ergebnisse der Simulation für ausgewählte Kuppen- und Wannenradien. Sowohl bei den Messungen, als auch in der Simulation wird die Scheinwerferachse nach dem in Kapitel 4 vorgestellten Algorithmus mit der Zielentfernung $d_2 = 50 \text{ m}$ an die vertikale Straßenform angepasst. Der endgültige Algorithmus mit der gemischten Verstellstrategie ist zu diesem Zeitpunkt noch nicht entwickelt.

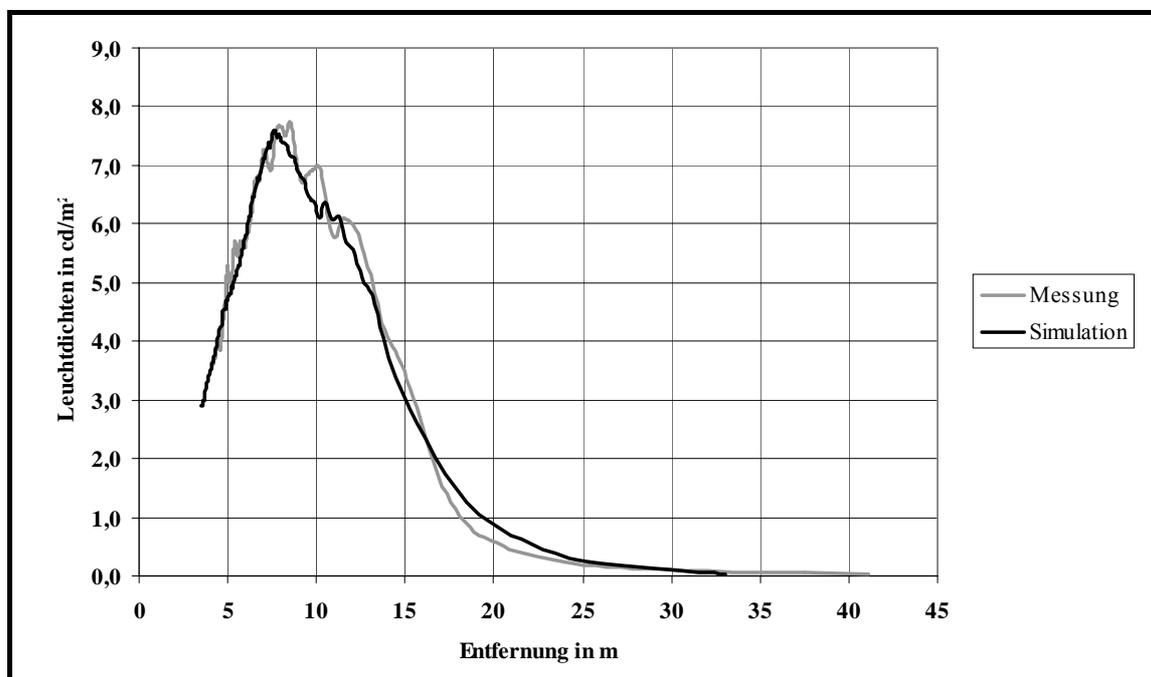


Bild 8.32: Reflektierte Leuchtdichten auf einer Kuppe mit $R_v = 1000 \text{ m}$

¹⁸⁵ GÜNZEL 2004 [50], S. 20 f.

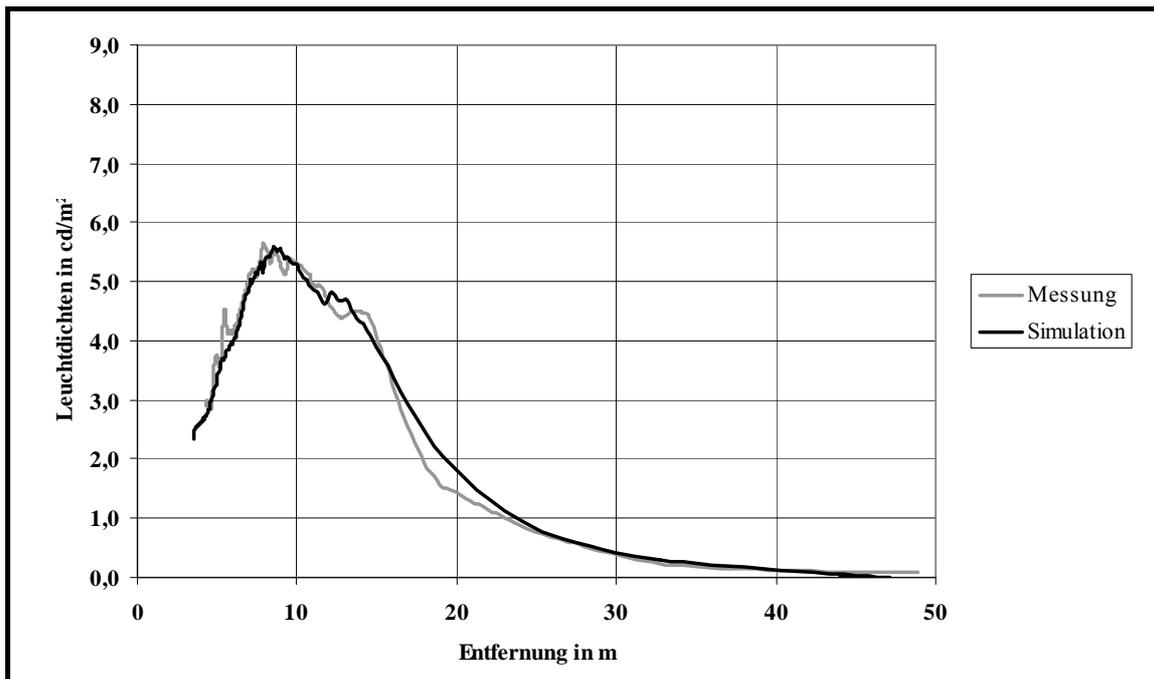


Bild 8.33: Reflektierte Leuchtdichten auf einer Kuppe mit $R_v = 2000 \text{ m}$

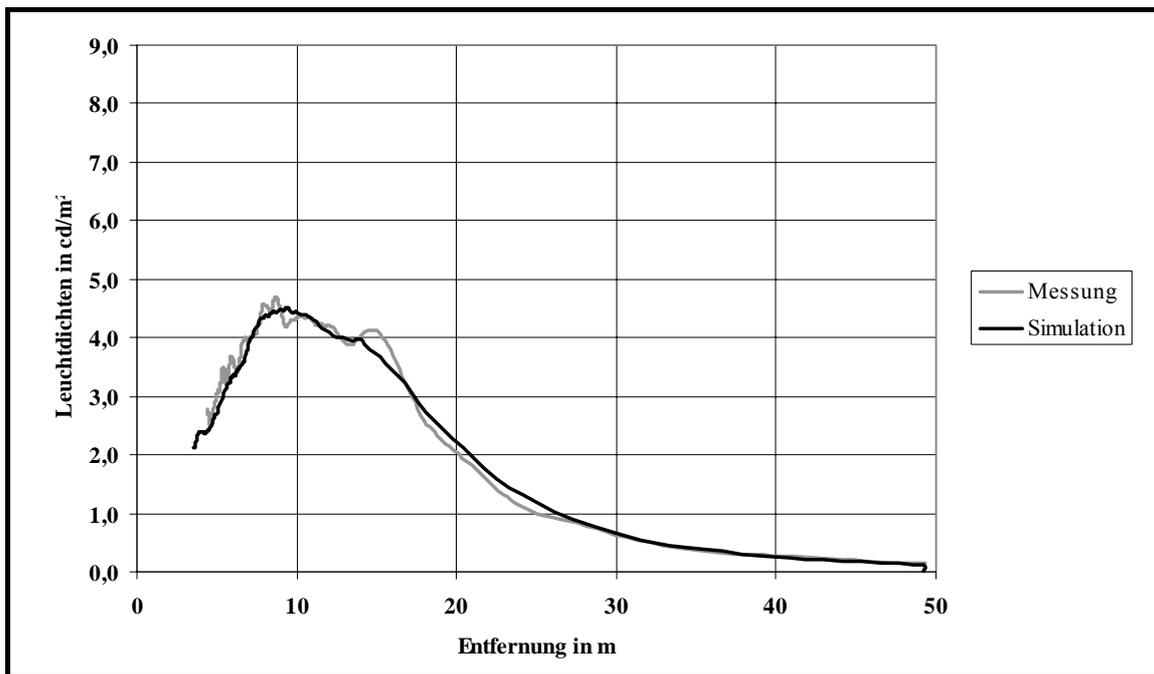


Bild 8.34: Reflektierte Leuchtdichten auf einer Kuppe mit $R_v = 5000 \text{ m}$

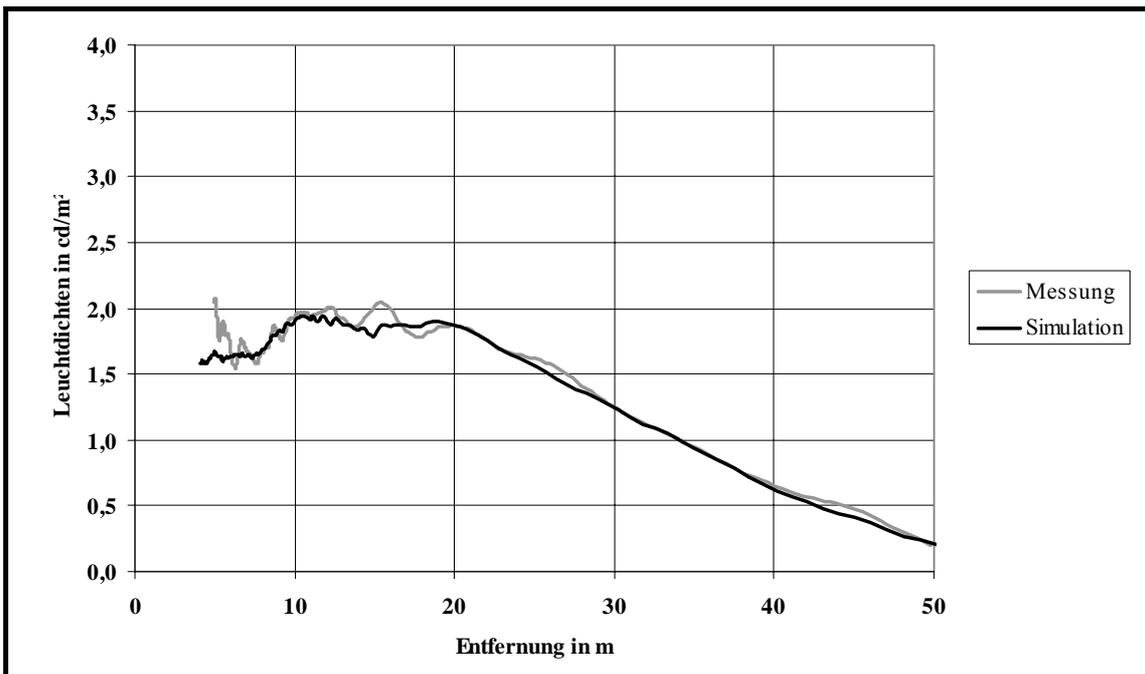


Bild 8.35: Reflektierte Leuchtdichten in einer Wanne mit $R_v = 1000 \text{ m}$

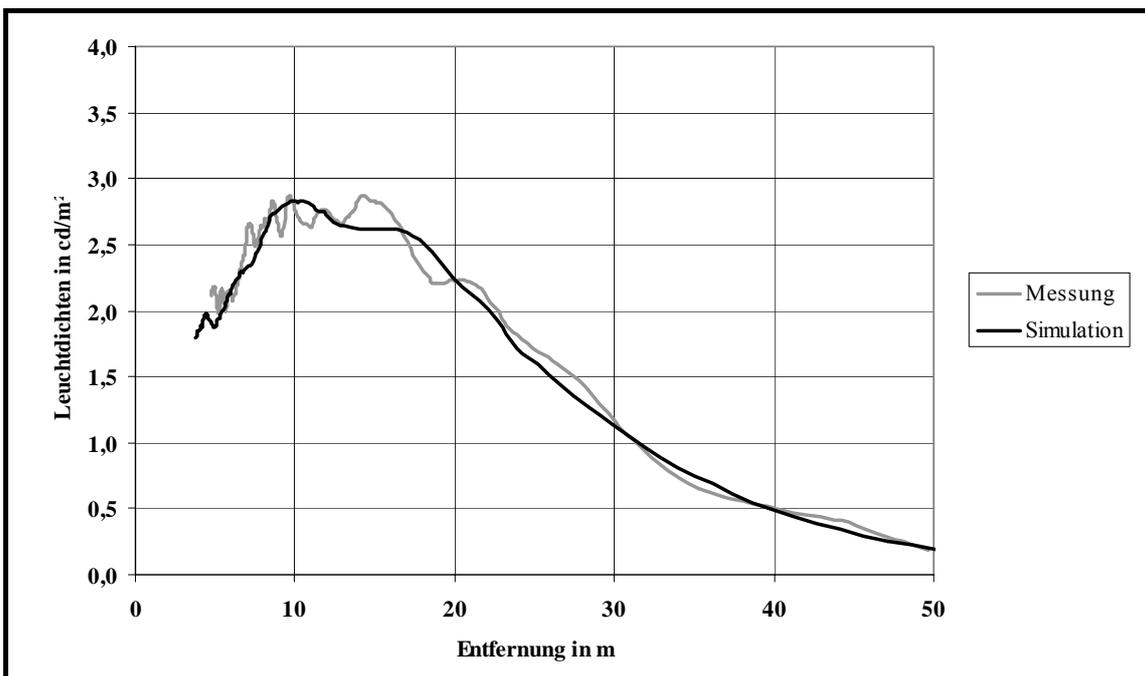


Bild 8.36: Reflektierte Leuchtdichten in einer Wanne mit $R_v = 2000 \text{ m}$

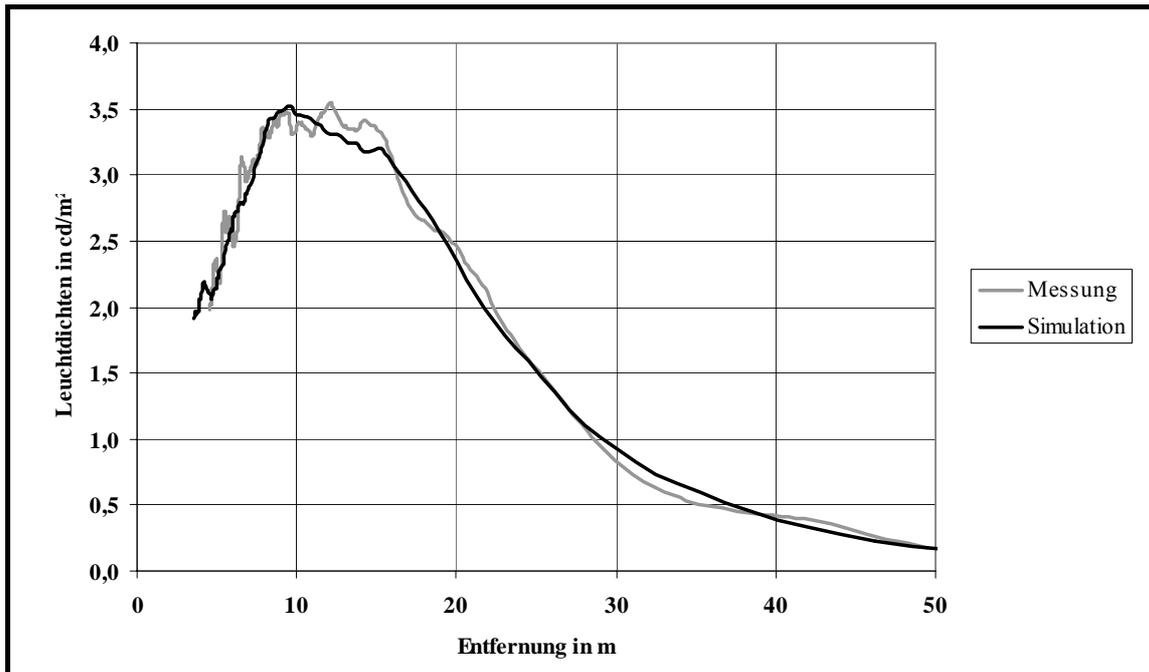


Bild 8.37: Reflektierte Leuchtdichten in einer Wanne mit $R_v = 5000 \text{ m}$

Bei einem Vergleich der Messungen mit den Simulationsergebnissen müssen Messfehler und Ungenauigkeiten im Simulationsmodell berücksichtigt werden:

1. Die Schwankungen und Sprünge in den gemessenen Leuchtdichten entstehen durch leichte Unebenheiten und Verunreinigungen auf der Oberfläche der Modellstraße sowie durch unstetige Lichtstärkensprünge in der Lichtverteilung des Pixellichtscheinwerfers.
2. Die Berechnung der Reflexionskoeffizienten der Fahrbahnoberfläche im Simulationsmodell beruht auf Messungen, die durch mathematische Funktionen ersetzt oder interpoliert wurden.
3. Die Leuchtdichten sind das Produkt aus Leuchtdichtekoeffizient und Beleuchtungsstärke auf der Fahrbahnoberfläche. Zur Berechnung der Beleuchtungsstärken wird das photometrische Entfernungsgesetz angewendet, welches unterhalb der photometrischen Grenzentfernung zu Fehlern führt.

Dennoch erlaubt die gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen und berechneten Leuchtdichten (Bild 8.32 bis Bild 8.37) eine gültige Validierung der Simulationssoftware für die Berechnung der zum Fahrer reflektierten Leuchtdichten bei Beleuchtung der Fahrbahn durch die Fahrzeugscheinwerfer. Die Simulationsergebnisse lassen jedoch nur relative Aussagen über verschiedene Simulationsläufe zu, da zu Beginn der Validierung der Pixellichtscheinwerfer so programmiert wurde, dass die gemessenen Leuchtdichten dem Simulationsergebnis entsprachen. Absolute Aussagen sind auch aufgrund der Unterschiede zwischen

den realen Straßenbelägen und der Oberfläche der Modellstraße nicht möglich. Weitere Informationen zu der Validierung der Leuchtdichten finden sich in Günzel¹⁸⁶.

8.4.6 Simulierte Beleuchtungsstärken und Leuchtdichten

Die folgenden Diagramme zeigen den Verlauf der Augenbeleuchtungsstärken, wenn ein Fahrzeug mit Xenon-Scheinwerfer entgegenkommt. Die Kurven repräsentieren die Anpassung der Lichtverteilung an die vertikalen Kurven mit verschiedenen Winkelfaktoren. Zusätzlich werden als Referenz die Beleuchtungsstärken am Fahrauge dargestellt, wenn sich zwei Fahrzeuge auf einer ebenen Straße begegnen und die Scheinwerferachse nicht verstellt wird.

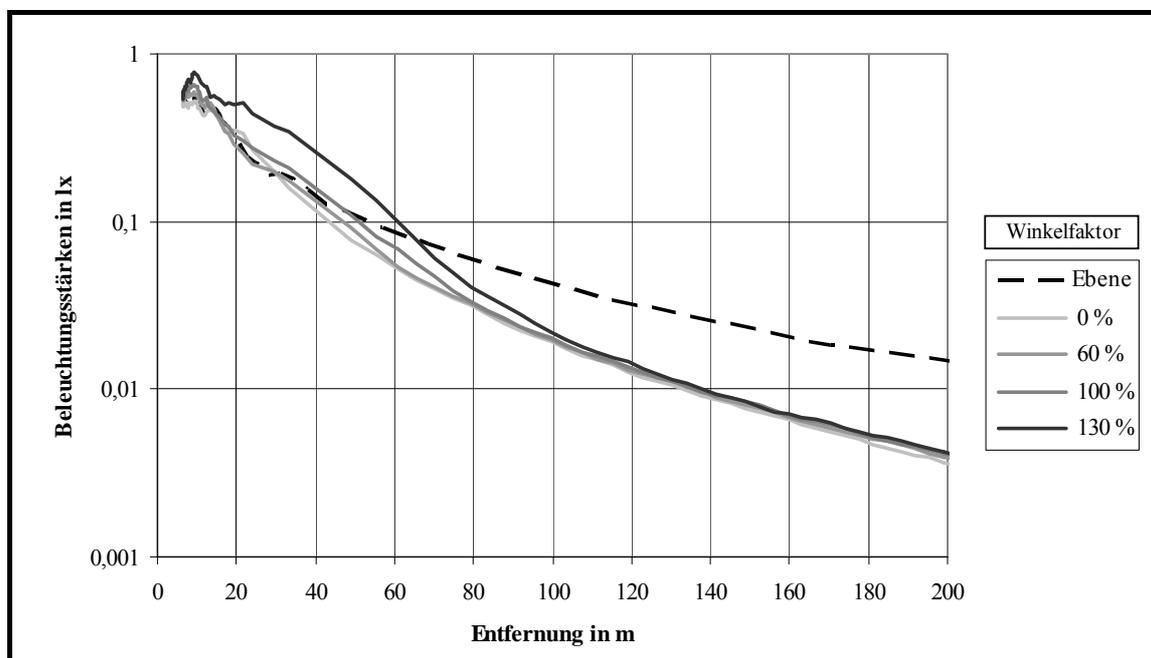


Bild 8.38: Augenbeleuchtungsstärken in einer Wanne mit $R_v = 1000m$

¹⁸⁶ GÜNZEL 2004 [50], S. 20 ff.

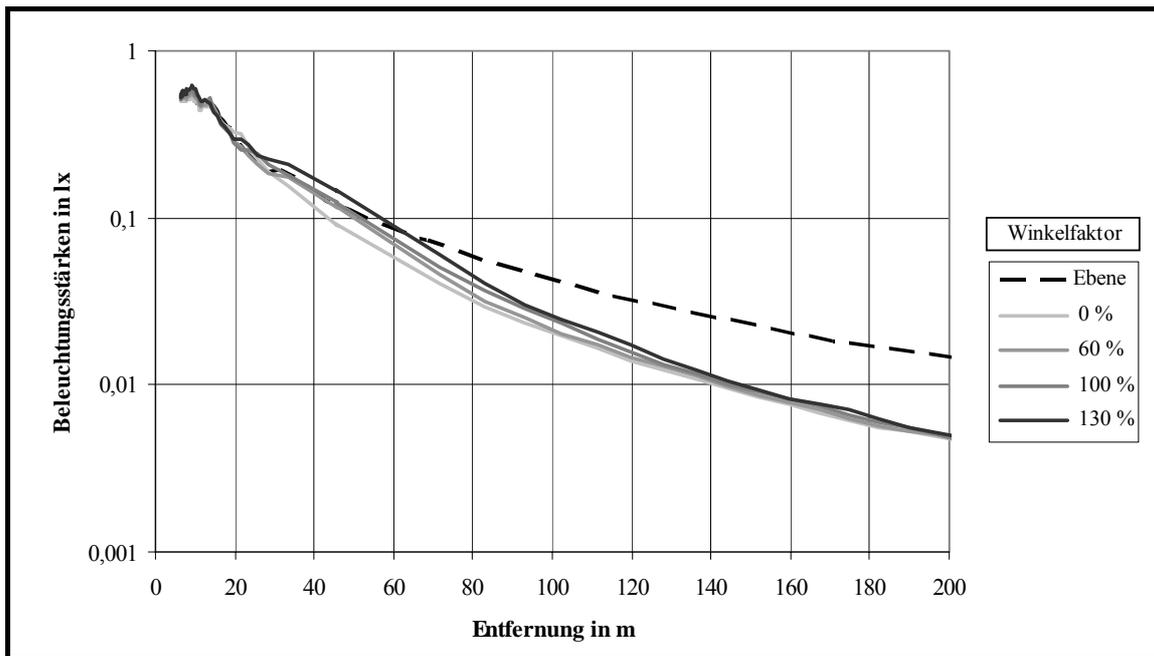


Bild 8.39: Augenbeleuchtungsstärken in einer Wanne mit $R_v = 2000 \text{ m}$

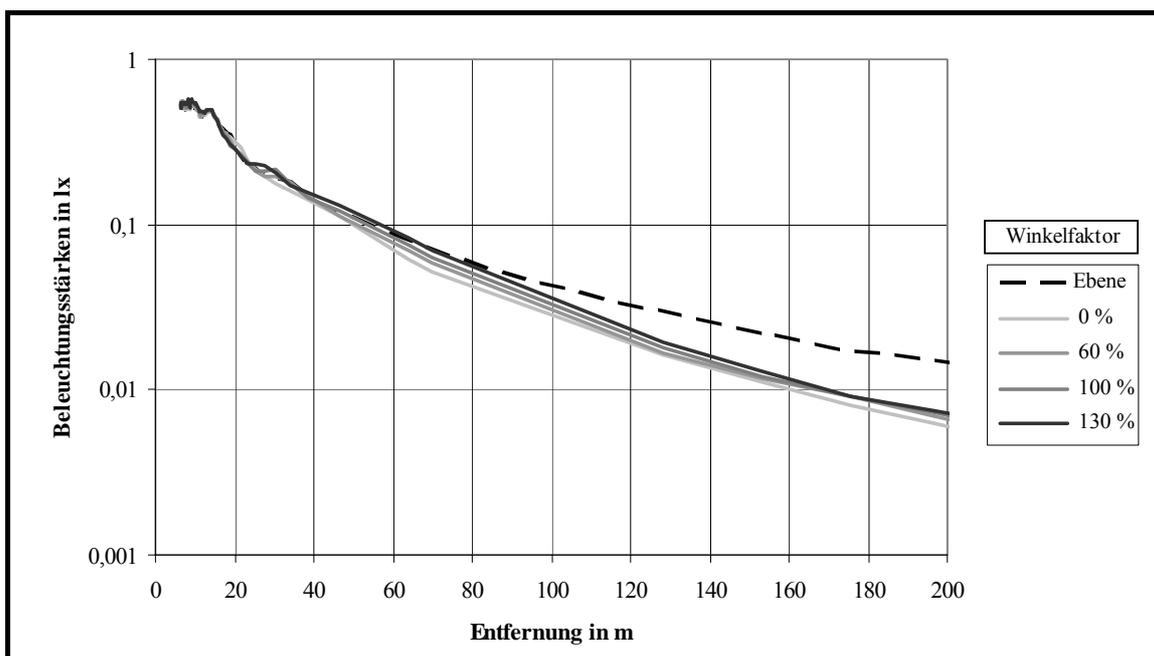


Bild 8.40: Augenbeleuchtungsstärken in einer Wanne mit $R_v = 5000 \text{ m}$

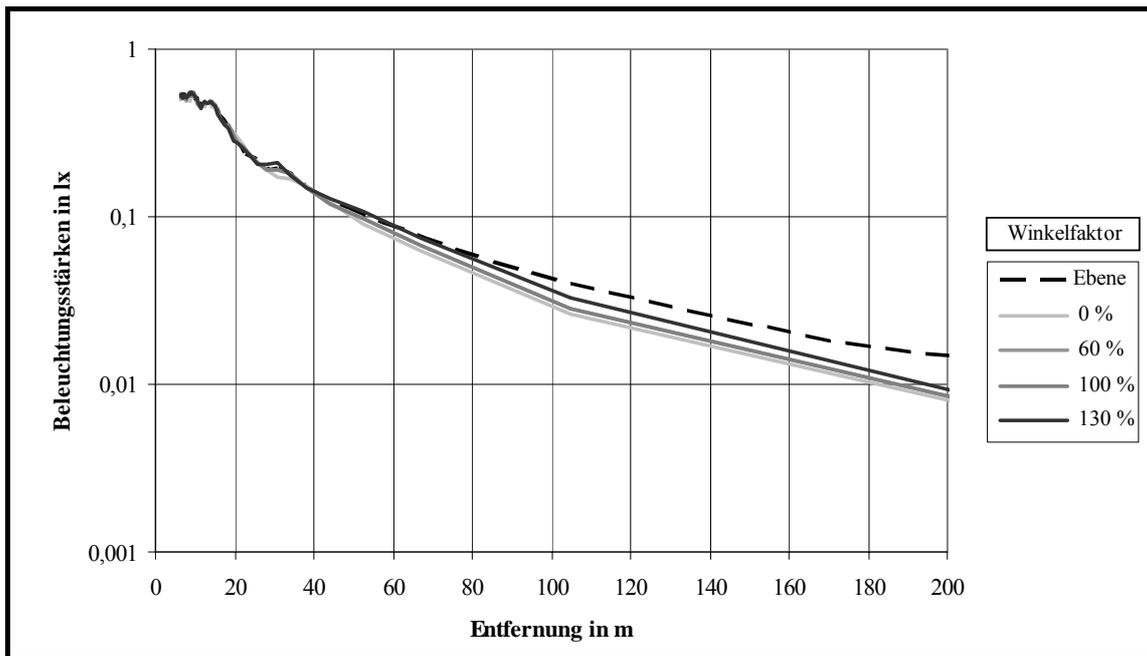


Bild 8.41: Augenbeleuchtungsstärken in einer Wanne mit $R_v = 10000m$

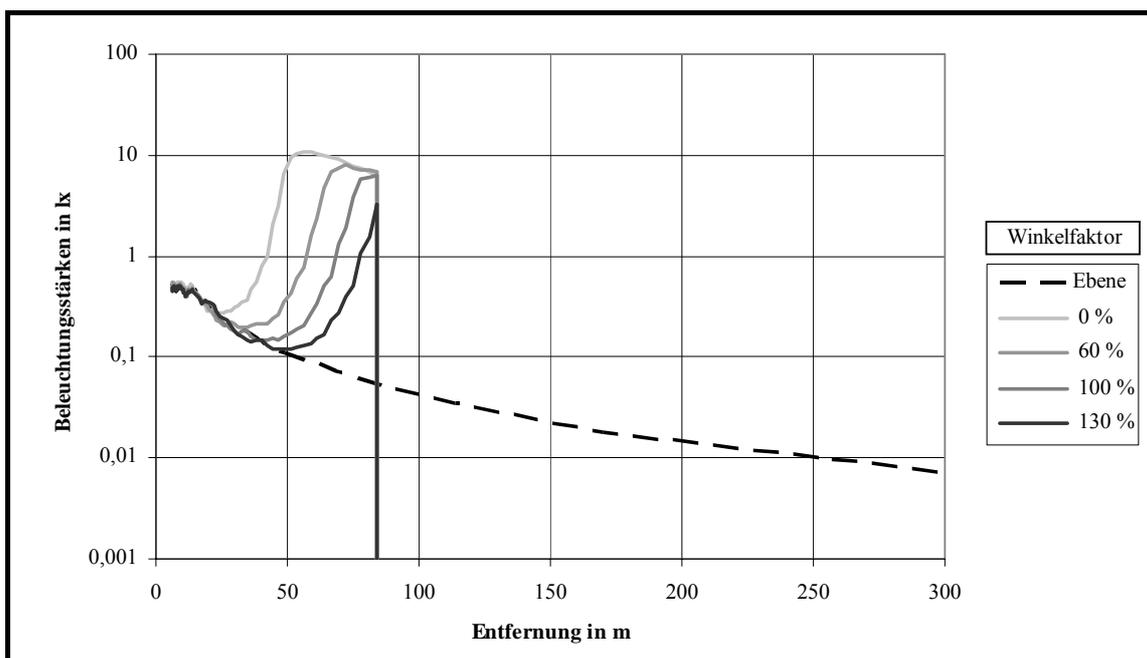


Bild 8.42: Augenbeleuchtungsstärken auf einer Kuppe mit $R_v = 1000m$

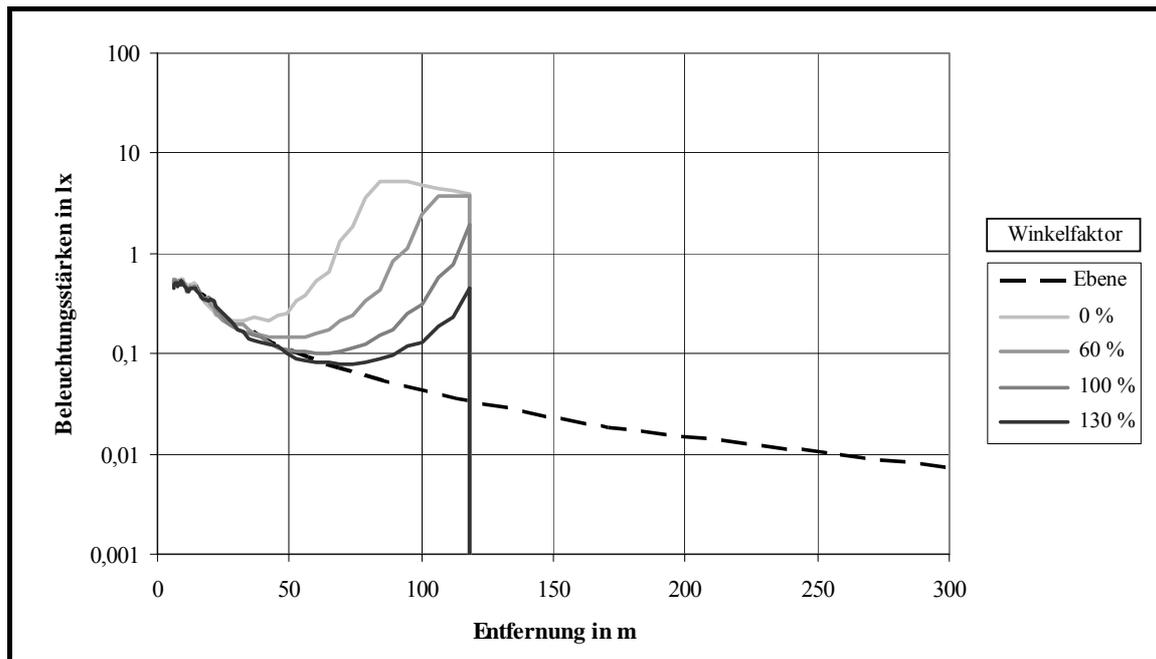


Bild 8.43: Augenbeleuchtungsstärken auf einer Kuppe mit $R_v = 2000$ m

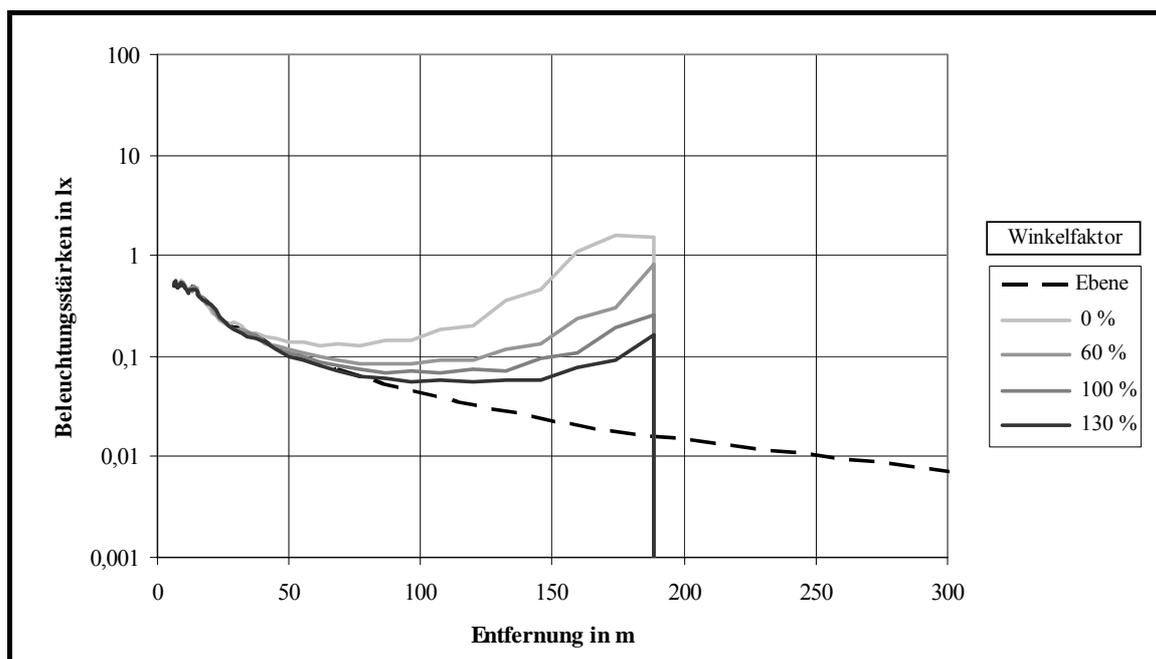


Bild 8.44: Augenbeleuchtungsstärken auf einer Kuppe mit $R_v = 5000$ m

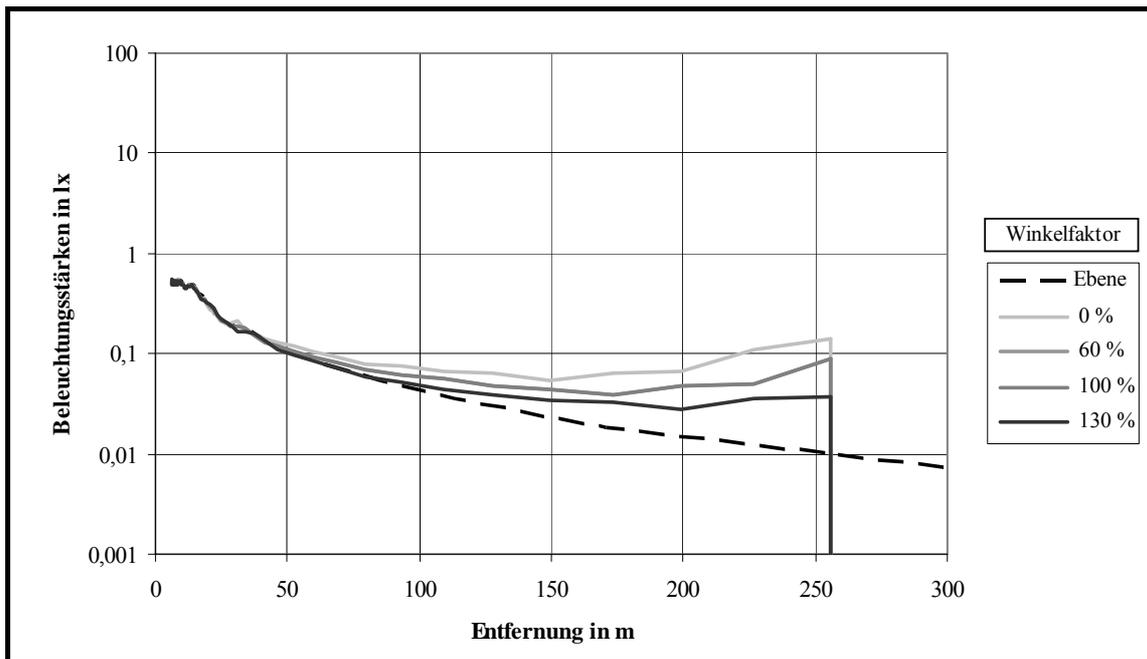


Bild 8.45: Augenbeleuchtungsstärken auf einer Kuppe mit $R_v = 10000m$

Die nächsten acht Diagramme zeigen die simulierten Leuchtdichten, die von der Fahrbahnoberfläche zurück zum Fahrer reflektiert werden, wenn sie von einem Fahrzeug mit Halogen-Scheinwerfer beleuchtet wird. Auch hier dienen zu Vergleichszwecken die reflektierten Leuchtdichten einer ebenen Straße als Referenz. Als Straßenbelag wurde Diabas mit groben Luxovitkörnern gewählt.

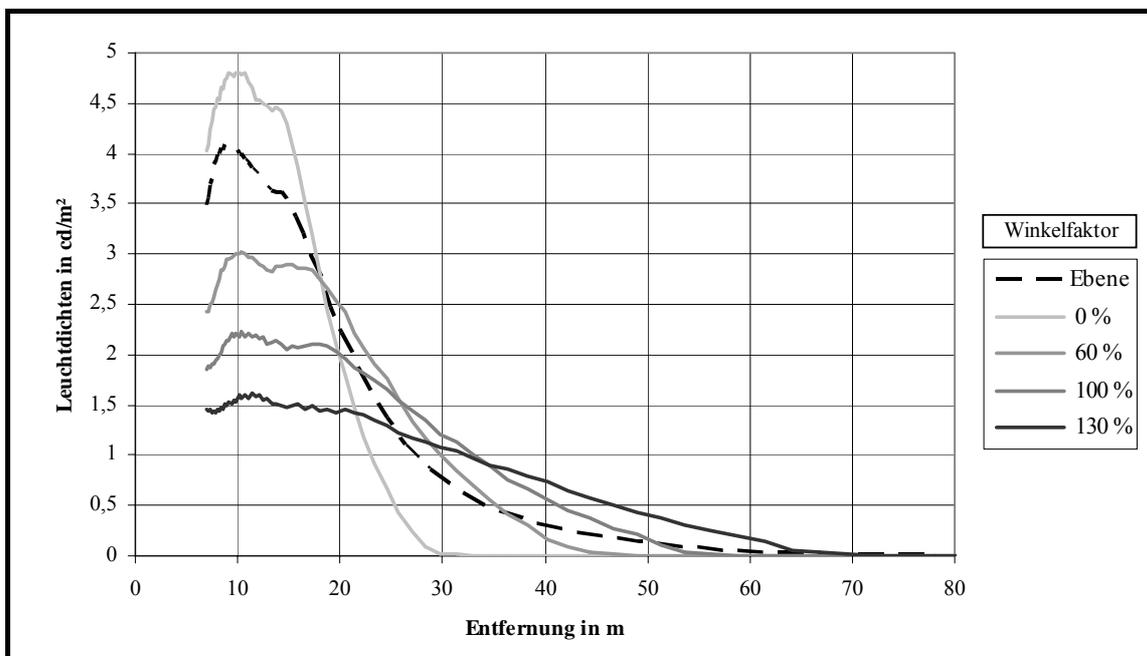


Bild 8.46: Fahrbahnleuchtdichten in einer Wanne mit $R_v = 1000m$

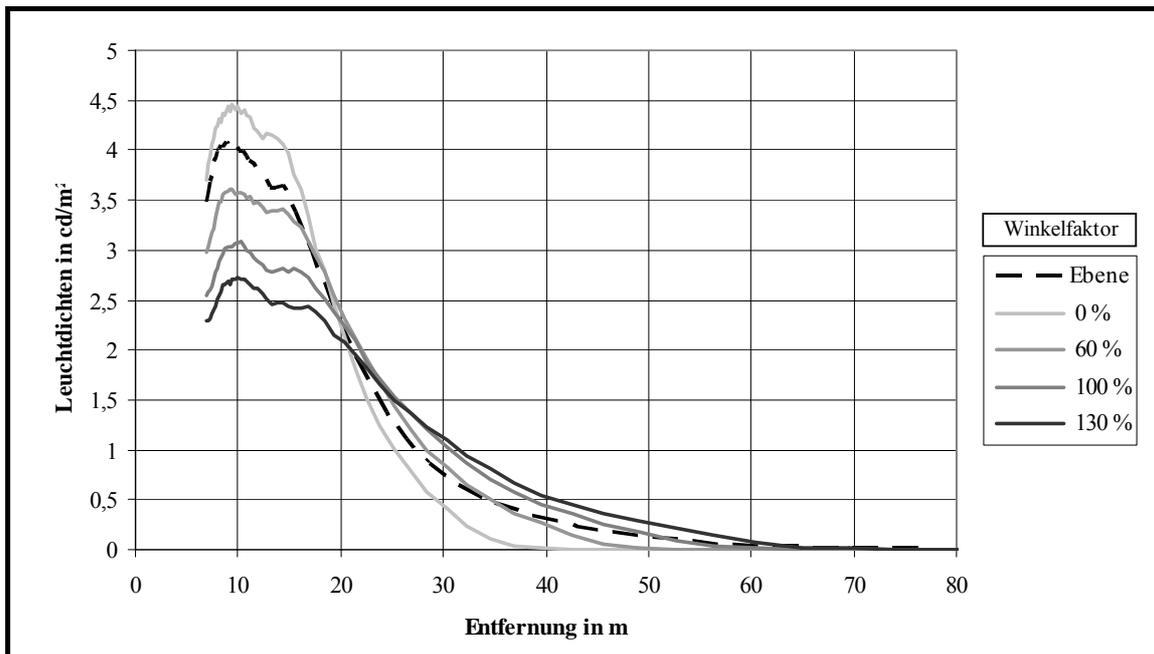


Bild 8.47: Fahrbahnleuchtdichten in einer Wanne mit $R_v = 2000 \text{ m}$

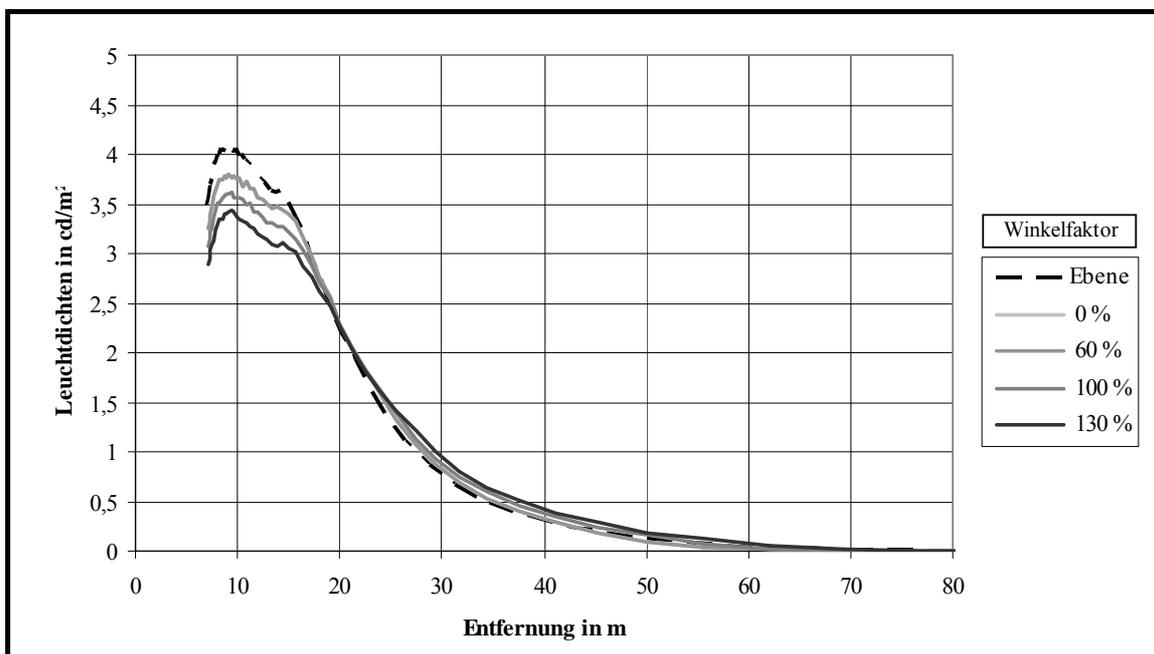


Bild 8.48: Fahrbahnleuchtdichten in einer Wanne mit $R_v = 5000 \text{ m}$

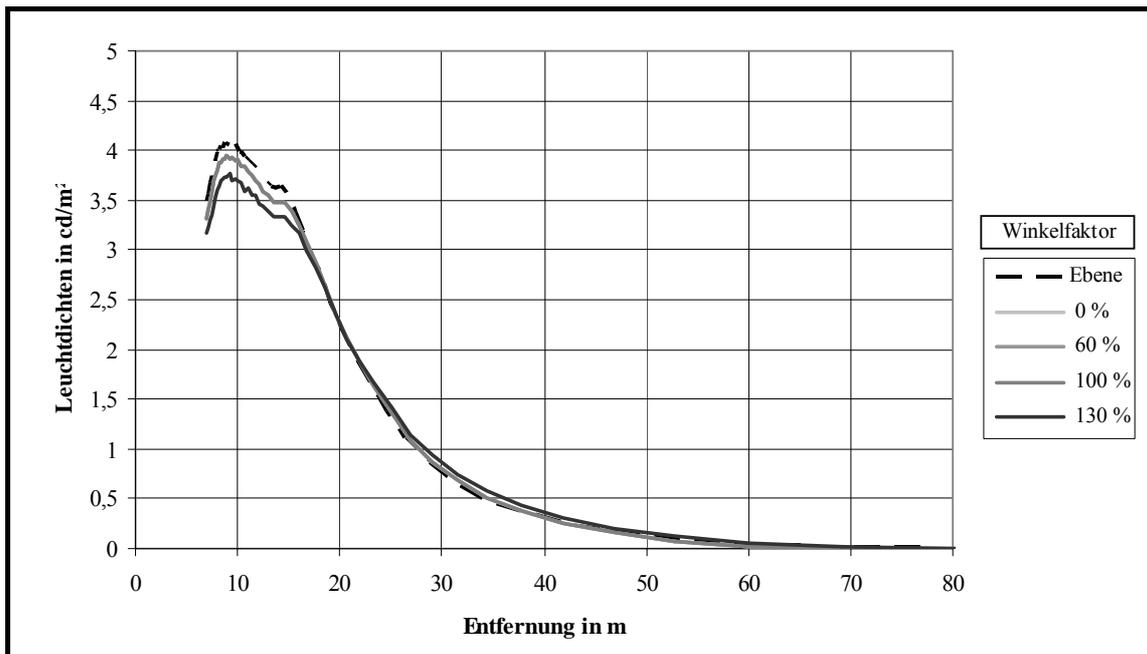


Bild 8.49: Fahrbahnleuchtdichten in einer Wanne mit $R_v = 10000m$

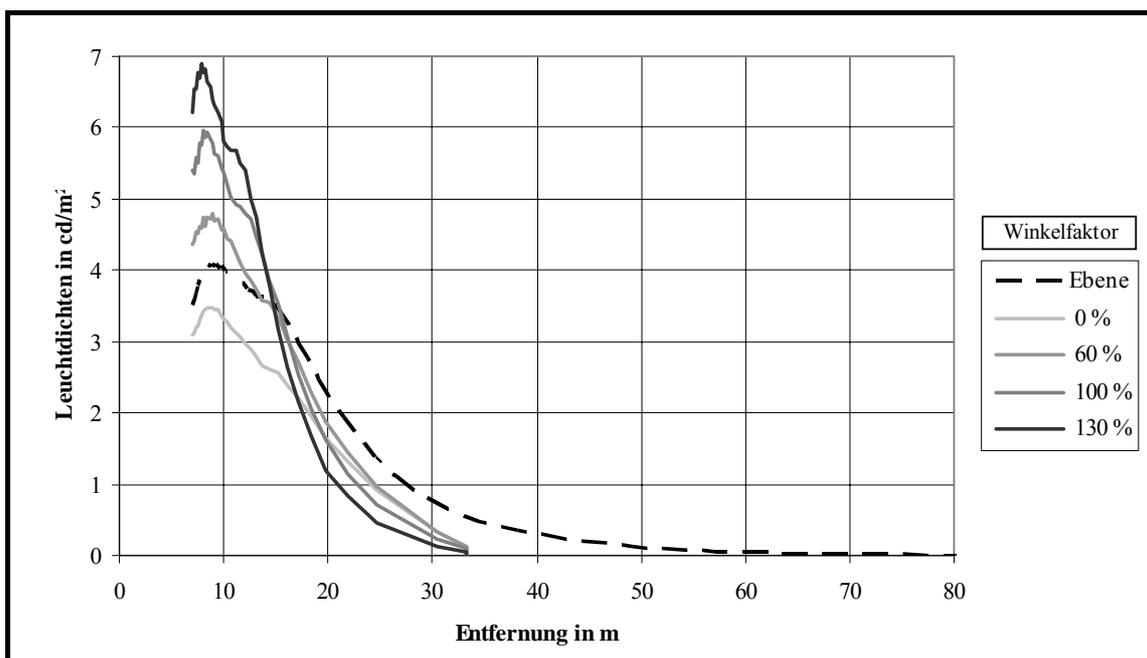


Bild 8.50: Fahrbahnleuchtdichten auf einer Kuppe mit $R_v = 1000m$

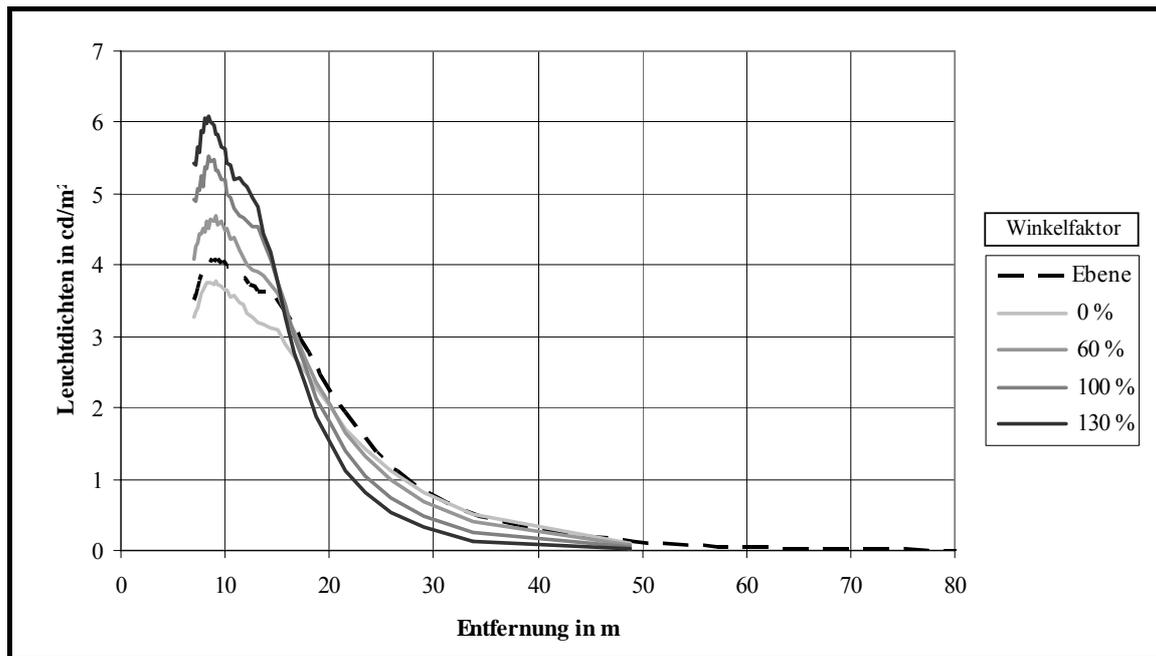


Bild 8.51: Fahrbahnleuchtdichten auf einer Kuppe mit $R_v = 2000 \text{ m}$

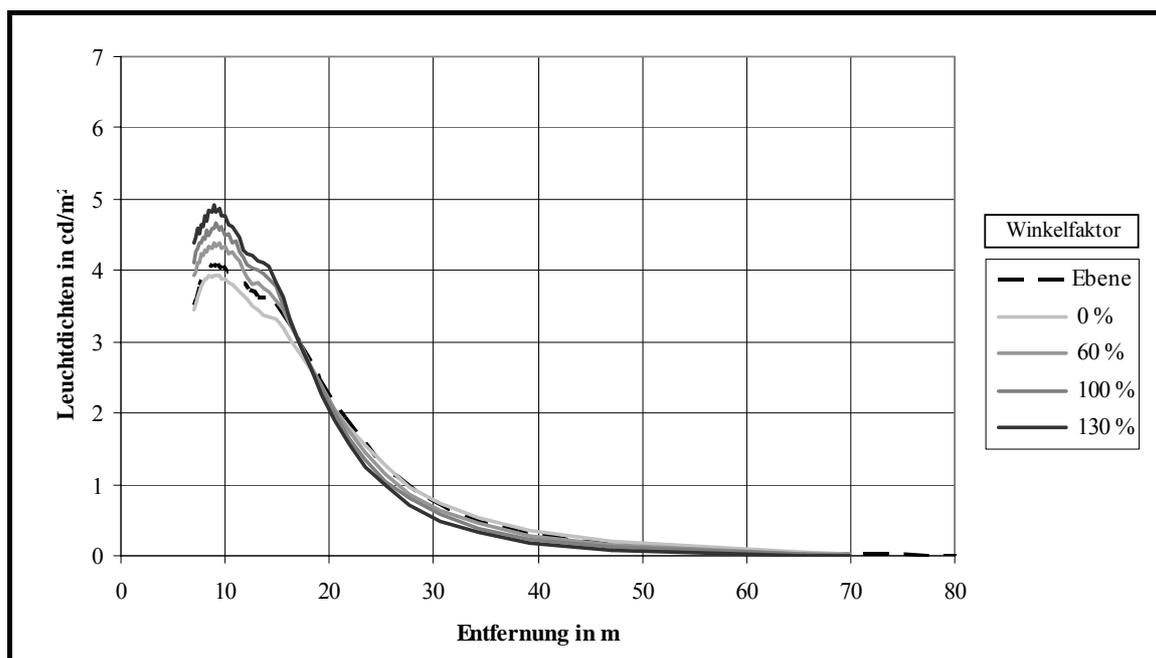


Bild 8.52: Fahrbahnleuchtdichten auf einer Kuppe mit $R_v = 5000 \text{ m}$

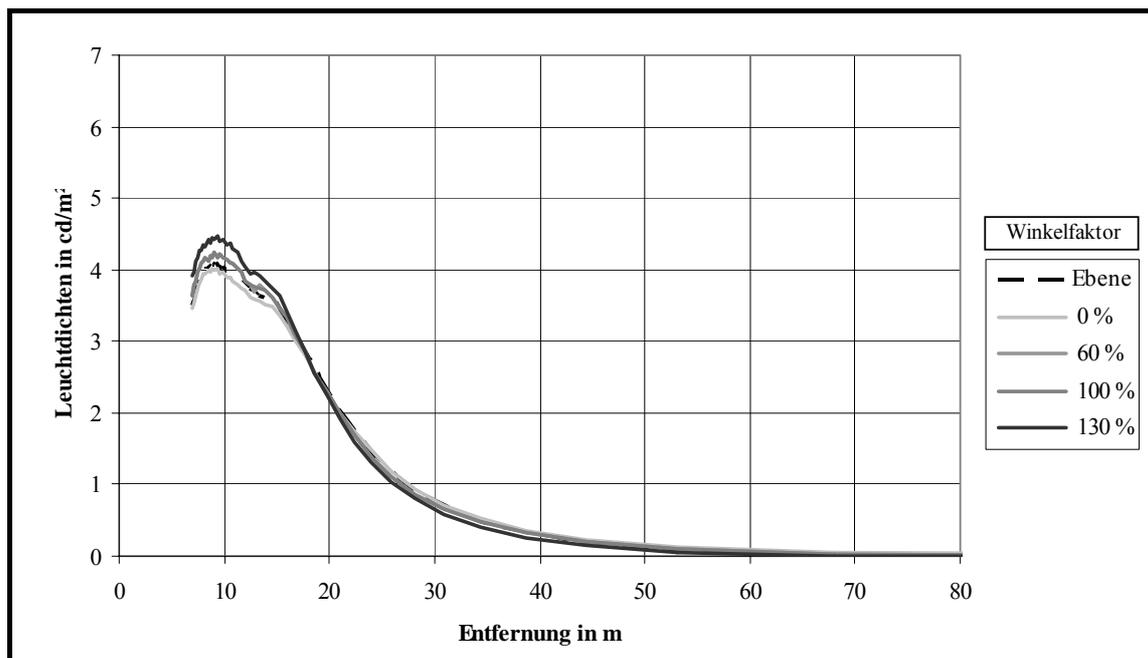


Bild 8.53: *Fahrbahnleuchtdichten auf einer Kuppe mit $R_v = 10000\text{m}$*

8.5 Messung des Blickverhaltens mit dem Eye-Tracking-System

Die folgenden Diagramme zeigen das Blickverhalten der Probanden für bestimmte Kuppen und Wannen während der Messfahrten auf der Teststrecke. Die Ergebnisse werden als Häufigkeitsverteilungen sowohl für die vertikalen Blickwinkel als auch für die Fixationsentfernungen dargestellt. Eine Fixationsentfernung entspricht dem Abstand des Fahrzeugs zum Schnittpunkt eines Blickwinkels mit der Fahrbahnoberfläche. In den Häufigkeitsverteilungen sind die Blickwinkel aller Probanden zusammengefasst.

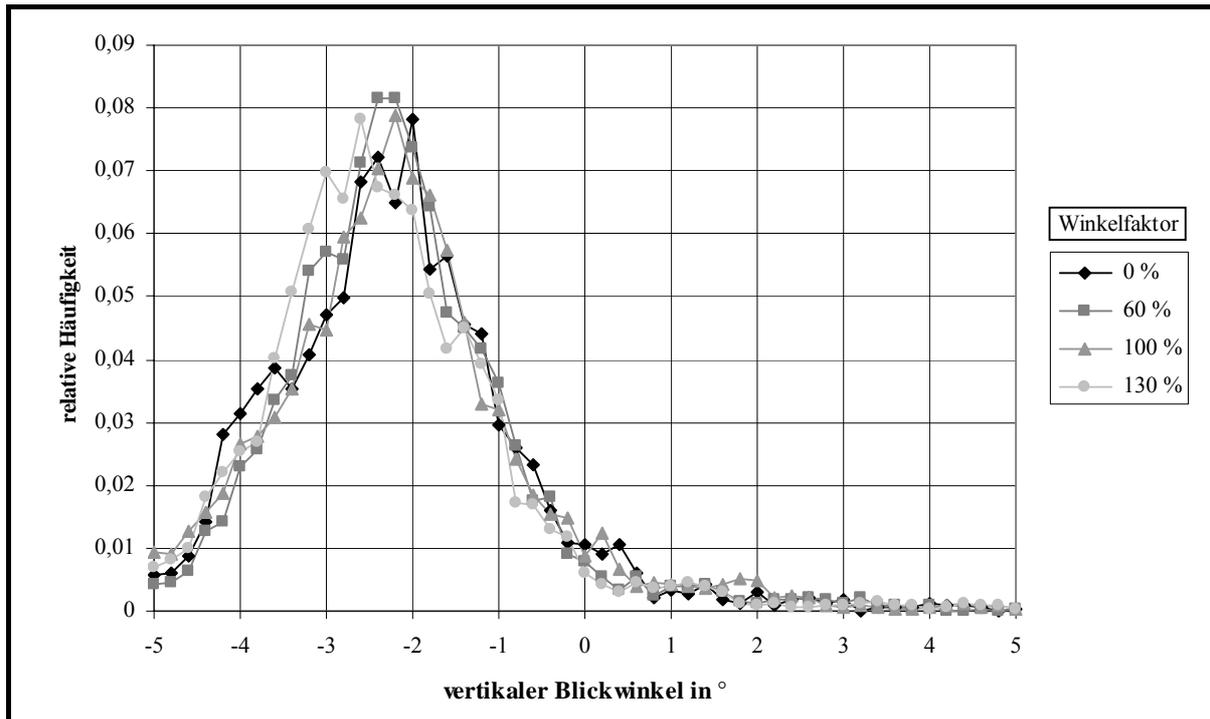


Bild 8.54: Häufigkeitsverteilung der vertikalen Blickwinkel auf einer Kuppe mit $R_v = 1500$ m

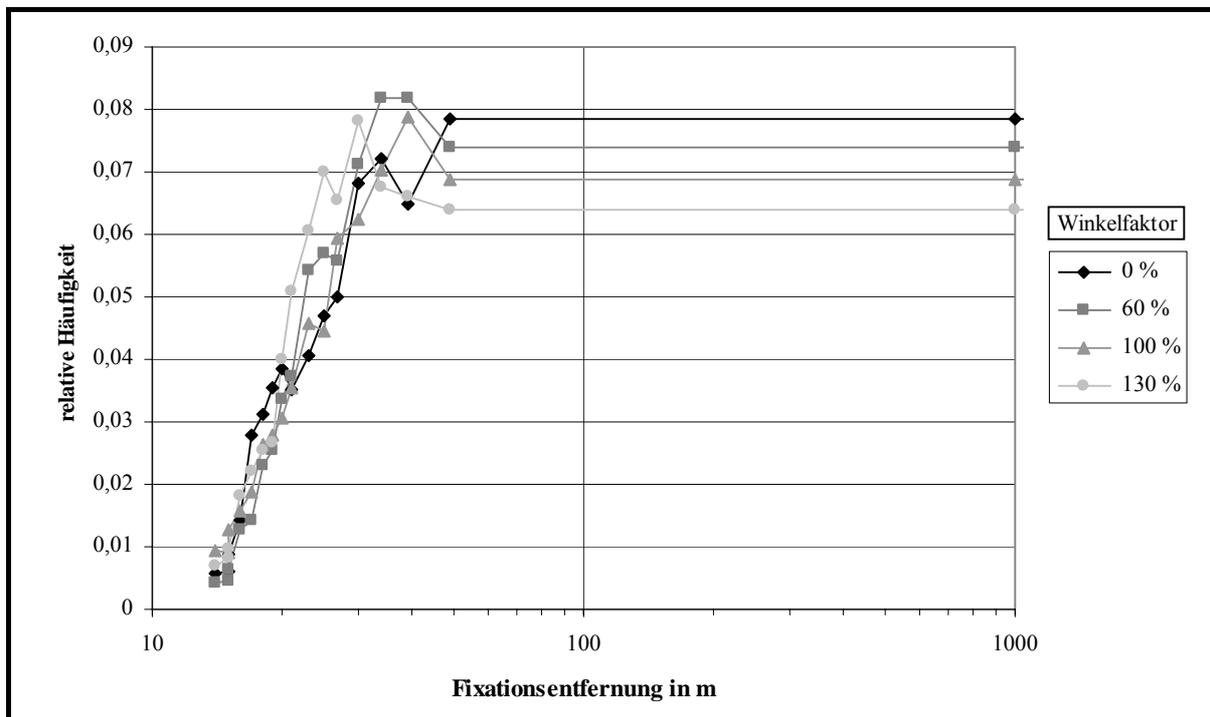


Bild 8.55: Häufigkeitsverteilung der Fixationsentfernungen auf einer Kuppe mit $R_v = 1500$ m

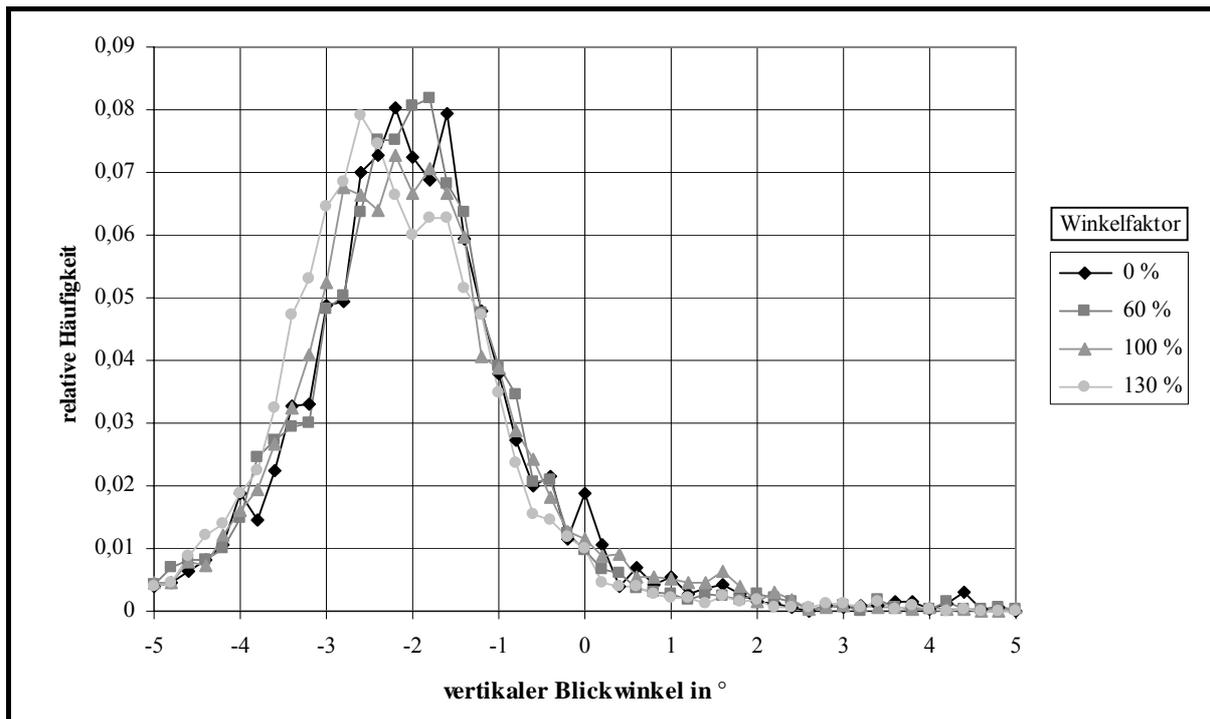


Bild 8.56: Häufigkeitsverteilung der vertikalen Blickwinkel auf einer Kuppe mit $R_v = 2200\text{ m}$

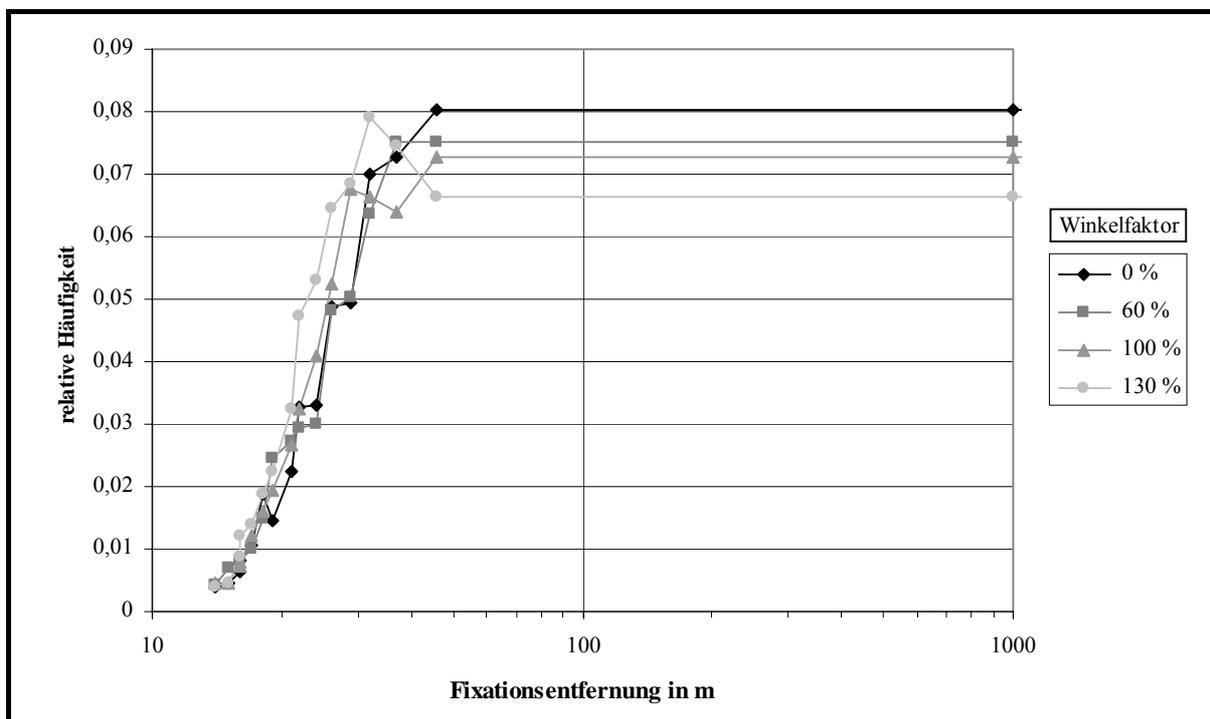


Bild 8.57: Häufigkeitsverteilung der Fixationsentfernungen auf einer Kuppe mit $R_v = 2200\text{ m}$

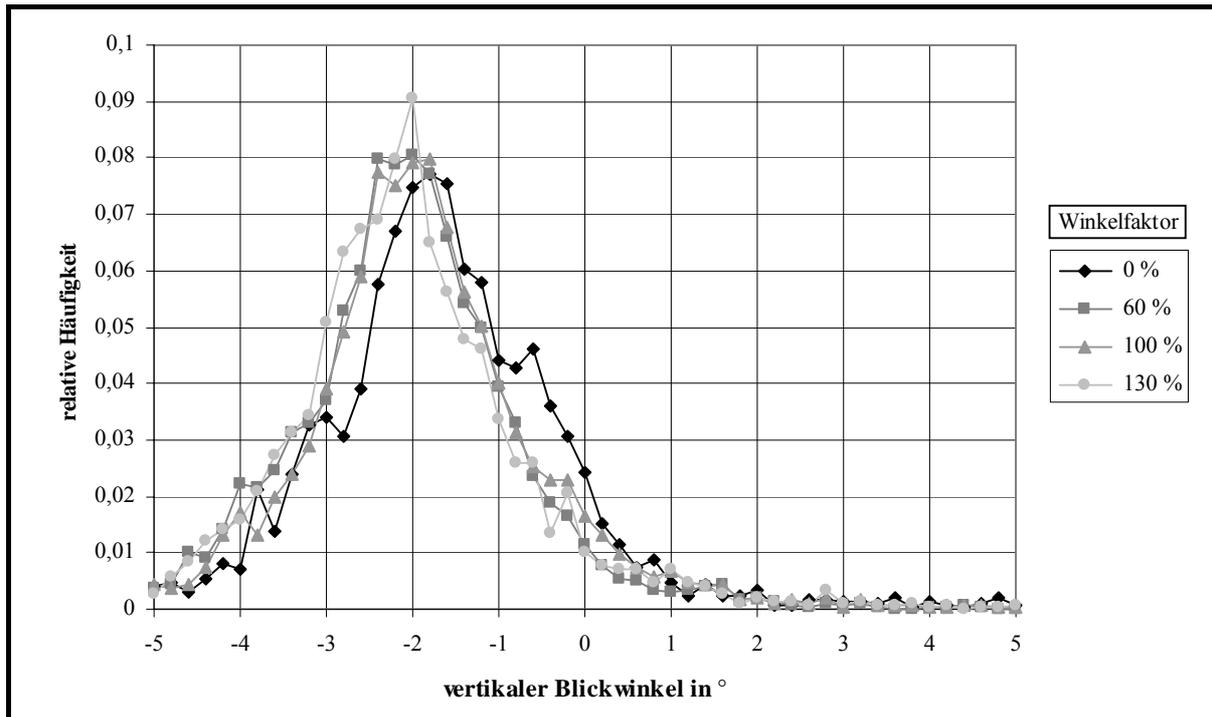


Bild 8.58: Häufigkeitsverteilung der vertikalen Blickwinkel auf einer Kuppe mit $R_v = 3200$ m

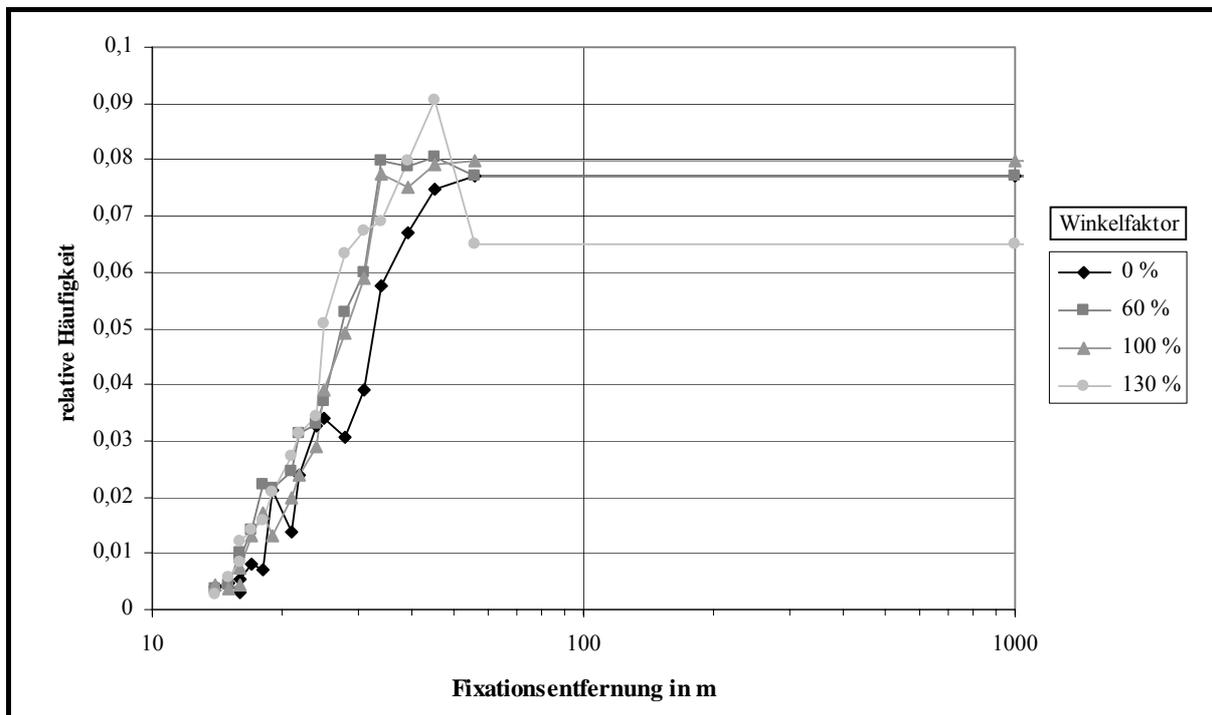


Bild 8.59: Häufigkeitsverteilung der Fixationsentfernungen auf einer Kuppe mit $R_v = 3200$ m

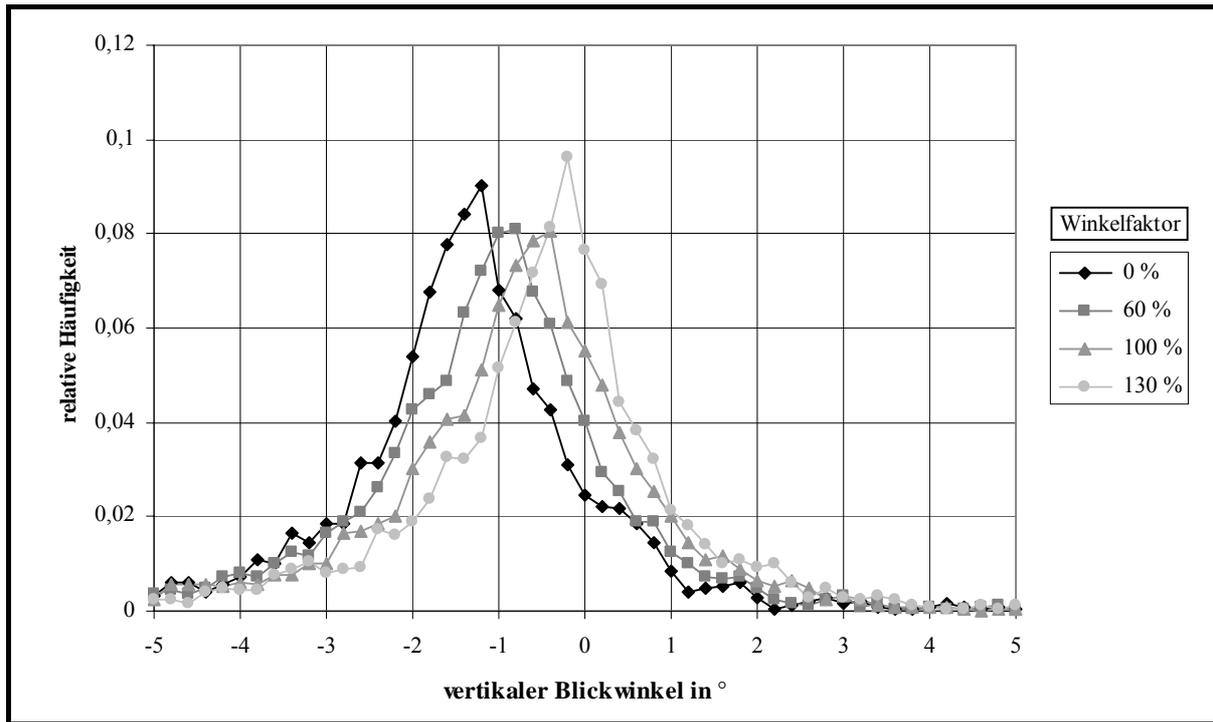


Bild 8.60: Häufigkeitsverteilung der vertikalen Blickwinkel in einer Wanne mit $R_v = 2300$ m

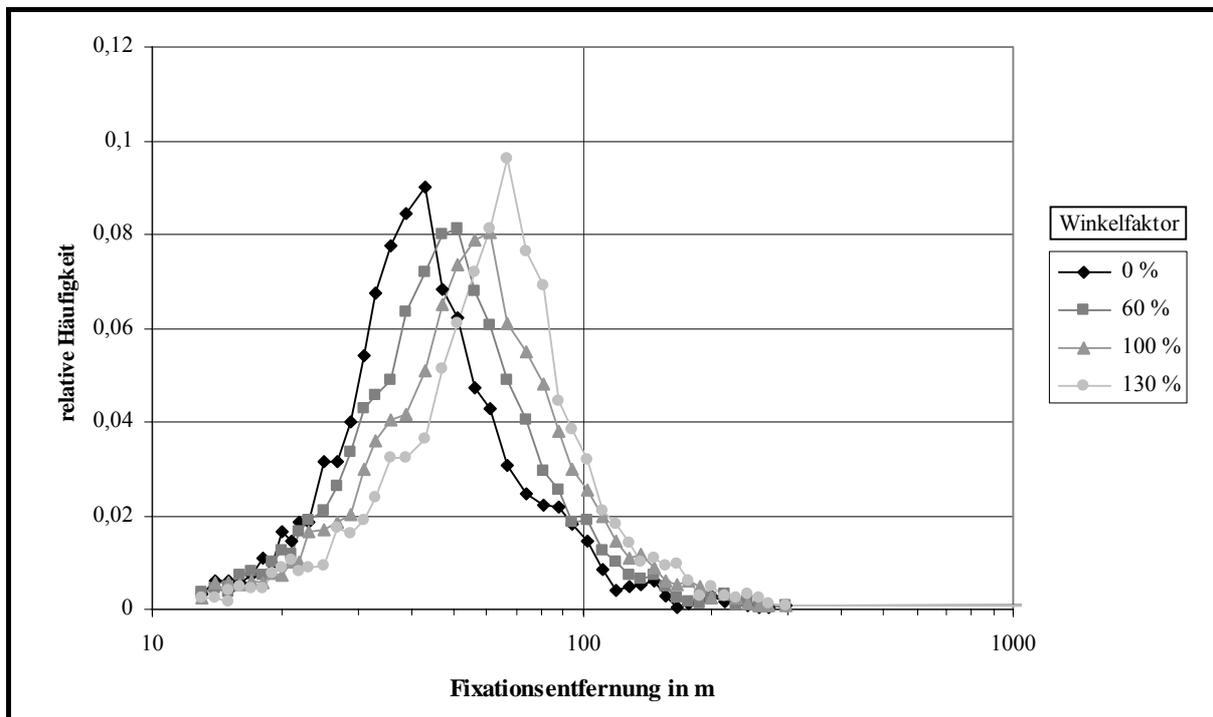


Bild 8.61: Häufigkeitsverteilung der Fixationsentfernungen in einer Wanne mit $R_v = 2300$ m

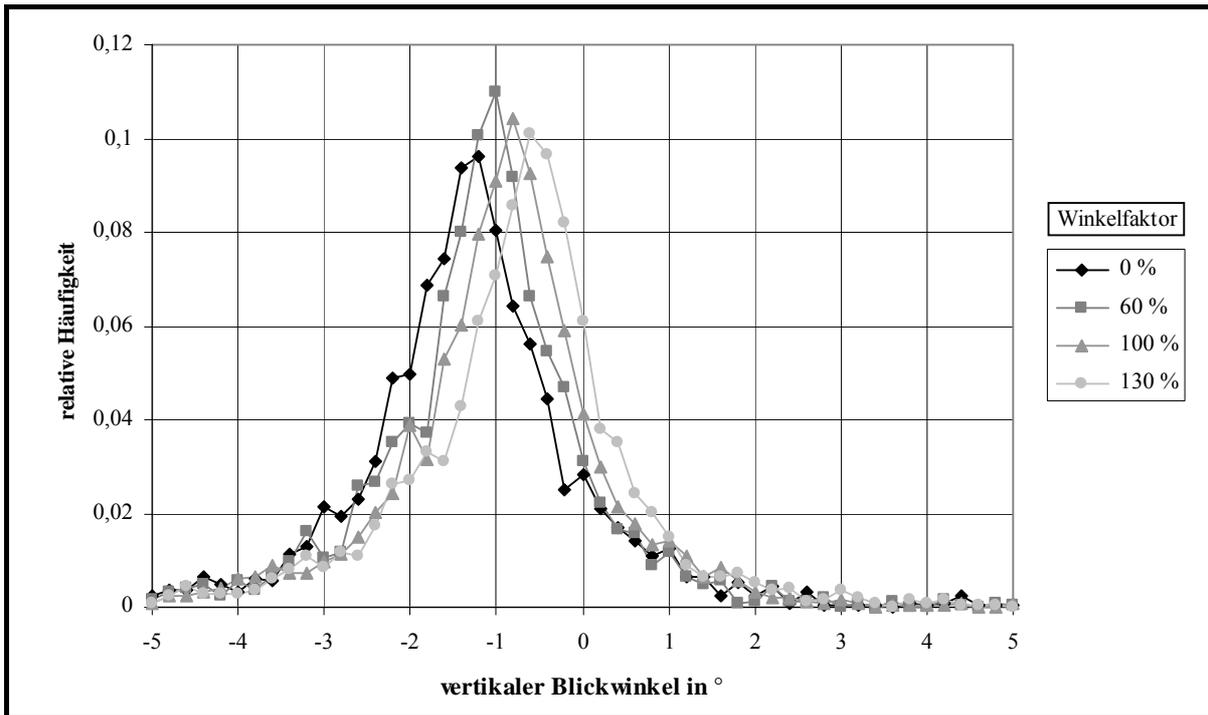


Bild 8.62: Häufigkeitsverteilung der vertikalen Blickwinkel in einer Wanne mit $R_v = 3800\text{ m}$

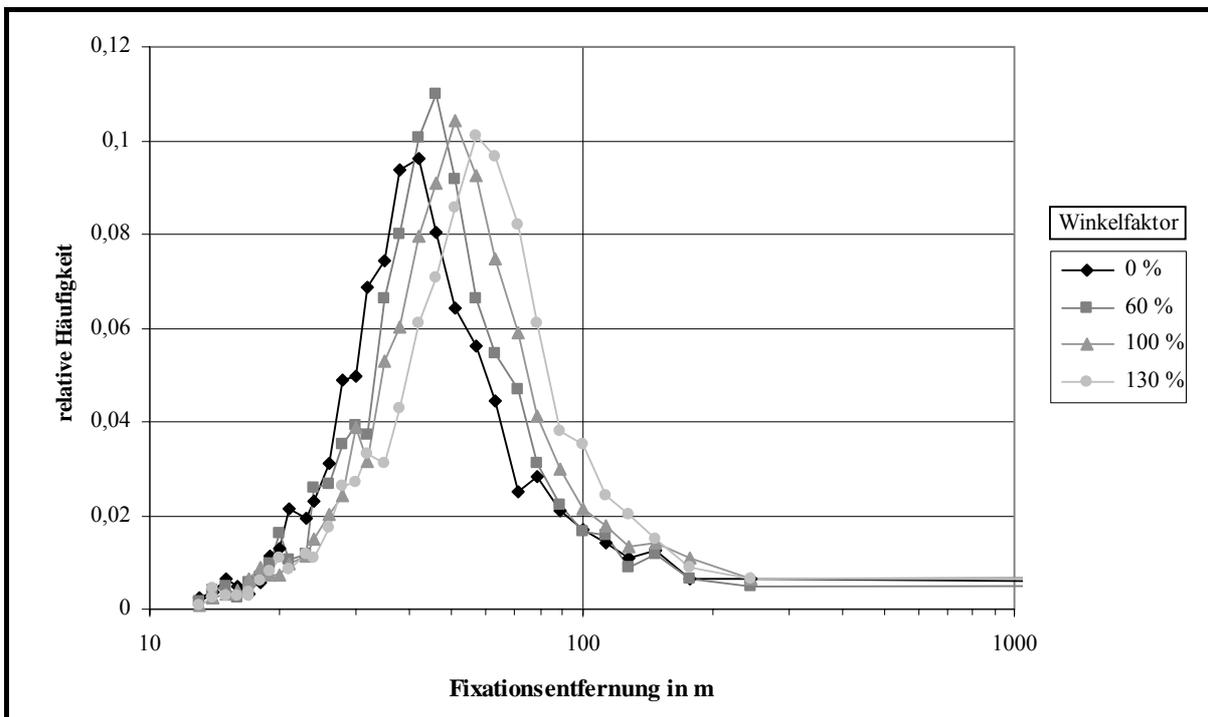


Bild 8.63: Häufigkeitsverteilung der Fixationsentfernungen in einer Wanne mit $R_v = 3800\text{ m}$

8.6 Ausschnitt aus dem Fragenkatalog

Seite 1					Datum:				
Fragenkatalog zur adaptiven Leuchtweitenregulierung									
Fahrer:		Alter:		Sehhilfe:		Ja / Nein		Xenon: Ja / Nein	
Version adap. LWR: A		Winkelfaktor = 1,0		Dämpffaktor = 1,0		Voraussichtweite = 35			
1. Wie ist die Ausleuchtung auf ebener Straße?									
Reichweite:									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
sehr gut		gut		befriedigend		ausreichend		mangelhaft	
Helligkeit:									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
zu dunkel		dunkel		optimal		hell		zu hell	
2. Wie ist die Ausleuchtung auf einer Kuppe?									
Reichweite:									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
sehr gut		gut		befriedigend		ausreichend		mangelhaft	
Helligkeit:									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
zu dunkel		dunkel		optimal		hell		zu hell	
3. Wie ist die Ausleuchtung in einer Wanne?									
Reichweite:									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
sehr gut		gut		befriedigend		ausreichend		mangelhaft	
Helligkeit:									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
zu dunkel		dunkel		optimal		hell		zu hell	
4. Wurde eine Bewegung der Lichtverteilung bemerkt?									
					Ja / Nein		bei "Ja" weiter mit 5, bei "Nein" weiter mit nächsten Bogen		
Winkelfaktor = 1,0		Dämpffaktor = 1,0		Voraussichtweite = 35					
5a. Bewegungen der Scheinwerfer									
Ist die Bewegungsgeschwindigkeit der Scheinwerfer?									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
zu langsam		langsam		ok		schnell		zu schnell	
Wie ist die Gleichmäßigkeit der Scheinwerferbewegungen?									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
sehr ruckartig		ruckartig		gleichmäßig		nervös		sehr nervös	
Winkelfaktor = 1,0		Dämpffaktor = 1,3		Voraussichtweite = 35					
5b. Bewegungen der Scheinwerfer									
Ist die Bewegungsgeschwindigkeit der Scheinwerfer?									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
zu langsam		langsam		ok		schnell		zu schnell	
Wie ist die Gleichmäßigkeit der Scheinwerferbewegungen?									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
sehr ruckartig		ruckartig		gleichmäßig		nervös		sehr nervös	

Seite 2

Winkelfaktor = 1,0 Dämpfungsfaktor = 0,8 Voraussichtweite = 35

5c. Bewegungen der Scheinwerfer**Ist die Bewegungsgeschwindigkeit der Scheinwerfer?**

1	2	3	4	5	6	7	8	9
zu langsam		langsam		ok		schnell		zu schnell

Wie ist die Gleichmäßigkeit der Scheinwerferbewegungen?

1	2	3	4	5	6	7	8	9
sehr ruckartig		ruckartig		gleichmäßig		nervös		sehr nervös

Winkelfaktor = 1,0 Dämpfungsfaktor = 0,5 Voraussichtweite = 35

5d. Bewegungen der Scheinwerfer**Ist die Bewegungsgeschwindigkeit der Scheinwerfer?**

1	2	3	4	5	6	7	8	9
zu langsam		langsam		ok		schnell		zu schnell

Wie ist die Gleichmäßigkeit der Scheinwerferbewegungen?

1	2	3	4	5	6	7	8	9
sehr ruckartig		ruckartig		gleichmäßig		nervös		sehr nervös

Winkelfaktor = 1,0 Dämpfungsfaktor = 1,0 Voraussichtweite = 35

6a. Räumliche / zeitliche Zuordnung**Erfolgt die Scheinwerferbewegung bei Krümmungsänderung der Fahrbahn?**

1	2	3	4	5	6	7	8	9
zu spät		spät		optimal		früh		zu früh

Winkelfaktor = 1,0 Dämpfungsfaktor = 1,0 Voraussichtweite = 25

6b. Räumliche / zeitliche Zuordnung**Erfolgt die Scheinwerferbewegung bei Krümmungsänderung der Fahrbahn?**

1	2	3	4	5	6	7	8	9
zu spät		spät		optimal		früh		zu früh

Winkelfaktor = 1,0 Dämpfungsfaktor = 1,0 Voraussichtweite = 40

6c. Räumliche / zeitliche Zuordnung**Erfolgt die Scheinwerferbewegung bei Krümmungsänderung der Fahrbahn?**

1	2	3	4	5	6	7	8	9
zu spät		spät		optimal		früh		zu früh

Winkelfaktor = 1,0 Dämpfungsfaktor = 1,0 Voraussichtweite = 30

6d. Räumliche / zeitliche Zuordnung**Erfolgt die Scheinwerferbewegung bei Krümmungsänderung der Fahrbahn?**

1	2	3	4	5	6	7	8	9
zu spät		spät		optimal		früh		zu früh

Seite 9					Datum:				
Fragenkatalog zur adaptiven Leuchtweitenregulierung									
Fahrer:		Alter:		Sehhilfe:		Ja / Nein		Xenon: Ja / Nein	
Version adap. LWR:		Dämpfungsfaktor = 1,0		Voraussichtweite = 35					
1. Wurden das Fahren als angenehm empfunden?									
ohne adaptive LWR:									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
trifft voll zu		trifft größtenteils zu			trifft teilweise zu		trifft weniger zu		trifft nicht zu
mit 60% adaptive LWR:									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
trifft voll zu		trifft größtenteils zu			trifft teilweise zu		trifft weniger zu		trifft nicht zu
mit 100% adaptive LWR:									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
trifft voll zu		trifft größtenteils zu			trifft teilweise zu		trifft weniger zu		trifft nicht zu
2. Fühlen Sie sich beim Fahren sicher?									
ohne adaptive LWR:									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
trifft voll zu		trifft größtenteils zu			trifft teilweise zu		trifft weniger zu		trifft nicht zu
mit 60% adaptive LWR:									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
trifft voll zu		trifft größtenteils zu			trifft teilweise zu		trifft weniger zu		trifft nicht zu
mit 100% adaptive LWR:									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
trifft voll zu		trifft größtenteils zu			trifft teilweise zu		trifft weniger zu		trifft nicht zu
3. Wurde Ihr Blick abgelenkt? (auf unrelevante, uninteressante Bereiche)									
ohne adaptive LWR:									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
trifft voll zu		trifft größtenteils zu			trifft teilweise zu		trifft weniger zu		trifft nicht zu
mit 60% adaptive LWR:									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
trifft voll zu		trifft größtenteils zu			trifft teilweise zu		trifft weniger zu		trifft nicht zu
mit 100% adaptive LWR:									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
trifft voll zu		trifft größtenteils zu			trifft teilweise zu		trifft weniger zu		trifft nicht zu
4. Wie beurteilen Sie die Sichtverhältnisse auf Kuppen?									
ohne adaptive LWR:									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
sehr gut		gut		befriedigend		ausreichend		mangelhaft	
mit 60% adaptive LWR:									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
sehr gut		gut		befriedigend		ausreichend		mangelhaft	
mit 100% adaptive LWR:									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
sehr gut		gut		befriedigend		ausreichend		mangelhaft	
5. Wie beurteilen Sie die Sichtverhältnisse in Wannen?									
ohne adaptive LWR:									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
sehr gut		gut		befriedigend		ausreichend		mangelhaft	
mit 60% adaptive LWR:									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
sehr gut		gut		befriedigend		ausreichend		mangelhaft	
mit 100% adaptive LWR:									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
sehr gut		gut		befriedigend		ausreichend		mangelhaft	