Projekt FASIVAL

FASIVAL - Entwicklung und Validierung eines Sichtweitenmodells zur Bestimmung der Fahrersichtweite

PROGRAMM MOTIV

Abschlussbericht

S. Kokoschka[‡], D. Gall[◇]

‡ Lichttechnisches Institut der Universität Karlsruhe
D-76128 Karlsruhe

◇ Fachgebiet Lichttechnik der Technischen Universität Ilmenau
D-98693 Ilmenau

April 2000

Die diesem Bericht zugrundeliegenden Arbeiten wurden seitens des bmb+f im Rahmen des Forschungsprojektes MOTIV, Förderkennzeichen 19K9627B4 (Sichere Straße) gefördert. Die Forschungsarbeiten wurden im Auftrag der Firmen BMW AG, Robert Bosch GmbH und Daimler Crysler AG unter Leitung von Prof. Dr. S. Kokoschka, Lichttechnisches Institut der Universität Karlsruhe und Prof. Dr. D. Gall, Fachgebiet Lichttechnik der TU Ilmenau, durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren.

Die Untersuchungen, Auswertungen und Ergebnisermittlungen wurden gemeinsam vom Lichttechnischen Institut der Universität Karlsruhe (LTI) und dem Fachbereich Lichttechnik der Universität Ilmenau (TUI) durchgeführt.

Der Partner LTI unter der Leitung von Prof. Dr. S. Kokoschka ist für die Modellierung der Sichtweiten zuständig. Die wissenschaftlichen Mitarbeiter dieser Arbeitsgruppe waren Dipl.-Physiker B. Pourat, Dr. B. Schultheiss sowie in der letzten Phase Dipl.-Ing. B. Müller. Zuständig für den experimentellen Teil dieses Projektes ist der Partner TUI unter der Leitung von Prof. Dr. D. Gall. Die wissenschaftlichen Mitarbeiter waren hier Dipl.-Ing. S. Wolf, Dipl.-Ing. C. Blankenhagen und anfangs Dipl.-Ing. S. Völker. Die wissenschaftliche Leitung und Koordination des Projektes FASIVAL lag in den Händen von Prof. Dr. S. Kokoschka.

Die Autoren dieses Berichtes möchten sich bei den genannten wissenschaftlichen Mitarbeitern für die engagierte Mitarbeit bedanken. Ein ganz besonderer Dank gilt den Vertretern der Industrie: dem Projektleiter Dipl. Phys. Wolfgang Hahn, *BMW AG*, Dr. Götz Kühnle, *Robert Bosch GmbH* und Hans-Georg Leis, *DaimlerChrysler AG* für die jederzeit gute und konstruktive Zusammenarbeit und Unterstützung in diesem Projekt.

Inhaltsverzeichnis

1 Aufgabenstellung **1**

2 Theoretische Grundlagen der Sichtweitenmodellation **3**

2.1 Atmosphärenmodell 3

2.2 Das Beobachtermodell 5

2.2.1 Leuchtdichtekontraste der Sehobjekte 6

2.2.2 Theoretische Schwellenkontraste der Sehobjekte 7

2.2.3 Praktische Schwellenkontraste 9

2.2.4 Überschwelligkeitsfaktor Visibility Level 14

2.2.5 Kontrast- und Umfeldleuchtdichten 15

2.2.6 Äquivalente Schleier- und Adaptationsleuchtdichte 21

2.2.7 Schritte zur Sichtweitenbestimmung 23

3 Das Sichtweitenprogramm FASIVALSICHT **25**

3.1 Geometrische Zusammenhänge 25

3.2 Spezifikationen zur Berechnung der Szenenleuchtdichten 32

3.3 Eigenschaften der Sehobjekte 36

3.4 Sichtweitenprogrammierung 37

4 Theoretische Modellergebnisse **41**

4.1 Praxisfaktoren zur Berechnung der praktischen Schwellenkontraste 41

4.2 Zusammenhänge zwischen den Sichtweitenvariablen 46

4.2.1 Streuleuchtdichte und Normsichtweite 47

4.2.2 Äquivalente Schleierleuchtdichte und Normsichtweite 48

4.2.3 Adaptationsleuchtdichte und Normsichtweite 49

4.2.4 Randkontrast und Sehobjektabstand 50

4.2.5 Visibility Level und Sehobjektabstand 51

4.2.6 Reflexionsgrad und Sichtweite 52

4.2.7 Visibility Level und Tarnung . . . 53
4.2.8 Beispiele von Leuchtdichteverteilungen . . . 54
4.3 Ergebnisse der Sichtweitenberechnungen . . . 57
4.3.1 Voraussetzungen und Randbedingungen . . . 57
4.3.2 Sichtweiten der Kernsituationen . . . 59
4.3.2.1 Großes dunkles Sehobjekt . . . 61
4.3.2.2 Kleines dunkles Sehobjekt . . . 63
4.3.2.3 Kleines mittelhelles Sehobjekt . . . 65
4.3.2.4 Kleines helles Sehobjekt . . . 67
4.3.2.5 Schlussleuchte . . . 69
4.3.2.6 Nebelschlussleuchte . . . 71
4.3.3 Vergleich der Sehobjektklassen . . . 73

5 Experimentelle Sichtweitenuntersuchungen 77
5.1 Untersuchungsbedingungen . . . 77
5.2 Messung lichttechnischer Variablen . . . 80
5.2.1 Umfeldleuchtdichte und Normsichtweite . . . 80
5.2.2 Zeitlicher Verlauf der gemessenen Normsichtweite . . . 81
5.3 Sichtweitenergebnisse . . . 84
5.3.1 Sichtweiten der Kernsituationen . . . 84
5.3.2 Subjektive Bewertung der Sichtverhältnisse . . . 96
5.3.3 Ergebnisse mit großem Versuchspersonenkollektiv . . . 98

6 Messung des Visibility Levels 103
6.1 Auswahl der lichttechnischen Parameter . . . 103
6.2 Auswahl des Visibilitymeterprinzips und Messergebnisse . . . 105
6.3 Vergleich der VL-Messungen mit den VL-Berechnungen . . . 108

7 Einsatzmöglichkeiten des Sichtweiten-Demonstrationsmessgerätes 111
7.1 Aufbau des Sichtweiten-Demonstrationsmessgerätes . . . 111
7.2 Einsatz des Sensors für die horizontale Beleuchtungsstärke . . . 115
7.3 Einsatz des Sensors für die mittlere Gesichtsfeldleuchtdichte . . . 121

8 Vergleich von gemessenen und berechneten Sichtweiten 123
8.1 Die Vergleichsbedingungen . . . 123
8.2 Vergleich der Sichtweiten . . . 124
8.3 Bewertung des Vergleichs . . . 125

9 Zusammenfassung **139**

Anhang **141**

A Tabellen der theoretischen Sichtweitenuntersuchungen **141**

B Tabellen der Messwerte der experimentellen Sichtweitenuntersuchungen **149**

C Tabellen des Vergleichs von gemessenen mit den berechneten Sichtweiten **187**

D Liste der häufig verwendeten Symbole **207**

Literatur **211**

Abbildungsverzeichnis

2.1 Das physikalisches Atmosphärenmodell 4
2.2 Homogene Referenzsituation des physikalischen Beobachtermodells 6
2.3 Theoretische Schwellenkontraste 9
2.4 Beispiel für eine Trefferfunktion 10
2.5 Theoretischer Schwellenerhöhungsfaktor TSF 13
2.6 Schema der Beobachtungssituation 16
2.7 Komponenten des Randmodells 16
2.8 Berechnung der Leuchtdichten von beleuchteten Sehobjekten 17
2.9 Berechnung der Leuchtdichten von selbstleuchtenden Sehobjekten 20
2.10 Simulation des retinalen Streulichtschleiers 21

3.1 Das Koordinatensystem 26
3.2 Der Winkel zwischen zwei Punkten im Außenraum 26
3.3 Darstellung der Rasterung der Szenen 27
3.4 Darstellung des Raumwinkelelements eines Objektes im Außenraum 28
3.5 Das bewertete Gesichtsfeld 29
3.6 Kategorien der Objektpunkte 29
3.7 Beitrag einzelner Randpunkte zum Objektumfangswinkel 31
3.8 Zur Bestimmung des Objektumfangwinkels 31
3.9 Komponenten zur Berechnung des Randkontrastes 35
3.10 Beispiel einer iterativen Sichtweitenbestimmung 37
3.11 Flussdiagram des Programmablaufs 38
3.12 Flussdiagramm des Visibility Levels VL 39

4.1 Beispiel zur Bestimmung der Praxisfaktoren 42
4.2 Beispiel eines Sichtweitenvergleichs 45
4.3 Mittlere Streuleuchtdichte im Gesichtsfeld 47
4.4 Äquivalente Schleierleuchtdichte im Gesichtsfeld 48

4.5 Adaptationsleuchtdichte des Gesichtsfeldes 49
4.6 Mittlerer Randkontrast und Sehobjektabstand 50
4.7 Visibility Level und Sehobjektabstand 51
4.8 Tarnsituation eines Sehobjektes 52
4.9 Unstetiges Abstandsverhalten des Visibility Levels im Nahbereich 53
4.10 2D-Grafik der Leuchtdichteverteilung eines Sehobjektes bei Nacht 55
4.11 2D-Grafik der Leuchtdichteverteilung eines Sehobjektes bei Tag 55
4.12 Sichtweiten des großen dunklen Sehobjektes, Abblendlicht, abhängig von V_N 61
4.13 Sichtweiten des großen dunklen Sehobjektes, Abblendlicht, abhängig von E_h 61
4.14 Sichtweiten des großen dunklen Sehobjektes, Nebellicht, abhängig von V_N 62
4.15 Sichtweiten des großen dunklen Sehobjektes, Nebellicht, abhängig von E_h 62
4.16 Sichtweiten des kleinen dunklen Sehobjektes, Abblendlicht, abhängig von V_N 63
4.17 Sichtweiten des kleinen dunklen Sehobjektes, Abblendlicht, abhängig von E_h 63
4.18 Sichtweiten des kleinen dunklen Sehobjektes, Nebellicht, abhängig von V_N 64
4.19 Sichtweiten des kleinen dunklen Sehobjektes, Nebellicht, abhängig von E_h 64
4.20 Sichtweiten des kleinen mittelhellen Sehobjektes, Abblendlicht, abhängig von V_N . . 65
4.21 Sichtweiten des kleinen mittelhellen Sehobjektes, Abblendlicht, abhängig von E_h . . 65
4.22 Sichtweiten des kleinen mittelhellen Sehobjektes, Nebellicht, abhängig von V_N 66
4.23 Sichtweiten des kleinen mittelhellen Sehobjektes, Nebellicht, abhängig von E_h 66
4.24 Sichtweiten des kleinen hellen Sehobjektes, Abblendlicht, abhängig von V_N 67
4.25 Sichtweiten des kleinen hellen Sehobjektes, Abblendlicht, abhängig von E_h 67
4.26 Sichtweiten des kleinen hellen Sehobjektes, Nebellicht, abhängig von V_N 68
4.27 Sichtweiten des kleinen hellen Sehobjektes, Nebellicht, abhängig von E_h 68
4.28 Sichtweiten der Schlussleuchte, Abblendlicht, abhängig von V_N 69
4.29 Sichtweiten der Schlussleuchte, Abblendlicht, abhängig von E_h 69
4.30 Sichtweiten der Schlussleuchte, Nebellicht, abhängig von V_N 70
4.31 Sichtweiten der Schlussleuchte, Nebellicht, abhängig von E_h 70
4.32 Sichtweiten der Nebelschlussleuchte, Abblendlicht, abhängig von V_N 71
4.33 Sichtweiten der Nebelschlussleuchte, Abblendlicht, abhängig von E_h 71
4.34 Sichtweiten der Nebelschlussleuchte, Nebellicht, abhängig von V_N 72
4.35 Sichtweiten der Nebelschlussleuchte, Nebellicht, abhängig von E_h 72

5.1 Beispiel einer Leuchtdichtemessung bei Tag als Graustufendarstellung 79
5.2 Beispiel einer Leuchtdichtemessung bei Nacht als Graustufendarstellung 79
5.3 Normsichtweiten-Vergleichsmessung 80

5.4 Quotient der Messwerte aus Abb. 5.3 81
5.5 Nachtsituation, großes dunkles Sehobjekt, Abblendlicht 85
5.6 Nachtsituation, kleines dunkles Sehobjekt, Abblendlicht 85
5.7 Nachtsituation, kleines helles Sehobjekt, Abblendlicht 86
5.8 Nachtsituation, kleines dunkles Sehobjekt, Abblendlicht und Nebelscheinwerfer . . . 86
5.9 Nachtsituation, Nebelschlussleuchte, Abblendlicht 87
5.10 Nachtsituation, Schlussleuchten, Abblendlicht 87
5.11 Nachtsituation, dunkles Sehobjekt, Abblendlicht, sicher erkannt 88
5.12 Nachtsituation, kleines Sehobjekt, Abblendlicht, sicher erkannt 88
5.13 Nachtsituation, kleines dunkles Sehobjekt, sicher erkannt 89
5.14 Nachtsituation, sicher erkannt 89
5.15 Tagsituation, großes dunkles Sehobjekt, kein Licht 90
5.16 Tagsituation, kleines dunkles Sehobjekt, kein Licht 90
5.17 Tagsituation, kleines mittelhelles Sehobjekt, kein Licht 91
5.18 Tagsituation, kleines helles Sehobjekt, kein Licht 91
5.19 Tagsituation, kleines dunkles Sehobjekt, Abblendlicht 92
5.20 Tagsituation, Nebelschlussleuchte, kein Licht 92
5.21 Tagsituation, Schlussleuchten, kein Licht 93
5.22 Tagsituation, dunkles Sehobjekt, kein Licht 93
5.23 Tagsituation, kleines Sehobjekt, kein Licht 94
5.24 Tagsituation, kleines dunkles Sehobjekt, sicher erkannt 94
5.25 Tagsituation, kein Licht am Versuchspersonenfahrzeug, sicher erkannt 95
5.26 Subjektives Beobachterurteil für die Nachtsituationen 96
5.27 Subjektives Beobachterurteil für die Tagsituationen 97
5.28 Subjektives Beobachterurteil für alle Versuchssituationen 97
5.29 Häufigkeitsverteilung, kleines dunkles Sehobjekt, gerade erkannt 99
5.30 Häufigkeitsverteilung, kleines dunkles Sehobjekt, sicher erkannt 100
5.31 Häufigkeitsverteilung, kleines helles Sehobjekt, gerade erkannt 100
5.32 Häufigkeitsverteilung, kleines helles Sehobjekt, sicher erkannt 101
5.33 Sichtweitenmittelwerte und -standardabweichung in Abhängigkeit vom Sehobjekt . . 101
5.34 Sichtweitenmittelwerte und -standardabweichung in Abhängigkeit vom Visus 102
5.35 Sichtweitenmittelwerte und -standardabweichung in Abhängigkeit vom Visus, MW . 102

6.1 Typische Versuchssituation während der VL-Messungen (Messentfernung 100 m) . . 104
6.2 Gemessene Schwellenleuchtdichten $\overline{L}$ des Sehobjektes 106

6.3 Aufbau des verwendeten Schwellenkontrast-VL-Meters 106
6.4 VL-Messungen mit drei Versuchspersonen 107
6.5 VL-Mittelwerte 108
6.6 Vergleich der gemessenen VL-Werte mit den berechneten VL-Werten 109

7.1 Blockschaltbild des Demonstrationsmessgerätes 112
7.2 Linearitätsfehler des Leuchtdichtekanals für 5° Messfeld 112
7.3 Linearitätsfehler des Leuchtdichtekanals für 10° Messfeld 113
7.4 Linearitätsfehler des Beleuchtungsstärkekanals 113
7.5 Leuchtdichteverlauf, großes Versuchspersonenkollektiv 114
7.6 Verlauf der Beleuchtungsstärke, großes Versuchspersonenkollektiv 114
7.7 Sichtweitensensor: Kleines dunkles Sehobjekt (Nacht/Tag), Normsichtweite 2,4 km („trübungsfrei“) 116
7.8 Verlauf und Approximation des Parameters b 117
7.9 Sichtweitensensor: Kleines dunkles Sehobjekt, Vergleich Rechnung-Messung, ($E_h = 0,1\ lx$) 117
7.10 Sichtweitensensor: Kleines dunkles Sehobjekt, Vergleich Rechnung-Messung, ($E_h = 1\ lx$) 118
7.11 Sichtweitensensor: Kleines dunkles Sehobjekt, Vergleich Rechnung-Messung, ($E_h = 10\ lx$) 118
7.12 Sichtweitensensor: Kleines dunkles Sehobjekt, Vergleich Rechnung-Messung, ($E_h = 100\ lx$) 119
7.13 Sichtweitensensor: Kleines dunkles Sehobjekt, Vergleich Rechnung-Messung, ($E_h = 1000\ lx$) 119
7.14 Sichtweitensensor: Kleines dunkles Sehobjekt, Vergleich Rechnung-Messung, ($E_h = 10\,000\ lx$) 120
7.15 Sichtweitensensor: Kleines dunkles Sehobjekt, Vergleich Rechnung-Messung, ($E_h = 30\,000\ lx$) 120
7.16 Sichtweite und Leuchtdichte, Abblendlicht 122
7.17 Sichtweite und Leuchtdichte, Abblend- und Nebellicht 122

8.1 Vergleich der Sichtweiten für das große dunkle Sehobjekt bei Tage 127
8.2 Sichtweiten-Korrelationsdiagramm für die Beobachtungssituationen von Abb. (8.1) . 127
8.3 Vergleich der Sichtweiten für das große dunkle Sehobjekt bei Nacht 128
8.4 Sichtweiten-Korrelationsdiagramm für die Beobachtungssituationen von Abb. (8.3) . 128
8.5 Vergleich der Sichtweiten für das kleine dunkle Sehobjekt bei Tage 129
8.6 Sichtweiten-Korrelationsdiagramm für die Beobachtungssituationen von Abb. (8.5) . 129
8.7 Vergleich der Sichtweiten für das kleine dunkle Sehobjekt bei Nacht 130

8.8 Sichtweiten-Korrelationsdiagramm für die Beobachtungssituationen von Abb. (8.7) . 130
8.9 Vergleich der Sichtweiten für das kleine mittelhelle Sehobjekt bei Tage 131
8.10 Sichtweiten-Korrelationsdiagramm für die Beobachtungssituationen von Abb. (8.9) . 131
8.11 Vergleich der Sichtweiten für das kleine helle Sehobjekt bei Tage 132
8.12 Sichtweiten-Korrelationsdiagramm für die Beobachtungssituationen von Abb. (8.11) 132
8.13 Vergleich der Sichtweiten für das kleine helle Sehobjekt bei Nacht 133
8.14 Sichtweiten-Korrelationsdiagramm für die Beobachtungssituationen von Abb. (8.13) 133
8.15 Vergleich der Sichtweiten für die Schlussleuchte bei Tage 134
8.16 Sichtweiten-Korrelationsdiagramm für die Beobachtungssituationen von Abb. (8.15) 134
8.17 Vergleich der Sichtweiten für die Schlussleuchte bei Nacht 135
8.18 Sichtweiten-Korrelationsdiagramm für die Beobachtungssituationen von Abb. (8.17) 135
8.19 Vergleich der Sichtweiten für die Nebelschlussleuchte bei Tage 136
8.20 Sichtweiten-Korrelationsdiagramm für die Beobachtungssituationen von Abb. (8.19) 136
8.21 Vergleich der Sichtweiten für die Nebelschlussleuchte bei Nacht 137
8.22 Sichtweiten-Korrelationsdiagramm für die Beobachtungssituationen von Abb. (8.21) 137

Tabellenverzeichnis

3.1 Die Kategorien der Objektpunkte 30

3.2 Normsichtweiten, bei denen die Streuleuchtdichten der Scheinwerfer berechnet wurden 32

3.3 Spezifikationen der Fahrzeugscheinwerfer 33

3.4 Koordinaten der Scheinwerfer 33

3.5 Bereich untersuchter Beleuchtungsstärken 33

3.6 Geometrische Daten des großen dunklen Sehobjektes 36

3.7 Geometrische Daten der Schlussleuchte 36

4.1 Beispiel zur Bestimmung der Praxisfaktoren 43

4.2 Zusammenfassung der ermittelten Praxisfaktoren 44

4.3 Beispiele von berechneten Szenendaten 56

4.4 Absolute Sichtweiten im Nebelbereich 74

4.5 Bezogene Sichtweiten (bezogen auf die Normsichtweiten) im Nebelbereich 75

8.1 Anzahl der verglichenen Sichtweiten 124

8.2 Mittlere prozentuale Abweichung zwischen gemessenen und berechneten Sichtweiten. Die Randmittelwerte berücksichtigen die Häufigkeit der Messsituation nach Tabelle 8.1 126

8.3 Korrelationskoeffizient zwischen gemessenen und berechneten Sichtweiten 126

A.1 Berechnete Sichtweiten, großes dunkles Sehobjekt, Abblendlicht 142

A.2 Berechnete Sichtweiten, großes dunkles Sehobjekt, Nebellicht 142

A.3 Berechnete Sichtweiten, kleines dunkles Sehobjekt, Abblendlicht 143

A.4 Berechnete Sichtweiten, kleines dunkles Sehobjekt, Nebellicht 143

A.5 Berechnete Sichtweiten, kleines mittelhelles Sehobjekt, Abblendlicht 144

A.6 Berechnete Sichtweiten, kleines mittelhelles Sehobjekt, Nebellicht 144

A.7 Berechnete Sichtweiten, kleines helles Sehobjekt, Abblendlicht 145

A.8 Berechnete Sichtweiten, kleines helles Sehobjekt, Nebellicht 145

A.9 Berechnete Sichtweiten, Schlussleuchte, Abblendlicht 146

A.10 Berechnete Sichtweiten, Schlussleuchte, Nebellicht 146
A.11 Berechnete Sichtweiten, Nebelschlussleuchte, Abblendlicht 147
A.12 Berechnete Sichtweiten, Nebelschlussleuchte, Nebellicht 147

B.1 Normsichtweiten-Vergleichsmessung (AEG-MS05 zu FUMOSENS E) 150
B.1 Normsichtweiten-Vergleichsmessung (AEG-MS05 zu FUMOSENS E) 151
B.2 Daten von den 12 Versuchspersonen der Kernuntersuchungen 152
B.3 Nachtsituation, großes dunkles Sehobjekt, Abblendlicht 153
B.3 Nachtsituation, großes dunkles Sehobjekt, Abblendlicht 154
B.4 Nachtsituation, kleines dunkles Sehobjekt, Abblendlicht 155
B.4 Nachtsituation, kleines dunkles Sehobjekt, Abblendlicht 156
B.5 Nachtsituation, kleines helles Sehobjekt, Abblendlicht 157
B.5 Nachtsituation, kleines helles Sehobjekt, Abblendlicht 158
B.6 Nachtsituation, kleines dunkles Sehobjekt, Abblend- und Nebellicht 159
B.6 Nachtsituation, kleines dunkles Sehobjekt, Abblend- und Nebellicht 160
B.7 Nachtsituation, Nebelschlussleuchte, Abblendlicht 161
B.8 Nachtsituation, Schlussleuchten, Abblendlicht 162
B.9 Tagsituation, großes dunkles Sehobjekt, kein Licht 163
B.9 Tagsituation, großes dunkles Sehobjekt, kein Licht 164
B.10 Tagsituation, kleines dunkles Sehobjekt, kein Licht 165
B.10 Tagsituation, kleines dunkles Sehobjekt, kein Licht 166
B.11 Tagsituation, kleines mittelhelles Sehobjekt, kein Licht 167
B.11 Tagsituation, kleines mittelhelles Sehobjekt, kein Licht 168
B.12 Tagsituation, kleines helles Sehobjekt, kein Licht 169
B.12 Tagsituation, kleines helles Sehobjekt, kein Licht 170
B.13 Tagsituation, kleines dunkles Sehobjekt, Abblendlicht 171
B.13 Tagsituation, kleines dunkles Sehobjekt, Abblendlicht 172
B.14 Tagsituation, Nebelschlussleuchte, kein Licht 173
B.14 Tagsituation, Nebelschlussleuchte, kein Licht 174
B.15 Tagsituation, Schlussleuchten, kein Licht 175
B.15 Tagsituation, Schlussleuchten, kein Licht 176
B.16 Einzelergebnisse der Sichtweitenmessung 177
B.16 Einzelergebnisse der Sichtweitenmessung 178
B.17 Messwerte der Visibility-Messungen 179
B.17 Messwerte der Visibility-Messungen 180

B.18 Messwerte zur Bestimmung des Linearitätsfehlers, 5°-Messfeld 181
B.18 Messwerte zur Bestimmung des Linearitätsfehlers, 5°-Messfeld 182
B.19 Messwerte zur Bestimmung des Linearitätsfehlers, 10°-Messfeld 183
B.19 Messwerte zur Bestimmung des Linearitätsfehlers, 10°-Messfeld 184
B.20 Bestimmung des Linearitätsfehlers des Beleuchtungsstärkekanals 185
B.20 Bestimmung des Linearitätsfehlers des Beleuchtungsstärkekanals 186

C.1 Vergleich der Sichtweiten für das große dunkle Sehobjekt bei Tage 188
C.1 Vergleich der Sichtweiten für das große dunkle Sehobjekt bei Tage 189
C.2 Vergleich der Sichtweiten für das große dunkle Sehobjekt bei Nacht 190
C.3 Vergleich der Sichtweiten für das kleine dunkle Sehobjekt bei Tag 191
C.3 Vergleich der Sichtweiten für das kleine dunkle Sehobjekt bei Tag 192
C.3 Vergleich der Sichtweiten für das kleine dunkle Sehobjekt bei Tag 193
C.4 Vergleich der Sichtweiten für das kleine dunkle Sehobjekt bei Nacht 194
C.4 Vergleich der Sichtweiten für das kleine dunkle Sehobjekt bei Nacht 195
C.5 Vergleich der Sichtweiten für das kleine mittelhelle Sehobjekt bei Tag 196
C.5 Vergleich der Sichtweiten für das kleine mittelhelle Sehobjekt bei Tag 197
C.6 Vergleich der Sichtweiten für das kleine helle Sehobjekt bei Tag 198
C.6 Vergleich der Sichtweiten für das kleine helle Sehobjekt bei Tag 199
C.7 Vergleich der Sichtweiten für das kleine helle Sehobjekt bei Nacht 200
C.8 Vergleich der Sichtweiten für die Schlussleuchte bei Tag 201
C.8 Vergleich der Sichtweiten für die Schlussleuchte bei Tag 202
C.9 Vergleich der Sichtweiten für die Schlussleuchte bei Nacht 203
C.10 Vergleich der Sichtweiten für die Nebelschlussleuchte bei Tag 204
C.10 Vergleich der Sichtweiten für die Nebelschlussleuchte bei Tag 205
C.11 Vergleich der Sichtweiten für die Nebelschlussleuchte bei Nacht 206

Kapitel 1

Aufgabenstellung

Im vorliegenden Bericht wird ein experimentell validiertes Modell zur Bestimmung von Sichtweiten im Straßenverkehr bei Nebel vorgestellt. Dieses im Jahre 1997 begonnene Projekt FASIVAL (Fahrersichtweiten-Validierung) baut auf dem im Jahre 1995 abgeschlossenen Projekt FASIMOD (Fahrersichtweiten-Modellierung) auf, in dem die prinzipielle Möglichkeit gezeigt wurde, Fahrersichtweiten bei Nebel zu modellieren. Wegen unvollständiger Daten für die von den Fahrzeugscheinwerfern erzeugte Streuleuchtdichte konnten die Sichtweitenmodellierungen jedoch nur stichprobenartig durchgeführt werden. Erster Schwerpunkt dieses FASIVAL-Projektes ist daher die Ausdehnung der Modellierungen auf den gesamten Trübungs- und Helligkeitsbereich. Hinzu kommt die Entwicklung wesentlicher Modellverbesserungen.

Im Projekt FASIMOD blieb ferner offen, ob und inwieweit die berechneten Sichtweiten den Sichtweiten im realen Straßenverkehr entsprechen, weil die Seherschwernisse des realen Fahrbetriebs gegenüber der simulierten Beobachtersituation nur geschätzt werden konnten. Zweiter Schwerpunkt dieses Projektes ist somit die Validierung des Sichtweitenmodells, die mit Hilfe von umfassenden Feldexperimenten durchgeführt wurde.

Aus inhaltlicher Sicht gliedert sich dieser Bericht in drei Teile. Der erste Teil befasst sich mit der theoretischen Modellierung der Sichtweiten. Dazu werden zunächst im Kapitel 2 die physikalisch-physiologischen Grundlagen des Nebelsehens zusammengefasst. In Kapitel 3 wird das im Rahmen dieses Projektes entwickelte Sichtweitenprogramm *FASIVALSICHT* erläutert. Die Modellergebnisse sind der Inhalt von Kapitel 4.

Der zweite Teil dieses Berichtes befasst sich mit den experimentellen Untersuchungen der Sichtverhältnisse bei Nebel. Schwerpunkt dieses Teils ist die Messung von Sichtweiten unter verkehrsrelevanten Nebelbedingungen mit Hilfe von Versuchspersonen. Darüber wird in Kapitel 5 berichtet. In Ergänzung zur Sichtweitenmessung wird in Kapitel 6 die Sichtbarkeit ausgewählter Sehobjekte durch ein spezielles Sichtbarkeitsmaß, das sog. Visibility Level bewertet. In Kapitel 7 werden die praktischen Möglichkeiten zur Sichtweitenermittlung demonstriert.

Inhalt des dritten Teils dieses Berichtes ist ein Vergleich zwischen den theoretisch berechneten und den experimentell ermittelten Sichtweiten, siehe Kapitel 8, sowie eine Zusammenfassung in Kapitel 9. Im Anhang sind die numerischen Ergebnisse in tabellarischer Form zusammengefasst.

Kapitel 2

Theoretische Grundlagen der Sichtweitenmodellation

Inhalt dieses Kapitels ist die Begründung und Dokumentation der Sichtweitenberechnungen.

Das im Folgenden in seinen grundlegenden Eigenschaften beschriebene Sichtweitenmodell basiert auf zwei unabhängigen Teilmodellen. Erstens auf einem Modell zur Beschreibung der physikalisch-lichttechnischen Eigenschaft des Beobachterraumes, einschließlich der Atmosphäre, der Fahrbahn und der Sehobjekte. Das zweite Teilmodell beschreibt die physiologischen Eigenschaften des Beobachters. Beide Modelle zusammen ermöglichen die Bestimmung von Sichtweiten. Die Grundlagen zur Berechnung von Sichtweiten verkehrsrelevanter Sehobjekte im Nebel wurden bereits von Behrens und Kokoschka (Behrens,Kokoschka, 1976) beschrieben. Darauf aufbauend wurde das im FASIMOD-Bericht (FASIMOD, 1995) beschriebene Modell entwickelt, das im Rahmen dieses Projektes weiter ausgebaut wurde.

2.1 Atmosphärenmodell

Im genannten FASIMOD-Bericht sind neben einem relativ einfach aufgebauten Atmosphärenmodell eine Reihe sehr komplexer Modelle zur physikalischen Kennzeichnung des Strahlungstransportes in der getrübten Atmosphäre beschrieben, die vor allem eine vertikale Schichtung der Atmosphäre sowie auch die Sonneneinstrahlung berücksichtigen.

Reale Szenen im Straßenverkehr zeichnen sich aber im Allgemeinen durch eine weitgehend homogene Schichtung in horizontaler Richtung aus. Die vertikale oder schräge Schichtung spielt i.a. keine Rolle, da die zu beobachtenden Sehobjekte sich in Bodennähe bei praktisch horizontaler Blickrichtung befinden. Auch direkte Sonneneinstrahlung in den Beobachterraum zwischen Fahrer und Sehobjekt scheidet in der Regel aus. Außerdem hat sich gezeigt, dass die mit Hilfe von komplexen Atmosphärenmodellen berechneten Sehweiten keine systematischen Unterschiede gegenüber den mit einem einfachen Atmosphärenmodell berechneten ergaben. Für Zwecke von Sichtweitenmodellierungen genügt es, die Extinktionseigenschaften des Nebels in horizontaler Richtung zu erfassen. Die Problematik der Sichtweitenmodellierung liegt vor allem im Bereich der Modellierung der Beobachtereigenschaften.

Das dieser Untersuchung zugrunde liegende Atmosphärenmodell beruht auf einer in horizontaler Richtung homogenen Nebelschicht, die in vertikaler Richtung beliebig dick aber optisch dicht ist, so dass keine direkte Sonneneinstrahlung bis zum Boden vordringt. Siehe Abb. (2.1). Das angenommene Atmosphärenmodell hat somit folgende Eigenschaften:

- In horizontaler Richtung homogene Trübungsschichtung
- In vertikaler und schräger Richtung optisch dichte Schichtung
- Die Schwächungseigenschaften der Trübung werden durch den Schwächungsexponenten bzw. die Normsichtweite beschrieben
- Die zur Berechnung der von den Fahrzeugscheinwerfern erzeugten Streulichtdichten benötigte Phasenfunktion zur Beschreibung der winkelabhängigen Streuung beruht auf Messungen bei realem Nebel
- Die Leuchtdichteverteilung des Nebelhimmels wird als homogen mit konstanter Leuchtdichte angenommen

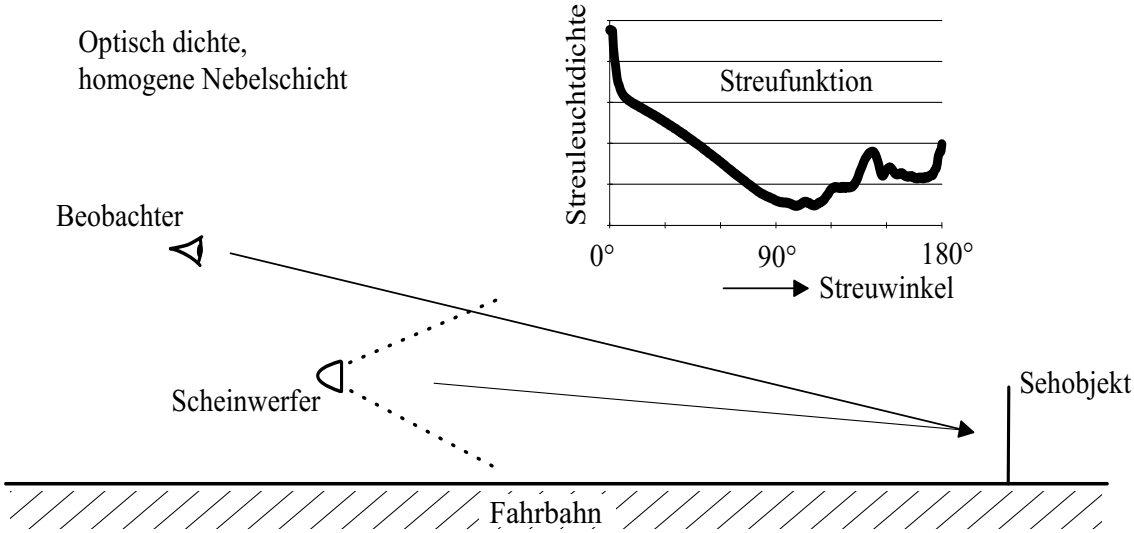


Abbildung 2.1: Das physikalisches Atmosphärenmodell. Die Atmosphäre in dem hier entwickelten Sichtweitenmodell wird durch eine homogene, optisch dichte Trübungsschicht über dem Boden simuliert. Die Streufunktion des Nebels beruht auf Messungen von Kooß (Kooß, 1993) bei natürlichen Bedingungen.

Basisgröße Normsichtweite

Die Trübung der Atmosphäre wird in der Meteorologie nach Koschmieder (Koschmieder, 1925) durch die sog. Normsichtweite V_N gekennzeichnet, die anschaulich als die Sichtweite eines ausgedehnten schwarzen Zieles interpretiert werden kann, das bei Tage bei Annahme eines Schwellenkontrastes von 2 % oder 5 % gegen den Horizont beobachtet wird. (DIN 5037).

Bei Annahme einer homogenen Trübung folgt dann bei gegebenem Schwächungsexponent σ_e sowie bei Annahme einer 2 % Kontrastschwelle für die sog. 2 %-Normsichtweite:

$$V_N(2\%) = \frac{3.91}{\sigma_e} \tag{2.1}$$

und für die sog. 5 %-Normsichtweite bzw. die sog. Meteorologische Normsichtweite:

$$V_N(5\%) = \frac{3.00}{\sigma_e}. \tag{2.2}$$

Da sich die Normsichtweite auf ein kontrastreiches, ausgedehntes Sichtziel bezieht, ist zu vermuten, dass von ihr nicht auf eine Sichtweite von realen Sehobjekten im Straßenverkehr geschlossen werden kann. Die Sehbedingungen im Straßenverkehr sind erheblich ungünstiger. Unterschiedliche Sehobjekte, inhomogene Gesichtsfeldleuchtdichten, sich ändernde Tages- und Nachthelligkeiten und von diesen Einflussgrößen abhängiges Beobachterverhalten unterscheiden sich grundlegend von den Bedingungen, die der Meteorologischen- oder Normsichtweite zugrunde liegen. Die Bedeutung der Normsichtweite liegt somit in zwei Punkten. Erstens kann man sie bei Tage zumindest näherungsweise mit empfindungsgemäßen Sichtbezeichnungen verknüpfen. Nach DIN 5037 (DIN 5037) entsprechen Normsichtweiten von 50 m bis 200 m einem dichten Nebel, ab 200 m bis 500 m einem mäßig dichten Nebel und ab 500 m bis 1000 m einem subjektiv leichten Nebel. Normsichtweiten zwischen 1000 m und 2000 m werden subjektiv als Nebeldunst empfunden, ab 2000 m als Dunst. Von klarer Sicht spricht man bei Normsichtweiten größer als 10 000 m. Zweitens bietet sich die Normsichtweite als Bezugsgröße an, mit der die tatsächliche Sichtweite realer Sichtziele verglichen werden kann. In diesem Projekt wird die Trübung der Atmosphäre durch die 5 %- Normsichtweite beschrieben.

2.2 Das Beobachtermodell

Im Folgenden werden die Basiselemente des physiologischen Beobachtermodells, d.h.

1. der Sehobjektkontrast
2. der Schwellenkontrast
3. der Überschwelligkeitsfaktor Visibility Level

zur Bestimmung der Sichtbarkeit von Sehobjekten aufbauend auf der im CIE-Report 19.1/19.2 (CIE, 1972,1981) beschriebenen Kontrastmetrik erläutert. Dabei wird davon ausgegangen, dass zur Bestimmung der Sichtbarkeit von Sehobjekten das visuelle System als ein rauschbehafteter Kontrastdetektor zur Detektion von Helligkeitsunterschieden interpretiert werden kann. Übersteigt der den äußeren Objektkontrast zugehörige Netzhautkontrast einen inneren, physiologisch-psychologisch determinierten Schwellenwert, so ist die Voraussetzung zur Wahrnehmung des Sehobjektes erfüllt. Ein Sehobjekt wird danach dann wahrgenommen, wenn der im Außenraum vorhandene Leuchtdichtekontrast des Sehobjektes den physiologisch notwendigen Schwellenkontrast des Sehobjektes überschreitet.

2.2.1 Leuchtdichtekontraste der Sehobjekte

Die einfachste Beobachtungssituation besteht aus einem vollkommen homogenen Umfeld und einem ebenso homogen aufgebauten Sehobjekt. Siehe Abb. (2.2). In dieser für die visuelle Wahrnehmung eines Sehobjektes günstigsten, idealen Situation nimmt der zur Detektion des Sehobjektes erforderliche Schwellenkontrast minimale Werte an, die vor allem von der Umfeldleuchtdichte und der scheinbaren Sehobjektgröße abhängig sind. Schwierigere Sehsituationen, verursacht z.B. durch Inhomogenitäten in der örtlichen Leuchtdichteverteilung, Blendung oder sonstige, die visuelle Wahrnehmung negativ beeinflussende Faktoren, können im Vergleich zur idealen Beobachtungssituation ein Vielfaches des Schwellenkontrastes erfordern.

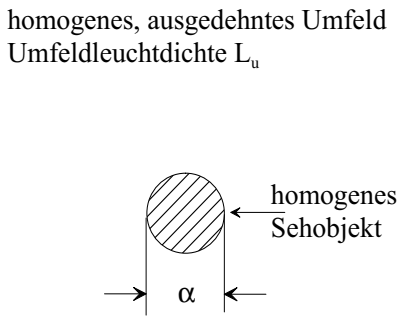


Abbildung 2.2: Referenzsituation des physikalischen Beobachtermodells. Die günstigste Beobachtungssituation zur Detektion eines Sehobjektes zeichnet sich durch ein homogenes, direkt fixiertes Sehobjekt innerhalb eines homogenen, ausgedehnten Umfeldes aus.

Sehobjektkontrast in der homogenen Beobachtungssituation
Der Leuchtdichtekontrast eines Sehobjektes wird im Rahmen der Kontrastmetrik definiert als der Betrag der Differenz von Objekt- zu Untergrundleuchtdichte, bezogen auf die Untergrundleuchtdichte, d.h.

$$C = \frac{|L_z - L_u|}{L_u} \tag{2.3}$$

wobei bedeuten:

- C der vorhandene Leuchtdichtekontrast des Sehobjektes
- L_z die Leuchtdichte des Sehobjektes
- L_u die Leuchtdichte des unmittelbaren, dem Sehobjekt benachbarten Untergrundes

Ist $L_z > L_u$, dann erscheinen die Objekte hell auf dunklerem Grund (Negativkontrast), umgekehrt bei $L_u > L_z$ dunkel auf hellerem Grund (Positivkontrast). Bei der zunächst betrachteten

Beobachtungssituation eines ideal homogenen Umfeldes sind Untergrund- und Umfeldleuchtdichte identisch. Ist der Beobachter genügend lange an die aktuelle Umfeldleuchtdichte adaptiert, dann sind Untergrund- und Umfeldleuchtdichte identisch mit der Adaptationsleuchtdichte. Die Bestimmung des Objektkontrastes kann durch Messung der örtlichen Leuchtdichteverteilung mittels hochauflösender Leuchtdichtemessgeräte oder rechnerisch durch eine geeignete Modellsimulation erfolgen, wie in der vorliegenden Untersuchung.

2.2.2 Theoretische Schwellenkontraste der Sehobjekte

Der Schwellenkontrast eines Sehobjektes in einer gegebenen Beobachtungssituation ist der physiologisch erforderliche Kontrast, um das Sehobjekt unter vereinbarten Wahrnehmungskriterien gerade wahrzunehmen. Insbesondere von theoretischem Interesse ist das Kriterium "Sehobjekt gerade gesehen" bzw. "Sehobjekt gerade wahrgenommen", das in der Referenzsituation des homogenen Umfeldes einer Wahrnehmungs-Wahrscheinlichkeit von etwa 50 % entspricht, wie Abb. (2.4) zeigt. Von mehr praktischem Interesse sind höhere Wahrnehmungsniveaus, insbesondere das Kriterium "Sehobjekt sicher gesehen" (genauer gesagt das "Sehobjekt gerade sicher gesehen"), das in der Referenzsituation des homogenen Umfeldes einer Wahrnehmungs-Wahrscheinlichkeit von etwa 95 % bis 99 % entsprechen dürfte. Jedenfalls gehört zur vollständigen Beschreibung von Schwellenkontrasten das zugehörige Wahrnehmungskriterium. In dieser Untersuchung wird zwischen praktischen Schwellenkontrasten bei zwei unterschiedlichen Wahrnehmungskriterien unterschieden:

- dem Schwellenkontrast bei dem Kriterium "Sehobjekt gerade gesehen": $\overline{C}(g)$
- dem Schwellenkontrast bei dem Kriterium "Sehobjekt sicher gesehen": $\overline{C}(s)$.

Schwellenkontraste zur Wahrnehmung von Sehobjekten sind von einer Vielzahl von äußeren und inneren Faktoren abhängig, insbesondere von:

1. Sehobjektfaktoren. Insbesondere von Art, Form, Farbe, Gestaltung und Ausdehnung, örtliche und zeitliche Leuchtdichtemodulierung, Kontrastrichtung des Sehobjektes
2. Helligkeitsfaktoren. Insbesondere Leuchtdichten von Umfeld, Sehobjekt und Blendquellen
3. Zeit- und Ortsfaktoren, wie Darbietungszeit und Geschwindigkeit der Sehobjekte, Lage im Gesichtsfeld, Maskierung der Sehobjekte und Strukturierung des Umfeldes
4. Personenfaktoren bzw. innere Faktoren. Insbesondere Akkomodations- und Refraktionszustand, Alter, mentale Struktur des Beobachters, Ermüdung
5. Praxisfaktoren, wie Wichtigkeit der jeweiligen Sehaufgabe im Gesamtkontext, Unterschied zwischen idealen und praktischen Umgebungsbedingungen, Sicherheit bzw. Wahrscheinlichkeit der Wahrnehmung

Schwellenkontraste hängen aber auch vom vereinbarten Empfindungsniveau ab. Die einfachste Stufe ist die Wahrnehmung eines Sehobjektes aufgrund eines Helligkeitsunterschiedes gegenüber dem Untergrund. Diese Fähigkeit wird hier mit Detektion bezeichnet. Identifikation liegt vor, wenn ein Sehobjekt in seinen spezifischen Einzelheiten zu erkennen oder zu klassifizieren ist. Das hier entwickelte Beobachtermodell beruht auf einer Wahrnehmung durch Detektion, weil dies zum Auslösen einer Fahrerreaktion genügt.

Die wichtigsten Einflussvariablen des Schwellenkontrastes sind die adaptationsbestimmende Umfeldleuchtdichte und die Sehobjektgröße. Erstere beschreibt den mittleren Empfindlichkeitszustand der Retina. Mit wachsender Adaptationsleuchtdichte und sonst konstanten Einflussfaktoren sind zunehmend geringere Schwellenkontraste zur Detektion eines Sehobjektes erforderlich. Ein entscheidender Faktor zur Kennzeichnung der Schwierigkeit einer Sehaufgabe ist die Sehobjektgröße. Je kleiner das Sehobjekt ist, umso schwieriger ist seine Wahrnehmung bzw. um so größer sind die erforderlichen Schwellenkontraste.

Für eine quantitative Beschreibung der Schwellenkontraste in Abhängigkeit von der adaptationsbestimmenden Umfeldleuchtdichte und der scheinbaren Sehobjektgröße wird eine Beziehung nach Kokoschka (Kokoschka, 1988) verwendet, die auf umfangreichen und gut dokumentierten Untersuchungen von Blackwell (Blackwell, 1946) beruht. Diese Daten gelten für insgesamt günstige Beobachtungsbedingungen, insbesondere für junge Beobachter, bekannte Sehobjektart, genügend lange Beobachtungszeit sowie ein homogenes ausgedehntes Umfeld bei genügend langer Adaptationszeit. Der analytische Ausgleich der Blackwell'schen Daten berücksichtigt physiologische Grundelemente, z.B. das Weber'sche und Ricco'sche Gesetz der Kontrastschwellen.

Danach gilt für den Schwellenkontrast in der idealen Referenzsituation des vollkommen homogenen Umfeldes und gleichfalls homogenen Sehobjektes bei dem Wahrnehmungskriterium "Sehobjekt gerade gesehen":

$$\overline{C}_o(g) \;=\; C_{min} \cdot f_1 \cdot f_2 \tag{2.4}$$

mit den Funktionen:

$$f_1 \;=\; 1 + \left(\frac{L_a}{c_1}\right)^{c_2}, \quad f_2 \;=\; 1 + \left(\frac{\alpha_0}{\alpha}\right)^{2}, \quad \alpha_0 \;=\; c_3 + c_4 \left(1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{L_a}{c_5}\right)^{c_6}}\right) \tag{2.5}$$

und den Konstanten:
$C_{min} = 0.00275, \quad c_1 = 0.185, \quad c_2 = -0.484, \quad c_3 = 7.5, \quad c_4 = 133, \quad c_5 = 0.00075, \quad c_6 = -0.383$.

Es bedeuten:

$\overline{C}_o(g)$	der Schwellenkontrast bei dem Kriterium "Sehobjekt gerade gesehen" unter den günstigsten Beobachtungsbedingungen in der homogenen Referenzsituation (der sog. theoretische Schwellenkontrast). Der Index "o" soll die theoretische Referenzsituation kennzeichnen.
L_a	die adaptationsbestimmende Umfeldleuchtdichte in cd/m^2
α	die scheinbare, effektive Sehobjektgröße in Bogenminuten

Abb. (2.3) zeigt eine Graphik des Schwellenkontrastes in der idealen Referenzsituation in Abhängigkeit von der adaptationsbestimmenden Umfeldleuchtdichte und der Sehobjektgröße als Parameter.

In einem biologischen System ist der eine Reaktion auslösende Schwellenwert naturgemäß eine statistische Größe, abhängig von zahlreichen äußeren Reizfaktoren und inneren Personenfaktoren. Abb. (2.4) zeigt den statistischen Charakter der visuellen Wahrnehmung in Form der sog. Trefferrate P für ein in der homogenen Referenzsituation durchgeführtes Experiment. Danach steigt die Trefferrate bei der Detektion von zufallsartig dargebotenen Sehobjekten in einer typisch S-förmig verlaufenden Funktion monoton mit dem Sehobjektkontrast an.

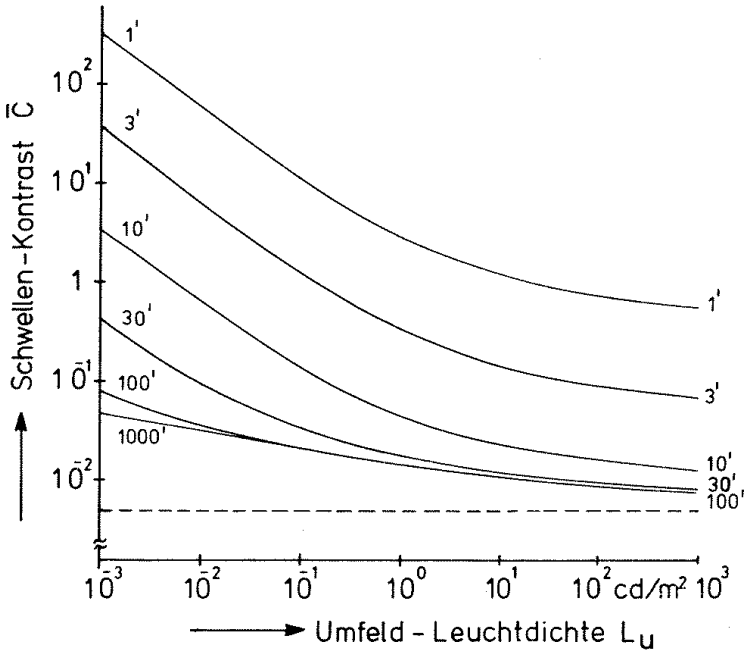


Abbildung 2.3: Theoretische Schwellenkontraste zur Detektion einfacher Sehobjekte wie Kreisscheibe, Quadrat oder ähnlich äquivalenter Sehobjekte gemäß Gl. (2.4) mit $C_{min} = 0.00275$. Wahrnehmungskriterium: "Sehobjekt gerade gesehen".

Wie Abb. (2.4) zeigt, beträgt unter den genannten Umgebungsbedingungen der Schwellenkontrast zur Detektion des Sehobjektes $\overline{C}(g) = 0,1$. In etwa 50 % aller Fälle wird ein Sehobjekt, dessen Leuchtdichte die Leuchtdichte des Umfeldes um 10 % übersteigt, wahrgenommen, in 50 % aller Fälle aber nicht. Zur sicheren Wahrnehmung ist nach Abb. (2.4) ein Kontrast von etwa 0,3 erforderlich bzw. der Schwellenkontrast zur praktisch sicheren Wahrnehmung des Sehobjektes von Abb. (2.4) beträgt $\overline{C}(s) = 0,3$.

2.2.3 Praktische Schwellenkontraste

Schwellenkontraste unter realen, praktischen Bedingungen können erheblich über den bei günstigsten Umgebungsbedingungen gemessenen Werten liegen. So beträgt z.B. der theoretische Schwellenkontrast zur Detektion von sehr großen Sehobjekten und hellem Tageslichtniveau nach Gl. (2.3) etwa 0,275 %, während bei der Definition der Normsichtweite, die sich ja auf den Fall eines großen Zieles beim Tagessehen bezieht, Schwellenkontraste von 2 % bzw. 5 % angenommen wurden. Die Normsichtweite basiert somit gegenüber der theoretisch günstigsten Umgebungssituation auf Schwellenwert-Erhöhungsfaktoren von 7,27 bzw. 18,2. Es ist daher anzunehmen, dass die Normsichtwerte eine praktisch sichere Wahrnehmung des ausgedehnten Objekts ermöglicht.

Betrachten wir ein weiteres Beispiel. Angenommen sei ein einfach aufgebautes Sehobjekt, das bei einer homogenen Umfeldleuchtdichte von 100 cd/m^2 unter einem Sehwinkel von 10' erscheint. Unter den theoretisch günstigsten Bedingungen muss nach Gl. (2.4) das Sehobjekt einen

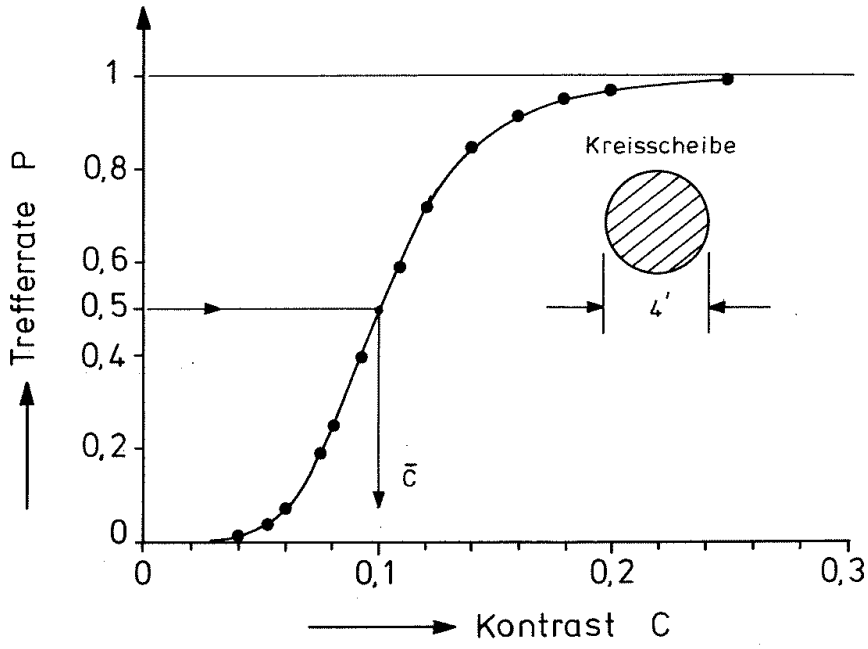


Abbildung 2.4: Beispiel für eine experimentell gewonnene Trefferfunktion nach Daten von Blackwell (Blackwell, 1971) für folgende Parameter: homogene Umfeldleuchtdichte 100 cd/m^2, Darbietungszeit $0.2s$, Sehobjektgröße $4'$, insgesamt sehr günstige Beobachtungsbedingungen. Zur sicheren Wahrnehmung muss der Sehobjektkontrast gegenüber dem Kriterium "gerade gesehen" etwa das Zwei- bis Dreifache betragen.

Leuchtdichtekontrast von 0,00516 bzw. 0,52 % besitzen, um gerade wahrgenommen zu werden ($L_a = 100\ cd/m^2$; $\alpha = 10'$; $\overline{C}_o(g) = 0,00516$).

Angenommen, in einer realen Sehsituation bei sehr schwierigen Bedingungen (z.B. Blendung, ungleichmäßige Leuchtdichteverteilung im Gesichtsfeld, unbekannter Sehobjektort) muss bei dem gleich großen Sehobjekt (10') sowie bei der gleichen Umfeldleuchtdichte (100 cd/m^2) der Sehobjektkontrast 0,2 bzw. 20 % betragen, um gerade bzw. bei einer Detektionswahrscheinlichkeit von 50 % erkannt zu werden. Der Praxis-Schwellenerhöhungsfaktor bei dem Wahrnehmungskriterium "gerade gesehen" würde danach 37,7 (= 0,20/0,00516) betragen. Soweit das Beispiel zur Erläuterung des praktischen Schwellenkontrastes.

Von besonderer Bedeutung bei der Modellierung der Sichtbarkeit ist die Erfassung aller verkehrsrelevanten Seherschwernisse. Das sind insbesondere:

- die transienten Sichtbarkeitsverluste als Folge der inhomogenen Leuchtdichteverteilung im Gesichtsfeld
- die unvollständige Information des Fahrers über Art und Ort von Hindernissen. Peripher erstmalig auftretende Sehobjekte erfordern erheblich größere Schwellenkontraste als bei direkter Fixierung

- die geteilte Aufmerksamkeit des Fahrers bei der Beobachtung der Fahrbahn. Neben der Fahrbahnbeobachtung hat der Fahrer eine große Anzahl weiterer Aufgaben zu erfüllen, wie z.B. Beobachtung von Instrumenten, Beobachtung des Rückspiegels, Bedienen, Lenken, usw.

Ermüdung, Blendung und weitere Unzulänglichkeiten wirken ebenso sichterschwerend und können zu einer weiteren Erhöhung der Schwellenkontraste führen. Allerdings werden diese Effekte hier nicht direkt berücksichtigt, da diese Unzulänglichkeiten im Regelfall ausgeschlossen sein sollten.

Darüber hinaus ist es im Straßenverkehr erforderlich, dass das Sehobjekt nicht nur detektiert, sondern auch in seiner spezifischen Form identifiziert werden kann. Praktische Schwellenkontraste im Straßenverkehr sind somit Schwellenkontraste zur Identifikation des Sehobjektes.

Das Konzept, reale Beobachtungssituationen durch Schwellenerhöhungsfaktoren zu berücksichtigen, beruht auf der Annahme, dass die primären Einflussvariablen Adaptationsleuchtdichte und Sehobjektgröße in der praktischen Situation auf den Schwellenkontrast nach den gleichen Gesetzmäßigkeiten einwirken wie in der homogenen Referenzsituation, allerdings bei konstant erhöhten Schwellenwerten.

Methodik zur Bestimmung der Praxisfaktoren

Schwellenkontraste unter den Bedingungen des Straßenverkehrs bei Nebelbedingungen sind nicht bekannt. Zur Überwindung dieser Problematik wird davon ausgegangen, dass Seherschwernisse und Sehbesonderheiten in der praktischen Beobachtungssituation sich durch multiplikative Schwellenerhöhungsfaktoren beschreiben lassen. Das heißt, allgemein soll für den praktischen Schwellenkontrast bei dem Wahrnehmungskriterium k gelten :

$$\overline{C}_p(k) \;=\; EF_1 \;\cdot\; EF_2 \;\cdot\; EF_i \;\cdot\; SF(k) \;\cdot\; \overline{C}_o(g) = EF(k) \;\cdot\; \overline{C}_o(g) \tag{2.6}$$

wobei bedeuten:

$\overline{C}_p(k)$	praktischer Schwellenkontrast unter praktischen, realen Beobachtungsbedingungen bei einem vereinbarten Wahrnehmungskriterium k, z.B. "Sehobjekt gerade gesehen" oder "Sehobjekt sicher gesehen". Der Index "p" in $\overline{C}_p(k)$ kennzeichnet die Praxissituation.
$\overline{C}_o(g)$	theoretischer Schwellenkontrast in der idealen, homogenen Referenzsituation bei dem Wahrnehmungskriterium "gerade gesehen"
EF_i	einzelne Schwellenerhöhungsfaktoren unter praktischen, realen Beobachtungsbedingungen
$SF(k)$	ein sog. Signifikanzfaktor, der angibt, um welchen Faktor der Schwellenkontrast beim Wahrnehmungskriterium k erhöht werden muss im Vergleich zum Kriterium "gerade gesehen"
$EF(k)$	Schwellenerhöhungsfaktor insgesamt, in dem alle Einzelfaktoren zusammengefasst sind.

Da sich die transienten Sichtbarkeitsverluste beim Beobachten einer inhomogenen Szene zumindest näherungsweise theoretisch nach Gl. (2.9) vorhersagen lassen, läßt sich EF(k) aufspalten in:

$$EF(k) = TSF \cdot PF(k) \tag{2.7}$$

wobei TSF ein sog. transienter Schwellenerhöhungsfaktor und $PF(k)$ ein alle anderen Seherschwernisse berücksichtigender Faktor bedeutet. Siehe Abb. (2.5). $PF(k)$ wird künftig als Praxisfaktor bezeichnet.

In dieser Untersuchung wird wie erwähnt zwischen zwei Wahrnehmungskriterien unterschieden:

1. Wahrnehmungskriterium " Sehobjekt gerade gesehen". Der dazugehörige Schwellenkontrast zur Detektion des Sehobjektes ist:

$$\overline{C}_p(g) \;=\; TSF \;\cdot\; PF(g) \;\cdot\; \overline{C}_o(g) \tag{2.8}$$

   Die Wahrnehmungs-Wahrscheinlichkeit dürfte bei etwa 50 % liegen.

2. Wahrnehmungskriterium " Sehobjekt sicher gesehen". Der dazugehörige Schwellenkontrast zur Identifikation des Sehobjektes ist:

$$\overline{C}_p(s) \;=\; TSF \;\cdot\; PF(s) \;\cdot\; \overline{C}_o(g)$$

   Die Wahrnehmungs-Wahrscheinlichkeit dürfte hier zwischen etwa 95 % und 99 % liegen.

Es bedeuten:

$\overline{C}_p(g)$	der praktische Schwellenkontrast bei dem Wahrnehmungskriterium "Sehobjekt gerade gesehen"
$\overline{C}_p(s)$	der praktische Schwellenkontrast bei dem Wahrnehmungskriterium "Sehobjekt sicher gesehen"
TSF	der theoretisch bestimmte Schwellenerhöhungsfaktor, der transiente Sichtbarkeitsverluste beim Beobachten eines inhomogenen Umfeldes beschreibt
$PF(g)$	der Praxisfaktor bei dem Kriterium "gerade gesehen"
$PF(s)$	der Praxisfaktor bei dem Kriterium "sicher gesehen"
$\overline{C}_o(g)$	theoretischer Schwellenkontrast bei dem Kriterium "gerade gesehen"

Das Attribut "gerade gesehen" wird in den Feldexperimenten mit "gerade erkannt" bezeichnet. Entsprechend auch "sicher gesehen" mit "sicher erkannt". Die Kennzeichnung der Sichtbarkeit von Sehobjekten durch Wahrnehmungs-Wahrscheinlichkeiten (zwischen 0 % und 100 %) und durch Wahrnehmungs-Kategorien bzw. Wahrnehmungs-Kriterien (hier "gerade gesehen" und "sicher gesehen") beruht auf zwei unterschiedlichen Modellansätzen. Die Zuordnung des Kriteriums "gerade gesehen" bzw. "gerade erkannt" zu einer Wahrnehmungs-Wahrscheinlichkeit von etwa 50 % ist daher eine Schätzung, ebenso die Zuordnung von "sicher gesehen" bzw. "sicher erkannt" zu einer Wahrnehmungs-Wahrscheinlichkeit von etwa 95 % - 99 %. Zu ihrer genauen Bestimmung sind sehr aufwendige Experimente erforderlich. Die Bestimmung der praktischen Schwellenkontraste bzw. des Praxisfaktors in einer gegebenen Beobachtungssituation erfolgt in dieser Untersuchung durch einen Vergleich der gemessenen und der berechneten Sichtweiten. Dabei wird der Praxisfaktor PF(g) bzw. PF(s) bei dem jeweiligen Kriterium g oder s so bestimmt, dass die Abweichungen zwischen berechneten und gemessenen Sichtweiten minimal sind.

Der transiente Schwellenerhöhungsfaktor

Das visuelle Wahrnehmungsvermögen wird gestört, wenn im Verlaufe der natürlichen Blickbewegungen beim Abtasten einer Szene die gesehenen Leuchtdichten des Sehobjektuntergrundes sich erheblich von der aktuellen Adaptationsleuchtdichte unterscheiden. Dieser Prozess der transienten

Adaptationsstörungen bewirkt eine Erhöhung der Schwellenkontraste, die nach (CIE, 1992) wie folgt beschrieben werden kann:

$$TSF = \frac{1}{4} \frac{(1 + L_u/L_a)^2}{L_u/L_a} \tag{2.9}$$

Es bedeuten:

TSF	der transiente Schwellenwerterhöhungsfaktor
L_u	die Untergrundleuchtdichte des Sehobjektes
L_a	die Adaptationsleuchtdichte.

Der Schwellenwerterhöhungsfaktor TSF gibt an, um welchen Faktor der bei einem inhomogenen Gesichtsfeld erforderliche Schwellenkontrast gegenüber dem Schwellenkontrast bei homogener Verteilung der Umfeldleuchtdichte größer ist. Wie Abb. (2.5) zeigt, wirkt sich eine Abweichung der Untergrundleuchtdichte (L_u) gegenüber der mittleren, adaptationsbestimmenden Umfeldleuchtdichte (L_a) praktisch erst dann aus, wenn sich das Verhältnis L_u/L_a erheblich von 1 unterscheidet. Zum Beispiel hat ein Inhomogenitätsverhältnis von $L_u/L_a = 0,1$ oder 10 eine Erhöhung des Schwellenkontrastes um 302,5 % (TSF=3,025) zur Folge.

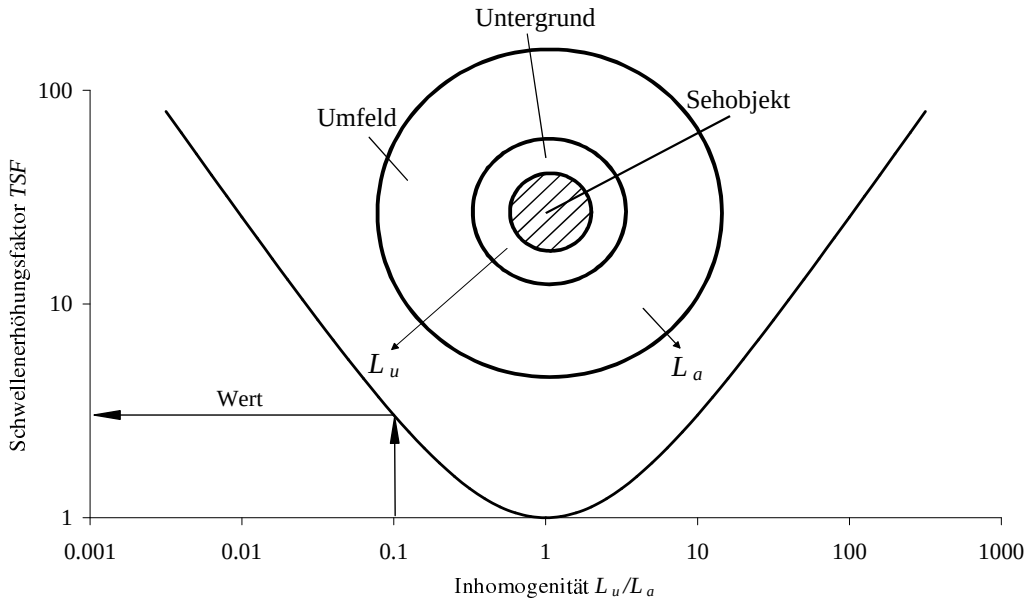


Abbildung 2.5: Theoretischer Schwellenerhöhungsfaktor TSF zur Beschreibung der transienten Sichtbarkeitsverluste, wenn das Auge kurzzeitig ein Sehobjekt fixiert, dessen Untergrundleuchtdichte L_u von der Adaptationsleuchtdichte L_a abweicht.

2.2.4 Überschwelligkeitsfaktor Visibility Level

Objektkontrast und Schwellenkontrast sind die primären Beschreibungsparameter einer Sehsituation. Der Objektkontrast kennzeichnet hierbei die physikalische Reizstruktur. Die visuelle Leistungsfähigkeit wird durch den Schwellenkontrast beschrieben. Zahlreiche Untersuchungen haben gezeigt, dass die Sichtbarkeit eines Sehobjektes zumindest näherungsweise vom Verhältnis von Objekt- zu Schwellenkontrast bestimmt wird, weitgehend unabhängig von den Einflussgrößen, die beide bestimmen.

Die Sichtbarkeit eines Sehobjektes in einer gegebenen Beobachtungssituation wird daher durch das Verhältnis von Objekt- zu dem Schwellenkontrast bei dem Wahrnehmungskriterium "gerade gesehen" bzw. "gerade erkannt" beschrieben. Dieses Kontrast-Überschwelligkeitsverhältnis wird in der lichttechnischen Literatur als Visibility Level bezeichnet. Für das Visibility Level eines Sehobjektes in einer praktischen Beobachtungssituation gilt dann:

$$VL = \frac{C}{\overline{C}_p(g)} \tag{2.10}$$

Es bedeuten C der Objektkontrast und $\overline{C}_p(g)$ der in der gleichen Situation erforderliche praktische Schwellenkontrast für das Kriterium "gerade gesehen". $VL \ll 1$ entspricht einer geringen Sichtbarkeit bzw. sehr geringen Wahrnehmungs-Wahrscheinlichkeit, $VL = 1$ entspricht einer Sichtbarkeit entsprechend dem Kriterium "Sehobjekt gerade gesehen" bzw. einer Wahrnehmungs-Wahrscheinlichkeit von etwa 50 % . $VL \gg 1$ entspricht einer mehr oder weniger sicheren Wahrnehmung unter den gegebenen Bedingungen.

Wahrnehmungskriterium und Visibility Level

Wahrnehmungskriterium "Sehobjekt gerade gesehen":

Soll in einer praktischen Situation das Sehobjekt gerade gesehen werden, dann muss der Objektkontrast C genauso groß sein wie der in dieser Situation erforderliche Schwellenkontrast $\overline{C}_p(g)$. Oder mit anderen Worten, das Visibility Level nach Gl. (2.10) muss mindestens den Grenzwert $VL_{grenz} = 1$ überschreiten.

Wahrnehmungskriterium "Sehobjekt sicher gesehen":

Soll in einer praktischen Situation das Sehobjekt sicher gesehen werden, dann muss der Leuchtdichtekontrast des Sehobjektes mindestens so groß sein wie der Schwellenkontrast $\overline{C}_p(s) = TSF \cdot PF(s) \cdot \overline{C}_o(g)$. Daraus folgt für den Grenzwert des Visibility Levels:

$$VL_{grenz} = \frac{\overline{C}_p(s)}{\overline{C}_p(g)} = \frac{TSF \cdot PF(s) \cdot \overline{C}_o(g)}{TSF \cdot PF(g) \cdot \overline{C}_o(g)} = \frac{PF(s)}{PF(g)} = SF \tag{2.11}$$

Es bedeuten:

VL_{grenz}	Mindestwert für das Visibility Level, damit das Sehobjekt sicher gesehen wird
$PF(s)$	Praxisfaktor zur Bestimmung des praktischen Schwellenkontrastes bei dem Wahrnehmungskriterium "Sehobjekt sicher gesehen"
$PF(g)$	Praxisfaktor bei dem Wahrnehmungskriterium "Sehobjekt gerade gesehen"
SF	Signifikanzfaktor. Um diesen Faktor muss der "gerade gesehen" -Schwellenkontrast erhöht werden, um das Sehobjekt sicher zu sehen.

Eine direkte Messung des Visibility Levels kann mit Hilfe eines sog. "Visibility-Meters" erfolgen, bei dem das Sehobjekt geräteintern durch eine künstliche Streulichtquelle zur Schwelle gebracht wird. Allerdings befindet sich diese Methode noch im Stadium der Erprobung. Auch können mit dieser Methode nur Umfeldeffekte im betrachteten Gesichtsfeld, aber keine kognitiv-emotionellen oder stressbedingte Seherschwernisse erfasst werden.

2.2.5 Kontrast- und Umfeldleuchtdichten

Im Folgenden werden die grundlegenden Beziehungen zur Berechnung der vom Beobachter gesehenen Leuchtdichten der Szenenelemente Sehobjekt, Untergrund und Umfeld erläutert. Diese Größen sind erforderlich zur Berechnung der Sehobjektkontraste, der Schwellenkontraste, des Visibility Levels und schließlich der Sichtweiten der Sehobjekte.

Die modellierte Beobachtungssituation
Gesichtsfelder im Straßenverkehr, insbesondere bei Nacht, zeichnen sich durch eine inhomogene Leuchtdichteverteilung im Umfeld aus, so dass ein homogenes Umfeld gemäß Abb. (2.2) den realen Bedingungen nicht gerecht wird. Daher wurde die modellierte Beobachtungssituation gegenüber der CIE-Metrik der homogenen Referenzsituation durch folgende Elemente erweitert:

1. bei örtlich strukturierten Sehobjekten wird der Sehobjektrand als kontrastrelevant bewertet. Dieser neue Ansatz berücksichtigt die Erfahrung, dass innerhalb eines sehr inhomogen ausgeleuchteten Umfeldes bestimmte Sehobjektteile gesehen werden, andere aber nicht.

2. bei örtlich strukturiertem Umfeld wird der unmittelbar an das Sehobjekt angrenzende Untergrund als kontrastrelevant angenommen. Der Untergrund kann aus der Fahrbahn, dem Horizont oder beiden bestehen

3. der mittlere Randkontrast des Sehobjektes wird aus allen Elementen des Sehobjekt-Randkontrastes gebildet

4. die den Schwellenkontrast bestimmende Adaptationsleuchtdichte wird aus einer mittleren Umfeldleuchtdichte gebildet, die auch die äquivalente Schleierleuchtdichte des Umfeldes und die von den Fahrzeugscheinwerfern erzeugte Streuleuchtdichte enthält.

Abb. (2.6) zeigt schematisch die modellierte Beobachtungssituation. Gegenüber der homogenen Referenzsituation, in der lediglich zwischen den Kontrastelementen Sehobjekt und Umfeld unterschieden wird, erfolgt hier eine feine Strukturierung aller Szenenelemente, insbesondere des Sehobjektes, seinem Untergrund und dem Umfeld, das auch weitere Objekte enthalten kann.

Beleuchtete Sehobjekte
Die prinzipielle Beobachtungssituationen für ein beleuchtetes Sehobjekt zeigen Abb. (2.6) und Abb. (2.7). Alle Szenenelemente können sowohl vom natürlichen Himmel als auch von den Fahrzeugscheinwerfern beleuchtet werden, wobei bei Nacht nur die Fahrzeugbeleuchtung von Bedeutung ist. Die vom Beobachter gesehenen Leuchtdichten der Szenenelemente werden durch Streuung an den Nebeltröpfchen exponentiell geschwächt und zwar umso mehr, je größer der die Streuungsprozesse beschreibende Schwächungsexponent sowie der Abstand zum Beobachter ist.
Neben der Lichtschwächung des gesehenen Objektes sind die Lichtstreuprozesse im Gesichtsfeld

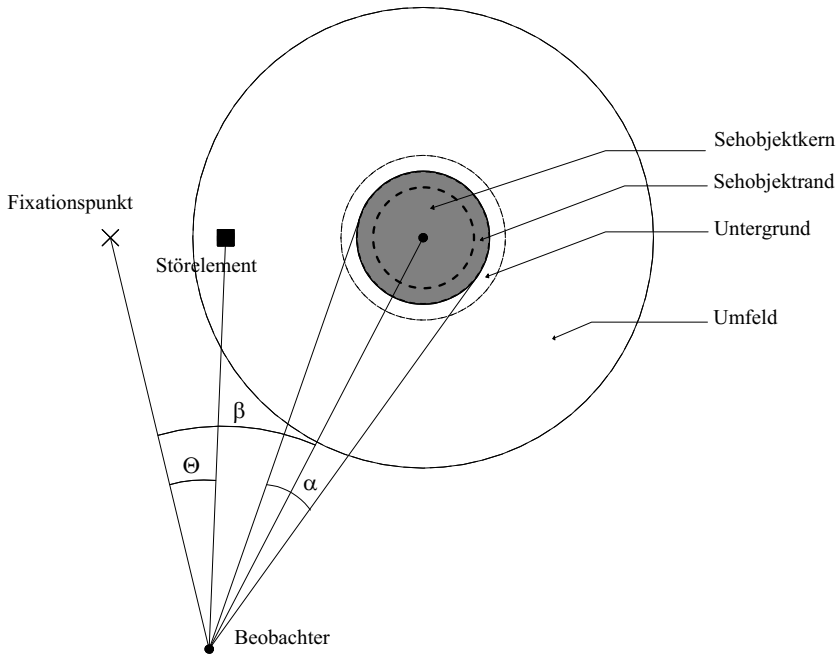


Abbildung 2.6: Schema der Beobachtungssituation im Rahmen des hier entwickelten Sichtweitenmodells, das die Berücksichtigung von Leuchtdichteinhomogenitäten von Sehobjekt und Umfeld ermöglicht.

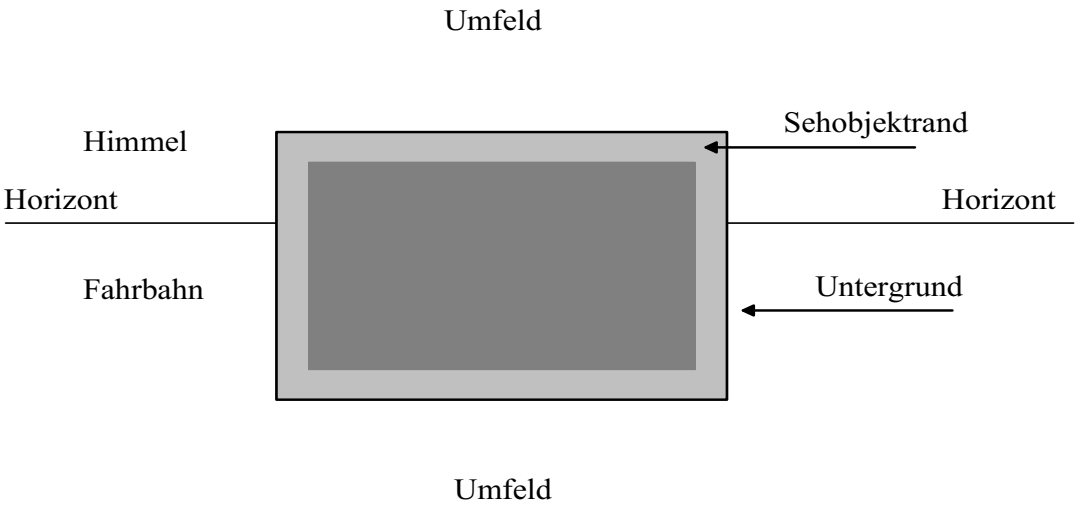


Abbildung 2.7: Komponenten des Randmodells zur Bestimmung des Sehobjektkontrastes

des Beobachters die wesentliche Ursache für die Sichtverschlechterung bei Nebel. Alle Nebeltröpfchen auf der Sichtlinie zwischen Sehobjekt und Beobachter streuen das auf sie einfallende Licht der natürlichen oder künstlichen Beleuchtung in alle Richtungen, auch zum Beobachter. Diese Streuleuchtdichten hellen die Kontrastelemente Sehobjekt und Untergrund mit zunehmender Trübungsdichte und zunehmendem Sehobjektabstand immer mehr auf, bis sie sich in ihren Leuchtdichten praktisch nicht mehr unterscheiden und damit unsichtbar werden. Lichtschwächung und Streulichtüberlagerung zusammen haben eine exponentielle Kontrastreduzierung des Sehobjektes zur Folge. (Behrens,Kokoschka, 1976).

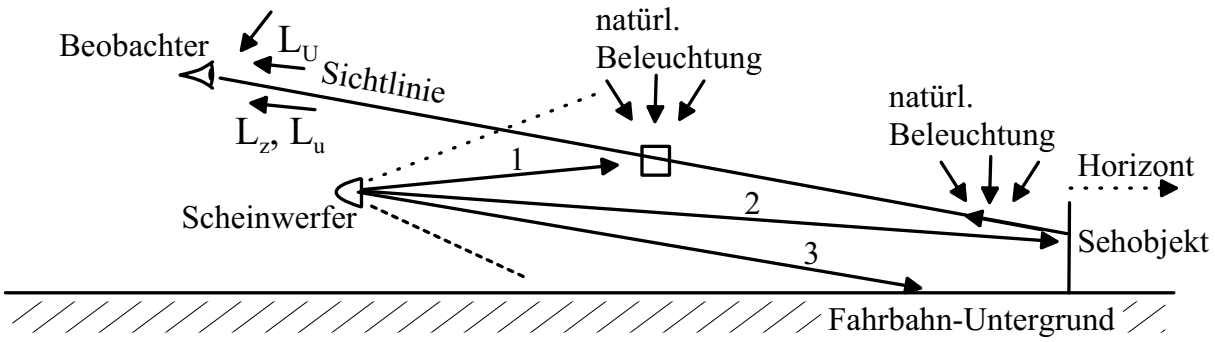


Abbildung 2.8: Schema zur Berechnung der Leuchtdichten von beleuchteten Sehobjekten

Sehobjektleuchtdichten
Somit setzt sich die gesehene Leuchtdichte eines Sehobjektes oder allgemeiner eines Sehobjektdetails aus Beiträgen der natürlichen Beleuchtung, der künstlichen Scheinwerferbeleuchtung und den Streuleuchtdichten zusammen. Es gilt:

$$L_z = L_{z,n,o} \cdot e^{-\sigma_e \cdot x} + L_{z,s,o} \cdot e^{-\sigma_e \cdot x} + L_H \cdot (1 - e^{-\sigma_e \cdot x}) + L_{s,s} \tag{2.12}$$

wobei bedeuten:

L_z	die vom Beobachter gesehene Leuchtdichte des Sehobjektes
$L_{z,n,o}$	die Leuchtdichte am Ort des Sehobjektes, die von der natürlichen Beleuchtung erzeugt wird
$L_{z,s,o}$	die Leuchtdichte am Ort des Sehobjektes, die von den Fahrzeugscheinwerfern erzeugt wird
L_H	die mittlere Himmels-Leuchtdichte, beim homogen bedeckten Himmel identisch mit der Horizont-Leuchtdichte
$L_{s,s}$	die Streuleuchtdichte, die von den Fahrzeugscheinwerfern auf der Sichtlinie in Richtung zum Beobachter erzeugt wird
σ_e	der Schwächungsexponent der Atmosphäre
x	der Abstand zwischen Beobachter und Sehobjekt bzw. Sehobjektdetail.

Die ersten beiden Summanden in obiger Gleichung sind die Anteile der gesehenen Sehobjektleuchtdichte, die von der natürlichen und der Fahrzeugbeleuchtung erzeugt werden. Der dritte Summand ist die natürliche Streuleuchtdichte, die auf der Strecke zwischen Sehobjekt und Beobachter durch die Himmelsbeleuchtung erzeugt wird. Die auf Koschmieder (Koschmieder, 1925) zurückgehende Beziehung wird auch als Luftlichtformel bezeichnet. Schließlich enthält der letzte Summand in Gl. (2.12) die von den Fahrzeugscheinwerfern erzeugten Streuleuchtdichten, die aus den Nebel- und

Scheinwerferdaten im Rahmen dieser Untersuchung für jede Blickrichtung im Gesichtsfeld des Fahrers berechnet wurden.

Untergrundleuchtdichte
Entsprechend erhält man für die Leuchtdichte eines Untergrunddetails, gegen den ein Teil des Sehobjektes gesehen wird:

$$L_u = L_{u,n,o} \cdot e^{-\sigma_e \cdot x} + L_{u,s,o} \cdot e^{-\sigma_e \cdot x} + L_H \cdot (1 - e^{-\sigma_e \cdot x}) + L_{s,s} \tag{2.13}$$

wobei hier analog Gl. (2.12) $L_{u,n,o}$ und $L_{u,s,o}$ die Leuchtdichten bedeuten, die am jeweils betrachteten Ort des Untergrundes von der natürlichen bzw. künstlichen Fahrzeugbeleuchtung verursacht werden. Besteht der Untergrund des Sehobjektes aus dem Horizont, so vereinfacht sich Gl. (2.13) zu:

$$L_u \;=\; L_H \;+\; L_{s,s} \tag{2.14}$$

mit L_H der Horizontleuchtdichte.

Umfeldleuchtdichten
Zum Umfeld gehören alle Szenenelemente, die nicht Bestandteil des Sehobjektes sind. Sie machen folglich den weitaus größten Teil des Gesichtsfeldes aus. Zum Umfeld gehören die Fahrbahn und der daran angrenzende Erdboden sowie der Himmel.

Bei geneigtem Blick gilt somit für die Leuchtdichte des betrachteten Umfeldelementes, d.h. der Fahrbahn und des Bodens analog Gl. (2.13)

$$L_U = L_{u,n,o} \cdot e^{-\sigma_e \cdot x} + L_{u,s,o} \cdot e^{-\sigma_e \cdot x} + L_H \cdot (1 - e^{-\sigma_e \cdot x}) + L_{s,s} \tag{2.15}$$

mit $L_{u,n,o}$ und $L_{u,s,o}$ den Leuchtdichten am Ort der betrachteten Umfeldelemente, die von der natürlichen Beleuchtung (n) bzw. den Scheinwerfern (s) erzeugt werden. Der dritte und vierte Summand bedeuten wieder die zwischen Umfeldelement und Beobachter erzeugten Streuleuchtdichten der natürlichen - bzw. der Scheinwerfer-Beleuchtung.

Sind im Umfeld oberhalb der horizontalen Blickrichtung keine beleuchteten Objekte vorhanden, dann gilt für diese Umfeldleuchtdichte bzw. die Himmelsleuchtdichte

$$L_U = L_H + L_{s,s} \tag{2.16}$$

wobei L_H die betrachtete Himmelsleuchtdichte bedeutet. $L_{s,s}$ ist wieder die von den Fahrzeugscheinwerfern in der entsprechenden Beobachtungsrichtung erzeugte Streuleuchtdichte.

Am Szenenort durch die natürliche Beleuchtung erzeugte Leuchtdichten
Für die am diffus reflektierenden Sehobjekt vorhandene Leuchtdichte gilt:

$$L_{z,n,o} \;=\; \frac{\rho}{\pi}\,(E_{B,o} + E_{H,o}) \tag{2.17}$$

und für die Fahrbahnleuchtdichte:

$$L_{u,n,o} \;=\; q_o \;\cdot\; E_h \tag{2.18}$$

Es bedeuten:

ρ	der Reflexionsgrad des Sehobjektes
q_o	der Leuchtdichtekoeffizient des Fahrbahnuntergrundes
$E_{B,o}$	die Beleuchtungsstärke auf dem Sehobjekt, die durch Zustrahlung des Bodens einschließlich des Fahrbahnuntergrundes erzeugt wird
$E_{H,o}$	die vom Himmel auf dem Sehobjekt erzeugte Beleuchtungsstärke
E_h	die unverbaute horizontale Beleuchtungsstärke auf der Fahrbahn

Geht man z.B. von einem ideal gleichmäßig leuchtenden Himmel mit konstanter Leuchtdichte aus, so kann man den Himmelsanteil der Sehobjektbeleuchtungsstärke einfach bestimmen zu:

$$E_{H,o} = \frac{1}{2}\, E_h \tag{2.19}$$

und den vom Boden herrührenden Anteil

$$E_{B,o} = \frac{1}{2}\, \pi q_o E_h \quad . \tag{2.20}$$

Am Szenenort durch die Scheinwerferbeleuchtung erzeugte Leuchtdichten
Es gilt für die von den Fahrzeugscheinwerfern verursachte Leuchtdichte am Sehobjekt:

$$L_{z,s,o} = \frac{\rho}{\pi} \;\cdot\; E_{z,o} \cdot e^{-\sigma_e \cdot x} \tag{2.21}$$

wenn $E_{z,o}$ die Beleuchtungsstärke am Sehobjekt ist, die von den Fahrzeugscheinwerfern bei trübungsfreier Atmosphäre erzeugt wird und ρ der Reflexionsgrad des Sehobjektes. Der Ausdruck $e^{-\sigma \cdot x}$ berücksichtigt die Lichtschwächung auf dem Weg vom Scheinwerfer zum Beobachter.

Bei der von den Scheinwerfern erzeugten Untergrundleuchtdichte bzw. der Fahrbahnleuchtdichte ist die spezielle Reflexionscharakteristik zu berücksichtigen. Es gilt dann für die Leuchtdichte am Ort der Fahrbahn:

$$L_{u,s,o} = q_r \cdot E_{u,o} \cdot e^{-\sigma_e \cdot x} \tag{2.22}$$

wobei hier q_r der Leuchtdichtekoeffizient der Fahrbahn bei Scheinwerferbeleuchtung und $E_{u,o}$ die Beleuchtungsstärke am Ort des Untergrundes bedeuten und zwar vereinbarungsgemäß senkrecht zur Lichteinfallsrichtung wiederum bei trübungsfreier Atmosphäre.

Gl. (2.21) bis Gl. (2.22) behandeln die Leuchtdichten des Fahrbahnuntergrundes, der zu dem jeweiligen Sehobjektelement gehört. Die gleichen Beziehungen gelten für die Fahrbahnelemente, die zum Umfeld des Gesichtsfeldes gehören. In den Formeln werden dabei die Indices u durch U ersetzt.

Selbstleuchtende Sehobjekte
Selbstleuchtende Sehobjekte wie Schlussleuchten oder Nebelschlussleuchten sind punktartige Sehobjekte und werden daher im Allgemeinen durch ihre Lichtstärke in Richtung zum Beobachter

charakterisiert. In dieser Untersuchung werden jedoch auch Signalleuchten aus rechentechnischen Gründen durch ihre Leuchtdichtekontraste beschrieben und nicht wie i.a. üblich durch ihre am Augenort verursachten Beleuchtungsstärken. Auf die berechneten Sichtweitenergebnisse hat dieses Vorgehen keinen Einfluss.

Abb. (2.9) zeigt das Schema zur Berechnung der Kontrastleuchtdichten von Selbstleuchtern, als deren Untergrund die rückwärtige Fahrzeugfläche angenommen wird.

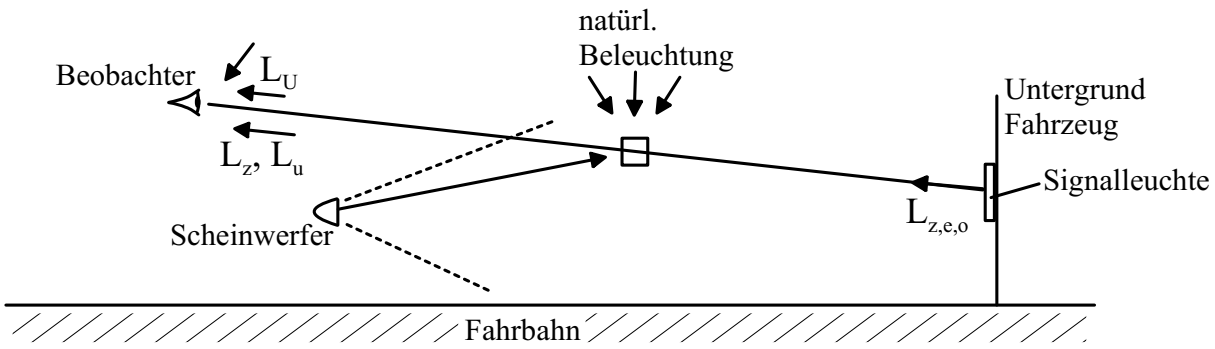


Abbildung 2.9: Schema zur Berechnung der Leuchtdichten von Fahrzeug-Signalleuchten (selbstleuchtende Sehobjekte)

Die emittierten Leuchtdichten selbstleuchtender Sehobjekte sind erheblich größer als die der beleuchteten Sehobjekte. Der Anteil der an der Signalleuchte in Richtung zum Beobachter reflektierten Leuchtdichte ist im Vergleich zum emittierten Anteil relativ gering und kann daher vernachlässigt werden.

Unter dieser Voraussetzung setzt sich die vom Beobachter gesehene Signalleuchtdichte aus der durch die Trübung geschwächten Emissionsleuchtdichte und den überlagerten Streuleuchtdichten zusammen. Das heißt:

$$L_z = L_{z,e,o} \cdot e^{-\sigma_e \cdot x} + L_H \cdot (1 - e^{-\sigma_e \cdot x}) + L_{s,s} \tag{2.23}$$

und entsprechend für die Untergrundleuchtdichte:

$$L_u = L_{u,n,o} \cdot e^{-\sigma_e \cdot x} + L_H \cdot (1 - e^{-\sigma_e \cdot x}) + L_{s,s} \tag{2.24}$$

Hier bedeuten:

L_z	die vom Beobachter gesehene Leuchtdichte der Signalleuchte
L_u	die vom Beobachter gesehene Leuchtdichte des Signaluntergrundes
$L_{z,e,o}$	die emittierte Signalleuchtdichte bei trübungsfreier Beobachtung
$L_{u,n,o}$	die von der natürlichen Beleuchtung erzeugte Untergrundleuchtdichte bei trübungsfreier Beobachtung

Ist I_o die Lichtstärke des Signals (bei ideal trübungsfreier Sicht) in Richtung zum Beobachter, dann gilt für die emittierte Signalleuchtdichte

$$L_{z,e,o} = \frac{I_o}{A} \tag{2.25}$$

wenn A die scheinbare Lichtaustrittsfläche des Signals bedeutet. Entsprechend dem Vorgehen bei beleuchteten Flächen gilt für die ungeschwächte Untergrundleuchtdichte

$$L_{u,n,o} = \frac{\rho}{\pi} \left(E_{H,o} + E_{B,o}\right) \tag{2.26}$$

mit ρ dem Reflexionsgrad der rückwärtigen Fahrzeugfläche sowie den Beleuchtungsstärken $E_{B,o}$ und $E_{H,o}$ gemäß Gl. (2.19) und Gl. (2.20).

In den Beziehungen zur Berechnung der Leuchtdichten von Sehobjekt und Untergrund ist die horizontale Beleuchtungsstärke E_h die maßgebliche Größe zur Beschreibung der natürlichen Beleuchtungsverhältnisse. Sichtverhältnisse bei Nacht sind durch verschwindend kleine Werte für E_h charakterisiert.

2.2.6 Äquivalente Schleier- und Adaptationsleuchtdichte

Das von den Objekten im Außenraum ins Auge gelangende Licht erzeugt durch Streuung an den Augenmedien (Hornhaut, Glaskörper, Linse, Augenhintergrund) auf der Augennetzhaut einen Streulichtschleier, der sich den durch die Augenoptik erzeugten Netzhautbildern überlagert. Dies hat zwei Effekte zur Folge. Erstens führt der Streulichtschleier zu einer Reduzierung des Sehobjekt-Netzhautkontrastes und damit unter Umständen zu einer erheblichen Verringerung der Sichtbarkeit der Sehobjekte. Zweitens führt der Streulichtschleier auf der Netzhaut zu einer Erhöhung der Netzhauterregung, die vergleichbar ist mit einer Erhöhung der mittleren Umfeldleuchtdichte und damit der Adaptationsleuchtdichte. Die quantitative Berücksichtigung dieser Streulichteffekte im Auge erfolgt nach der klassischen Streulichttheorie nach Holladay durch die sog. äquivalente Schleierleuchtdichte, die den Streulichtschleier auf der Netzhaut durch eine Leuchtdichte des Außenraumes simuliert. Die örtliche Verteilung der retinalen Beleuchtungsstärke wird durch eine äquivalente Leuchtdichteverteilung im Außenraum beschrieben, wie Abb. (2.10) erläutert.

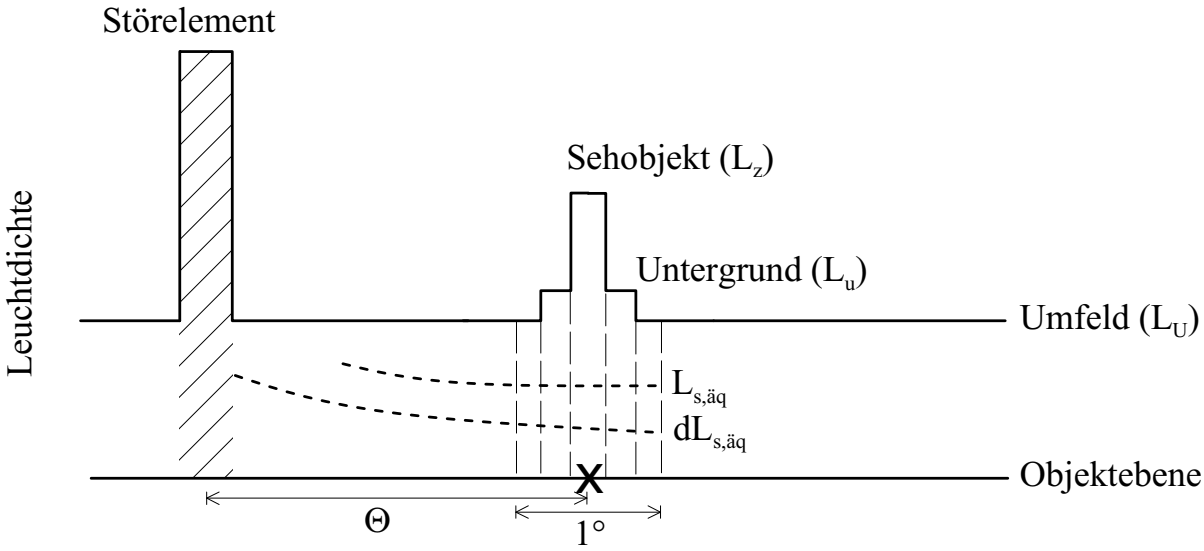


Abbildung 2.10: Simulation des retinalen Streulichtschleiers durch eine äquivalente Schleierleuchtdichte des Außenraumes

Danach erzeugt jedes leuchtende Objekt im Außenraum an jedem Ort der Objektebene eine sog. äquivalente Schleierleuchtdichte. Von besonderer Bedeutung ist die von allen Szenenobjekten, einschließlich z.B. Blendquellen, am Ort des Sehobjektes erzeugte Schleierleuchtdichte, da sie sich den Leuchtdichten des Sehobjektes und des Untergrundes überlagert und damit eine Reduzierung des Sehobjektkontrastes bewirkt. Es gilt:

$$C = \frac{(L_z + L_{s,äq}) - (L_u + L_{s,äq})}{L_u + L_{s,äq}} = \frac{L_z - L_u}{L_u + L_{s,äq}} \tag{2.27}$$

wobei hier bedeuten:

- C der effektive Sehobjektkontrast zur Berücksichtigung des Netzhautstreulichtes
- L_z die Sehobjektleuchtdichte
- L_u die Untergrundleuchtdichte
- $L_{s,äq}$ die äquivalente Streuleuchtdichte am Ort des Sehobjektes, gemäß Abb. (2.10), die durch Beiträge aller Umfeldelemente erzeugt wird. Der 1°-große Bereich um den Fixationspunkt (x) bleibt außer Betracht.

Im Sinne der Holladayschen Streulichttheorie ist die äquivalente Streuleuchtdichte auch ein Teil der Adaptationsleuchtdichte. Sie setzt sich aus der örtlich gemittelten Umfeldleuchtdichte und der über alle Netzhautpunkte gemittelten äquivalenten Streuleuchtdichte zusammen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass auch ein homogenes Umfeld einen Streulichtschleier im Auge erzeugt, der bei Aussparung des 1° großen Zentrumfeldes etwa 7 % der Umfeldleuchtdichte beträgt. Damit gilt:

$$L_a = 0,926 \cdot L_U + L_{s,äq} \ . \tag{2.28}$$

wobei bedeuten:

- L_a die Adaptationsleuchtdichte als eine äquivalent homogene Leuchtdichte eines inhomogenen Umfeldes
- L_U die mittlere Leuchtdichte des Umfeldes, einschließlich der Sehobjektleuchtdichte und der Streuleuchtdichte gemäß Gl. (2.15) und Gl. (2.16)
- $L_{s,äq}$ die äquivalente Schleierleuchtdichte, die durch alle Szenenelemente, außerhalb des 1°-Zentrumsfeldes, erzeugt wird.

Folglich wären im Prinzip zwei äquivalente Schleierleuchtdichten zu bestimmen. Erstens die am Ort des Sehobjektes zur Berechnung des effektiven Sehobjektkontrastes vorhandene Schleierleuchtdichte und zweitens eine Art mittlere äquivalente Schleierleuchtdichte zur Bestimmung der Adaptationsleuchtdichte. Vereinfachend wird Identität beider Schleierleuchtdichten angenommen.

Nach der klassischen Streulichttheorie von Holladay wird die äquivalente Schleierleuchtdichte am Ort des Sehobjektes und des Untergrundes gemäß

$$L_{s,äq} = \sum_{1^o}^{R} K \frac{E_a}{\Theta^n} \tag{2.29}$$

berechnet, wobei über alle Beiträge des gesamten Umfeldes, ausgenommen den 1°-Zentrumsbereich um das fixierte Sehobjekt, zu summieren ist.

Dabei bedeuten:

$L_{s,äq}$	äquivalente Schleierleuchtdichte einer inhomogenen Leuchtdichteszene in cd/m^2
E_a	die vom betrachteten Störelement verursachte Beleuchtungsstärke am Auge in lx
Θ	den Winkel zwischen fixiertem Sehobjekt und betrachtetem Umfeld-Störelement in Grad
K, n	Konstanten: K=10; n=2
R	den Gesichtsfeldrand.

Problematisch ist die Berücksichtigung von Szenenelementen die sehr nahe am Fixierungspunkt bzw. am Sehobjektzentrum liegen. Nach der klassischen Beziehung nach Gl. (2.29) bleibt das zentrale Feld von 1° bei der Bestimmung der Schleierleuchtdichte außer Betracht. Periphere Gesichtsfeldteile ab etwa 50° tragen erfahrungsgemäß nur noch wenig zur Schleierleuchtdichte bei.

Nach einem Adaptationsmodell von Fredriksen und Ronte (Fredriksen, 1978) wird die äquivalente Schleierleuchtdichte nach einem modifizierten Holladay-Ansatz bestimmt, insbesondere was die Bewertung der zentralen Störelemente betrifft. Dabei wird die Adaptationsleuchtdichte in einer sehr spezifischen Weise definiert und zwar wird als Umfeldleuchtdichte praktisch nur die dem Sehobjekt unmittelbar benachbarte Untergrundleuchtdichte herangezogen bei Außerachtlassung aller anderen Gesichtsfeldteile. Obwohl dieser Ansatz im FASIMOD-Bericht (FASIMOD, 1995) versuchsweise verwendet wurde und damit durchaus plausible Ergebnisse erhalten wurden, konnten eine Reihe von damit zusammenhängenden Fragen nicht gelöst werden. Aus diesem Grund wurde in diesem Projekt wieder das klassische Modell zur Berechnung der äquivalenten Schleierleuchtdichte verwendet.

2.2.7 Schritte zur Sichtweitenbestimmung

Im Folgenden werden die prinzipiellen Schritte beim Vorgehen zur Bestimmung der Sichtweite eines Sehobjektes zusammengefasst.

1. Berechnung der Streuleuchtdichten der Fahrzeugscheinwerfer
Die Berechnungen erfolgten mit Hilfe eines speziellen am LTI entwickelten Programms (Kooß, 1993), das für die vorliegenden Zwecke ergänzt und erweitert wurde.

2. Berechnung der Sehobjektleuchtdichte
Für jedes Randelement des Sehobjektes wird die Sehobjektleuchtdichte gemäß Gl. (2.12) berechnet zu:

$$L_z = L_{z,n,o} \cdot e^{-\sigma_e \cdot x} + L_{z,s,o} \cdot e^{-\sigma_e \cdot x} + L_H \cdot (1 - e^{-\sigma_e \cdot x}) + L_{s,s}$$

3. Berechnung der Untergrundleuchtdichte
Entsprechend dem Vorgehen unter Schritt 2 wird für jedes Untergrundelement die Untergrundleuchtdichte gemäß Gl. (2.13) berechnet zu:

$$L_u = L_{u,n,o} \cdot e^{-\sigma_e \cdot x} + L_{u,s,o} \cdot e^{-\sigma_e \cdot x} + L_H \cdot (1 - e^{-\sigma_e \cdot x}) + L_{s,s}$$

4. Berechnung des Sehobjektkontrastes
Für jedes der benachbarten Randelemente von Sehobjekt und Untergrund wird ein Randkontrast berechnet zu:

$$C_i = \left| \frac{L_z - L_u}{L_u + L_{s,äq}} \right| \tag{2.30}$$

wobei L_z die Leuchtdichte des jeweiligen Sehobjekt-Randelementes, L_u die Leuchtdichte des benachbarten Untergrund-Randelementes sowie $L_{s,äq}$ die äquivalente Schleierleuchtdichte am Ort des

Sehobjektes gemäß Gl. (2.29) für die jeweilige Leuchtdichteszene bedeuten. Aus den i Teilkontrasten ist dann ein mittlerer Randkontrast zu bestimmen.

5. Berechnung der Adaptationsleuchtdichte
Gemäß Gl. (2.28) wird als Eingangsgröße zur Berechnung der Schwellenkontraste die Adaptationsleuchtdichte berechnet zu:

$$L_a = 0,926 \cdot L_U + L_{s,äq}$$

wobei L_U die mittlere Umfeldleuchtdichte gemäß Gl. (2.15) bzw. Gl. (2.16) und $L_{s,äq}$ die äquivalente Schleierleuchtdichte gemäß Gl. (2.29) bedeuten. Die Größe des Umfeldes bzw. des Gesichtsfeldes orientiert sich an der Ausdehnung der Windschutzscheibe.

6. Berechnung der effektiven Sehobjektgröße
Als Eingangsgröße zur Berechnung des Schwellenkontrastes kann die effektive Sehobjektgröße einer von der Kreisform abweichenden Form nach dem Prinzip der Umfanggleichheit oder dem Prinzip der Raumwinkelgleichheit berechnet werden. In diesem Projekt wird das Umfangsmodell verwendet, weil damit vermutlich mehr langgestreckte Sehobjekte besser bewertet werden.

7. Berechnung des Visibility Levels
Für einen vorgegebenen Abstand x zwischen Sehobjekt und Beobachter in einer gegebenen Beobachtungssituation und einem vereinbarten Wahrnehmungskriterium k sind wie erläutert zur Berechnung des Visibility Levels gemäß

$$VL(x) = \frac{C}{\overline{C}_p(k)} = \frac{1}{PF(k)} \cdot \frac{C}{TSF \cdot \overline{C}_o(g)} \tag{2.31}$$

folgende Schritte durchzuführen:

- Berechnung eines ermittelten Randkontrastes C des Sehobjektes aus den Detailkontrasten gemäß Gl. (2.30)
- Berechnung des praktischen Schwellenkontrastes $\overline{C}_p(k)$ bei dem jeweiligen Wahrnehmungskriterium k aus dem Praxisfaktor PF(k), dem transienten Schwellenerhöhungsfaktor TSF nach Gl. (2.9) und dem theoretischen Schwellenkontrast $\overline{C}_o(g)$ nach Gl. (2.4).

Es sind die Visibility Levels für denjenigen Bereich des Abstandes zwischen Beobachter und Sehobjekt zu berechnen, in dem der vereinbarte Grenzwert erwartet wird.

8. Berechnung der Sichtweite
Zur Sichtweitenberechnung ist mit Hilfe eines geeigneten Iterationsverfahrens derjenige Sehobjektabstand zu ermitteln, bei dem das Visibility Level einen vereinbarten Grenzwert VL_{grenz} erreicht. Für eine Sichtweite bei dem Wahrnehmungskriterium "Sehobjekt gerade gesehen" beträgt dieser Grenzwert $VL_{grenz} = 1$. Zur Bestimmung der Sichtweite nach dem Wahrnehmungskriterium "Sehobjekt sicher gesehen" ist der Grenzwert $VL_{grenz} = SF$, wenn SF die Schwellenkontrasterhöhung zwischen vager und sicherer Wahrnehmung kennzeichnet. Dafür gilt nach Gl. (2.11):

$$SF = \frac{PF(s)}{PF(g)} .$$

Kapitel 3

Das Sichtweitenprogramm FASIVALSICHT

Inhalt dieses Kapitels ist die Erläuterung des Sichtweitenprogramms

Im Folgenden werden die in Kapitel 2 beschriebenen Zusammenhänge zwischen den Sichtweitenvariablen für die Zwecke der Programmierung falls erforderlich näher spezifiziert und im Detail ergänzt. Ferner werden Programmaufbau und Programmbedienung erläutert. Es werden folgende Punkte behandelt:

- Geometrische Zusammenhänge
- Spezifikationen zur Berechnung der Szenenleuchtdichten
- Sichtweitenprogrammierung
- Programmbeschreibung.

3.1 Geometrische Zusammenhänge

Die Geometrie zur Berechnung der Szenenleuchtdichten beruht darauf, dass alle Objekte im realen 3D-Außenraum winkelgetreu in eine 2D-Szene abgebildet werden. Abb. (3.1) zeigt das Koordinatensystem. Jede x, y, z Koordinate des Außenraumes entspricht einem Punkt in der Projektionsebene im 3D-Außenraum bzw. im 2D-Bild. Die Horizontalachse definiert den Winkel α, die Vertikalachse den Winkel β. Ferner wurden folgende Vereinbarungen getroffen:

- Bezugspunkt des Koordinatensystems der 2D-Szene ist das Fahrerauge. Der Winkel $\alpha = \beta = 0$ ist durch die horizontale Blickrichtung des Fahrers vorgegeben.
- Die Augenhöhe des Beobachters liegt 1,2 m über der Fahrbahn.

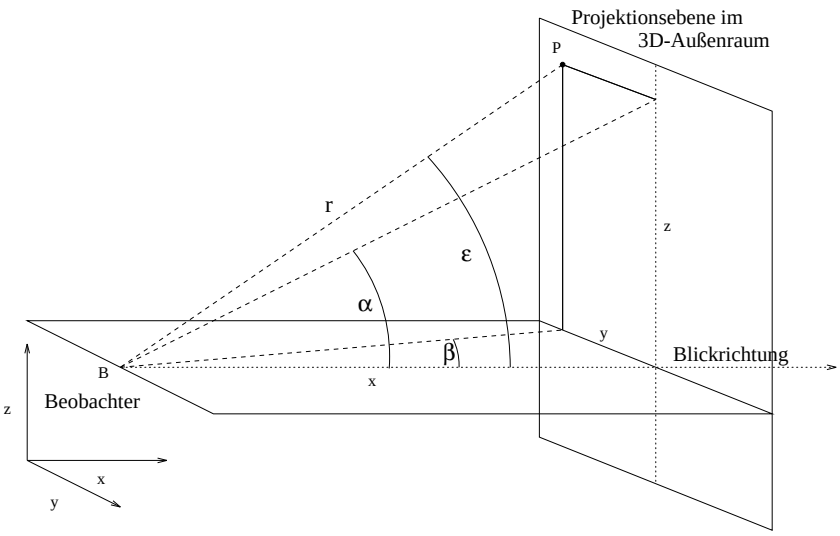


Abbildung 3.1: Das Koordinatensystem. Der Ursprung B des x, y, z-Koordinatensystems ist die Fahrerposition. Der Punkt P mit den Koordinaten x, y, z in der Projektionsebene im 3D-Außenraum (Gesichtsfeld) ist der Bildpunkt eines Außenpunktes.

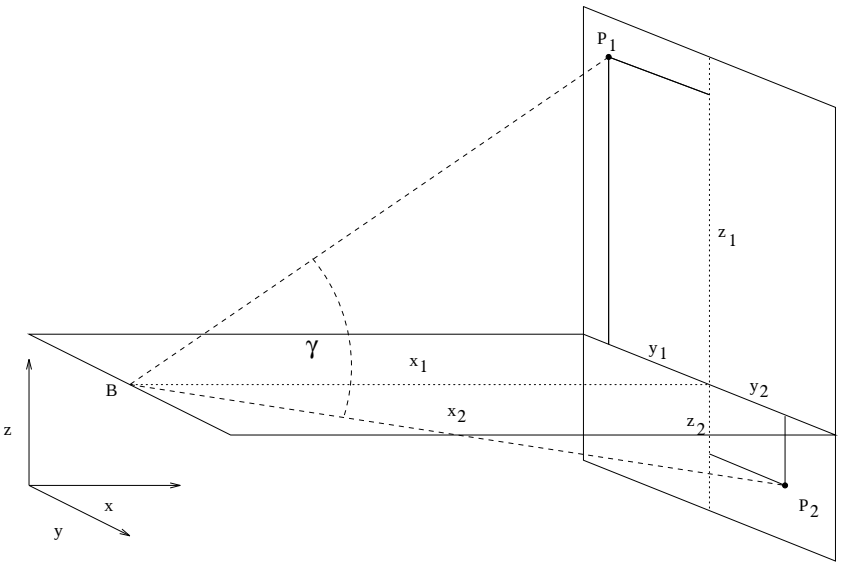


Abbildung 3.2: Der Winkel γ zwischen zwei Punkten P_1 und P_2 im Außenraum

Es gelten folgende Winkelbeziehungen:

Blickwinkel α, β

$$\tan\alpha = \frac{z}{x} \qquad \tan\beta = \frac{y}{x} \tag{3.1}$$

Sichtwinkel ε
Für den Sichtwinkel ε, der zwischen Blickrichtung und Außenpunkt P gezählt wird, gilt:

$$\varepsilon(\alpha,\beta) = \arccos\left(\frac{1}{\sqrt{1+\tan^2\beta+\tan^2\alpha}}\right) \tag{3.2}$$

Winkel γ zwischen zwei Blickpunkten P_1 und P_2
Für den Sichtwinkel γ zwischen den Außenpunkten P_1 und P_2, siehe Abb. (3.2) gilt:

$$\gamma(\alpha_1,\beta_1,\alpha_2,\beta_2) = \arccos\left(\frac{1+\tan\beta_1\cdot\tan\beta_2+\tan\alpha_1\cdot\tan\alpha_2}{\sqrt{1+\tan^2\beta_1+\tan^2\alpha_1}\quad\sqrt{1+\tan^2\beta_2+\tan^2\alpha_2}}\right) \tag{3.3}$$

Die Bildrasterung
Die Umrandungen einer Szene bzw. des Gesichtsfeldes sind durch die Winkel α_{max} und β_{max} beschrieben, die Rasterungen durch $\Delta\alpha$ und $\Delta\beta$. Siehe Abb. (3.3).

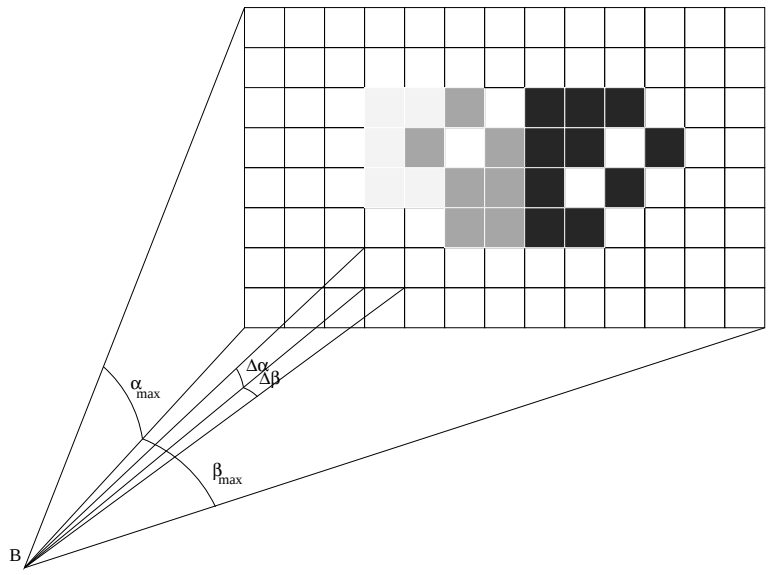


Abbildung 3.3: Darstellung der Rasterung der Szenen

Raumwinkel der Szenenelemente
Für die Raumwinkel der Rasterelemente der Szene aus der Sicht des Beobachters gilt, siehe Abb. (3.4):

$$\begin{aligned}\Delta\omega(\alpha,\beta) = \quad & \arcsin(\sin(\alpha+\Delta\alpha)\cdot\sin(\beta+\Delta\beta)) + \arcsin(\sin\alpha\cdot\sin\beta) \\ - \quad & \arcsin(\sin(\alpha+\Delta\alpha)\cdot\sin\beta) - \arcsin(\sin\alpha\cdot\sin(\beta+\Delta\beta))\end{aligned} \tag{3.4}$$

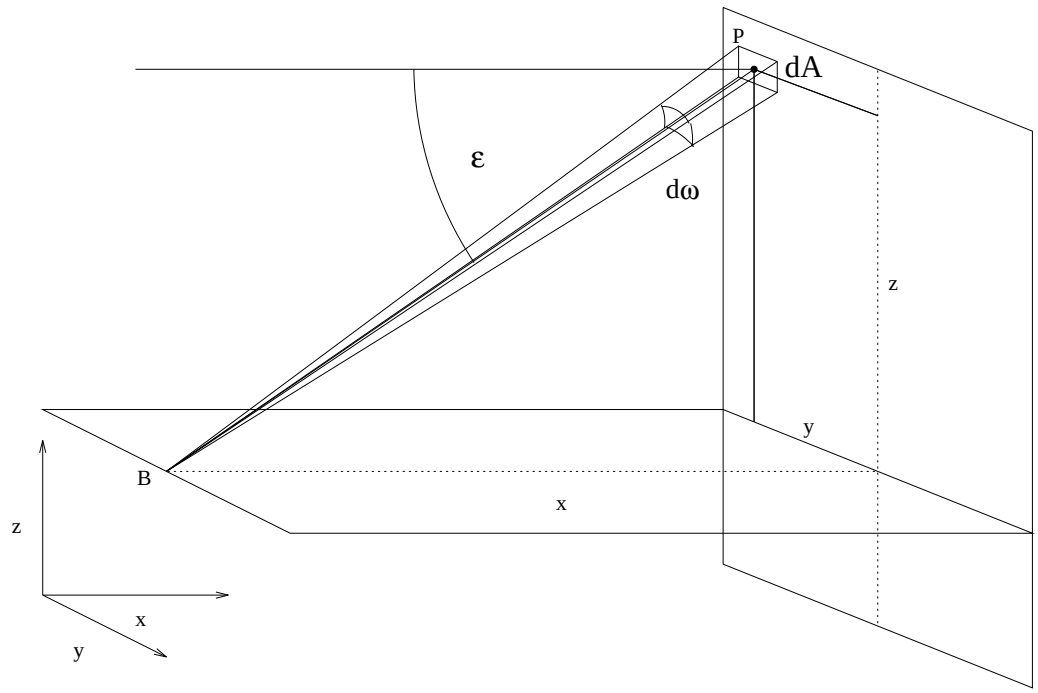


Abbildung 3.4: Darstellung des Raumwinkelelements $\Delta\,\omega$ eines Objektes im Außenraum

Berücksichtigt man weiterhin die Symmetrie der vorgegebenen Rasterung, so vereinfacht sich Gl. (3.4) zu:

$$\Delta\omega(\alpha,\beta) \;=\; \Delta\omega(-\alpha,\beta) \;=\; \Delta\omega(\alpha,-\beta) \;=\; \Delta\omega(-\alpha,-\beta)$$

Wenn desweiteren die Winkelauflösung $\Delta\alpha$ und $\Delta\beta$ gleich sein sollte, so gilt zusätzlich:

$$\Delta\omega(\alpha,\beta) \;=\; \Delta\omega(\beta,\alpha)$$

Benötigt werden diese Beziehungen zur Berechnung der äquivalenten Schleierleuchtdichte und der scheinbaren Sehobjektgröße.

Gesichtsfeldausdehnung
In Anlehnung an die Abmessungen üblicher Windschutzscheiben wurde als Gesichtsfeld eine rechteckförmige Fläche gewählt, dessen Winkelabmessungen aus der Sicht des Beobachters in horizontaler Richtung 100° und in vertikaler Richtung 40° betragen. Siehe Abb. (3.5).

Die Leuchtdichtematrix
Die berechnete Leuchtdichteverteilung einer Szene wurde in Form einer zweidimensionalen Matrix abgelegt, deren Koordinaten den Vertikal- und Horizontalwinkeln der realen Szene entsprechen. Das von der Leuchtdichtematrix erfasste Gesichtsfeld sollte einerseits möglichst groß sein (z.B. bei der Bestimmung der Adaptationsleuchtdichten), andrerseits eine genügend feine Auflösung ermöglichen (z.B. bei den relativ kleinen Schluss- und Nebelschlussleuchten). Hinzu kommt der Aspekt der möglichst geringen Rechenzeiten. Aus diesen Gründen wurde nicht mit einer starren, sondern einer adaptiven Matrixorganisation gearbeitet. Bei Berechnungen, die das gesamte Gesichtsfeld von

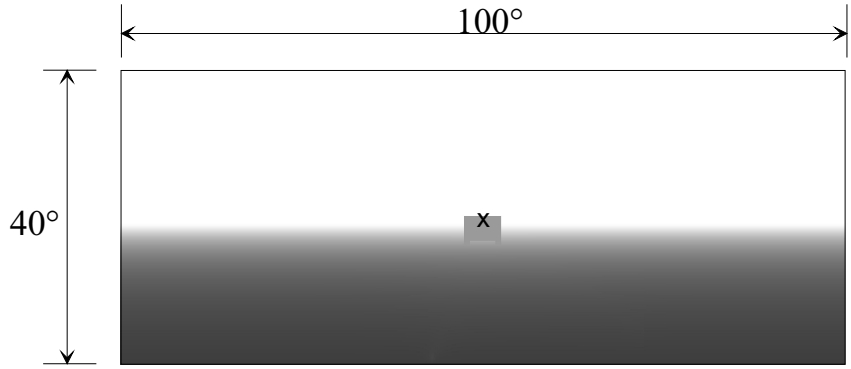


Abbildung 3.5: Das bewertete Gesichtsfeld hat eine Ausdehnung von 100° in der Horizontalen und 40° in der Vertikalen. Der Punkt (x) ist die horizontale Verlängerung des Punktes B in Abb. (3.1). Dargestellt ist das große dunkle Sehobjekt im Abstand von 20 m zum Beobachter.

100° x 40° betreffen, wurde eine sog. Übersichtsmatrix angelegt mit einer horizontalen Öffnung von 100° und einer vertikalen von 40°. Die Winkelauflösung beträgt hier $0,1^o$. Bei Berechnungen der Sehobjektleuchtdichten wurde eine sog. Detailmatrix angelegt, deren Ausschnitt adaptiv je nach Größe des Sehobjektes festgelegt wurde. Neben den Leuchtdichtematrizen wurden Codematrizen angelegt, in denen die Informationen abgelegt wurden, zu welchem Objekt (Hintergrund, Sehobjekt) das jeweilige Matrix-element (Pixel) der Leuchtdichtematrix gehört.

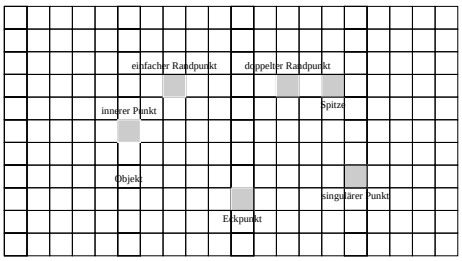


Abbildung 3.6: Darstellung der verschiedenen Kategorien der Objektpunkte.

Identifikation der Sehobjekte

Da die Kontrastelemente eines Sehobjektes sich auf das Objekt selbst und seinen Untergrund beziehen, ist die genaue Kenntnis der Koordinaten des Objektortes unerlässlich. Zu diesem Zweck wird zu jeder Leuchtdichtematrix eine Identifikationsmatrix generiert, in der zu jedem Pixel die Koordinaten über das gesehene Objekt gespeichert sind.

Bei der Auswertung werden die verschiedenen Objektpunkte kategorisiert. Abb. (3.6) zeigt schematisch die unterschiedlichen Arten von Objektpunkten. Tabelle 3.1 enthält die Kategorien der Objektpunkte und ihre Zuordnungskriterien. Mit ihrer Hilfe werden die Sehobjekte in einer Szene identifiziert.

Tabelle 3.1: Die Kategorien der Objektpunkte

Kategorie	Kriterium
innerer Objektpunkt	Alle Objektpunkte mit genau 4 Objektpunkten als nächsten Nachbarn
einfacher Randpunkt	Alle Objektpunkte mit genau 3 Objektpunkten als nächsten Nachbarn
Eckpunkt	Alle Objektpunkte, die genau 2 Objektpunkte als nächsten Nachbarn haben und diese liegen einander nicht gegenüber.
doppelter Randpunkt	Alle Objektpunkte, die genau 4 Objektpunkte als nächsten Nachbarn haben und diese liegen einander gegenüber.
Spitze	Alle Objektpunkte mit genau 1 Objektpunkt als nächsten Nachbarn
singulärer Punkt	Alle Objektpunkte mit keinem Objektpunkt als nächsten Nachbarn

Effektive Sehobjektgröße

Da die realen Sehobjekte von ihrer idealen Kreis- oder Rechteckform abweichen, wird ihre Ausdehnung durch einen effektiven Sehwinkel beschrieben. Zu seiner Berechnung nach dem raumwinkeläquivalenten Ansatz werden folgende Beziehungen benötigt. Raumwinkel des äquivalenten Sehobjektes:

$$\omega_{Objekt} = \sum_{i=1}^{N} \Delta\omega(\alpha_i, \beta_i) \tag{3.5}$$

mit:

α_i, β_i Koordinaten des i-ten Objektpunktes
N Anzahl der Objektpunkte

Raumwinkel des Winkeläquivalentenkreises:

$$\omega_{Kreis} = 2\pi \left(1 - \cos\frac{\alpha_{öffnung}}{2}\right) \tag{3.6}$$

Somit erhält man für den effektiven Sehwinkel eines Sehobjektes bei einer raumwinkelgetreuen Bewertung:

$$\alpha_{öffnung} = 2 \cdot \arccos\left(1 - \frac{\omega_{Objekt}}{2\pi}\right) . \tag{3.7}$$

Zur Berechnung der effektiven Sehobjektgröße nach dem Ansatz des äquivalenten Sehobjektumfanges werden die Winkel γ_i eines jeden Randpixels berechnet und entlang der gestrichelten Linie aufsummiert, wie aus Abb. (3.7) und Abb. (3.8) hervorgeht.

Für den Objektumfangwinkel φ_{Objekt} gilt danach:

$$\varphi_{Objekt} = \sum_{i=1}^{n} \gamma_i \tag{3.8}$$

mit:

n Anzahl der Randpunkte
γ_i Winkel des i-ten Randpunktes

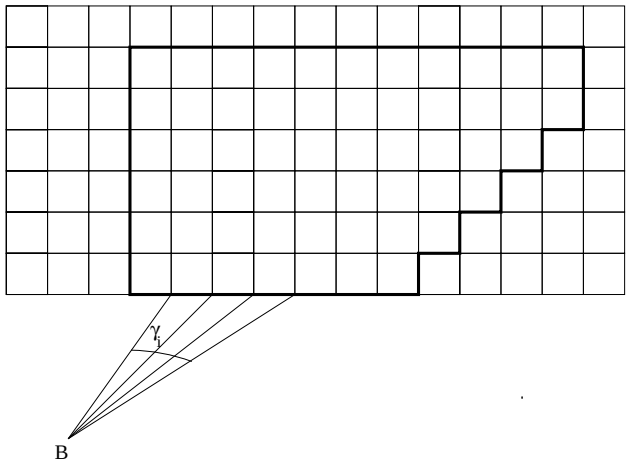


Abbildung 3.7: Der Beitrag einzelner Randpunkte zum Objektumfangswinkel.

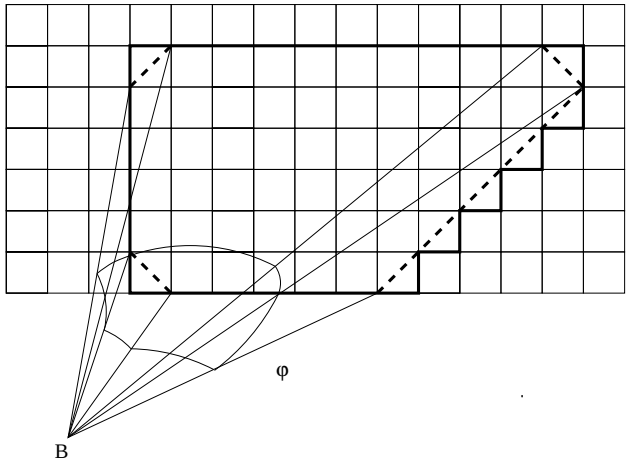


Abbildung 3.8: Zur Bestimmung des Objektumfangswinkels φ_{Objekt}. Die gestrichelte Summation vermeidet eine Überbewertung der Eckelemente.

Für den Umfangwinkel eines Kreises φ_{Kreis} mit dem Öffnungswinkel $\alpha_{öffnung}$ gilt, siehe Abb. (3.8):

$$\varphi_{Kreis} = 2\pi \sin\left(\frac{\alpha_{öffnung}}{2}\right) \tag{3.9}$$

Somit gilt für den effektiven Sehwinkel nach dem Kriterium der Umfanggleichheit im Vergleich zu einem kreisförmigen Sehobjekt:

$$\alpha_{öffnung} = 2 \cdot \arcsin\left(\frac{\varphi_{Objekt}}{2\pi}\right) \tag{3.10}$$

Das Programm FASIVALSICHT rechnet je nach Vorgabe mit beiden Ansätzen. Es zeigte sich, dass für die untersuchten Objekte die berechneten Kontrastwerte nur wenig von diesem Modellparameter abhängen. Bei den nachfolgenden Modellierungen wird mit dem Umfang-Ansatz gerechnet, weil wie erwähnt damit langgestreckte Objekte vermutlich besser bewertet werden.

3.2 Spezifikationen zur Berechnung der Szenenleuchtdichten

Der Beobachter
Vorausgesetzt wird ein normalsichtiger Beobachter, dessen Augen sich im Ursprung des Koordinatensystems von Abb. (3.1) befinden.

Die Frontscheibe
Die Frontscheibe des Fahrzeugs schwächt entsprechend ihrem Transmissionsgrad τ das ins Fahrzeug einfallende Licht. Für die vom Beobachter gesehene Leuchtdichte L gilt dann:

$$L = L_o \cdot \tau \tag{3.11}$$

wenn L_o die Szenenleuchtdichte bedeutet. Aufgrund von Messungen des Projektpartners TU-Ilmenau am Versuchsfahrzeug wird mit einem Lichttransmissionsgrad von 0,85 bzw. 85 % gerechnet.

Trübungsparameter
Die Trübung der Atmosphäre wird gemäß Kapitel 2.1 durch die Normsichtweite bei einem Schwellenkontrast von 5 % beschrieben.

Streuleuchtdichten der Fahrzeugscheinwerfer
Die von den Fahrzeugscheinwerfern erzeugten Streuleuchtdichten wurden mit Hilfe des am LTI entwickelten Programms (Kooß, 1993) für die Normsichtweiten gemäß Tabelle 3.2 berechnet. Dabei wurden sowohl die Einfachstreuung als auch die 1. Komponente der Mehrfachstreuung berücksichtigt. Wesentliche Einflussgrößen der Streuleuchtdichten sind:

- die relative Position der Scheinwerfer zum Beobachter
- die radiale Beleuchtungsstärkeverteilung der Scheinwerfer
- die Normsichtweite
- die Schichtdicke des beleuchteten Nebels.

Die Berechnungen der Streuleuchtdichten sind zu aufwendig, um sie während des Programmlaufes bei der Bestimmung der Sichtweiten in Echtzeit durchführen zu können. Sie wurden für Normsichtweiten gemäß Tabelle 3.2 zuvor berechnet und geordnet nach Scheinwerfertyp und Normsichtweite in speziellen Dateien abgelegt. Streuleuchtdichten für Normsichtweiten außerhalb des Bereiches von Tabelle 3.2 wurden linear interpoliert. Innerhalb jeder Streuleuchtdichtedatei sind die Streuleuchtdichten für alle Blickrichtungen (Blickwinkel α, β) des vorderen Halbraumes organisiert. Dabei setzen sich die Streuleuchtdichten im oberen Halbraum aus allen Zustrahlungen des gesamten Halbraumes zusammen. Die Aufsummierung der Streuleuchtdichten bei Blick in den unteren Halbraum wird durch die Fahrbahn bzw. den Boden oder das Sehobjekt begrenzt.

Tabelle 3.2: Normsichtweiten, bei denen die Streuleuchtdichten der Fahrzeugscheinwerfer berechnet wurden. Angaben in m

Normsichtweiten V_n	37,5	75	150	300	600	1200	2400

Beleuchtung durch die KFZ Scheinwerfer
Die Berechnungen basieren auf einem Paar Abblendscheinwerfer und einem Paar Nebelscheinwerfer,

die in Ellipsoid-Technik ausgeführt und mit H7 Lampen bestückt sind. Sie finden ihren Einsatz in den BMW-Fahrzeugen der 5-er Reihe. Tabelle 3.3 enthält die Spezifikationen der eingesetzten Scheinwerfer. Die geometrischen Positionen der Scheinwerfer enthält Tabelle 3.4.

Tabelle 3.3: Spezifikationen der Fahrzeug-Scheinwerfer

Spezifikationen	Abblendscheinwerfer	Nebellscheinwerfer
Streuscheiben-Nr.	145 505-02 I 145 505-01	31030700
Prüfzeichen	E1 04 HC/R 297(20)	E3 02B 51888 V49 1
Hersteller	Hella	Carello
KFZ-Type	BMW E39	BMW E39
Lampentype	H7	H7
Lampenlichtstrom	1500 lm	1500 lm
Scheinwerferlichtstrom	647 lm	469 lm

Tabelle 3.4: Koordinaten der eingesetzten Scheinwerfer relativ zum Ursprung B in Abb. (3.1). Angaben in m

Scheinwerfer	Abblendscheinwerfer		Nebelscheinwerfer	
	rechts	links	rechts	links
relative Position				
y-Koordinate	+0,22	-0,90	+0,22	-0,90
x-Koordinate	1,75	1,75	1,75	1,75
z-Koordinate	-0,57	-0,57	-0,87	-0,87

Von diesen Scheinwerfern wurden die radialen Beleuchtungsstärken in Abständen zwischen 2 m und 25 m im gesamten Ausstrahlungsraum gemessen, um Nahfeldfehler bei Anwendung des photometrischen Entfernungsgesetzes zu vermeiden. Diese Daten wurden auch bei der Berechnung der von den Scheinwerfern verursachten Streuleuchtdichten verwendet.

Die natürliche Beleuchtung

Tabelle 3.5 zeigt den Bereich der horizontalen Beleuchtungsstärke E_h, bei denen die Berechnungen der Sichtweiten durchgeführt wurden.

Tabelle 3.5: Bereich untersuchter Beleuchtungsstärken. Angaben in lx

Horizontale Beleuchtungsstärke E_h	0,1	1	3	10	30	100	300	1000	3000	10 000	30 000

Fahrbahnreflexion

Der Leuchtdichtekoeffizient der Fahrbahn bei natürlicher Himmelsbeleuchtung gemäß Gl. (2.18) wurde vom Partner TU Ilmenau für die Versuchsstrecken zu etwa $q_o = 0,04(cd/m^2)/lx$ ermittelt. Der richtungsabhängige Leuchtdichtekoeffizient q_r nach Gl. (2.22) bei Scheinwerferbeleuchtung beruht auf den in (PIARC, 1984) veröffentlichten Untersuchungen. Dafür gilt:

$$q_r = q_{r,o}\frac{(x + 10)^2}{333 + (x + 10)^2} \cdot \frac{\varepsilon}{\alpha} \tag{3.12}$$

es bedeuten:

q_r Leuchtdichtekoeffizient der Fahrbahn bei Scheinwerfereinstrahlung
$q_{r,o}$ Konstante: hier $q_{r,o} = 0,015\ (cd/m^2)/\text{lx}$
x Abstand zwischen betrachtetem Fahrbahnpunkt und Beobachter
ε Winkel zwischen Fahrbahnspur und Scheinwerfereinstrahlung
α Winkel zwischen Fahrbahnspur und Blickrichtung

Sehobjektleuchtdichte
Gemäß Gl. (2.12) bis Gl. (2.26) gilt für die einem Szenenpixel zuzuordnende Leuchtdichte:

$$L_z(\alpha,\beta) \;=\; \tau\left(\left(\frac{\rho}{\pi}((\frac{E_h}{2} \;+\; \frac{q_o\pi}{2}) \;+\; E_{z,o}(x_s)) \;\cdot\; e^{-\sigma_e\,\cdot\,x_s}\right) \;+\; \frac{I_o}{A}\right)\; e^{-\sigma_e\,\cdot\,x_b} \\ +\; \tau(L_H(1-e^{-\sigma_e\,\cdot\,x_b}) \;+\; L_{s,s}(\alpha,\beta)) \qquad (3.13)$$

wobei α, β die Beobachtungsrichtung zum Sehobjekt, x_b den Abstand zum Sehobjekt und x_s den Abstand zwischen Scheinwerfer und Sehobjekt bedeuten. $E_{z,o}$ ist die Beleuchtungsstärke am Sehobjekt ohne Trübungseinfluss, deren gemessene Daten, wie bereits erwähnt, für jeden Scheinwerfer in Abhängigkeit vom Abstand x_s in speziellen Dateien vorliegen.

Bei einem beleuchteten Sehobjekt ist $I_o = 0$ und bei einem selbstleuchtenden Sehobjekt gilt idealerweise $\rho = 0$. Hier wurde mit $\rho = 0,1$ gerechnet.

Untergrundleuchtdichte
Hier gilt wiederum gemäß Gl. (2.12) bis Gl. (2.26):

$$L_u(\alpha,\beta) \;=\; \tau(q_oE_h \;+\; E_{u,o}(x_s) \;\cdot\; q_r \;\cdot\; e^{-\sigma_e\,\cdot\,x_s}) \;\cdot\; e^{-\sigma_e\,\cdot\,x_b} \\ +\; \tau(L_H(1-e^{-\sigma_e\,\cdot\,x_b}) \;+\; L_{s,s}(\alpha,\beta)) \qquad (3.14)$$

Handelt es sich bei dem betrachteten Untergrundelement um den Horizont, so sind $q_o = q_r = 0$ zu setzen.

Äquivalente Schleierleuchtdichte
Die Berechnung der äquivalenten Schleierleuchtdichte im Gesichtsfeld eines Beobachters erfolgte nach der klassischen Streulichttheorie von Holladay gemäß Gl. (2.29).

Mittlere Untergrundleuchtdichte
Die mittlere Untergrundleuchtdichte des Sehobjektes z.B. berechnet sich als gewichtetes Mittel aller Leuchtdichten in unmittelbarer Nachbarschaft zum Objekt. Es gilt bei raumwinkelgetreuer Gewichtung:

$$L_{u,m} \;=\; \frac{\sum\limits_i \omega_i \cdot L_{u,i}}{\sum\limits_i \omega_i} \qquad (3.15)$$

Es bedeuten:

$L_{u,m}$ die mittlere Untergrundleuchtdichte des Sehobjektes
$L_{u,i}$ die Untergrundleuchtdichte des Untergrundelementes i gemäß Gl. (2.13)
ω_i der Raumwinkel eines Untergrundelementes i

Der Leuchtdichtekontrast
Entsprechend Gl. (2.30) gilt für den mittleren Randkontrast des Sehobjektes bei winkelgetreuer Gewichtung:

$$C = \frac{\sum_i \gamma_i \frac{|L_{u,i} - L_{z,i}|}{L_{u,i} + L_{s,äq}}}{\sum_i \gamma_i} \tag{3.16}$$

Es bedeuten:

C	der mittlere Randkontrast des Sehobjektes
$L_{z,i}$	die Leuchtdichte eines Sehobjektdetails i
$L_{u,i}$	die Leuchtdichte des dazugehörigen Untergrundelementes
$L_{s,äq}$	die äquivalente Schleierleuchtdichte der Szene
γ_i	die Winkelausdehnung des Sehobjektdetails als Gewichtungsfaktor

In Abb. (3.9) ist die Geometrie der Randleuchtdichten näher erläutert.

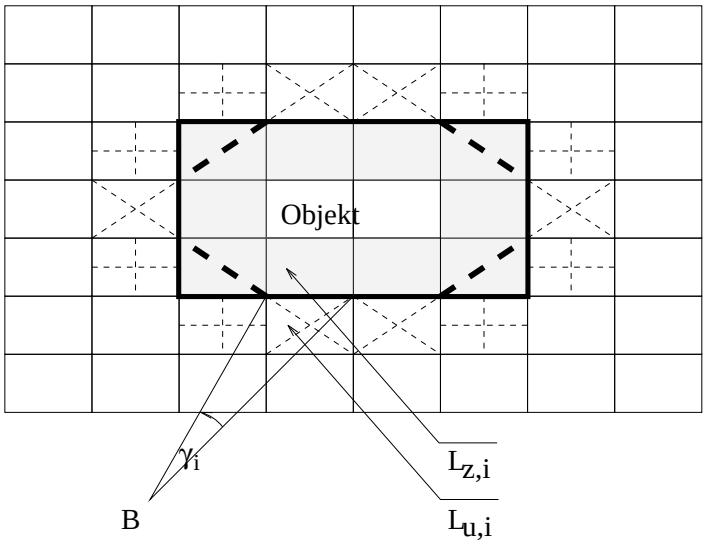


Abbildung 3.9: Die Komponenten zur Berechnung des Randkontrastes.

Praxisfaktoren im Dämmerungsbereich
Die Bestimmung der Praxisfaktoren im Bereich zwischen 0,1 lx und 1000 lx für die horizontale Beleuchtungsstärke E_h erfolgte durch eine logarithmisch lineare Interpolation der für Tag und Nacht ermittelten Praxisfaktoren gemäß:

$$PF(E_h) = a + b \cdot log(E_h) \tag{3.17}$$

wobei die Parameter a, b von der Sehobjektklasse und dem Nebelbereich abhängen.

3.3 Eigenschaften der Sehobjekte

Es wird zwischen 4 beleuchteten Sehobjekten (Sehobjekte Nr. 1 bis Nr. 4) und 2 selbstleuchtenden Sehobjekten (Sehobjekte Nr. 5 und Nr. 6) unterschieden. Die Reflexionsgrade der beleuchteten Sehobjekte Nr. 1 bis Nr. 4 sowie die Lichtstärken der selbstleuchtenden Sehobjekte Nr. 5 und Nr. 6 wurden vom Partner TU Ilmenau vor Ort gemessen.

Großes dunkles Sehobjekt: Sehobjekt Nr. 1
Dieses Sehobjekt simuliert die hintere Ansicht eines PKW. Es besteht aus drei Rechtecken mit dem Reflexionsgrad von 0,22. Das obere Rechteck steht für die Karosserie, die unteren Rechtecke stehen für die Reifen. Die geometrischen Daten dieses Sehobjektes enthält Tabelle 3.6.

Tabelle 3.6: Geometrische Daten des großen dunklen Sehobjektes, gezählt von der Beobachterposition von Abb. (3.1). Messung in m

Rechteck	linker Reifen		rechter Reifen		Karosserie	
	y	z	y	z	y	z
linke obere Ecke	-0,075	-1,0	0,625	-1,0	-0,875	0,2
linke untere Ecke	-0,875	-1,2	0,625	-1,2	-0,875	-1,0
rechte obere Ecke	-0,625	-1,0	0,875	-1,0	0,875	0,2
rechte untere Ecke	-0,625	-1,2	0,875	-1,2	0,875	-1,0

Kleines dunkles Sehobjekt: Sehobjekt Nr. 2
Der Reflexionsgrad beträgt hier 0,233.

Kleines mittelhelles Sehobjekt: Sehobjekt Nr. 3
Gegenüber dem kleinen hellen Sehobjekt hat dieses Sehobjekt einen Reflexionsgrad von 0,53.

Kleines helles Sehobjekt: Sehobjekt Nr. 4
Dieses Sehobjekt simuliert kleine, helle Hindernisse auf der Fahrbahn. Es hat eine quadratische Form der Kantenlänge von 0,3 m und einen Reflexionsgrad $\rho = 0,705$.

Schlussleuchten: Sehobjekt Nr. 5
Auf dem großen dunklen Sehobjekt sind noch zusätzlich 2 Rechtecke mit 13 x 4 cm^2 Kantenlänge zur Simulation der Schlussleuchten platziert. Die Koordinaten zeigt Tabelle 3.7. Die Lichtstärke einer Schlussleuchte beträgt $I_o = 2,7\ cd$. Die Refexion der Abschlussscheibe wurde mit $\rho = 0,1$ berücksichtigt.

Tabelle 3.7: Geometrische Daten der Schlussleuchte, gezählt von der Beobachterposition B in Abb. (3.1). Abmessungen in m

Rechteck	linke Schlussleuchte		rechte Schlussleuchte	
	y	z	y	z
linke obere Ecke	-0,85	-0,26	0,85	-0,26
linke untere Ecke	-0,85	-0,3	0,85	-0,3
rechte obere Ecke	-0,72	-0,26	0,72	-0,26
rechte untere Ecke	-0,72	-0,3	0,72	-0,3

Nebelschlussleuchte: Sehobjekt Nr. 6
Die Nebelschlussleuchte hat die gleiche geometrische Konfiguration wie die linke Schlussleuchte. Die Lichtstärke beträgt $I_o = 101$ cd. Auch hier dient die simulierte Fahrzeugkontur wie bei den Schlussleuchten als Hintergrund.

3.4 Sichtweitenprogrammierung

Die Berechnung der Sichtweiten erfolgte nach den in Kapitel 2.2.7 aufgelisteten Schritten. Aus der Menge von entfernungsabhängigen Visibility Levels VL(x) wird iterativ derjenige Sehobjektabstand bestimmt, bei dem VL(x) gleich groß ist wie der vereinbarte Grenzwert VL_{grenz}. Der dazugehörige Abstand ist die gesuchte Sichtweite des Sehobjektes bei dem gewählten Wahrnehmungskriterium. Dabei ergibt die Iteration zu $VL_{grenz} = 1$ die Sichtweite bei dem Kriterium "Sehobjekt gerade gesehen" , die Iteration zu $VL_{grenz} = SF$ die Sichtweite bei dem Kriterium "Sehobjekt sicher gesehen" .

Im Normalfall nimmt VL(x) mit abnehmendem Abstand x zu. Startpunkt der Iteration ist daher ein genügend großer Sehobjektabstand, bei dem VL(x) klar unter dem Wert 1 liegt. Die Sehobjektabstände werden danach so lange verringert, bis VL(x) erstmalig oberhalb des vereinbarten Grenzwertes VL_{grenz} liegt. Durch eine fortschreitende Einkreisung mit immer geringer werdenden Sehobjektabständen wird dann nach dem Newton'schen Verfahren derjenige Abstand ermittelt, bei dem die relative Differenz zweier aufeinander folgender VL(x)-Werte kleiner als 0,5 % ist. Das ist je nach Startwert bei etwa 5 bis 20 Iterationsschritten der Fall.

Die Iteration wird in zwei Sonderfällen ohne eine konkrete Sichtweitenbestimmung abgebrochen. Einmal, wenn bis zu einem Abstand von 2 m keine Iteration stattfindet. Das Sehobjekt ist dann praktisch unsichtbar. Zweitens wird die Iteration abgebrochen, wenn mit geringer werdendem Sehobjektabstand das Visibility Level geringer wird, statt wie im Normalfall größer. Dieser Fall ist ein Indiz für Tarnung. Siehe Kapitel 4.2.6 und Kapitel 4.2.7.

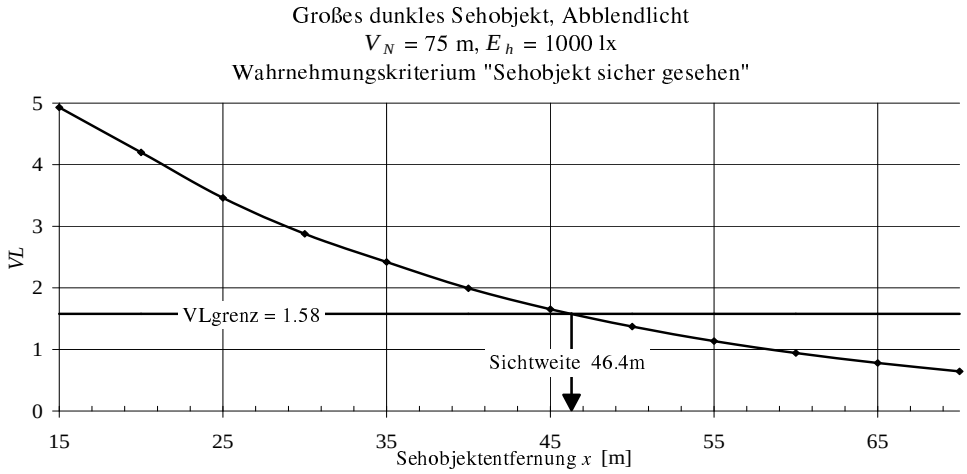


Abbildung 3.10: Beispiel einer iterativen Sichtweitenbestimmung.

Abb. (3.10) erläutert das Vorgehen der Sichtweitenbestimmung an Hand einer Grafik. Das Sehobjekt wird sicher gesehen, wenn der Sehobjektkontrast C mindestens so groß ist wie der praktische Schwellenkontrast $\overline{C}_p(s)$ oder wenn nach Gl. (2.11) das Visibility Level den Grenzwert $VL_{grenz} = SF = PF(s)/PF(g)$ erreicht. Mit $PF(s) = 30$ und $PF(g) = 19$ nach Tabelle 4.2 ist in diesem Beispiel $SF = 1,58$. Die Sichtweite im obigen Beispiel beträgt danach 46,4 m, in Übereinstimmung mit der im Sichtweitenprogramm iterativ-automatisch berechneten Sichtweite gemäß Tabelle A.1 in Anhang A. Soweit das Beispiel.

Programmbeschreibung

Das Programm FASIVALSICHT entstand auf einem Intel-PC mit dem Betriebssystem Windows-NT. Bei der Programmentwicklung wurde großer Wert auf Portierbarkeit des Programmes auf Rechner mit dem Betriebssystem UNIX gelegt. Der Quellcode diese Programmes ist in C++ geschrieben. Das Programm ist modular aufgebaut, so dass der Code auch in andere Programme übernommen werden kann. Das Flussdiagramm Abb. (3.11) zeigt zusammenfassend in groben Zügen den Programmablauf. Ausgehend von den Daten des Sehobjektes, der Trübung und der einstrahlenden Beleuchtung wird zunächst die örtliche Leuchtdichteverteilung der Szene berechnet und in der sog. Leuchtdichtematrix abgelegt. Mit Hilfe dieser Matrix werden alle Szenendaten berechnet, die im Folgenden bei der Besprechung der Programm-Modi aufgelistet werden.

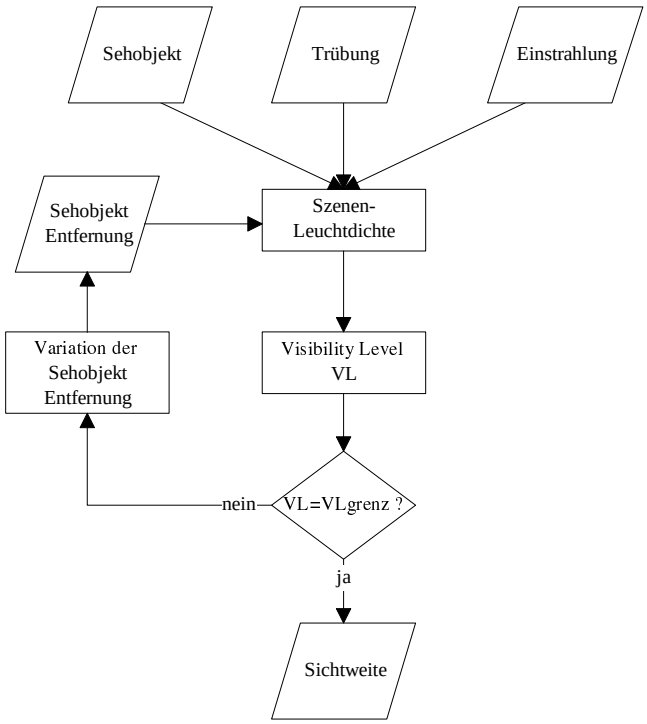


Abbildung 3.11: Flussdiagram des Programmablaufs

Abb. (3.12) beschreibt nochmals das Vorgehen zur Bestimmung des abstandsabhängigen Visibility Levels.

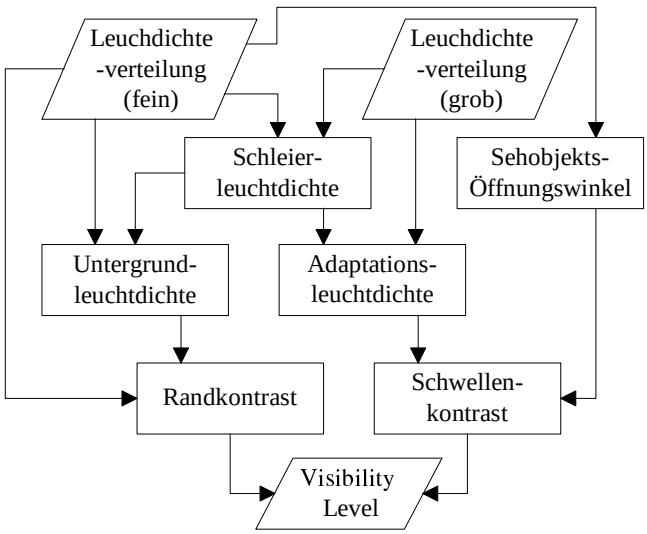


Abbildung 3.12: Flussdiagram zur Bestimmung des Visibility Levels VL

Das Programm FASIVALSICHT kann in 3 Modi betrieben werden:

- <u>Sichtweiten -Modus:</u>
  Dieser Programm-Modus dient zur direkten Berechnung von Sichtweiten.
  Eingabedaten:
  - Normsichtweite V_N
  - Horizontale Beleuchtungsstärke E_h
  - Art des Sehobjektes
  - Art der Scheinwerferzuschaltung
  - Startwert des Iterationsabstandes
  - Praxisfaktoren des Schwellenkontrastes

  Ausgabedaten:
  - Sichtweite des Sehobjektes
  - Visibility Level beim Iterationsabbruch

- Visibility Level Modus
  Zweck dieses Programm-Modus ist die Berechnung des Visibility Levels für vorgegebene Sehobjektabstände sowie von dahin führenden Zwischenergebnissen.
  Eingabedaten:
  - Beobachterabstand x
  - Normsichtweite V_N
  - Horizontale Beleuchtungsstärke E_h
  - Art des Sehobjektes
  - Art der Scheinwerferzuschaltung
  - Praxisfaktoren des Schwellenkontrastes

  Ausgabedaten:
  - Beleuchtungsstärke am Ort des Beobachters E_A
  - Mittlere Sehobjektleuchtdichte L_z
  - Mittlere Umfeldleuchtdichte L_U
  - Äquivalente Schleierleuchtdichte $L_{s,äq}$
  - Mittlere Untergrundleuchtdichte $L_{u,m}$
  - Mittlere Streuleuchtdichte $L_{s,s}$
  - Maximale Streuleuchtdichte
  - Adaptationsleuchtdichte L_a
  - Effektiver Öffnungswinkel des Sehobjektes α
  - Mittlerer Randkontrast des Sehobjektes C
  - Inhomogenitätsfaktor TSF
  - Theoretischer Schwellenkontrast des homogenen Umfeldes $C_o(g)$
  - Praktische Schwellenkontraste $\overline{C}_p(g)$, $\overline{C}_p(s)$
  - Visibility Level $VL = C/\overline{C}_p(g)$

- Grafikausgabe-Modus
  Mit diesem Modus werden die Szenenleuchtdichten grafisch dargestellt.
  Eingabedaten:
  - Beobachtungsabstand x
  - Normsichtweite V_N
  - Horizontale Beleuchtungsstärke E_h
  - Art des Sehobjektes
  - Art der Scheinwerferzuschaltung
  - Gesichtsfeldgröße
  - Auflösungsvermögen

  Ausgabedaten:
  - Leuchtdichtegrafik wie z.B. in Abb. (4.10) und Abb. (4.11)

Kapitel 4

Theoretische Modellergebnisse

Inhalt dieses Kapitels ist die Präsentation und Diskussion der modellierten Sichtweitenergebnisse.

4.1 Praxisfaktoren zur Berechnung der praktischen Schwellenkontraste

Wie in Kapitel 2.2.3 erläutert, werden die praktischen Seherschwernisse durch Schwellenerhöhungsfaktoren, die sog. Praxisfaktoren berücksichtigt. Danach gilt für den praktischen Schwellenkontrast bei dem Wahrnehmungskriterium "gerade gesehen":

$$\overline{C}_p(g) \;=\; TSF \;\cdot\; PF(g) \;\cdot\; \overline{C}_o(g)\;. \tag{4.1}$$

und bei dem Kriterium "sicher gesehen"

$$\overline{C}_p(s) \;=\; TSF \;\cdot\; PF(s) \;\cdot\; \overline{C}_o(g)$$

Gemäß dem Konzept dieses Projektes werden die Praxisfaktoren durch Vergleich von gemessenen und berechneten Sichtweiten bestimmt, wobei wie folgt vorgegangen wurde:

- Vorläufige Gruppierung der Beobachtungssituationen nach den Merkmalen: Art des Sehobjektes, Beleuchtungsniveau, Normsichtweite. Dabei wurden in die Gruppe der Nachtsituationen alle Beleuchtungsstärken E_h kleiner als 1 lx sortiert. Die wenigen Beobachtungssituationen mit Beleuchtungsstärken zwischen 1 lx und 100 lx wurden bei der Bestimmung der Praxisfaktoren nicht berücksichtigt. Alle Situationen mit Beleuchtungsstärken E_h größer als 100 lx wurden der Tagessituation zugeordnet.

- Durchführung folgender Rechnungen in jeder Gruppe:
  Vorgabe eines Praxisfaktors. Berechnen der Sichtweiten für alle Situationen dieser Gruppe. Berechnen des Gruppenmittelwertes der Sichtweiten. Vergleichen mit dem Mittelwert der gemessenen Sichtweiten. Bestimmen desjenigen Praxisfaktors, bei dem gemessene und berechnete Sichtweiten übereinstimmen.

- Neugruppierung der Beobachtersituationenen in Klassen mit ähnlichen Gruppen-Praxisfaktoren. Berechnen desjenigen Praxisfaktors in jeder Klasse, bei dem die gemessenen und berechneten Klassenmittelwerte nahezu übereinstimmen. Als Ergebnis dieser Gruppierungsanalysen wurden für jedes der beiden Wahrnehmungskriterien folgende Klassen von Beobachtungssituationen definiert:
  - Sehobjektklassen:
    Klasse I: Beleuchtete Sehobjekte (Nr. 1, Nr. 2, Nr. 3, Nr. 4)
    Klasse II: Schlussleuchte (Nr. 5)
    Klasse III: Nebelschlussleuchte (Nr. 6)
  - Beleuchtungsniveau - Klassen:
    Klasse I: Tag (E_h oberhalb 100 lx)
    Klasse II: Nacht (E_h unterhalb 1 lx)
  - Normsichtweiteklassen:
    Klasse I: Nebelbereich: Normsichtweite unterhalb 1000 m
    Klasse II: Dunst und klare Sicht: Normsichtweite oberhalb 1000 m.

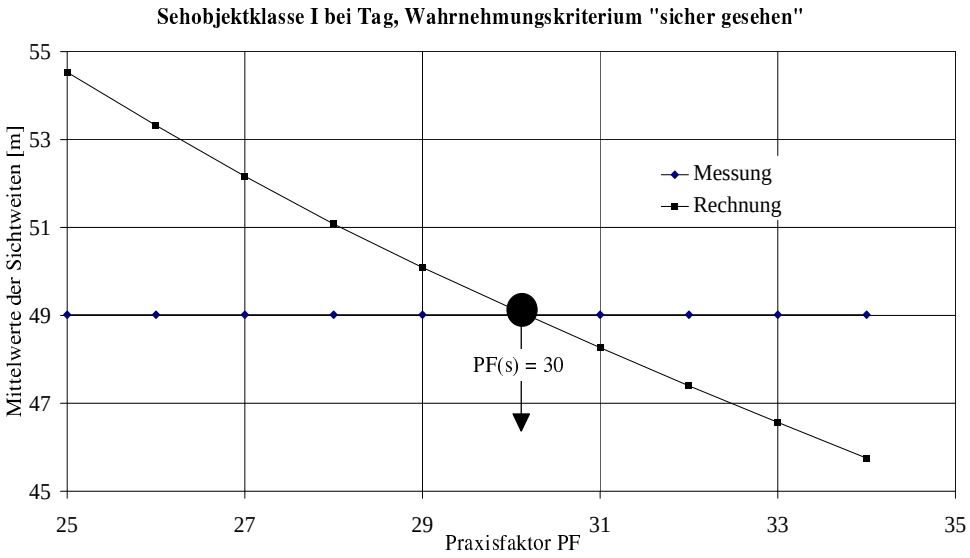


Abbildung 4.1: Beispiel zur Bestimmung des Praxisfaktors PF durch Vergleich von berechneten und gemessenen Sichtweiten für den Fall der Sehobjektklasse I bei Tage und dem Wahrnehmungskriterium "sicher gesehen". Mittelwert der Messung: 49 m

Tabelle 4.1 zeigt als Beispiel die Gruppierungsergebnisse für das Wahrnehmungskriterium "sicher gesehen" bei den Gruppierungsmerkmalen "Art des Sehobjektes" und "Beleuchtungsniveau" für Normsichtweiten unter 1000 m. Abb. (4.1) erläutert an Hand eines Beispiels das Vorgehen bei der Bestimmung des Praxisfaktors. Wie ersichtlich, wird für die Sehobjektklasse I bzw. die Klasse der beleuchteten Sehobjekte bei Tage für das Wahrnehmungskriterium "sicher gesehen" ein Praxisfaktor von 30 ermittelt.

Tabelle 4.1: Praxisfaktoren PF(s) bei dem Kriterium "sicher gesehen" für die Merkmale "Art des Sehobjektes" und "Beleuchtungsniveau", Trübungsbereich Nebel.

	Klasseneigenschaften	Art des Sehobjektes[x)]					
		Nr.1	Nr.2	Nr.3	Nr.4	Nr.5	Nr.6
Tag $E_h > 100\ lx$	Sichtweiten-Mittelwert der Messungen in m	49,0	289,4	46,9	51,8	57,4	100
	Sichtweiten-Mittelwert der Rechnung in m	49,2	28,3	48,1	52,6	57,3	100
	Anzahl der Situationen	39	77	40	38	38	38
	Standardabweichung zwischen Messung und Rechnung in m	14,9	6,8	17,1	15	16,1	22,6
	Praxisfaktor PF	**66**	**25**	**14**	**16**	**23**	**140**
Nacht $E_h < 1\ lx$	Sichtweiten-Mittelwert der Messung in m	31,6	30,4	xx)	38,6	121	145
	Sichtweiten-Mittelwert der Rechnung in m	31,3	30,2	xx)	38,3	121	145
	Anzahl der Situationen	20	37	xx)	20	18	14
	Standardabweichung zwischen Messung und Rechnung in m	4,1	4,5	xx)	4,8	21,4	21,1
	Praxisfaktor PF	**28**	**38**	xx)	**120**	**250**	**2700**

x) Nr. 1: großes dunkles Sehobjekt, Nr. 2: kleines dunkles Sehobjekt, Nr. 3: kleines mittelhelles Sehobjekt, Nr. 4: kleines helles Sehobjekt, Nr. 5: Schlussleuchte, Nr. 6: Nebelschlussleuchte

xx) keine Messwerte vorhanden

In Tabelle 4.2 sind alle ermittelten Praxisfaktoren zur Berechnung der praktischen Schwellenkontraste zusammengefasst. Zum Beispiel wurde bei dem Wahrnehmungskriterium "sicher gesehen" für die Klasse der beleuchteten Sehobjekte (Sehobjekte Nr. 1 bis Nr. 4) ein Praxisfaktor von 30 bei Tage und von 40 bei Nacht ermittelt. Um diesen Faktor müssen die theoretischen Schwellenkontraste $\overline{C}_o(g)$ x TSF für eine Beobachtungssituation bei gleicher Adaptationsleuchtdichte und gleicher Sehobjektgröße erhöht werden, um den praktischen Schwellenkontrast $\overline{C}_p(s)$ zu erhalten.

Je größer die Praxisfaktoren zur Ermittlung des praktischen Schwellenkontrastes sind, umso größer sind die praktischen Seherschwernisse und die Anforderungen an die jeweilige Sehaufgabe. Betrachtet man z.B. die Klasse der beleuchteten Sehobjekte, so folgt aus Tabelle 4.2 ein mittlerer Praxisfaktor von 45,5 bei dem Kriterium "sicher gesehen" im Vergleich zu 25,0 bei dem Kriterium "gerade gesehen", wenn alle untersuchten Beleuchtungs- und Trübungssituationen zusammengefasst werden. Allerdings ist die Verteilung der ermittelten Praxisfaktoren recht inhomogen. Sie sind einmal bei den selbstleuchtenden Sehobjekten im Mittel erheblich größer als bei den beleuchteten Sehobjekten. Vermutlich werden bei Signalleuchten an die Erkennbarkeit erheblich größere Anforderungen gestellt als bei Sehobjekten, die beleuchtet werden.

Tabelle 4.2: Zusammenfassung der ermittelten Praxisfaktoren zur Berechnung des praktischen Schwellenkontrastes

Nacht:	$E_h < 0,1\ lx.$	Tag:	$E_h \geq 1000\ lx$
Dunst:	$V_N > 1000\ m.$	Nebel:	$V_N \leq 1000\ m$
MW:	Mittelwert.	SF	= PF(s)/PF(g)

Beleuchtete Sehobjekte (Sehobjektklasse I)

	gerade gesehen					sicher gesehen		
	Nacht	Tag	MW			Nacht	Tag	MW
Nebel	**24**	**19**	21,5		Nebel	**40**	**30**	35
Dunst	3	54	28,5		Dunst	31	81	56
MW	13,5	36,5	25,0		MW	35,5	55,5	45,5

Schlussleuchte (Sehobjektklasse II)

	gerade gesehen					sicher gesehen		
	Nacht	Tag	MW			Nacht	Tag	MW
Nebel	**140**	**11**	75,5		Nebel	**250**	**23**	136,5
Dunst	1,6	7	4,3		Dunst	7	4,5	5,75
MW	70,8	9	39,9		MW	128,5	13,75	71,13

Nebelschlussleuchte (Sehobjektklasse III)

	gerade gesehen					sicher gesehen		
	Nacht	Tag	MW			Nacht	Tag	MW
Nebel	**1400**	**55**	727,5		Nebel	**2700**	**140**	1420
Dunst	16	270	143		Dunst	270	39	154,5
MW	708	162,5	435,25		MW	1485	89,5	787,25

Sicherheitsfaktor SF für sichere Wahrnehmung im Vergleich zum Kriterium gerade gesehen. Nebelbereich $V_N \leq 1000\ m$

	Beleuchtete Sehobjekte (I)	Schlussleuchte (II)	Nebelschlussleuchte (III)
Nacht	1,67	1,79	1,93
Tag	1,58	2,09	2,55

Auffällig sind auch die relativ großen Streuungen der Praxisfaktoren im Bereich geringer Trübung oder klarer Sicht. Dies zeigen auch die relativ unsicheren Versuchspersonen-Ergebnisse in diesem Bereich, wo zum Teil für selbstleuchtende Sehobjekte bei dem Wahrnehmungskriterium "sicher gesehen" größere Sichtweiten erhalten wurden als bei dem Kriterium "gerade gesehen". Bei Sichtweiten oberhalb von einigen Hundert Metern im Straßenverkehr ist die Existenz einer Wahrnehmungsschwelle relativ vage.

In dem für diese Untersuchung relevanten Bereich des Nebels wurden jedoch für alle Sehobjektklassen nachvollziehbare Ergebnisse der die praktischen Seherschwernisse beschreibenden Praxisfaktoren erhalten, wie die fett markierten Zahlen von Tabelle 4.2 zeigen. Bei allen Sehobjektklassen wurde eine starke Abhängigkeit vom Beleuchtungsniveau gefunden. Zum Beispiel beträgt bei den beleuchteten Sehobjekten bei Nacht der Praxisfaktor etwa das 5fache im Vergleich bei Tage. Hervorzuheben ist auch das Ergebnis, dass für eine sichere Sehobjekterkennung im Vergleich zum Kriterium "gerade gesehen" die Praxisfaktoren etwa doppelt so groß sind.

Wie sich nach erfolgter Optimierung des Praxisfaktors zur Ermittlung des praktischen Schwellenkontrastes die Abweichungen zwischen berechneten und gemessenen Sichtweiten konkret darstellen, zeigt an Hand eines Beispiels Abb. (4.2). Danach ist eine sehr gute Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Sichtweiten vorhanden. Allerdings sollte dieser Befund nicht überschätzt werden, da es sich bei dem gewählten Beispiel nur um eine einzige Sehobjektklasse handelt. In Kapitel 8.2 wird der Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Sichtweiten systematisch durchgeführt.

Im FASIMOD-Bericht (FASIMOD, 1995) wurden die Praxisfaktoren lediglich geschätzt und zwar zu 10 bei dem Wahrnehmungskriterium "gerade gesehen" und zu 30 bei dem Kriterium "sicher gesehen". Die Anpassung des Modells an reale Beobachtungsbedingungen mit Hilfe der sog. Praxisfaktoren ist ein wesentliches Ergebnis dieses Projektes.

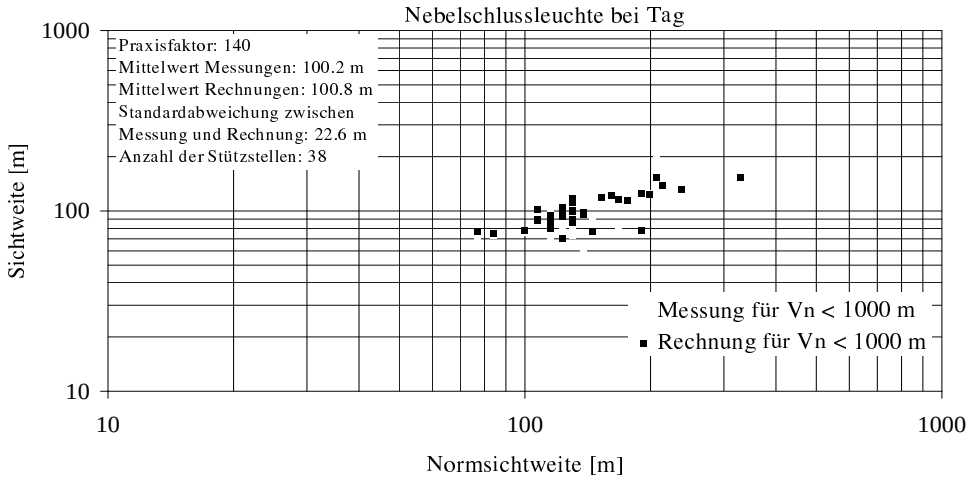


Abbildung 4.2: Vergleich von gemessenen und berechneten Sichtweiten am Beispiel für die 38 Beobachtungssituationen der Sehobjektklasse III (Nebelschlussleuchte) bei Tage und dem Praxisfaktor PF(s)=140. Wahrnehmungskriterium: "sicher gesehen"

4.2 Zusammenhänge zwischen den Sichtweitenvariablen

Zum besseren Verständnis der in Kapitel 4.3 dargestellten Zusammenhänge zwischen den Sehobjekt-Sichtweiten und den abhängigen Variablen werden im Folgenden typische Zwischenergebnisse dargestellt. Im Einzelnen werden an Hand von Beispielen behandelt:

- der Zusammenhang zwischen der von den Fahrzeugscheinwerfern erzeugten Streuleuchtdichte und der Normsichtweite
- der Zusammenhang zwischen der äquivalenten Schleierleuchtdichte und der Normsichtweite
- der Zusammenhang zwischen der Adaptationsleuchtdichte im Gesichtsfeld des Fahrers und der Normsichtweite
- der Zusammenhang zwischen Sehobjektkontrast und Beobachtungsabstand
- der Zusammenhang zwischen dem Überschwelligkeitsfaktor Visibility Level und dem Beobachtungsabstand.
- der Zusammenhang zwischen Reflexionsgrad des Sehobjektes und Sichtweite in Tarnsituationen

Ferner werden Beispiele von 2D-Grafiken der berechneten Szenenleuchtdichten dargestellt.

4.2.1 Streuleuchtdichte und Normsichtweite

Abb. (4.3) zeigt den Zusammenhang zwischen der mittleren Streuleuchtdichte im Gesichtsfeld des Fahrers in Abhängigkeit von der die Trübung kennzeichnenden Normsichtweite bei Abblendlicht und Nebellicht. Den Berechnungen lagen folgende Bedingungen zugrunde:

- Scheinwerferdaten nach Tabelle 3.3
- Gesichtsfeldausdehnung 40° in der Horizontalen und 40° in der Vertikalen, abweichend von dem üblichen Gesichtsfeld von 100° x 40° aus der Sicht des Beobachters. Der Blick ist geradeaus nach vorn gerichtet.

Wie erwartet, nimmt die von den Fahrzeugscheinwerfern verursachte Streuleuchtdichte mit wachsender Normsichtweite drastisch ab. Sie beträgt z.B. bei einer Normsichtweite von 100 m etwa $0,20\ cd/m^2$ und sinkt um etwa den Faktor 10 auf etwa $0,02\ cd/m^2$ bei der Normsichtweite von 1000 m. Die maximale Streuleuchtdichte bei 100 m Normsichtweite liegt bei etwa 40 cd/m^2. Bei Nebellicht (Abblendlicht plus Nebelscheinwerfer) sind die Streuleuchtdichten etwa 10 % - 15 % größer als bei Abblendlicht.

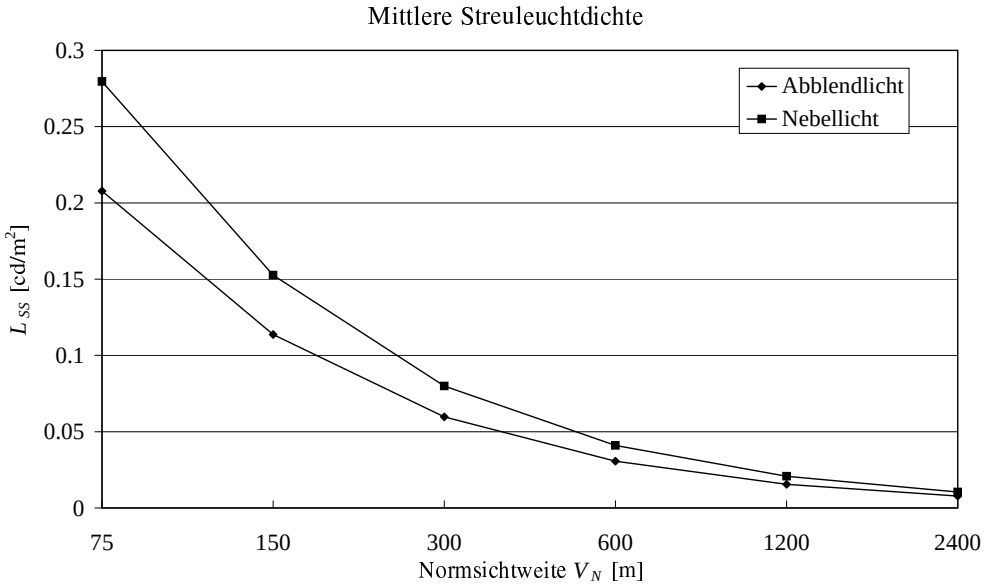


Abbildung 4.3: Mittlere Streuleuchtdichte in einem 40° x 40° Gesichtsfeld des Fahrers in Abhängigkeit von der Normsichtweite bei eingeschaltetem Abblendlicht oder Nebellicht

4.2.2 Äquivalente Schleierleuchtdichte und Normsichtweite

Die äquivalente Schleierleuchtdichte als Maß für das Streulicht auf der Netzhaut des Auges als Folge einer inhomogenen Leuchtdichteverteilung im Gesichtsfeld reduziert den Sehobjektkontrast (Gl. (2.30)) und erhöht die Adaptationsleuchtdichte (Gl. (2.28)).

Den Beispiel-Berechnungen von Abb. (4.4) liegen folgende Bedingungen zu Grunde:

- Scheinwerferdaten nach Tabelle 3.3
- Gesichtsfeld 100° x 40° mit dem Auge im Zentrum. Der Blick ist zum Sehobjekt "Nebelschlussleuchte" gerichtet, das 100 m vom Beobachter entfernt ist.

Bei völlig homogenem Gesichtsfeld beträgt die äquivalente Schleierleuchtdichte etwa 7 % der Umfeldleuchtdichte, wenn das Gesichtsfeld sich über den gesamten vorderen Halbraum erstreckt. Je größer die Inhomogenität der Leuchtdichteverteilung im Gesichtsfeld ist, umso stärker wächst die äquivalente Schleierleuchtdichte an. Das ist auch der Grund dafür, dass bei eingeschaltetem Nebellicht die Schleierleuchtdichte in diesem Beispiel um etwa 0,05 cd/m^2 größer ist als bei eingeschaltetem Abblendlicht. Der Grund für die Zunahme der äquivalenten Schleierleuchtdichte mit wachsender Normsichtweite liegt vermutlich vor allem darin, dass mit wachsender Normsichtweite bzw. geringer werdender Trübung die unterschiedlichen Leuchtdichten von dunkler Fahrbahn und hellerem Himmel immer mehr zum Tragen kommen.

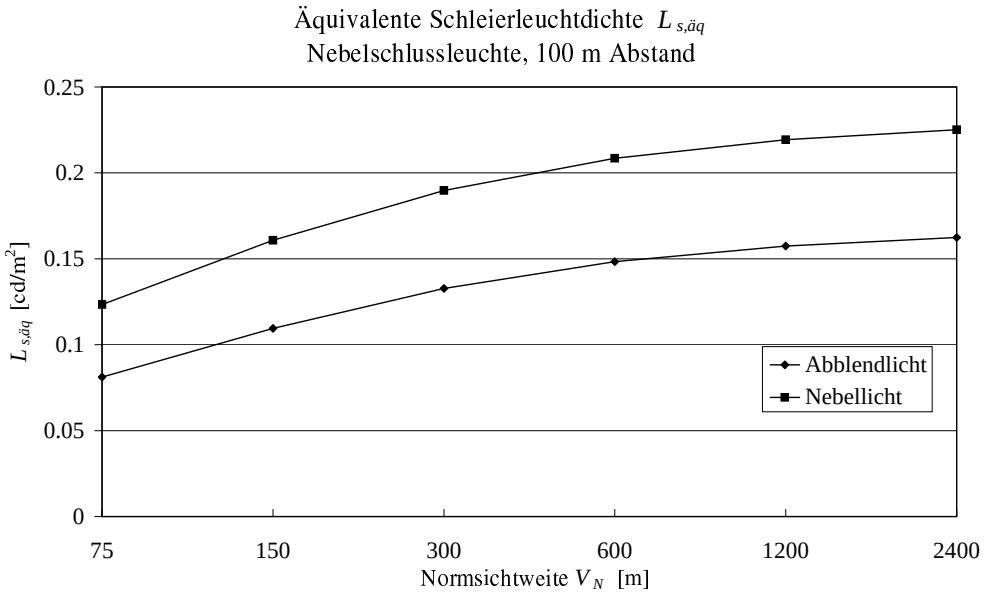


Abbildung 4.4: Äquivalente Schleierleuchtdichte im Gesichtsfeld in Abhängigkeit von der Normsichtweite bei Nacht

4.2.3 Adaptationsleuchtdichte und Normsichtweite

Die Adaptationsleuchtdichte L_a als maßgebliche Einflussgröße des Schwellenkontrastes ist gemäß Gl. (2.28) die Summe aus mittlerer Umfeldleuchtdichte L_U (gewichtet mit dem Faktor 0,93) und äquivalenter Schleierleuchtdichte $L_{säq}$, wobei die Streuleuchtdichte der Fahrzeugscheinwerfer in beiden enthalten ist. Abb. (4.5) gilt für die Bedingung:

- Bewertungsfeld 100° x 40°. Blickrichtung zum 100 m entfernten Sehobjekt, Nebelschlussleuchte. Nachtsituation

Wie Abb. (4.5) zeigt, nimmt die Adaptationsleuchtdichte mit abnehmender Trübung bzw. zunehmender Normsichtweite etwas zu. Sie ist ab Normsichtweiten von etwa 300 m nahezu unabhängig von der Trübung. Sie beträgt je nach Scheinwerferlicht etwa 1 cd/m^2 bzw. etwa 2 cd/m^2. Die um etwa den Faktor 2 größere Adaptationsleuchtdichte bei Nebellicht erklärt sich durch den zusätzlichen Lichtstrom, den die Nebelscheinwerfer auf die Fahrbahn bringen.

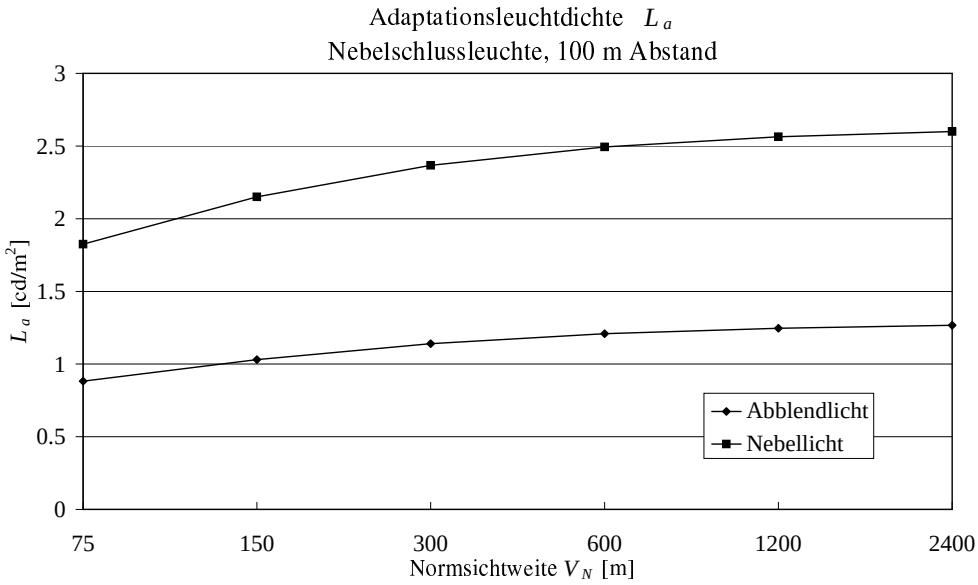


Abbildung 4.5: Adaptationsleuchtdichte des Gesichtsfeldes in Abhängigkeit von der Normsichtweite bei Nacht

4.2.4 Randkontrast und Sehobjektabstand

Der in Kapitel 2.2 eingeführte Randkontrast eines Sehobjektes wird gemäß Gl. (2.30) aus den Detailleuchtdichten und den zugehörigen Untergrundleuchtdichten bestimmt.

Abb. (4.6) zeigt die Abnahme des mittleren Randkontrastes mit wachsender Sehobjektentfernung am Beispiel des kleinen hellen Sehobjektes und der Nebelschlussleuchte bei eingeschaltetem Abblendlicht. Das etwas untypische Verhalten der Nebelschlussleuchte im Nahbereich um 20 m ist ohne Bedeutung für die Berechnung der Sichtweiten, die weit über diesem Bereich liegen.

Abb. (4.6) könnte auch zur Bestimmung der Sichtweite für das jeweilige Sehobjekt aus der Gleichheit von Sehobjektkontrast C und praktischem Schwellenkontrast $\overline{C}_p$ herangezogen werden.

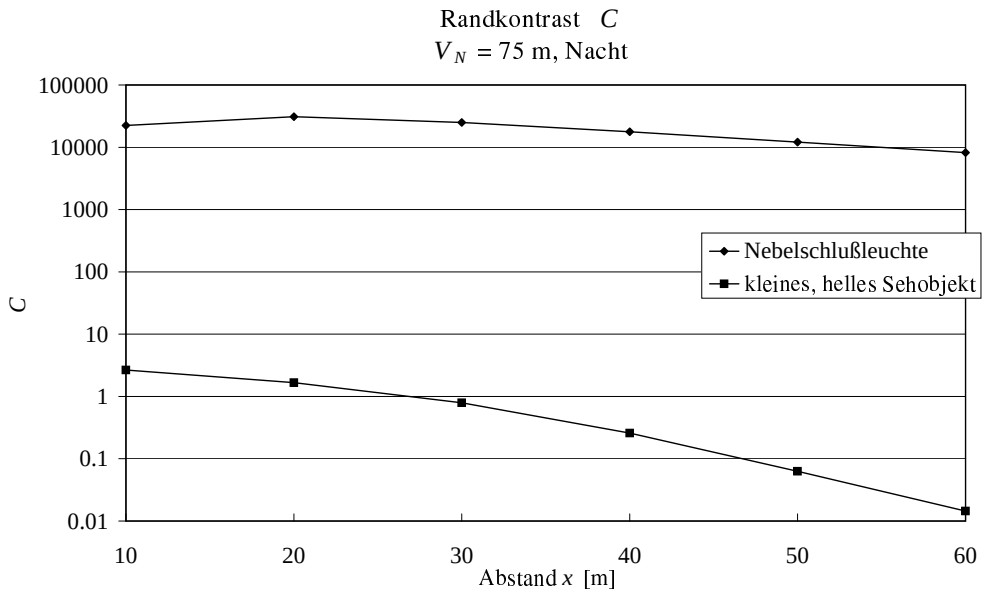


Abbildung 4.6: Mittlerer Randkontrast des Sehobjektes "Nebelschlussleuchte" und "kleines helles Sehobjekt" in Abhängigkeit vom Abstand zwischen Beobachter und Sehobjekt. Parameter: Eingeschaltetes Abblendlicht

4.2.5 Visibility Level und Sehobjektabstand

Das nach Gl. (2.10) berechnete Visibility Level als Verhältnis von Randkontrast und praktischem Schwellenkontrast bei dem Wahrnehmungs-Kriterium "gerade gesehen" nimmt nach dem Beispiel von Abb. (4.7) mit wachsendem Sehobjektabstand rascher ab als der mittlere Randkontrast gemäß Abb. (4.6). Der Grund liegt darin, dass auch der Schwellenkontrast mit wachsendem Abstand zum Sehobjekt größer wird.

Betrachten wir z.B. die Abstandsabhängigkeit des Visibility Levels VL bei dem kleinen hellen Sehobjekt, das bei Nacht beobachtet wird. Bei VL = 1 wird dieses Sehobjekt gerade gesehen, d.h. mit einer Wahrnehmungswahrscheinlichkeit von etwa 50 %. Das ist hier bei etwa 42 m der Fall. Der VL-Grenzwert für sichere Wahrnehmung hat nach Tabelle 4.2 den Wert von 1,67. Wie ersichtlich, schneidet die VL-Kurve diesen Wert bei einem Abstand von etwa 39 m. Die berechnete Sichtweite beträgt nach Tabelle A.7 des Anhanges 38,9 m. In diesem Beispiel ist somit die Sichtweite bei dem Kriterium "gerade gesehen" etwa 7 % größer als bei dem Kriterium "sicher gesehen".

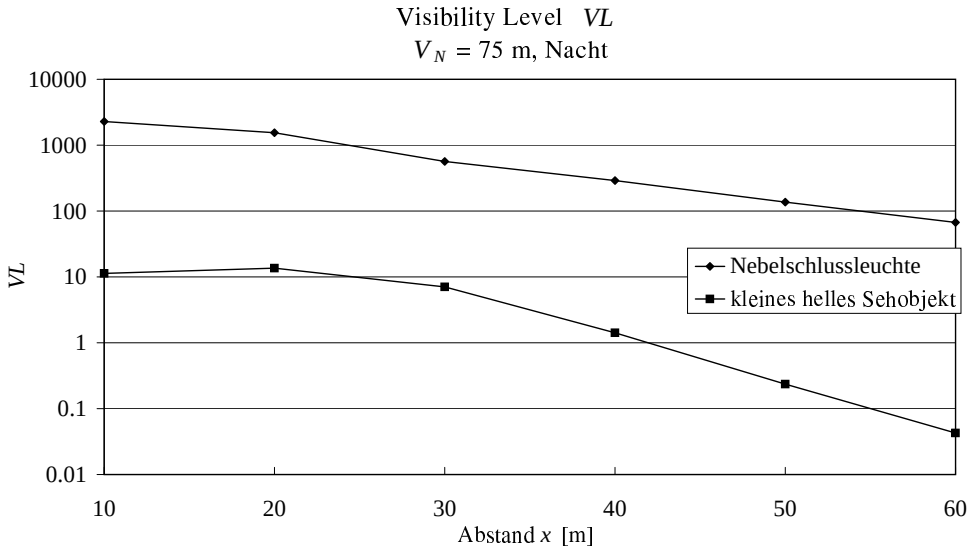


Abbildung 4.7: Visibility Level der Sehobjekte "Nebelschlussleuchte" und "kleines helles Sehobjekt" in Abhängigkeit vom Abstand zwischen Beobachter und Sehobjekt. Eingeschaltetes Abblendlicht.

4.2.6 Reflexionsgrad und Sichtweite

Der Leuchtdichtekontrast eines Sehobjektes wird wesentlich durch das Reflexionsverhalten des Sehobjektes und der Fahrbahn bestimmt. Die Kontraste sind umso größer, je mehr sich die Reflexionsgrade beider Kontrastfelder unterscheiden.

Es kann aber auch zu sehr geringen Sehobjektkontrasten kommen, wenn die Reflexionsgrade von Sehobjekt und Fahrbahn so beschaffen sind, dass die Leuchtdichten beider Kontrastfelder sich nur wenig unterscheiden. Kritisch in dieser Hinsicht sind Tagessituationen vor allem bei diffuser Himmelseinstrahlung. Ist ρ der Reflexionsgrad des Sehobjektes und q_o der Leuchtdichtekoeffizient einer als diffus reflektierend angenommenen Fahrbahn, so besteht zwischen Sehobjekt und Fahrbahn dann kein Leuchtdichtekontrast, wenn gilt: $\rho_k = 2\pi q_o$.

In Abb. (4.8) ist dieser Sachverhalt für das kleine dunkle Sehobjekt bei einem Fahrbahn-Leuchtdichtekoeffizient von $q_o = 0{,}04\ (cd/m^2)/\mathrm{lx}$ dargestellt, mit dem die Sichtweitenberechnungen durchgeführt wurden. Der theoretische Reflexionsgrad für völlige Tarnung beträgt bei dann $\rho_k = 0,25$ und liegt damit in der Nähe des dunklen Sehobjektes, dessen Reflexionsgrad mit 0,23 angenommen wurde. Da das Sehobjekt nicht nur gegen die Fahrbahn gesehen wird sondern auch gegen den Horizont, ist völlige Tarnung ausgeschlossen. Diese Betrachtung zeigt aber grundsätzlich, dass bei beleuchteten Sehobjekten der Effekt der Tarnung beim Nebelsehen eine entscheidende Rolle spielen kann.

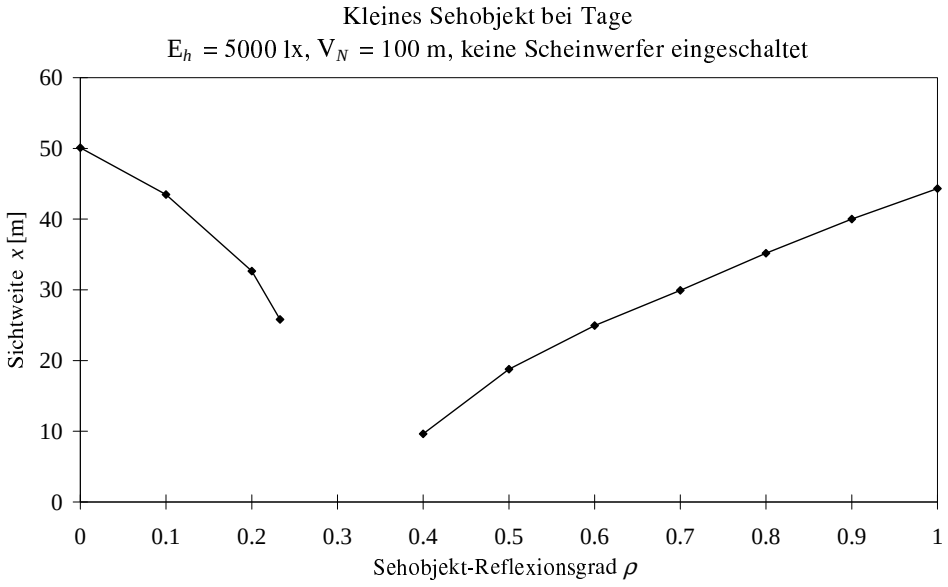


Abbildung 4.8: Eine Tarnsituation. Sichtweite des kleinen dunklen Sehobjektes in Abhängigkeit von seinem Reflexionsgrad bei Tage und einem Leuchtdichtekoeffizienten der Fahrbahn $q_o = 0,04\ (cd/m^2)/\mathrm{lx}$.

4.2.7 Visibility Level und Tarnung

Der Effekt der Tarnung äußert sich auch darin, dass mit abnehmendem Sehobjektabstand das Visibility Level nicht wie in Abb. (3.10) monoton anwächst, sondern unstetig abwechselnd zu- und abnimmt. Eine eindeutige Sichtweiteniteration ist dann nicht möglich. Die Iteration wird im Programm abgebrochen.

In Abb. (4.9) ist dieser Sachverhalt an Hand eines Beispiels dargestellt. Ausgewertet wurde die Beobachtungssituation des kleinen dunklen Sehobjektes, das bei Nebel der Normsichtweite von 300 m bei einem Tages-Beleuchtungsniveau von 1000 lx beobachtet wird. Um dieses Sehobjekt bei dem Kriterium "sicher gesehen" wahrzunehmen, muss das Visibility Level VL den Grenzwert von 1,58 überschreiten. Wie ersichtlich, wächst VL bis zu einem Abstand von etwa 20 m monoton an, um dann relativ rasch abzufallen, ohne den Grenzwert von 1,58 zu erreichen. Bei einem Abstand von etwa 12 m wird VL etwa 1, das Sehobjekt wird folglich bei diesem Abstand gerade gesehen. Die erwähnte Unstetigkeit bei noch kleineren Sehobjektabständen ist deutlich zu verfolgen.

Tarnung der Sehobjekte äußert sich durch einen unstetigen Verlauf des Visibility Levels in Abhängigkeit von Sehobjektabstand. Die Folge ist, dass in Tarnsituationen die Sehobjekte in gewissen Bereichen schlechter gesehen werden, als es dem Wahrnehmungs-Kriterium "sicher gesehen" entspricht.

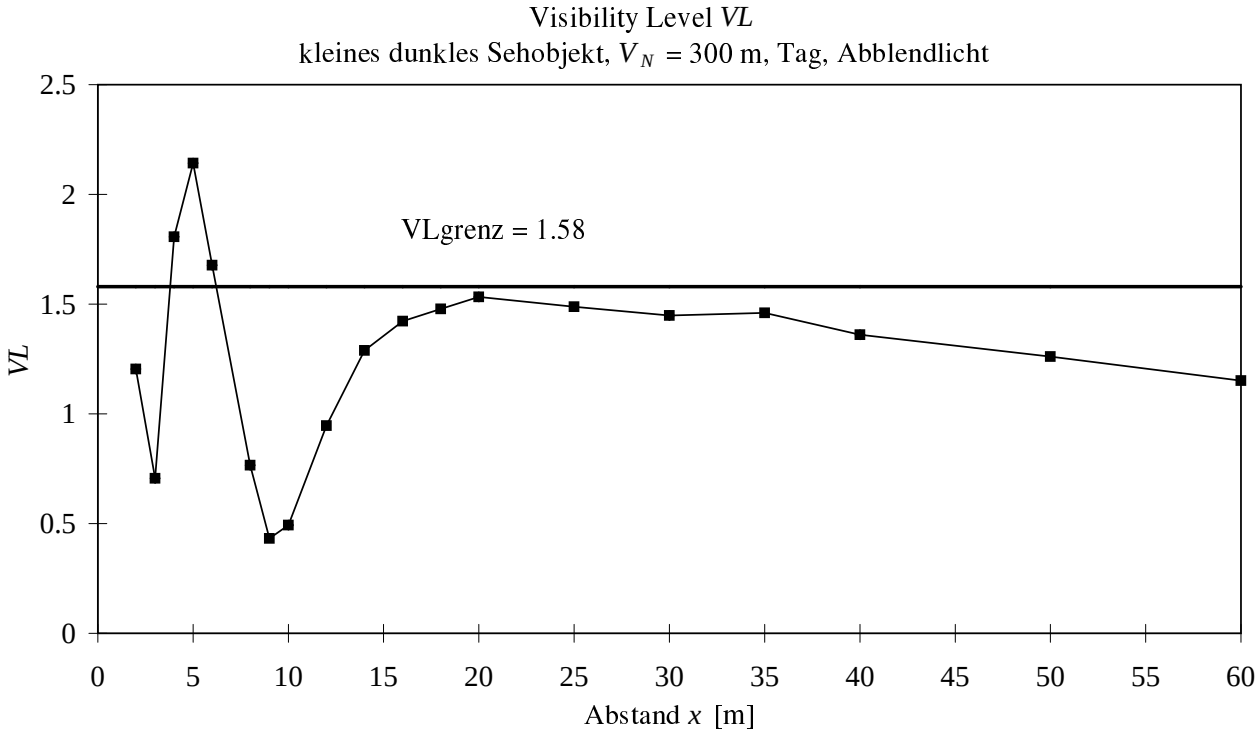


Abbildung 4.9: Unstetiges Abstandsverhalten des Visibility Levels im Nahbereich beim kleinen dunklen Sehobjekt als Folge des Tarnungseffektes

4.2.8 Beispiele von Leuchtdichteverteilungen

Die Visualisierung der berechneten Nebelszenen ist kein primäres Thema dieser Untersuchung. Allerdings besteht die Möglichkeit, die berechneten Szenenleuchtdichten jeder Nebelszene auf einem Bildschirm zu beobachten oder auf Papier auszudrucken. Zu beachten ist dabei, dass aus technischen Gründen die Leuchtdichteverteilung der 2D-Darstellungen nur in Näherung der berechneten Verteilung entsprechen und somit auch die subjektiv wahrgenommenen Helligkeitsverteilungen nur grob der realen Helligkeitsverteilung entsprechen kann.

Abb. (4.10) zeigt als Beispiel die Leuchtdichteverteilung einer Nebelszene für das große dunkle Sehobjekt bei Nacht im Vergleich zu Abb. (4.11) mit dem gleichen Sehobjekt bei Tag. Die Normsichtweite beträgt in beiden Darstellungen 75 m. Es werden also dichte Nebeltrübungen simuliert.

In Tabelle 4.3 sind die zu diesen Nebelszenen zugehörigen Zwischenergebnisse zusammengefasst, die zur Berechnung des Visibility Levels erhalten wurden. Ferner enthält diese Tabelle auch Zwischenergebnisse für das Sehobjekt Nebelschlussleuchte.

Dazu folgende Anmerkungen:
Die im Programm-Modus "Visibility Level Modus" berechneten Szenendaten von Tabelle 4.3 beziehen sich auf ein beleuchtetes und ein selbstleuchtendes Sehobjekt, nämlich das große dunkle Sehobjekt und die Nebelschlussleuchte unter Tag- und Nachtbedingungen, die bei einem Abstand von 20 m und einer Trübung entsprechend einer Normsichtweite von 75 m beobachtet werden. Aufschlussreiche Zwischenergebnisse bei der Berechnung von Sichtweiten sind z.B.:

- die Augenbeleuchtungsstärke E_a
- die mittlere Sehobjektleuchtdichte L_z
- die mittlere Untergrundleuchtdichte $L_{u,m}$
- der mittlere Randkontrast C
- das Visibility Level VL.

Das die Sichtbarkeit der Sehobjekte charakterisierende Visibility Level VL zeigt das erwartete Verhalten. Am besten sichtbar mit den größten VL-Werten sind die Nebelschlussleuchten mit VL = 1536 bei Nacht und VL = 22,6 bei Tage. Weit weniger gut sichtbar ist das große dunkle Sehobjekt, das bei Nacht mit VL = 1,46 zwischen der Sichtbarkeitsschwelle bei dem Kriterium "gerade gesehen" ($VL_{grenz} = 1$) und "sicher gesehen" ($VL_{grenz} = 1,58$) liegt.

Die in der letzten Zeile von Tabelle 4.3 enthaltenen Sichtweiten für das Kriterium "sicher gesehen" zeigen die gleiche Rangfolge wie die Visibility Levels bei dem gewählten Beobachterabstand von 20 m. Diese Relation zwischen Visibility Level bei gegebenen Abstand und Sichtweite ist nicht unbedingt zwangsläufig, aber noch im Allgemeinen erfüllt, wenn der gewählte Beobachtungsabstand im Bereich üblicher Sehobjektabstände liegt.

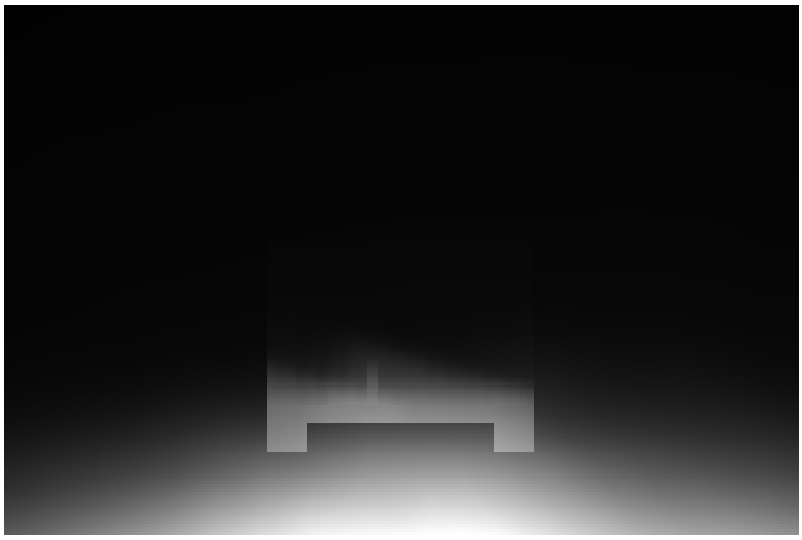


Abbildung 4.10: Berechnete Leuchtdichteverteilung des großen dunklen Sehobjektes bei Nacht. Parameter: Normsichtweite 75 m, Abblendlicht, Sehobjektabstand 20 m

Abbildung 4.11: Berechnete Leuchtdichteverteilung des großen dunklen Sehobjektes bei Tag. Parameter: Wie in Abb. (4.10)

Tabelle 4.3: Berechnete Szenendaten der 2D-Grafiken von Abb. (4.10) und Abb. (4.11)
Parameter: Fahrbahn-Leuchtdichtekoeffizient $q_o = 0,04\ cd/m^2$ $q_{r,o} = 0,015\ cd/m^2$
Wahrnehmungskriterium "Sehobjekt sicher gesehen"
Leuchtdichten in cd/m^2

Sehobjektytpe	großes dunkles Sehobjekt Nacht	großes dunkles Sehobjekt Tag	Nebel Schluss-leuchte Nacht	Nebel Schluss-leuchte Tag
Fahrzeugbeleuchtung	Abblendl.	Abblendl.	Abblendl.	Abblendl.
Sehobjektreflexionsgrad ρ	0,233	0,233	0,1	0,1
Sehobjektlichtstärke I_o [cd]	0	0	101	101
Sehobjektabstand x [m]	20	20	20	20
Normsichtweite V_N [m]	75	75	75	75
Horizontalbeleuchtungsstärke E_h [lx]	0,1	10 000	0,1	10 000
Augen-Beleuchtungsstärke E_a [lx]	0,920	1807	0,916	1807
Mittlerer Sehobjektleuchtdichte L_z	0,636	1631	7427	8976
Mittlerer Untergrund-Leuchtdichte L_u	1,041	2234	0,166	1360
Mittlerer Umfeldleuchtdichte L_U	0,885	1921	0,885	1921
Äquivalente Schleierleuchtdichte $L_{s,äq}$	0,110	121	0,0919	127
Mittl. Streuleuchtdichte d. Scheinw.$L_{s,s}$	0,21	0,21	0,21	0,21
Max. Streuleuchtdichte d. Scheinw. $L_{s,smax}$	43,8	43,8	43,8	43,8
Mittlerer Randkontrast C	0,138	0,229	28 810	4,18
Sehwinkel des Sehobjektes α [$Minuten$]	361	361	18	18
Adaptationsleuchtdichte L_a	0,930	1900	0,912	1906
Theoretischer Schwellenkontrast $\overline{C}_o(g)$	0,00392	0,00280	0,00699	0,00333
Transienter Schwellenerhöhungsfaktor TSF	1,003	1,007	1,92	1,006
Praxisfaktor PF(g)	24	19	1400	55
Praxisfaktor PF(s)	40	30	2700	140
Praktischer Schwellenkontrast $\overline{C}_p(g)$	0,0945	0,0532	18,8	0,185
Praktischer Schwellenkontrast $\overline{C}_p(s)$	0,157	0,0840	36,2	0,470
Praktisches Visibility-Level VL=$C/\overline{C}_p(g)$	1,46	4,30	1536	22,6
Sichtweite des Sehobjektes S [m]	17,8	47,0	116	48,6

4.3 Ergebnisse der Sichtweitenberechnungen

In diesem Kapitel werden die berechneten Sichtweiten der untersuchten Sehobjekte in ihren Abhängigkeiten von den Trübungs- und Beleuchtungsbedingungen dargestellt. Die grafisch und tabellarisch dokumentierten Ergebnisse sind eine fundierte Datenbasis für die Implementierung eines Fahrersichtweitenmodells. Bei Festlegung geeigneter Sicherheitsfaktoren lässt sich diese Datenmenge durch relativ einfach aufgebaute Sichtweitenformeln approximieren.

4.3.1 Voraussetzungen und Randbedingungen

Wahrnehmungskriterien
Wie beschrieben beruhen die berechneten Sichtweiten auf einem Vergleich der in der jeweiligen Nebelsituation vorhandenen Leuchtdichtekontraste mit den physiologisch notwendigen Kontrasten bzw. den Schwellenkontrasten bei dem vereinbarten Wahrnehmungskriterium. Die praktischen Seherschwernisse gegenüber einer idealen theoretisch beherrschbaren Referenzsituation wurden durch sog. Praxisfaktoren beschrieben, die mit Hilfe von Feldexperimenten ermittelt wurden.

Zwei Wahrnehmungskriterien wurden unterschieden:

- Kriterium "Sehobjekt gerade gesehen"
- Kriterium "Sehobjekt sicher gesehen" .

Die nach dem Kriterium "Sehobjekt gerade gesehen" berechneten Sichtweiten sind von eher grundsätzlichem Interesse, weil deren Wahrnehmungswahrscheinlichkeiten bei nur etwa 50 % liegen dürfte. Von praktischer Relevanz sind die nach dem Kriterium "Sehobjekt sicher gesehen" ermittelten Sichtweiten, deren Wahrnehmungswahrscheinlichkeit vermutlich zwischen etwa 95 % und 99 % liegen dürften. Die folgenden Ergebnisse beruhen auf dem Wahrnehmungskriterium "Sehobjekt sicher gesehen". Bei diesem Kriterium wird das Sehobjekt nicht nur auf Grund eines Helligkeitunterschiedes zum Untergrund detektiert, sondern auch in seiner speziellen Form identifiziert.

Die Sichtweitenvariablen
Die unabhängige Variable Sichtweite ist das vereinbarte Maß für die Sehbedingungen beim Nebelsehen. Relativ hohe Sichtweiten entsprechen guten oder sehr guten Sehbedingungen. Sichtweiten sind dann relativ hoch, wenn sie ausreichend über dem verkehrsabhängigen Mindestwert liegen.

Die abhängigen Variablen sind diejenigen Einflussgrößen der Sichtweite, die systematisch variiert wurden, um die Zusammenhänge und Abhängigkeiten aufzudecken. Die abhängigen Variablen dieses Projektes sind, nochmals zusammengefasst:

- die Normsichtweite als Trübungsmaß zwischen 37,5 m und 100 000 m
- die horizontale Beleuchtungsstärke der natürlichen Himmelsbeleuchtung als Maß der Umgebungshelligkeit zwischen 0,1 lx und 30 000 lx.

- die Art der Fahrzeugbeleuchtung und zwar:
  - Abblendlicht (d.h. zwei Abblendscheinwerfer) eingeschaltet
  - Nebellicht (d.h. zwei Abblend- und zwei Nebelscheinwerfer) eingeschaltet
    Bei der Nacht-Situation ist entweder Abblend- oder Nebellicht eingeschaltet, ebenso bei der Tagsituation, wenn nicht anders vermerkt.

- die Sehobjektklassen
  Untersucht wurden insgesamt 6 unterschiedliche Sehobjekte mit folgenden Eigenschaften:
  Sehobjekt Nr. 1: Großes dunkles Sehobjekt; etwa $1,70$ x $1,4$ m^2; $\rho = 0,233$
  Sehobjekt Nr. 2: Kleines dunkles Sehobjekt; $0,3$ x $0,3$ m^2; $\rho = 0,233$
  Sehobjekt Nr. 3: Kleines mittelhelles Sehobjekt; $0,3$ x $0,3$ m^2; $\rho = 0,53$
  Sehobjekt Nr. 4: Kleines helles Sehobjekt; $0,3$ x $0,3$ m^2; $\rho = 0,705$
  Sehobjekt Nr. 5: Schlussleuchten; $I_o = 2,7$ cd
  Sehobjekt Nr. 6: Nebelschlussleuchte; $I_o = 101$ cd

  wobei ρ den Reflexionsgrad bei den beleuchteten Sehobjekten und I_o die Lichtstärke bei den selbstleuchtenden Sehobjekten bedeuten.

- Sichtweitenparameter
  Das sind Einflussgrößen, die zwar kontrolliert, aber nicht variiert also konstant gehalten wurden, und zwar:
  - Diffus bedeckter Himmelshalbraum mit konstanter Leuchtdichte
  - Ausdehnung des Gesichtsfeldes mit 100° in horizontaler und 40° in vertikaler Richtung
  - Beobachterhöhe 1,20 m
  - Scheinwerferposition gemäß Tabelle 3.4
  - Transmissionsgrad der Frontscheibe $\tau = 0,85$
  - Leuchtdichtekoeffizient der Fahrbahn (einschließlich der angrenzenden Bodenflächen): $q_o = 0,04$ $(cd/m^2)/\mathrm{lx}$
  - Leuchtdichtekoeffizient der Fahrbahn (einschließlich der angrenzenden Bodenflächen) bei Scheinwerferbeleuchtung gemäß Gl. (3.12).

4.3.2 Sichtweiten der Kernsituationen

In den folgenden Abb. (4.12) bis Abb. (4.35), den sog. Sichtweiten-Kerndiagrammen, sind die berechneten Sichtweiten der 6 untersuchten Sehobjekttypen erstens in Abhängigkeit von der Normsichtweite V_N und zweitens von der horizontalen Beleuchtungsstärke E_h dargestellt. Parameter ist die eingeschaltete Fahrzeugbeleuchtung.

Dazu folgende allgemeine Erläuterungen:
Die Sichtweiten aller 6 untersuchten Sehobjekte wurden jeweils bei eingeschaltetem Abblendlicht (d.h. 2 Abblendscheinwerfer) sowie bei eingeschaltetem Nebellicht (d.h. 2 Abblendscheinwerfer und 2 Nebelscheinwerfer) untersucht und in entsprechenden Paralleldiagrammen und Tabellen dargestellt.

Weitere Analysen haben gezeigt, dass bei den Tagsituationen die Art der Fahrzeugbeleuchtung sich praktisch nicht auf die Sichtweite auswirkt. Die Wirkung der Nebelscheinwerfer bei Nacht und in der Dämmerung ist uneinheitlich. Der Sichtbarkeitsgewinn bei eingeschalteten Nebelscheinwerfern zeigt sich besonders deutlich im Nahbereich der Fahrbahn bei Beobachtungsabständen unterhalb von etwa 10 m.

Tarneffekte zwischen Sehobjekt und Untergrund treten relativ häufig bei dem dunklen, beleuchteten Sehobjekt auf, deren Ursache in Kapitel 4.2.6 erläutert wurden. Tarnung zwischen Sehobjekt und Untergrund tritt auf, wenn auf Grund der speziellen Reflexionsgradkombination von Fahrbahn und Untergrund der Kontrast zwischen beiden Kontrastfeldern sehr geringe Werte annimmt und dann sehr geringe Sichtweiten zur Folge hat. Tarnung wirkte sich auch so aus, dass mit abnehmendem Beobachtungsabstand das Visibility Level nicht größer sondern zumindest abschnittweise kleiner wird. In diesem Fall wurde die Iteration abgebrochen und in die entsprechenden Diagramme und Tabellen eine Leerstelle eingetragen.

Die Abhängigkeiten der Sichtweiten von der die Trübung kennzeichnenden Normsichteweite V_N und der das Helligkeitsniveau beschreibenden Beleuchtungsstärke E_h zeigen insgesamt gesehen folgende Trends:

- Im Allgemeinen nimmt die Sichtweite sowohl bei den beleuchteten als auch bei den selbstleuchtenden Sehobjekten mit der Normsichtweite zu. Die Größe des Sichtweitengewinns hängt aber auch von der Höhe des Beleuchtungsniveaus ab. Bei Tage erfolgt der Sichtweitenzuwachs bis zu Normsichtweiten von etwa 10 000 m. Danach sind die Sichtweiten nahezu unabhängig von der Trübung. Bei Nacht gehen die Sichtweiten für Normsichtweiten ab etwa 500 m in die Sättigung. Ursache dafür ist die begrenzte Reichweite der Fahrzeugscheinwerfer.

- Differenziert ist der Sichtweitenverlauf mit wachsendem Helligkeitsniveau bzw. wachsender horizontaler Beleuchtungsstärke. Der Verlauf hängt sehr stark von der Art des Sehobjektes und der Trübung ab. Wie z.B. Abb. (4.21) für das kleine mittelhelle Sehobjekt zeigt, nimmt die Sichtweite bei großen Nebeldichten bzw. kleinen Normsichtweiten mit wachsendem Beleuchtungsniveau ab und bei geringerer Trübung zu. In Nebelsituationen kann somit die Sichtweite bei Nacht größer als bei Tage sein. Dies trifft auch und zwar in besonders auffälliger Weise für die selbstleuchtenden Sehobjekte zu, wie z.B. Abb. (4.29) zeigt.

Im Einzelnen ist folgendes festzustellen:

Großes dunkles Sehobjekt: (Abb. (4.12) bis Abb. (4.15))
Die Zunahme der Sichtweiten mit wachsender Normsichtweite und Beleuchtungsstärke erfolgt einheitlich mit Ausnahme nur sehr weniger Tarnungssituationen.

Kleines dunkles Sehobjekt: (Abb. (4.16) bis Abb. (4.19))
Auf Grund der durchgeführten Modellrechnungen muss dieses Sehobjekt in bezug auf seine Wahrnehmungschancen äußerst kritisch bewertet werden. Bei höheren Beleuchtungsniveaus und größeren Trübungen besteht die Gefahr von Tarnungen mit Sichtweiten unter 5 m. Dass dieser Effekt in der Praxis vermutlich weniger krass auftritt, dürfte daran liegen, dass Schattenbildungen und Inhomogenitäten hier sichtverbessernd wirken aber im Modell nicht berücksichtigt wurden. Außerdem ist der gewählte Leuchtdichtekoeffizient von $q_o = 0,04\ (cd/m^2)/lx$ für die Fahrbahn hinsichtlich des Tarneffektes besonders kritisch. Die im Falle einer Tarnungsgefahr (keine Zunahme des Visibility Levels mit abnehmendem Beobachterabstand) eingetragenen Leerstellen in den Diagrammen und Tabellen bedeuten, dass das Sehobjekt zumindest im Fernbereich nicht bei dem Kriterium "sicher gesehen" erkannt werden kann aber z.B. durchaus bei dem Kriterium "gerade gesehen". Bei Tarnungsgefahr sind die Sichtbarkeitsbedingungen unsicher und schwankend.

Kleines mittelhelles Sehobjekt: (Abb. (4.20) bis Abb. (4.23))
Tarnungseffekte sind hier theoretisch ausgeschlossen, weil der Reflexionsgrad von etwa 0,5 weit oberhalb des kritischen Reflexionsgrades von etwa 0,25 liegt. Bei Nacht und Dämmerung nimmt die Sichtweite mit wachsender Normsichtweite nur relativ wenig zu und erreicht ab Normsichtweiten von etwa 1000 m den durch die Fahrzeugbeleuchtung bedingten Grenzwert. Bei Tagessituationen mit entsprechend hohen Beleuchtungsstärken steigen die Sichtweiten bis zu Normsichtweiten von etwa 10 000 m an.

Bei Nebeltrübungen nimmt die Sichtweite mit wachsendem Beleuchtungsniveau ab. Die Sichtweiten sind hier bei Nacht größer als bei Tage. Die Scheinwerferbeleuchtung wirkt sich hier stärker aus als bei dem dunklen Sehobjekt. Bei geringen Trübungen nimmt die Sichtweite mit dem Beleuchtungsniveau zu.

Kleines helles Sehobjekt: (Abb. (4.24) bis Abb. (4.27))
Dieses Sehobjekt verhält sich ähnlich wie das kleine mittelhelle Sehobjekt, nur dass der positive Effekt des größeren Sehobjektreflexionsgrades sich noch klarer auswirkt.

Schlussleuchte und Nebelschlussleuchte: (Abb. (4.28) bis Abb. (4.35))
Die Sichtweiten nehmen mit wachsender Normsichtweite monoton zu. Die Abhängigkeit vom Beleuchtungsniveau ist bei Tag und bei Nacht verschieden. Bei Nacht oder in der Dämmerung nimmt die Sichtweite mit wachsendem Beleuchtungsniveau zu oder bleibt annähernd konstant, je nach Trübung. Bei Tage werden die Sichtweiten mit zunehmendem Beleuchtungsniveau zunehmend geringer. Besonders deutlich wird dies bei der lichtstärkeschwachen Schlussleuchte. Ursache dieses Effektes ist die natürliche Streuleuchtdichte, die sich den Signalleuchtdichten überlagert und das umso mehr, je größer das Beleuchtungsniveau ist.

Die numerischen Werte der zu diesen Grafiken gehörenden Sichtweiten sind in Tabelle A.1 bis Tabelle A.12 zusammengefasst.

4.3.2.1 Großes dunkles Sehobjekt

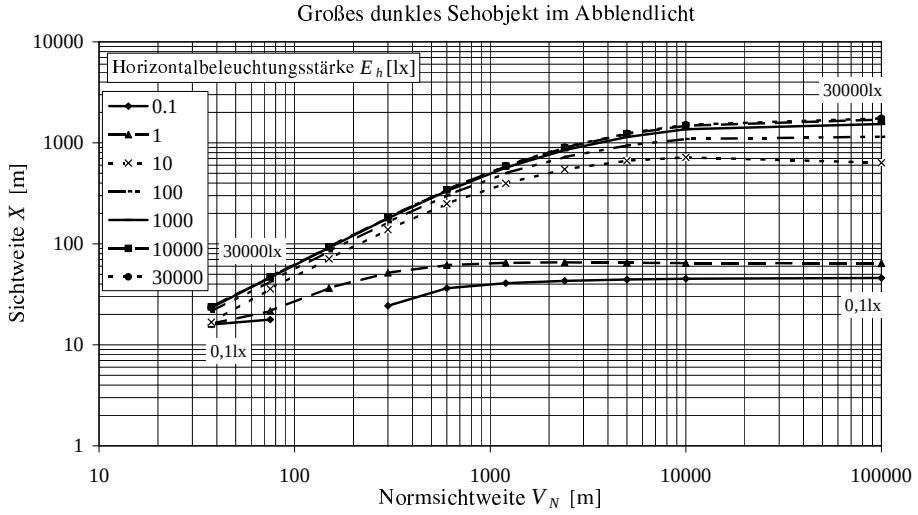


Abbildung 4.12: Sichtweiten des großen dunklen Sehobjektes bei Abblendlicht in Abhängigkeit von der Normsichtweite V_N. Parameter ist die horizontale Beleuchtungsstärke E_h der natürlichen Himmelsstrahlung

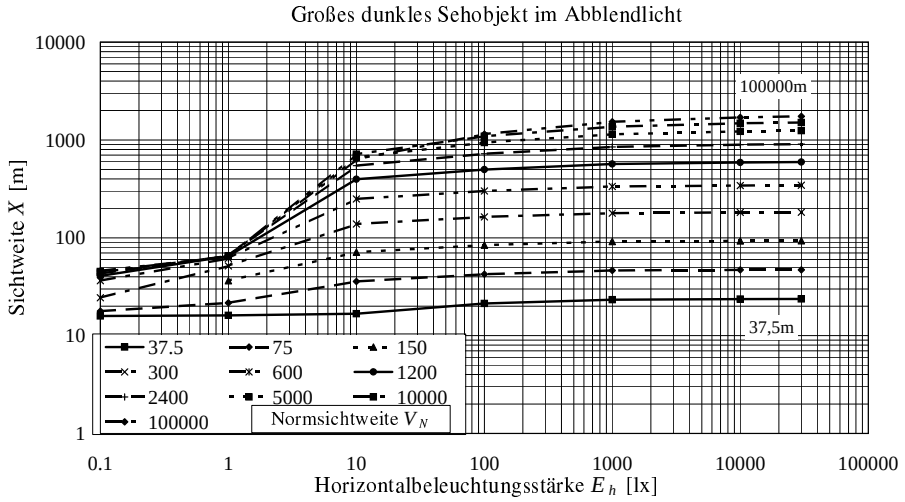


Abbildung 4.13: Sichtweiten des großen dunklen Sehobjektes bei Abblendlicht in Abhängigkeit von der horizontalen Beleuchtungsstärke E_h. Parameter ist die Normsichtweite V_N

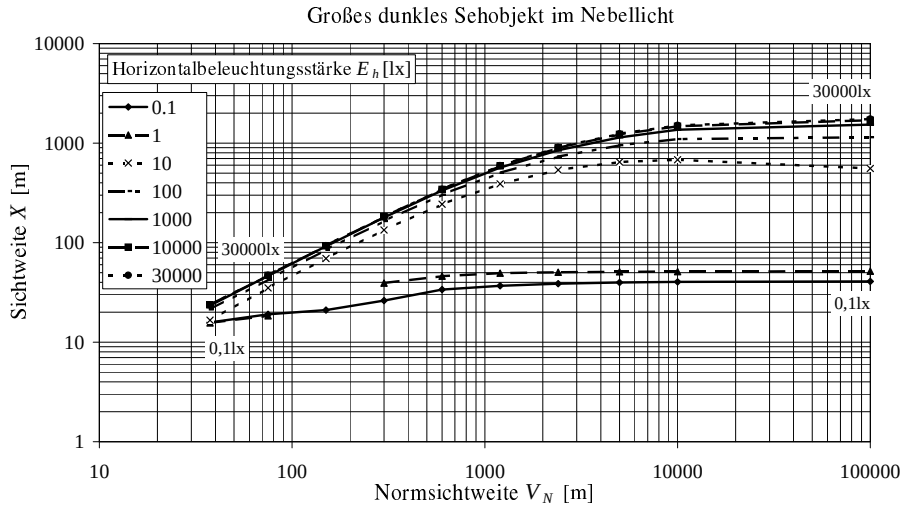


Abbildung 4.14: Sichtweiten des großen dunklen Sehobjektes bei Nebellicht in Abhängigkeit von der Normsichtweite V_N. Parameter ist die horizontale Beleuchtungsstärke E_h der natürlichen Himmelsstrahlung

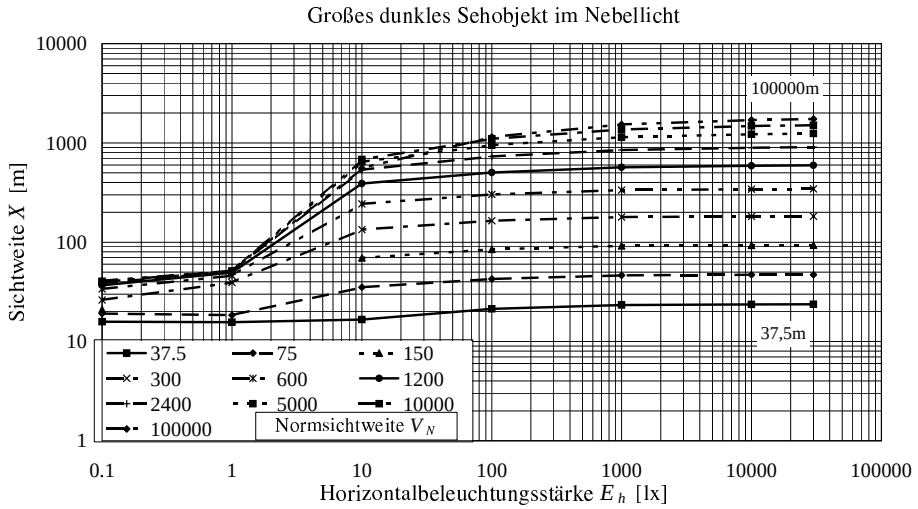


Abbildung 4.15: Sichtweiten des großen dunklen Sehobjektes bei Nebellicht in Abhängigkeit von der horizontalen Beleuchtungsstärke

4.3.2.2 Kleines dunkles Sehobjekt

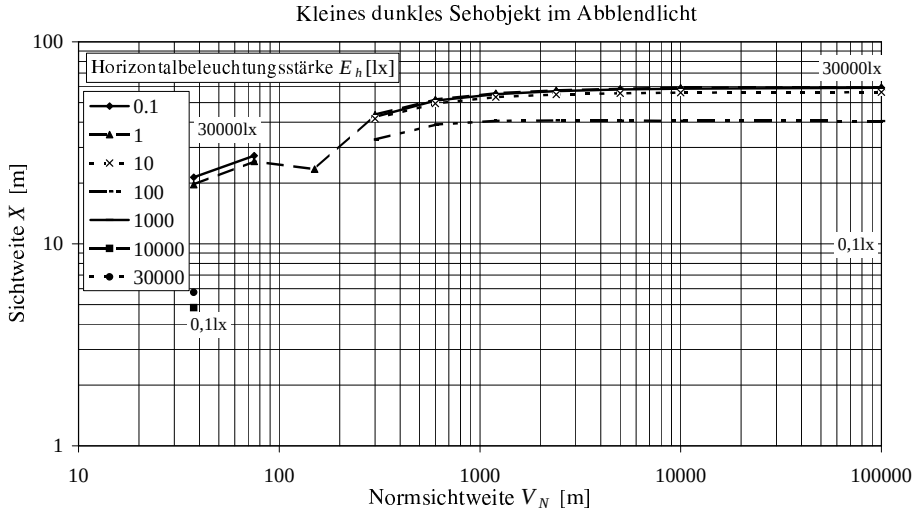


Abbildung 4.16: Sichtweiten des kleinen dunklen Sehobjektes bei Abblendlicht in Abhängigkeit von der Normsichtweite

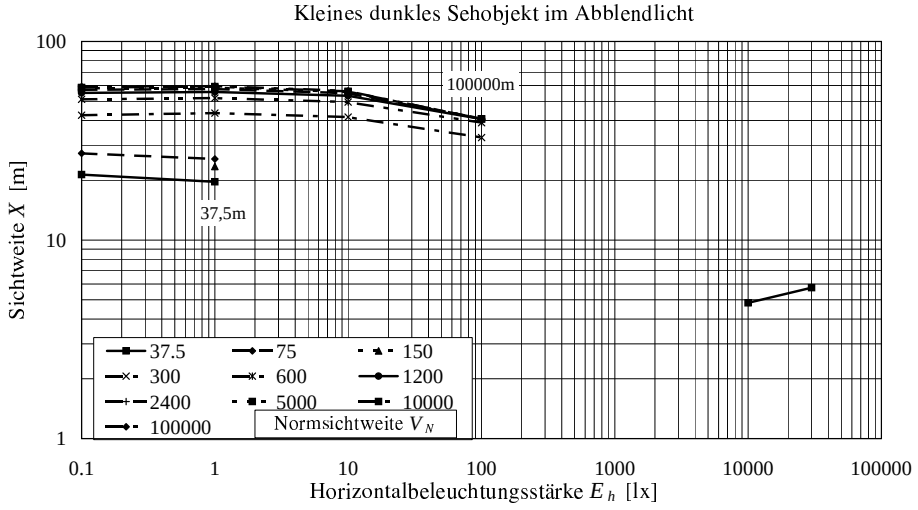


Abbildung 4.17: Sichtweiten des kleinen dunklen Sehobjektes bei Abblendlicht in Abhängigkeit von der horizontalen Beleuchtungsstärke

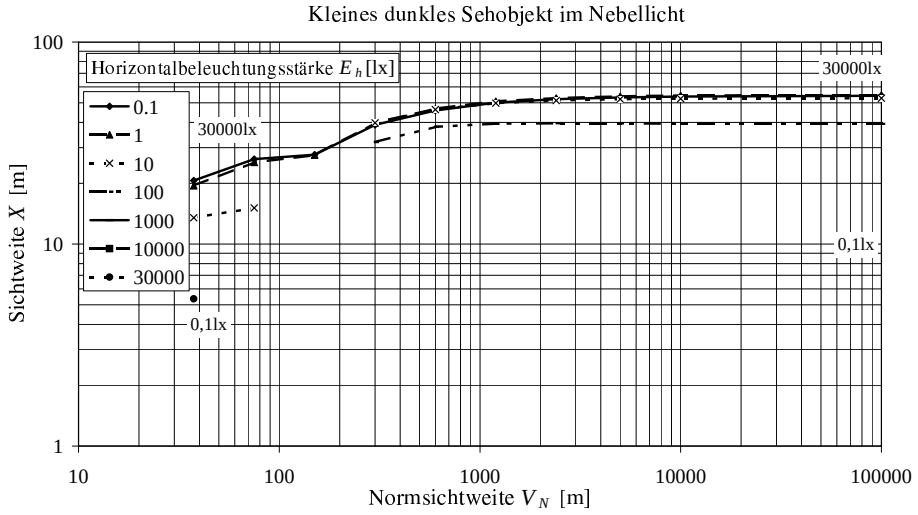


Abbildung 4.18: Sichtweiten des kleinen dunklen Sehobjektes bei Nebellicht in Abhängigkeit von der Normsichtweite

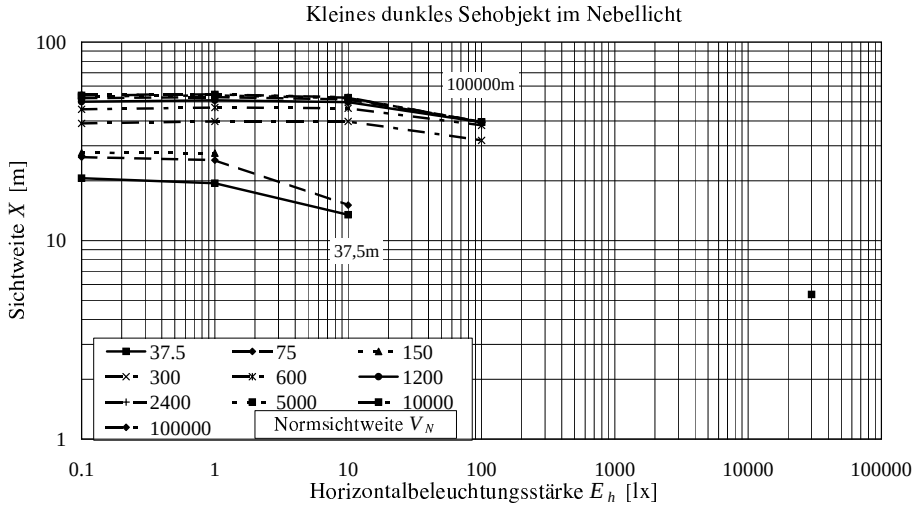


Abbildung 4.19: Sichtweiten des kleinen dunklen Sehobjektes bei Nebellicht in Abhängigkeit von der horizontalen Beleuchtungsstärke

4.3.2.3 Kleines mittelhelles Sehobjekt

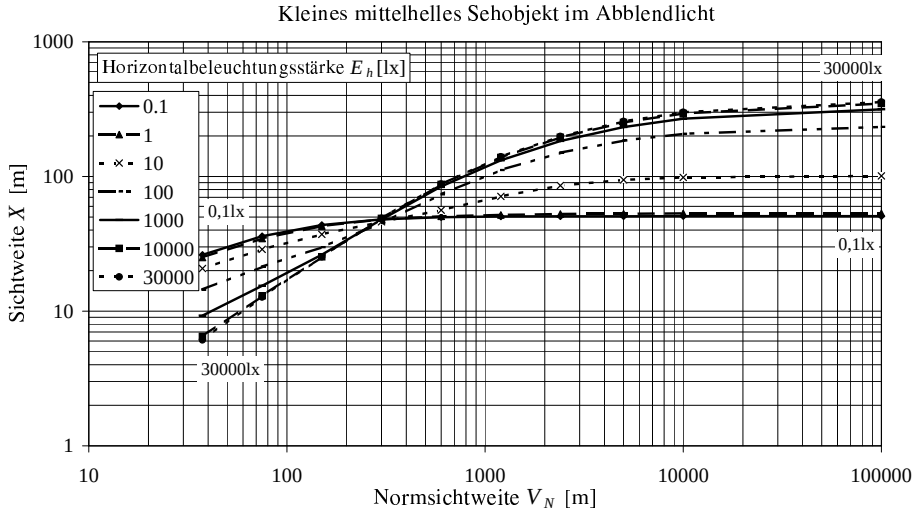


Abbildung 4.20: Sichtweiten des kleinen mittelhellen Sehobjektes bei Abblendlicht in Abhängigkeit von der Normsichtweite

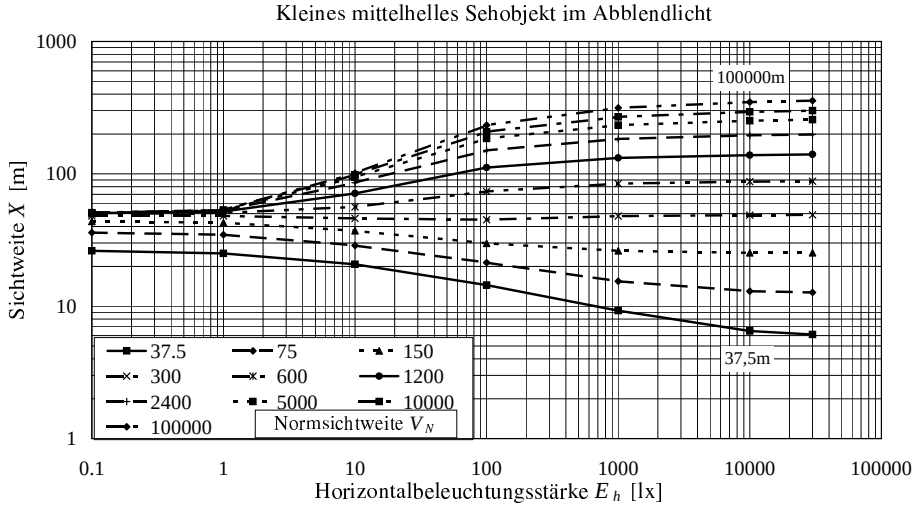


Abbildung 4.21: Sichtweiten des kleinen mittelhellen Sehobjektes bei Abblendlicht in Abhängigkeit von der horizontalen Beleuchtungsstärke

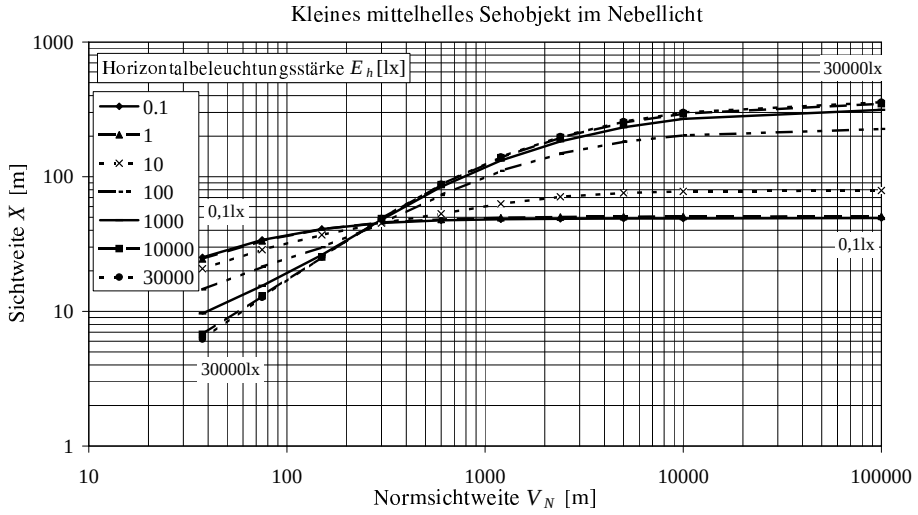


Abbildung 4.22: Sichtweiten des kleinen mittelhellen Sehobjektes bei Nebellicht in Abhängigkeit von der Normsichtweite

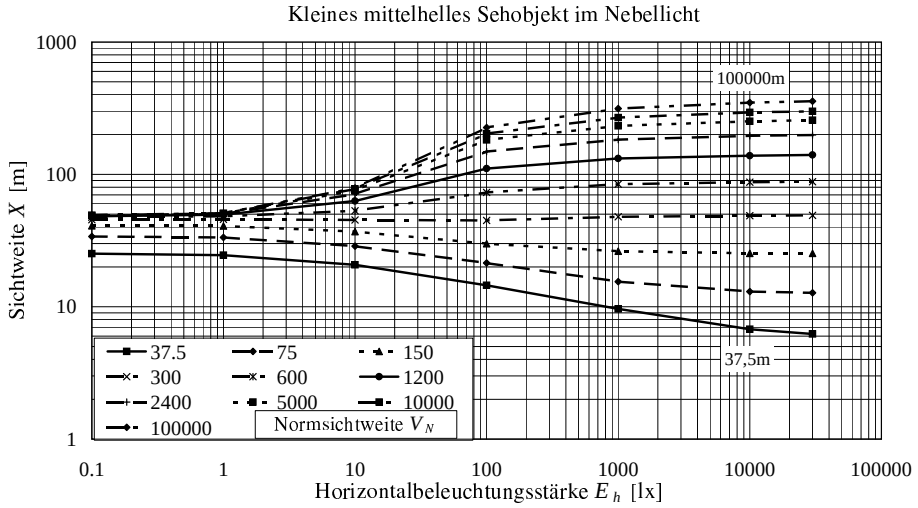


Abbildung 4.23: Sichtweiten des kleinen mittelhellen Sehobjektes bei Nebellicht in Abhängigkeit von der horizontalen Beleuchtungsstärke

4.3.2.4 Kleines helles Sehobjekt

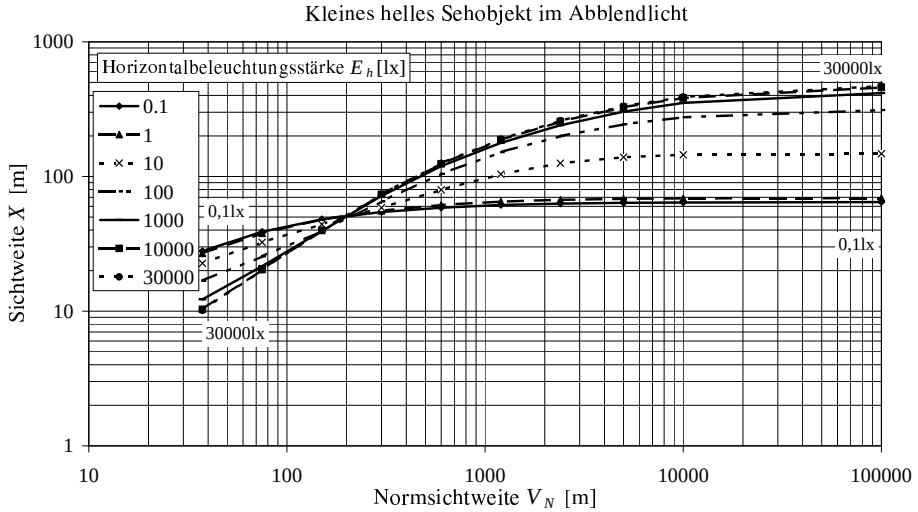


Abbildung 4.24: Sichtweiten des kleinen hellen Sehobjektes bei Abblendlicht in Abhängigkeit von der Normsichtweite

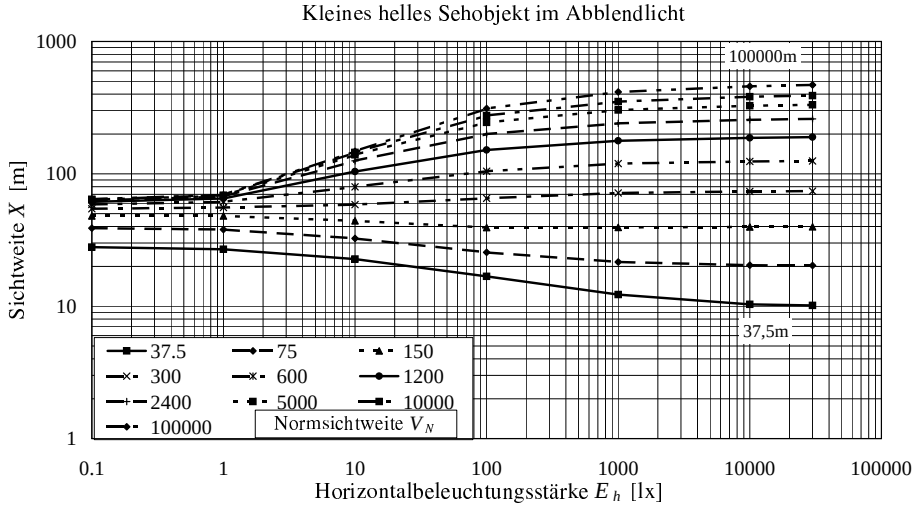


Abbildung 4.25: Sichtweiten des kleinen hellen Sehobjektes bei Abblendlicht in Abhängigkeit von der horizontalen Beleuchtungsstärke

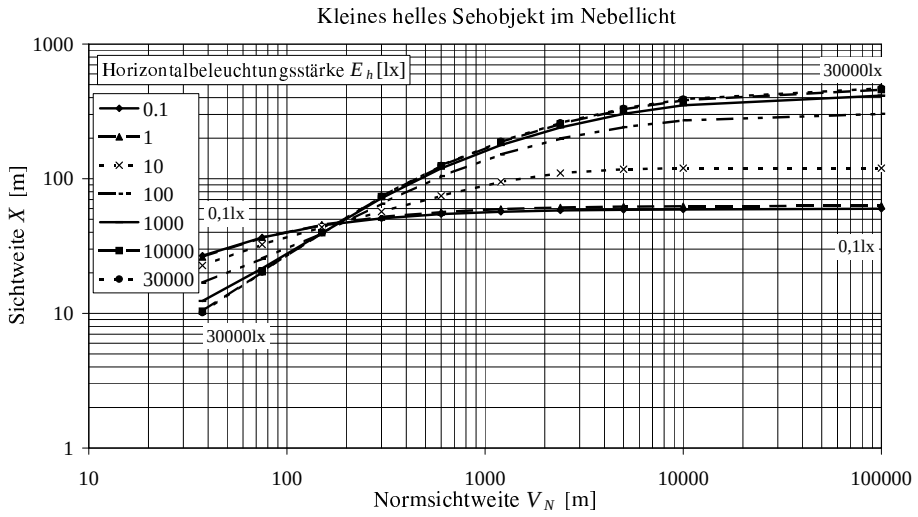


Abbildung 4.26: Sichtweiten des kleinen hellen Sehobjektes bei Nebellicht in Abhängigkeit von der Normsichtweite

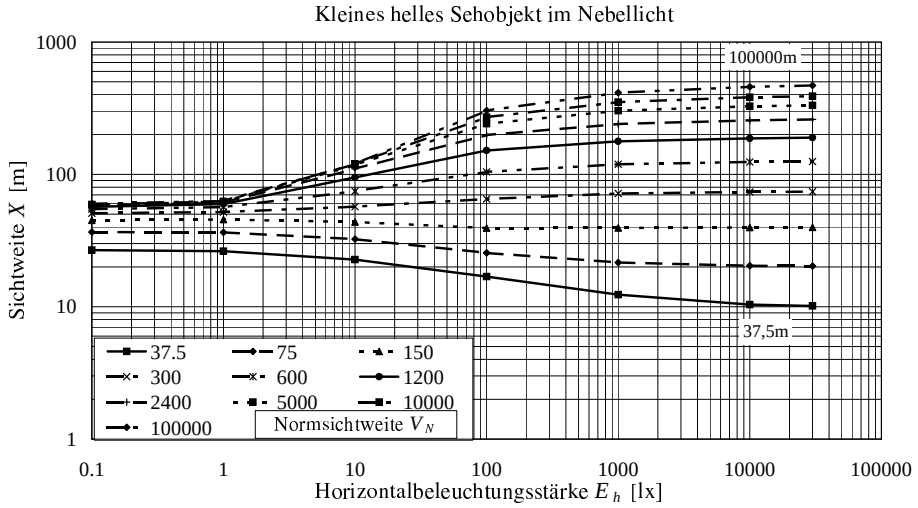


Abbildung 4.27: Sichtweiten des kleinen hellen Sehobjektes bei Nebellicht in Abhängigkeit von der horizontalen Beleuchtungsstärke

4.3.2.5 Schlussleuchte

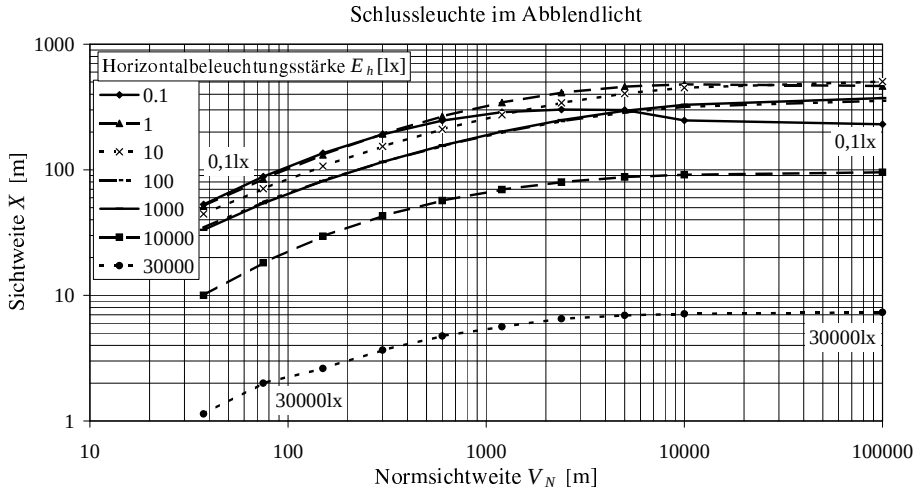


Abbildung 4.28: Sichtweiten der Schlussleuchte bei Abblendlicht in Abhängigkeit von der Normsichtweite

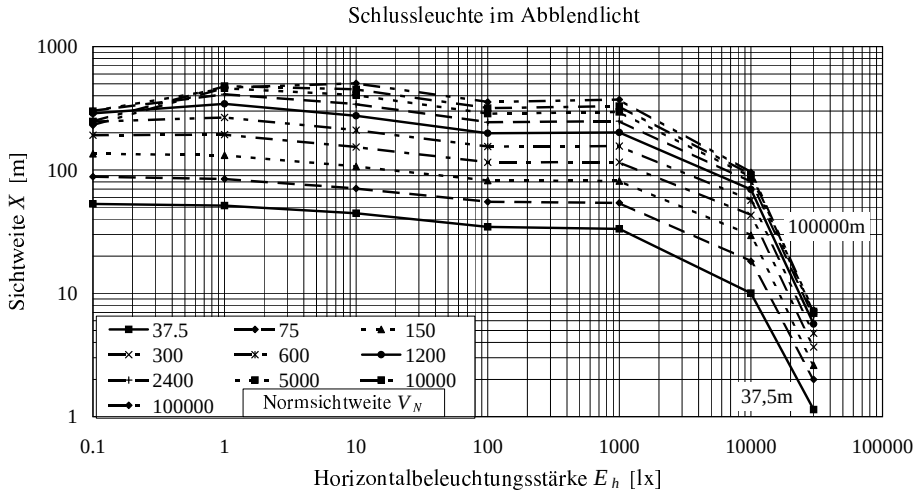


Abbildung 4.29: Sichtweiten der Schlussleuchte bei Abblendlicht in Abhängigkeit von der horizontalen Beleuchtungsstärke

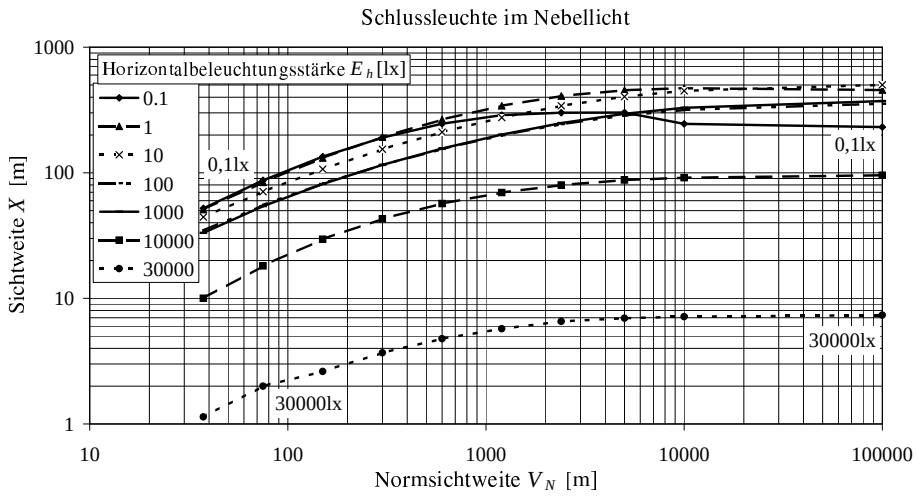


Abbildung 4.30: Sichtweiten der Schlussleuchte bei Nebellicht in Abhängigkeit von der Normsichtweite

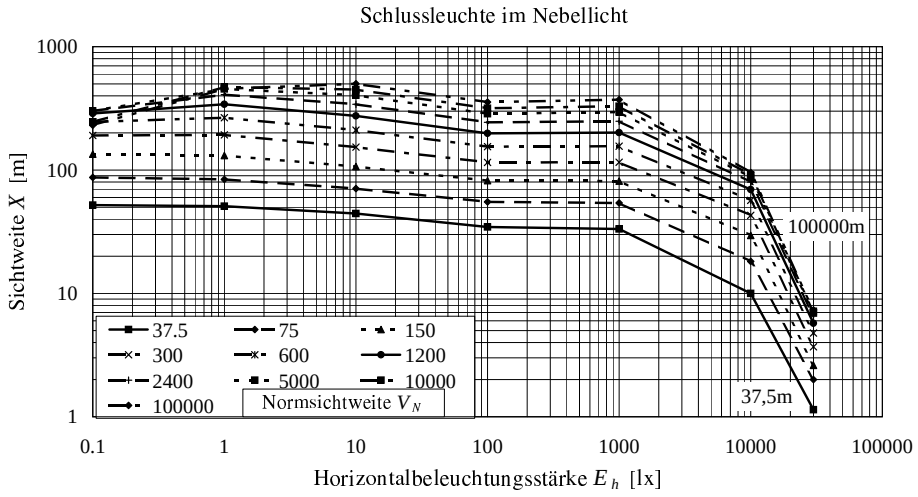


Abbildung 4.31: Sichtweiten der Schlussleuchte bei Nebellicht in Abhängigkeit von der horizontalen Beleuchtungsstärke

4.3.2.6 Nebelschlussleuchte

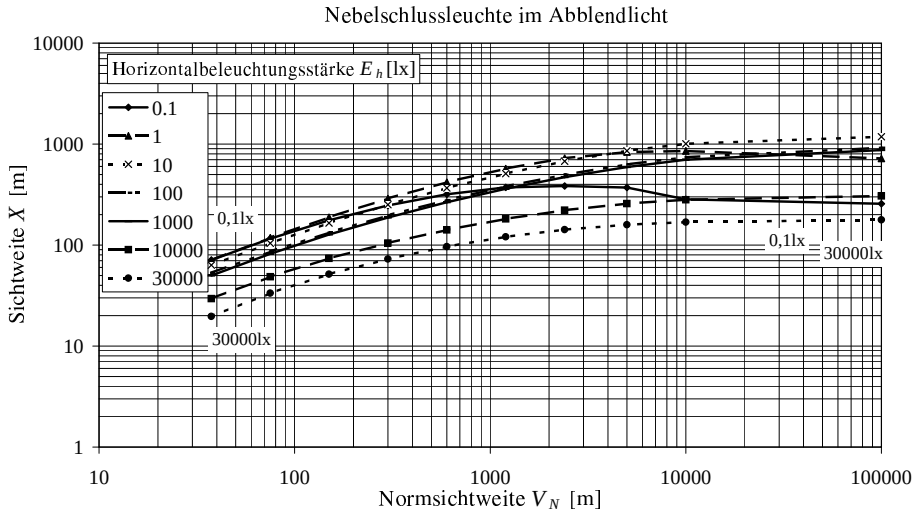


Abbildung 4.32: Sichtweiten der Nebelschlussleuchte bei Abblendlicht in Abhängigkeit von der Normsichtweite

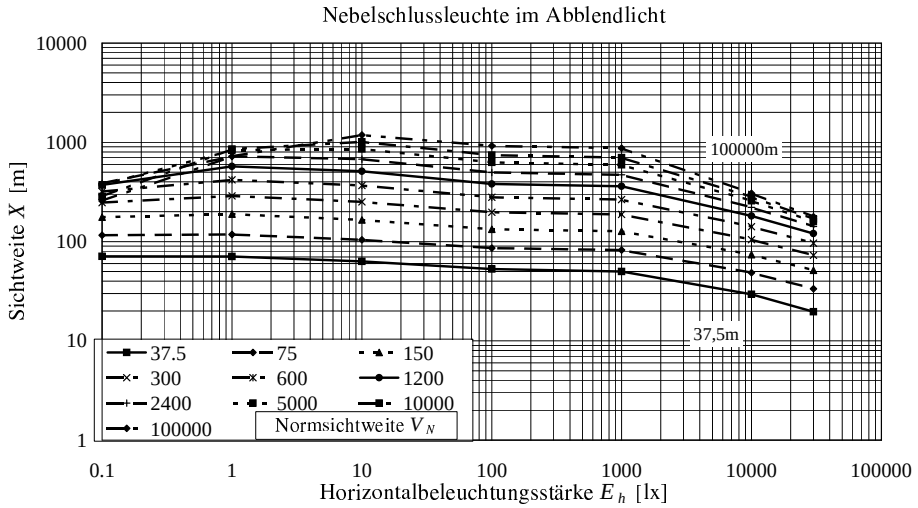


Abbildung 4.33: Sichtweiten der Nebelschlussleuchte bei Abblendlicht in Abhängigkeit von der horizontalen Beleuchtungsstärke

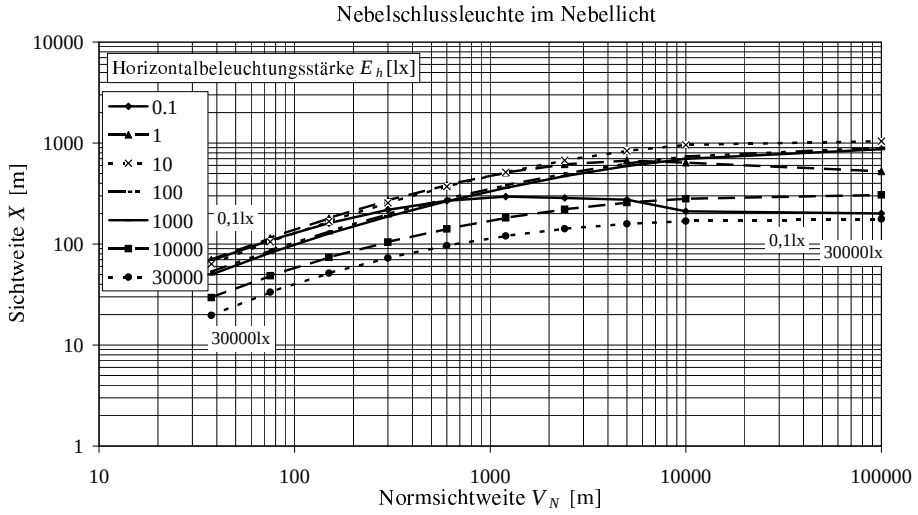


Abbildung 4.34: Sichtweiten der Nebelschlussleuchte bei Nebellicht in Abhängigkeit von der Normsichtweite

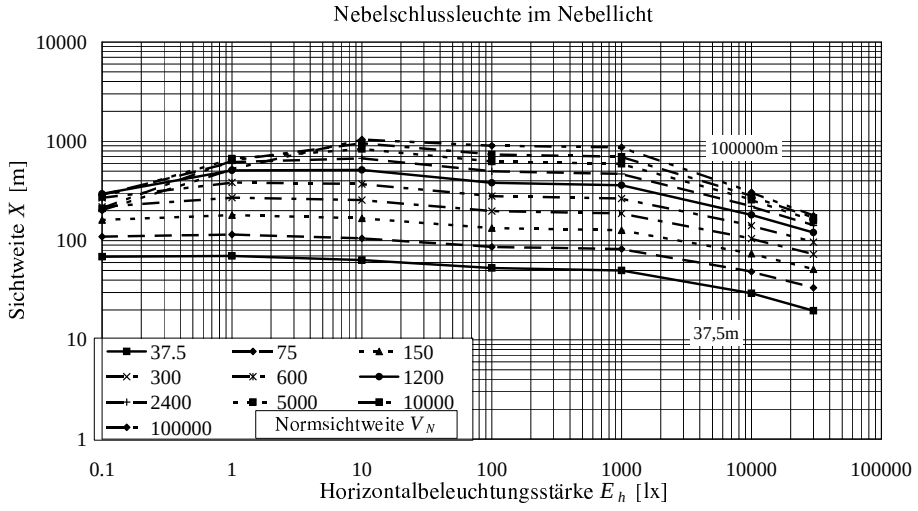


Abbildung 4.35: Sichtweiten der Nebelschlussleuchte bei Nebellicht in Abhängigkeit von der horizontalen Beleuchtungsstärke

4.3.3 Vergleich der Sehobjektklassen

Im Folgenden wird der Frage nachgegangen, ob und inwieweit sich die untersuchten Sehobjekte in ihren Sichtweiten bei unterschiedlichen Trübungs- und Beobachtungsbedingungen unterscheiden.

Zu diesem Zweck sind in Tabelle 4.4 die Sichtweiten der untersuchten Sehobjekte bei je einer typischen Nacht-, Dämmerungs- und Tagsituation zusammengestellt. Daraus erkennt man folgende Trends:

Nachtsituation:
Die Sichtweiten beleuchteter Sehobjekte sind erheblich geringer und zwar um etwa den Faktor 4 als die der selbstleuchtenden Sehobjekte. Besonders kritisch sind dunklere Sehobjekte. Zum Beispiel sind bei einer Normsichtweite von 75 m die beleuchteten Sehobjekte über alle 4 Typen gemittelt etwa 30 m weit zu erkennen, während die Sichtweiten der Schlussleuchte bei etwa 95 m und die der Nebelschlussleuchte bei etwa 116 m liegen. Bei höheren Normsichtweiten bzw. geringeren Trübungen bleiben die Relationen annähernd gleich, allerdings bei erheblich größeren absoluten Werten für die Sichtweiten.

Tagessituation:
Auch hier rangieren beleuchtete Sehobjekte hinter den selbstleuchtenden Sehobjekten. Auffällig ist auch, dass beleuchtete Sehobjekte bei Tage z.T. weniger gut sichtbar sind als bei Nacht, insbesondere hellere Objekte. Bei Tage verlieren auch die selbstleuchtenden Sehobjekte an Wirkung. Allerdings ist dieser Befund unkritisch, weil die Absolutwerte der Sichtweiten im Mittel oberhalb von etwa 200 m liegen und damit in jedem Fall eine ausreichende Sichtbarkeit gewährleistet ist. Wie bereits erwähnt, zeigen die Lücken in Tabelle 4.4 Tarnsituationen an, bei denen die Sehobjekte zumindest bis zu Sehobjektabständen von etwa 5 m nicht mit Sicherheit zu erkennen sind.

Auf die Normsichtweite bezogene Sichtweite:
Einen direkten Vergleich der berechneten Sichtweiten mit den Normsichtweiten ermöglicht Tabelle 4.5, wo die Sichtweiten von Tabelle 4.4 auf die jeweiligen Normsichtweiten bezogen wurden. Zum Beispiel entspricht bei einer Normsichtweite von 37,5 m eine absolute Sichtweite von 15,9 m einer bezogenen Sichtweite von 0,424 m (=15,9/37,5) bzw. wie in Tabelle 4.5 gerundet von 0,42 m.

Tabelle 4.5 zeigt, dass zwischen den Sichtweiten von verkehrsrelevanten Sehobjekten und den Normsichtweiten bzw. meteorologischen Sichtweiten keine festen Beziehungen bestehen. Die Relationen hängen vielmehr vom Sehobjekt selbst und den Trübungs- und Beleuchtungsbedingungen ab. Bei beleuchteten Sehobjekten im Bereich dichten Nebels mit Normsichtweiten zwischen etwa 50 m und 200 m liegt die bezogene Sichtweite je nach Art des Sehobjektes und der Nebeldichte zwischen etwa 0,25 und 0,75, im Mittel grob bei etwa 0,35 bzw. 35 % der Normsichtweite, annähernd unabhängig vom Beleuchtungsniveau.

Als einfache Faustregel gilt daher, dass bei Nebel die Sichtweite beleuchteter Sehobjekte im Mittel etwa 1/3 der Normsichtweite beträgt, dagegen die Sichtweite der Fahrzeug-Signalleuchten im Mittel in der Nähe der Normsichtweite liegt.

Tabelle 4.4: Absolute Sichtweiten in m im Nebelbereich. Wahrnehmungskriterium "Sehobjekt sicher gesehen". Abblendlicht eingeschaltet.

Nacht ($E_h = 0,1$ lx) Sehobjekt	Normsichtweite V_N in m 37,5	75	150	300	600	1200	Mittel
Nr. 1: großes dunkles Sehobjekt	15.9	17.8		24.4	36.4	40.8	27.1
Nr. 2: kleines dunkles Sehobjekt	21.4	27.3		42.5	51.1	55.1	39.5
Nr. 3: kleines mittelhelles Sehobjekt	26.2	36.0	43.7	48.1	49.8	50.5	42.4
Nr. 4: kleines helles Sehobjekt	27.9	38.9	48.1	54.5	58.7	61.5	48.3
Nr. 5: Schlussleuchte	59.5	94.5	137.6	181.4	213.6	223.6	151.7
Nr. 6: Nebelschlussleuchte	71.1	115.9	175.9	246.9	318.2	372.5	216.8
Mittel (1-4)	22.9	30.0	45.9	42.4	49.0	52.0	**39.3**
Mittel (5-6)	65.3	105.2	156.8	214.2	265.9	298.1	**184.2**
Mittel (1-6)	37.0	55.1	101.3	99.6	121.3	134.0	**87.6**

Dämmerung ($E_h = 10$ lx) Sehobjekt	Normsichtweite V_N in m 37,5	75	150	300	600	1200	Mittel
Nr. 1: großes dunkles Sehobjekt	16.7	35.9	71.1	138.1	249.4	397.2	151.4
Nr. 2: kleines dunkles Sehobjekt				41.6	49.5	53.2	48.1
Nr. 3: kleines mittelhelles Sehobjekt	20.7	28.7	37.2	46.1	56.2	71.1	43.3
Nr. 4: kleines helles Sehobjekt	22.7	32.5	44.2	58.6	79.7	104.1	57.0
Nr. 5: Schlussleuchte	51.5	83.0	127.7	187.5	262.3	349.1	176.9
Nr. 6: Nebelschlussleuchte	63.2	104.2	165.2	251.6	366.9	510.1	243.5
Mittel (1-4)	20.0	32.4	50.8	71.1	108.7	156.4	**75.0**
Mittel (5-6)	57.4	93.6	146.5	219.6	314.6	429.6	**210.2**
Mittel (1-6)	35.0	56.9	89.1	120.6	177.3	247.5	**120.0**

Tag ($E_h = 1000$ lx) Sehobjekt	Normsichtweite V_N in m 37,5	75	150	300	600	1200	Mittel
Nr. 1: großes dunkles Sehobjekt	23.3	46.4	91.8	178.9	334.3	567.6	207.1
Nr. 2: kleines dunkles Sehobjekt							
Nr. 3: kleines mittelhelles Sehobjekt	9.3	15.4	26.2	47.9	84.3	131.9	52.5
Nr. 4: kleines helles Sehobjekt	12.2	21.6	39.4	71.7	119.4	177.7	73.7
Nr. 5: Schlussleuchte	32.9	53.5	80.5	114.2	154.5	199.5	105.9
Nr. 6: Nebelschlussleuchte	50.0	82.0	127.0	187.6	265.3	360.6	178.8
Mittel (1-4)	14.9	27,8	52.5	99.5	179.3	292.4	**111.1**
Mittel (5-6)	41.5	67.8	103.8	150.9	209.9	280.1	**142.3**
Mittel (1-6)	30.3	50.5	80.6	124.8	185.7	262.1	**122.3**

Tabelle 4.5: Bezogene Sichtweiten (bezogen auf die jeweilige Normsichtweite) gemäß Tabelle 4.4

Nacht ($E_h = 0,1$ lx) Sehobjekt	Normsichtweite V_N in m 37,5	75	150	300	600	1200	Mittel
Nr. 1: großes dunkles Sehobjekt	0.42	0.24		0.08	0.06	0.03	0.17
Nr. 2: kleines dunkles Sehobjekt	0.57	0.36		0.14	0.09	0.05	0.24
Nr. 3: kleines mittelhelles Sehobjekt	0.70	0.48	0.29	0.16	0.08	0.04	0.29
Nr. 4: kleines helles Sehobjekt	0.74	0.52	0.32	0.18	0.10	0.05	0.32
Nr. 5: Schlussleuchte	1.59	1.26	0.92	0.60	0.36	0.19	0.82
Nr. 6: Nebelschlussleuchte	1.90	1.55	1,17	0.82	0.53	0.31	1.05
Mittel (1-4)	0.61	0.40	0.31	0.14	0.08	0.04	**0.26**
Mittel (5-6)	1.74	1.40	1.05	0.71	0.44	0.25	**0.93**
Mittel (1-6)	1.32	1.03	0.75	0.49	0.30	0.17	**0.67**

Dämmerung ($E_h = 10$ lx) Sehobjekt	Normsichtweite V_N in m 37,5	75	150	300	600	1200	Mittel
Nr. 1: großes dunkles Sehobjekt	0.45	0.48	0.47	0.46	0.42	0.33	0.43
Nr. 2: kleines dunkles Sehobjekt				0.14	0.08	0.04	0.09
Nr. 3: kleines mittelhelles Sehobjekt	0.55	0.38	0.25	0.15	0.09	0.06	0.25
Nr. 4: kleines helles Sehobjekt	0.61	0.43	0.29	0.20	0.13	0.09	0.29
Nr. 5: Schlussleuchte	1.37	1.11	0.85	0.63	0.44	0.29	0.78
Nr. 6: Nebelschlussleuchte	1,69	1,39	1.10	0.84	0.61	0.43	1.01
Mittel (1-4)	0.53	0.43	0.34	0.24	0.18	0.11	**0.48**
Mittel (5-6)	1.53	1.25	0.98	0.73	0.52	0.36	**0.89**
Mittel (1-6)	0.93	0.76	0.59	0.40	0.30	0.21	**0.48**

Tag ($E_h = 1000$ lx) Sehobjekt	Normsichtweite V_N in m 37,5	75	150	300	600	1200	Mittel
Nr. 1: großes dunkles Sehobjekt	0.62	0.62	0.61	0.60	0.56	0.47	0.58
Nr. 2: kleines dunkles Sehobjekt							
Nr. 3: kleines mittelhelles Sehobjekt	0.25	0.21	0.17	0.16	0.14	0.11	0.17
Nr. 4: kleines helles Sehobjekt	0.33	0.29	0.26	0.24	0.20	0.15	0.24
Nr. 5: Schlussleuchte	0.88	0.71	0.54	0.38	0.26	0.17	0.49
Nr. 6: Nebelschlussleuchte	1.33	1.09	0.85	0.63	0.44	0.30	0.77
Mittel (1-4)	0.40	0.37	0.35	0.33	0.30	0.24	**0.33**
Mittel (5-6)	1.11	0.90	0.69	0.50	0.35	023	**0.63**
Mittel (1-6)	0.68	0.58	0.49	0.40	0.32	0.24	**0.45**

Kapitel 5

Experimentelle Sichtweitenuntersuchungen

Inhalt dieses Kapitels ist die Präsentation der in den Feldexperimenten ermittelten Sichtweiten.

5.1 Untersuchungsbedingungen

Zur experimentellen Ermittlung von Sichtweiten unter realen Nebelbedingungen kamen im Feldversuch die gleichen Sehobjekte zum Einsatz, wie sie bereits im FASIMOD-Projekt (FASIMOD, 1995) Verwendung fanden. Dabei handelte es sich einerseits um zwei beleuchtete Sehobjekte der Größe $0,3 \times 0,3\,\mathrm{m}$ und $1,75 \times 1,40\,\mathrm{m}$, welche der Simulation eines vorausfahrenden PKW bzw. der Nachbildung eines verlorenen Paketes oder eines Straßenkegels dienten. Die Reflexionsgrade dieser Sehobjekte betrugen 23,3 % (dunkel), 53 % (mittelhell) und 70,5 % (hell). Weiterhin wurden die Nebelschlussleuchte ($13 \times 4,5\,\mathrm{cm}$) sowie die Schlussleuchten (in den Abbildungen der Kapitel 5-7 als Rückleuchten bezeichnet)(je $13 \times 4\,\mathrm{cm}$) des Versuchsfahrzeuges als selbstleuchtende Sehobjekte verwendet.

Für die Feldversuche standen zwei Messstrecken zur Verfügung: eine sog. 600 m - und eine 200 m - Strecke. Die 600 m - Strecke ist eine Kreisstraße, die die Ortschaften Pennewitz und Gräfinau Augstedt verbindet. Sie hat eine Breite von etwa 6 m. Der Fahrbahnbelag besteht aus dunklem Asphalt, für den der Leuchtdichtekoeffizient zu etwa 0,04 $(cd/m^2)/\mathrm{lx}$ bestimmt wurde. Auf dieser Straße wurden in der Zeit zwischen dem 12. 02. 1998 und 07. 10. 1998 Sichtweitenmessungen bei relativ geringer Trübung mit Normsichtweiten oberhalb 1000 m durchgeführt. Während der Messungen war die Straße für den öffentlichen Verkehr gesperrt.

Da wider Erwartung auf dieser Messstrecke keine Nebelsituationen eintraten, wurde für die folgende Zeit auf eine kürzere Straße von 200 m Länge auf der Rennsteig-Höhe bei Veffer ausgewichen, die als Zufahrt zur Gaststätte "Zum Stutenhaus" dient . Die Straße war auch hier etwa 6 m breit, die Fahrbahn bestand ebenfalls aus dunklem Asphalt. Auf dieser Straße wurden zwischen dem 27. 10. 1998 und dem 02. 11. 1999 die Sichtweitenmessungen bei Nebel mit Normsichtweiten unterhalb etwa 600 m durchgeführt.

Vor der Versuchsdurchführung wurden die einzelnen Versuchspersonen über die Messmethodik und den Versuchsablauf sowohl mittels schriftlich abgefasster Kurzanleitung als auch verbal informiert.

Die 12 Versuchspersonen der Kernuntersuchungen verfügten bis auf 2 über lichttechnische Kenntnisse. Bei den Sichtweitenmessungen mit dem großen Versuchspersonenkollektiv (29 Versuchspersonen) waren keine bzw. nur sehr wenige lichttechnische Kenntnisse vorhanden. Genauere Angaben zu beiden Versuchspersonengruppen sind in den Tabellen B.2 und B.16 enthalten.

Zum Versuchsbeginn wurde jede Versuchsperson gebeten, auf einer 5-stufigen Ratingskala die allgemeinen Sichtbedingungen unabhängig vom Sehobjekt einzuschätzen. Diese Ratingskala verfügte über 15 Markierungen mit den Randwerten „ungenügend“ und „sehr gut“. Anschließend erfolgte die Bekanntgabe der zu erwartenden Sehsituation und die Versuchsperson fuhr langsam auf das zunächst noch unsichtbare Sehobjekt zu. Das Versuchspersonenfahrzeug hielt an, wenn das Sehobjekt nach Einschätzung der Versuchsperson gerade wahrgenommen wurde (Schwellensituation). Nach Messung der Entfernung wurde weiter auf das Hindernis zugefahren, bis es nach Einschätzung der Versuchsperson sicher erkannt werden konnte und dieser Entfernungswert ebenfalls notiert wurde. Nach Beendigung der Messung fuhr das Versuchspersonenfahrzeug in seine Ausgangsposition zurück und die Messungen begannen mit der nächsten Parameterkombination von vorn. Die für Tag und Nacht unterschiedlichen Sehsituationen sind im Folgenden in jeweils der Reihenfolge aufgelistet, wie sie in den Feldversuchen dargeboten wurden.

- Tagessituation
  1. Großes dunkles Sehobjekt (Versuchspersonenfahrzeug - ohne Fahrzeugbeleuchtung)
  2. Kleines dunkles Sehobjekt (Versuchspersonenfahrzeug - ohne Fahrzeugbeleuchtung)
  3. Kleines mittelhelles Sehobjekt (Versuchspersonenfahrzeug - ohne Fahrzeugbeleuchtung)
  4. Kleines helles Sehobjekt (Versuchspersonenfahrzeug - ohne Fahrzeugbeleuchtung)
  5. Kleines dunkles Sehobjekt (Versuchspersonenfahrzeug - Abblendlicht)
  6. Versuchsfahrzeug - Nebelschlussleuchte (Versuchspersonenfahrzeug - ohne Fahrzeugbeleuchtung)
  7. Versuchsfahrzeug - Schlussleuchten (Versuchspersonenfahrzeug - ohne Fahrzeugbeleuchtung)
- Nachtsituation
  1. Großes dunkles Sehobjekt (Versuchspersonenfahrzeug - Abblendlicht)
  2. Kleines dunkles Sehobjekt (Versuchspersonenfahrzeug - Abblendlicht)
  3. Kleines helles Sehobjekt (Versuchspersonenfahrzeug - Abblendlicht)
  4. Kleines dunkles Sehobjekt (Versuchspersonenfahrzeug - Abblendlicht + Nebellicht)
  5. Versuchsfahrzeug - Nebelschlussleuchte (Versuchspersonenfahrzeug - Abblendlicht)
  6. Versuchsfahrzeug - Schlussleuchten (Versuchspersonenfahrzeug - Abblendlicht)

Abbildung 5.1: Beispiel einer Leuchtdichtemessung bei Tag als Graustufendarstellung

Abbildung 5.2: Beispiel einer Leuchtdichtemessung bei Nacht als Graustufendarstellung

5.2 Messung lichttechnischer Variablen

5.2.1 Umfeldleuchtdichte und Normsichtweite

Zu Vergleichszwecken zwischen den Messungen in Ilmenau und den Modellrechnungen in Karlsruhe wurden weiterhin Leuchtdichtemessungen mittels ortsauflösender Kameramesstechnik durchgeführt. Die Leuchtdichtekamera befand sich während der Versuchsdurchführung im Versuchspersonenfahrzeug auf der Höhe des Fahrerauges (ca. 1,20 m) und war mit ihrer optischen Achse etwa parallel zur Blicklinie des Fahrers ausgerichtet. Der Öffnungswinkel dieser Kamera beträgt ungefähr 10 Grad. Die meisten Sehsituationen der Feldmessungen für die Kriterien „gerade erkannt“ und „sicher erkannt“ sind daher in Leuchtdichtebildern gespeichert. Abb. (5.1) und Abb. (5.2) vermitteln einen Eindruck der beschriebenen Sehsituationen vom Versuchspersonenfahrzeug aus.

Während der gesamten Versuchsdauer wurde die Trübungsdichte der Atmosphäre mittels eines Streulichtmessgerätes (AEG) erfasst, welches zur Ermittlung der Normsichtweite seinen Messergebnissen einen Schwellenkontrast von 2 % zugrunde legt. Kontrollierende Vergleichsmessungen mit einem weiteren Streulichtmessgerät (FUMOSENS E), welches nach dem Rückstreuprinzip arbeitet und den Schwellenkontrast mit 5 % ansetzt, ergaben nach entsprechender Umrechnung der Messwerte zufriedenstellende Abweichungen von wenigen Prozenten als Mittelwert über 41 Stichprobenmessungen. Siehe Abb. (5.3), Abb. (5.4) und Tabelle B.1 in Anhang B. Die Trübung bei den experimentellen Sichtweitenbestimmungen wurde durch die 5 %-Normsichtweite beschrieben.

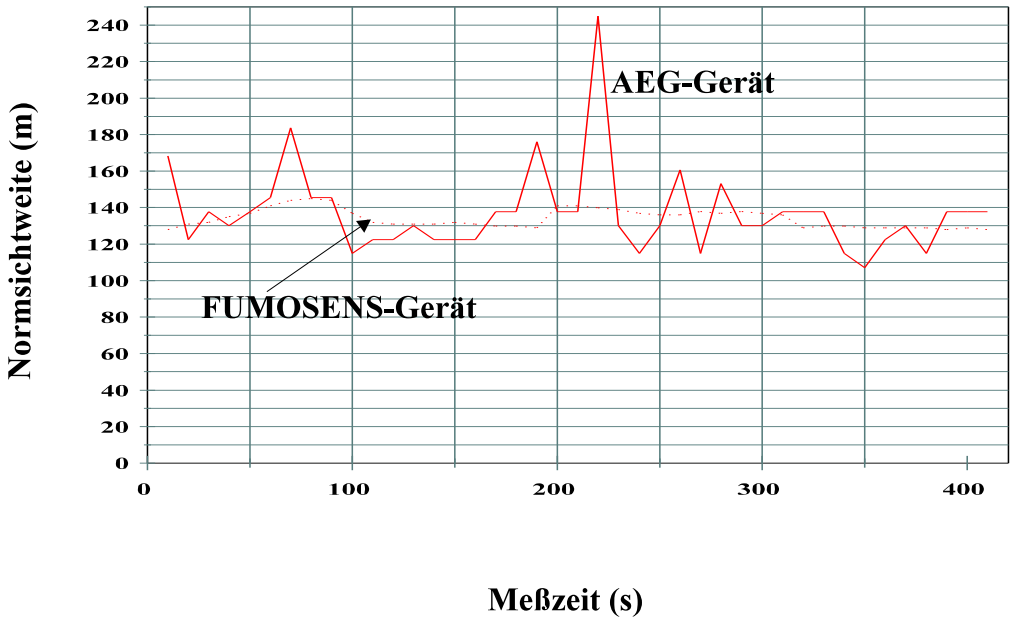


Abbildung 5.3: Normsichtweiten-Vergleichsmessung zwischen AEG-Streulichtschreiber MS 05 und FUMOSENS E (siehe Tabelle B.1)

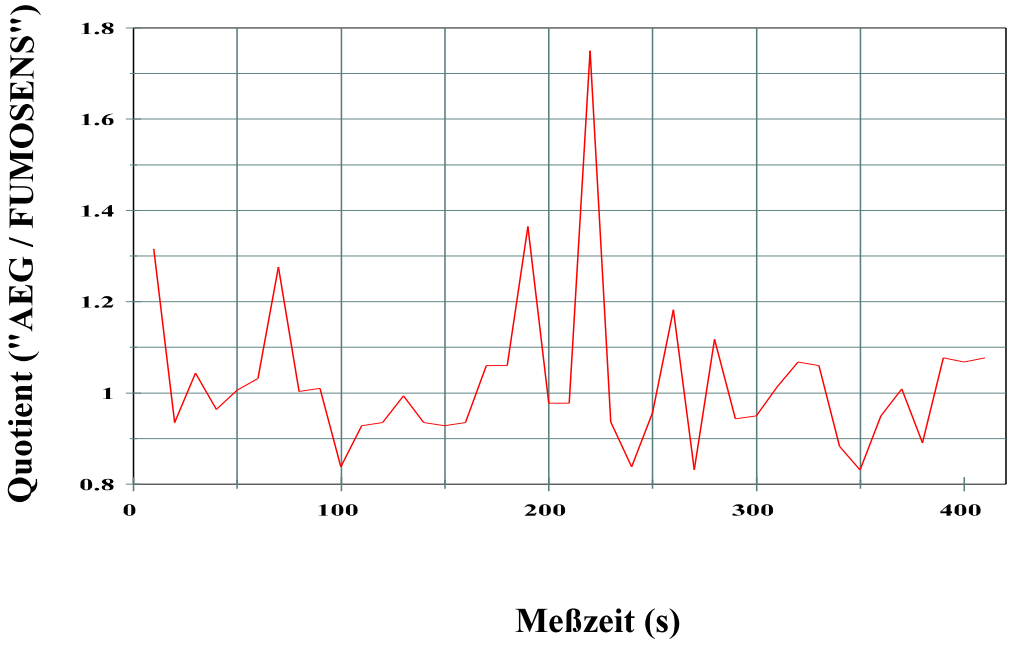
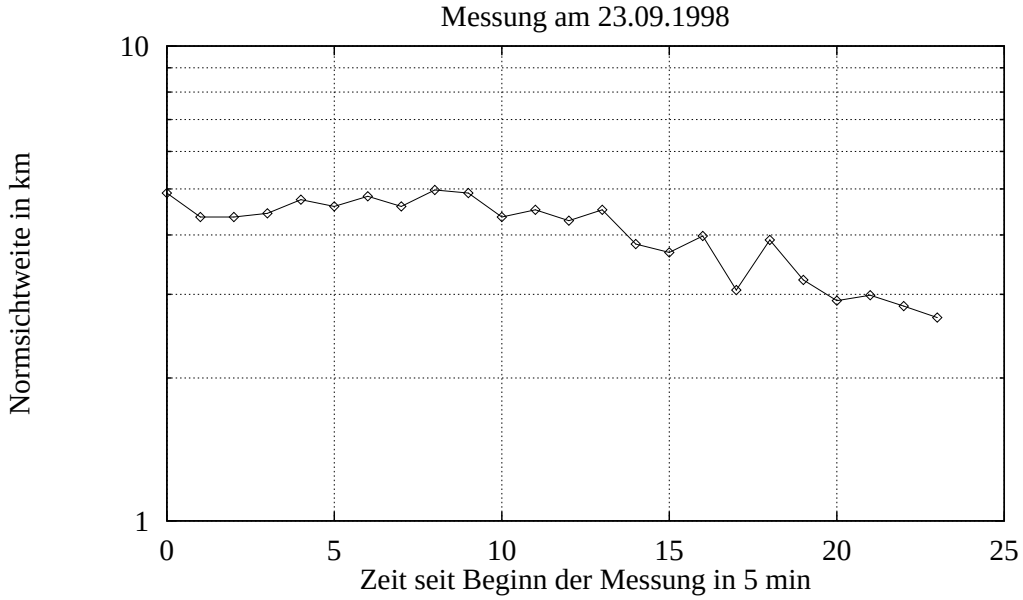
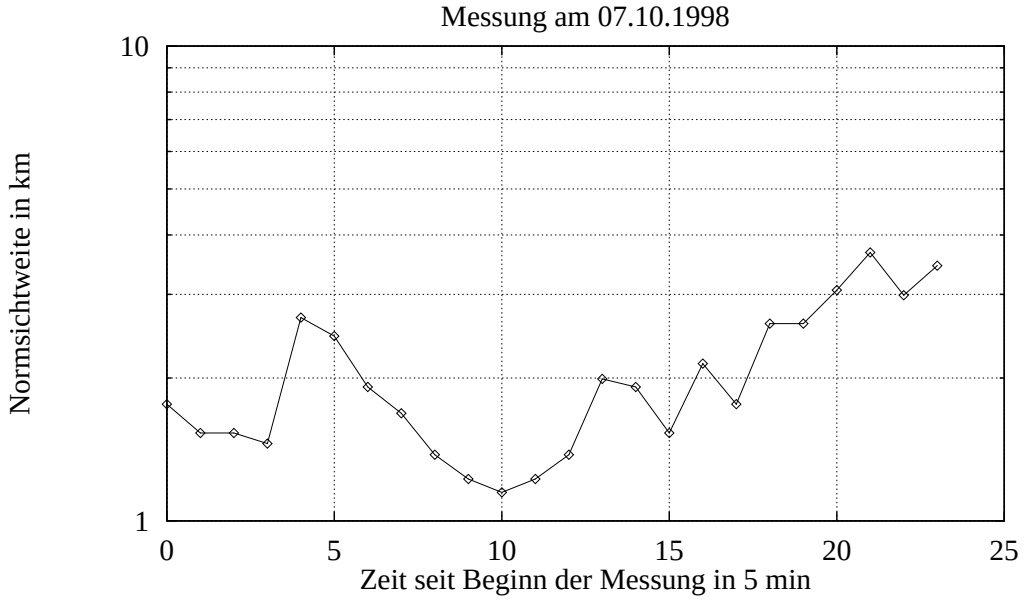


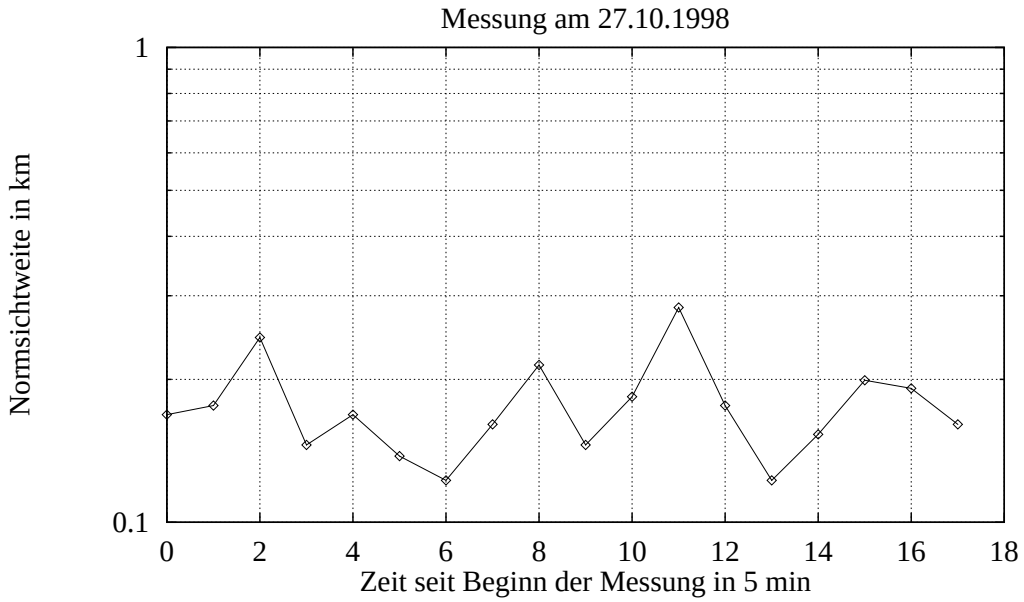
Abbildung 5.4: Quotient der Messwerte aus Abb. 5.3

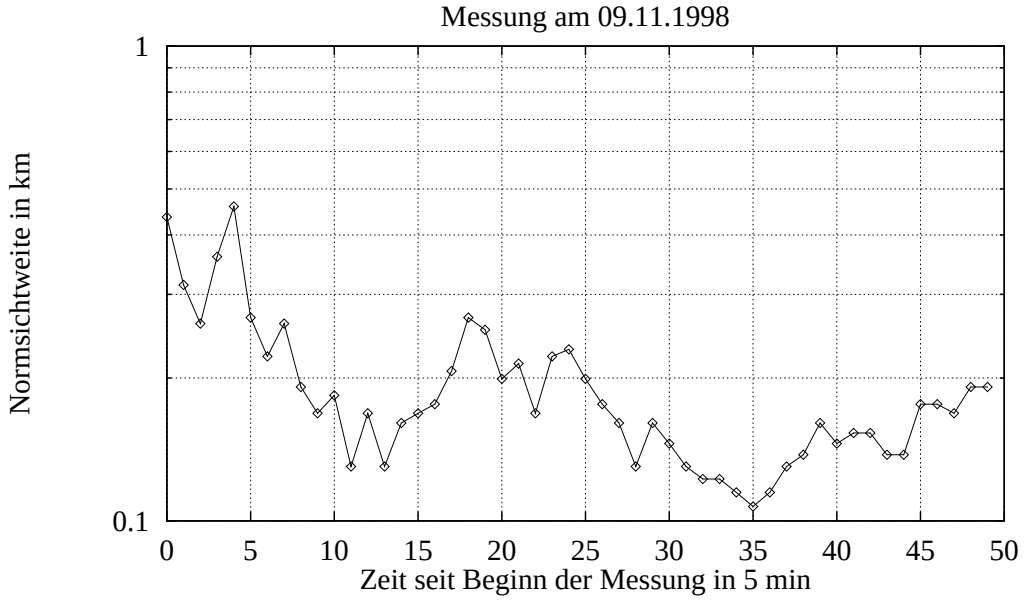
5.2.2 Zeitlicher Verlauf der gemessenen Normsichtweite

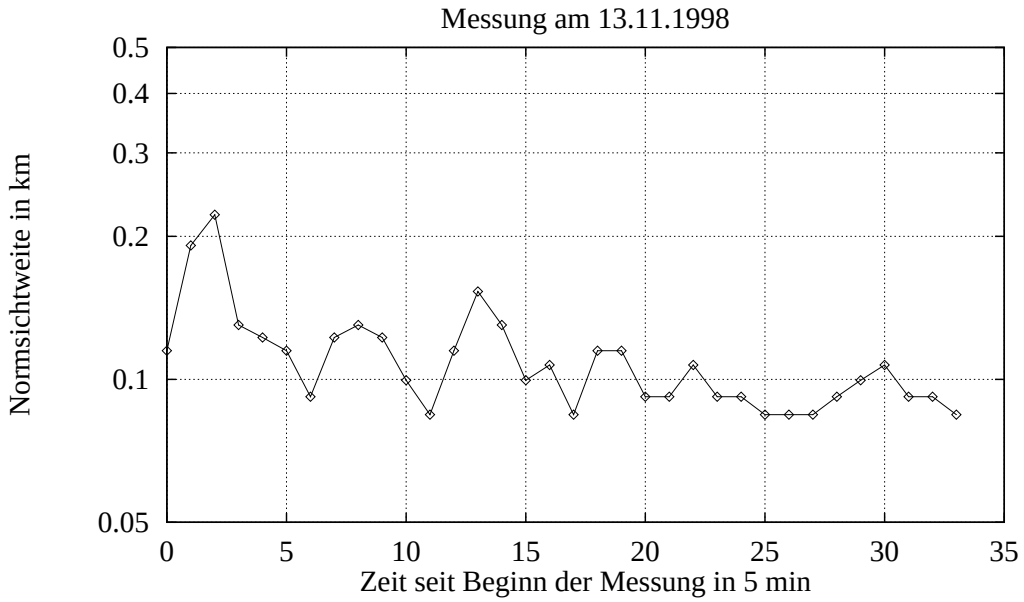
Die folgenden Diagramme zeigen den zeitlichen Verlauf der gemessenen Normsichtweite während ausgewählter Messungen, bei denen die Normsichtweite weniger als 10 km betrug.




Messung am 07.10.1998
10
1
Normsichtweite in km
0
5
10
15
20
25
Zeit seit Beginn der Messung in 5 min


Messung am 27.10.1998
1
0.1
Normsichtweite in km
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
Zeit seit Beginn der Messung in 5 min


Messung am 09.11.1998
Normsichtweite in km
1
0.1
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
Zeit seit Beginn der Messung in 5 min


Messung am 13.11.1998
Normsichtweite in km
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0.05
0
5
10
15
20
25
30
35
Zeit seit Beginn der Messung in 5 min

5.3 Sichtweitenergebnisse

5.3.1 Sichtweiten der Kernsituationen

Vereinbarungsgemäß umfassen die sog. Kernsituationen 6 ausgewählte Sehobjekte, deren Sichtweiten im gesamten Trübungs- und Helligkeitsbereich untersucht werden sollten. Zusammenfassend wurden die Feldmessungen unter folgenden Bedingungen durchgeführt:

- Messstrecken
  1. 600 m-Strecke: Sichtweitenmessungen im Dunstbereich im Frühjahr 1998 bis Herbst 1998
  2. 200 m-Strecke: Sichtweitenmessungen im Nebelbereich im Herbst 1998 bis Herbst 1999
- Versuchspersonen, siehe Tabelle B.2
  Anzahl: 12
  Alter: zwischen 27 - 53 Jahre
  Sehvermögen: normalsichtig, Visus 1
- Normsichtweiten
  zwischen 69 m und 30 631 m
- Horizontale Beleuchtungsstärken
  zwischen kleiner 1 lx und 52 000 lx.

Im Folgenden werden die Ergebnisse aller bisher durchgeführten Messungen dargestellt und kurz kommentiert. In den Diagrammen sind zusätzlich zu den reinen Messpunkten Funktionen der Form

$$S = a \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{-V_N}{b}\right)\right) \tag{5.1}$$

dargestellt. Hierbei wurden die Parameter a und b durch eine nichtlineare Approximation aus den Messwerten ermittelt. Der Zweck dieses Funktionsplottes ist die bessere visuelle Darstellung des tendenziellen Zusammenhanges zwischen der Fahrersichtweite S und der Normsichtweite V_N als das mit den einzelnen Messpunkten möglich ist. Diese Form einer Exponentialfunktion wurde gewählt, weil das Grenzwertverhalten sowohl für $V_N \to 0$ als auch für $V_N \to \infty$ dem zu erwartenden Zusammenhang entspricht. Zu beachten ist bei diesen Diagrammen, dass der Parameter „horizontale Beleuchtungsstärke“ in der Darstellung vollständig vernachlässigt wurde. Die Tabellen zu allen Messwerten befinden sich in Anhang B (Tabelle B.3 bis Tabelle B.15).

Eine gesonderte Darstellung der Ergebnisse der subjektiven Einschätzung der Sichtverhältnisse in Abhängigkeit von der Normsichtweite erfolgt in den Diagrammen 5.26 bis 5.28.

Nachtsituation
In den Abb. (5.5) bis Abb. (5.10) sind alle Einzelergebnisse dargestellt. Gezeigt werden jeweils die Ergebnisse für die Kriterien „Das Sehobjekt wurde gerade so erkannt“ und „Das Sehobjekt wurde sicher erkannt“.

In den Abb. (5.9) und Abb. (5.10) ist bei Normsichtweiten von mehr als 1 km bei beiden Erkennungskriterien eine Beschränkung der Fahrersichtweite bei 610 m zu erkennen. Die Ursache hierfür

ist die begrenzte Länge der Messstrecke. Die tatsächlichen Sichtweiten sind bei diesen Normsichtweiten und den Fahrzeugschlussleuchten als Sehobjekte wesentlich größer und konnten im Experiment nicht ermittelt werden.

Die Abb. (5.11) bis Abb. (5.14) zeigen die 4 Diagramme mit den Parameterkombinationen der sog. Kernuntersuchungen. Hierbei wurden jeweils die Werte für das Sichtbarkeitskriterium „sicher erkannt“ verwendet. Für Abb. (5.14) gelten die gleichen Einschränkungen wie bei Abb. (5.9) und Abb. (5.10), bei Normsichtweiten über 1 km konnten keine Fahrersichtweiten bestimmt werden.

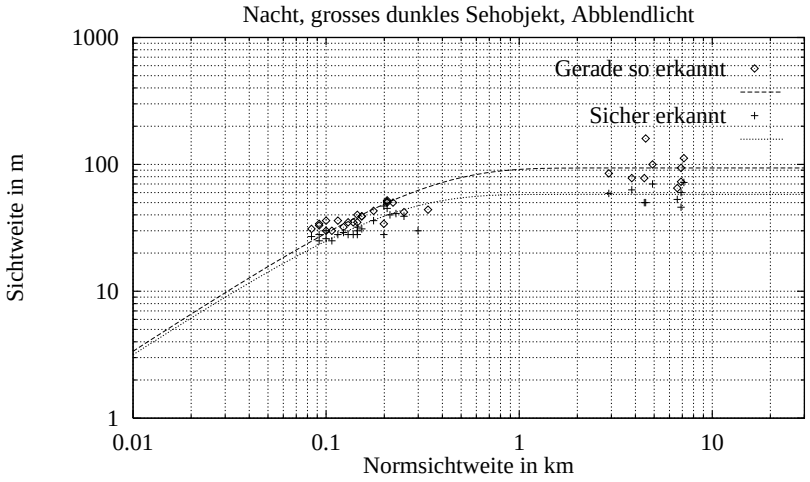


Abbildung 5.5: Nachtsituation, großes dunkles Sehobjekt, Abblendlicht am Versuchspersonenfahrzeug, Parameter: Erkennungssicherheit (siehe Tabelle B.3)

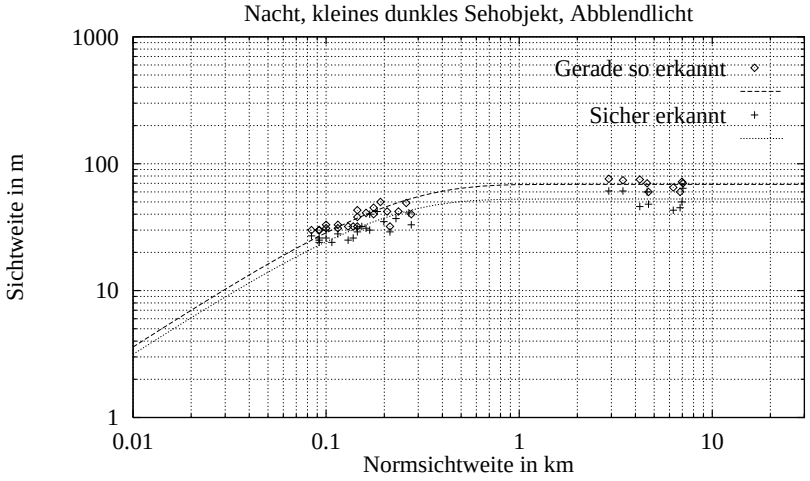


Abbildung 5.6: Nachtsituation, kleines dunkles Sehobjekt, Abblendlicht am Versuchspersonenfahrzeug, Parameter: Erkennungssicherheit (siehe Tabelle B.4)

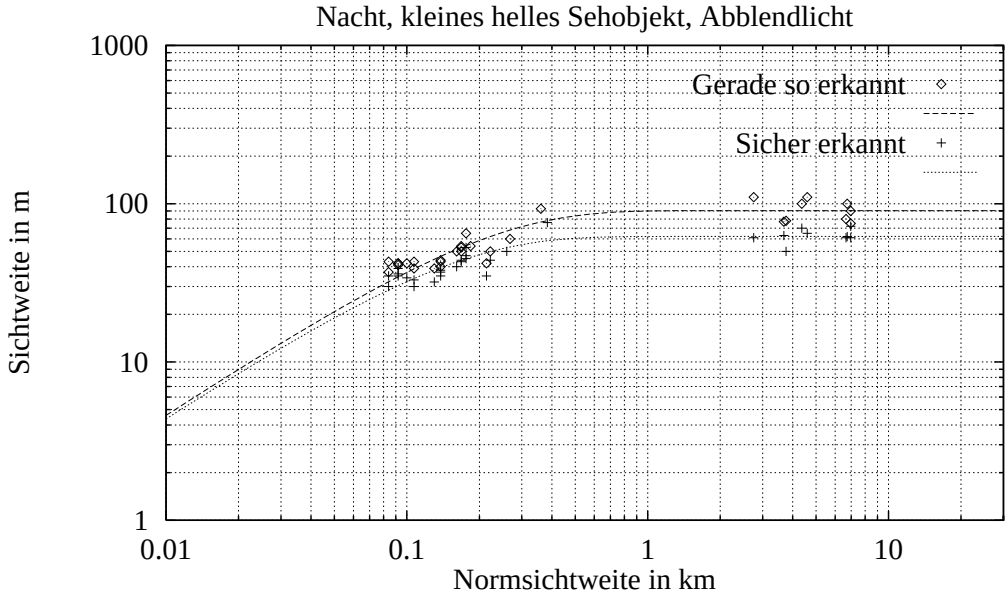


Abbildung 5.7: Nachtsituation, kleines helles Sehobjekt, Abblendlicht am Versuchspersonenfahrzeug, Parameter: Erkennungssicherheit (siehe Tabelle B.5)

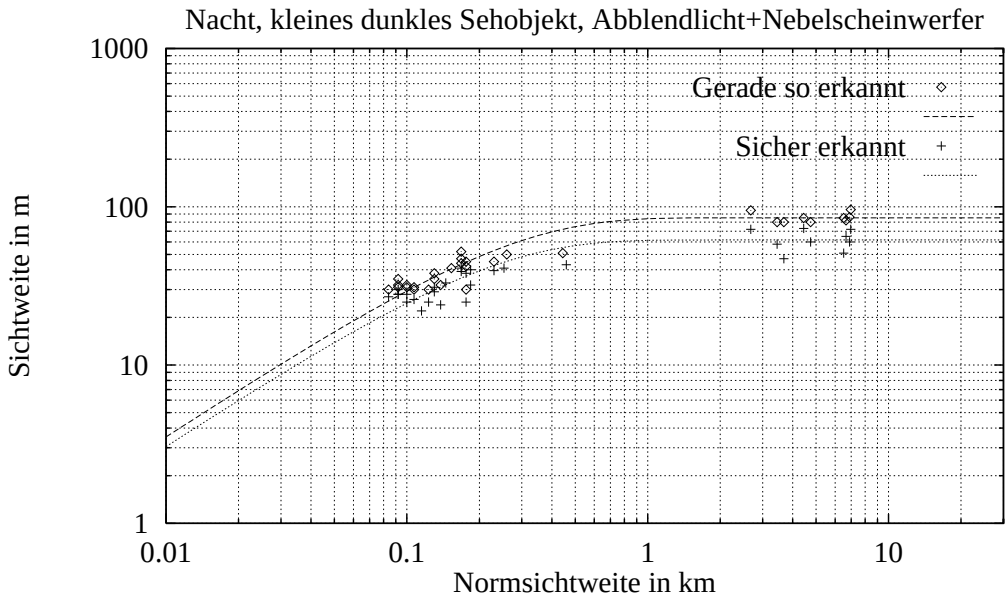


Abbildung 5.8: Nachtsituation, kleines dunkles Sehobjekt, Abblendlicht und Nebelscheinwerfer am Versuchspersonenfahrzeug, Parameter: Erkennungssicherheit (siehe Tabelle B.6)

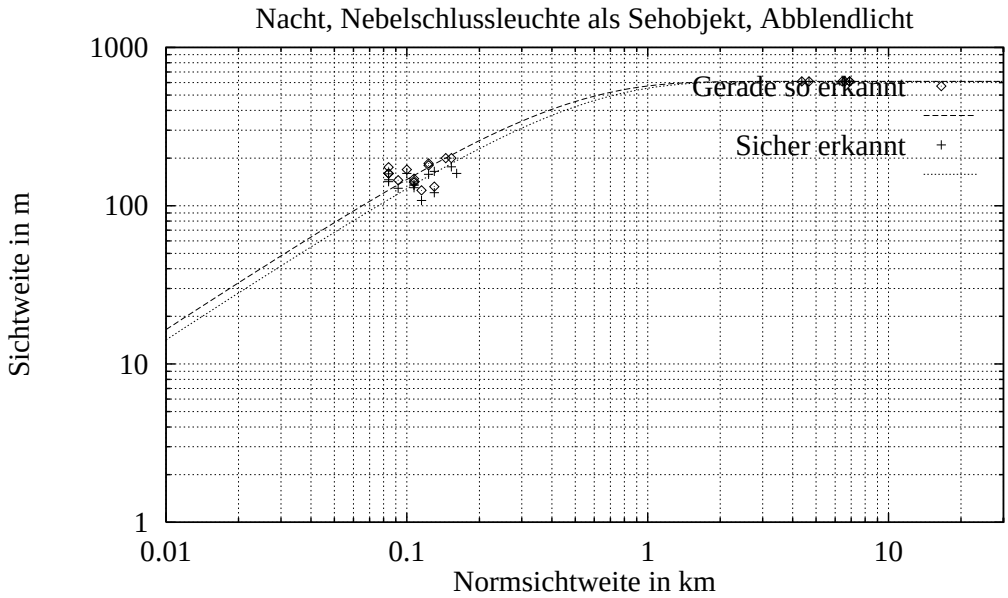


Abbildung 5.9: Nachtsituation, Nebelschlussleuchte als Sehobjekt, Abblendlicht am Versuchspersonenfahrzeug, Parameter: Erkennungssicherheit (siehe Tabelle B.7)

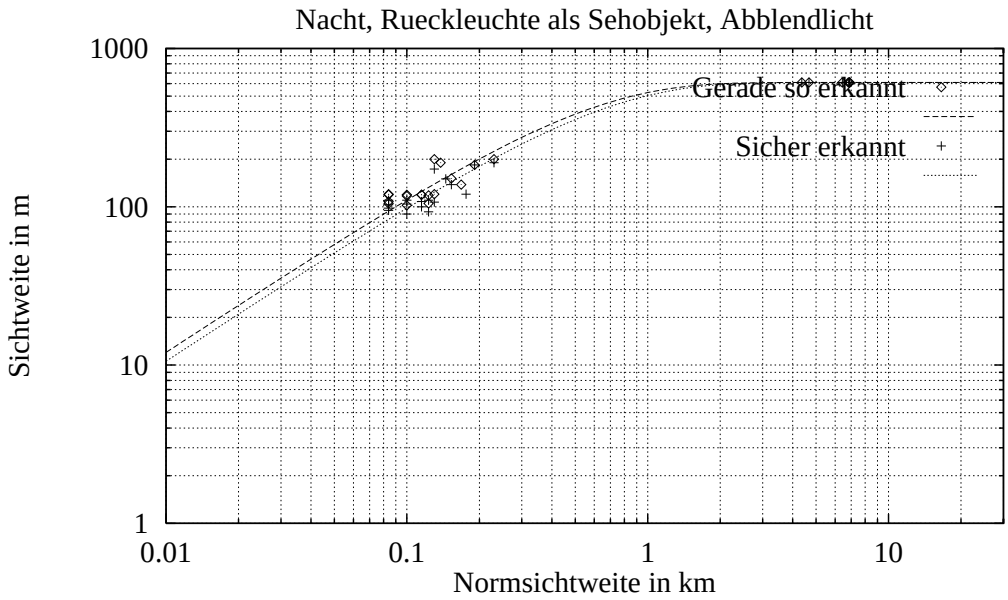


Abbildung 5.10: Nachtsituation, Schlussleuchten (Rückleuchten) als Sehobjekt, Abblendlicht am Versuchspersonenfahrzeug, Parameter: Erkennungssicherheit (siehe Tabelle B.8)

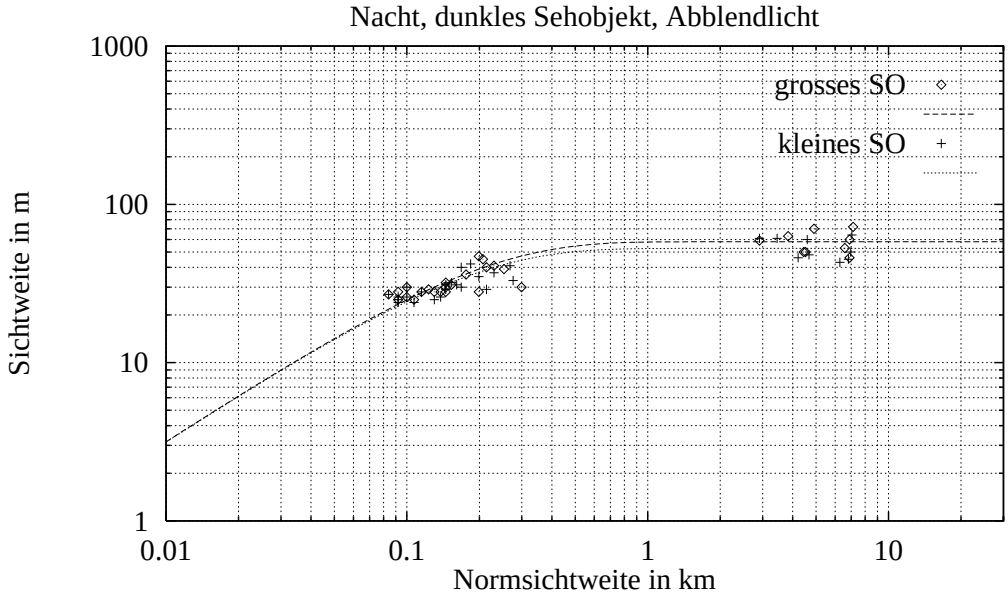


Abbildung 5.11: Nachtsituation, dunkles Sehobjekt, Abblendlicht am Versuchspersonenfahrzeug, sicher erkannt, Parameter: Sehobjektgröße

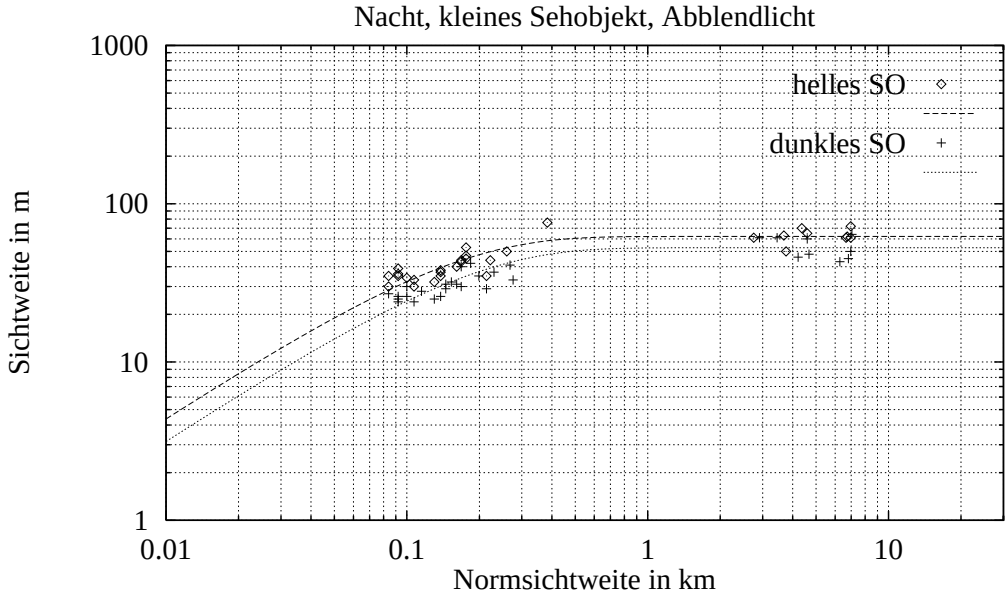


Abbildung 5.12: Nachtsituation, kleines Sehobjekt, Abblendlicht am Versuchspersonenfahrzeug, sicher erkannt, Parameter: Reflexionsgrad des Sehobjektes

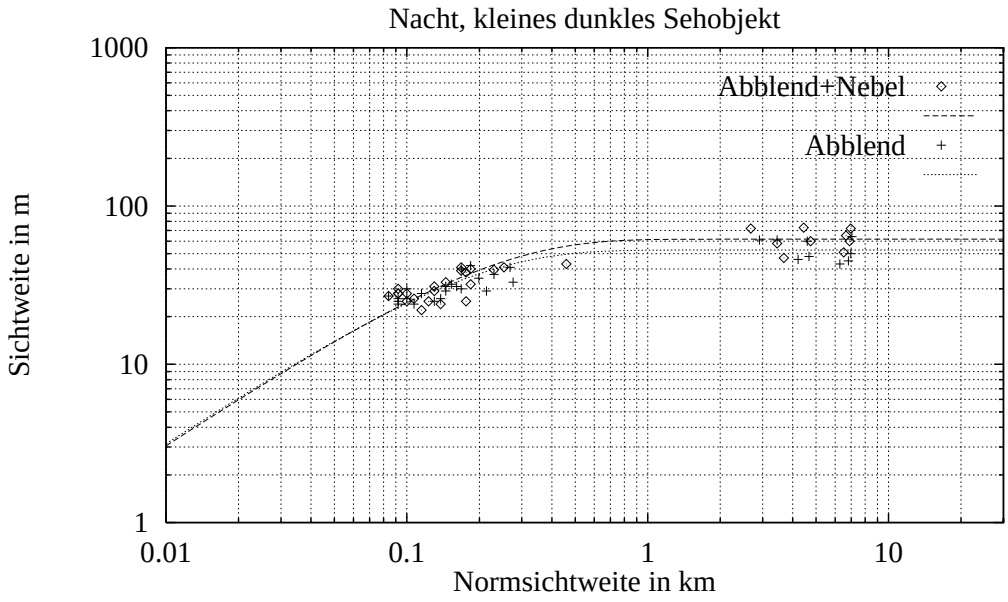


Abbildung 5.13: Nachtsituation, kleines dunkles Sehobjekt, sicher erkannt, Parameter: Beleuchtung am Versuchspersonenfahrzeug

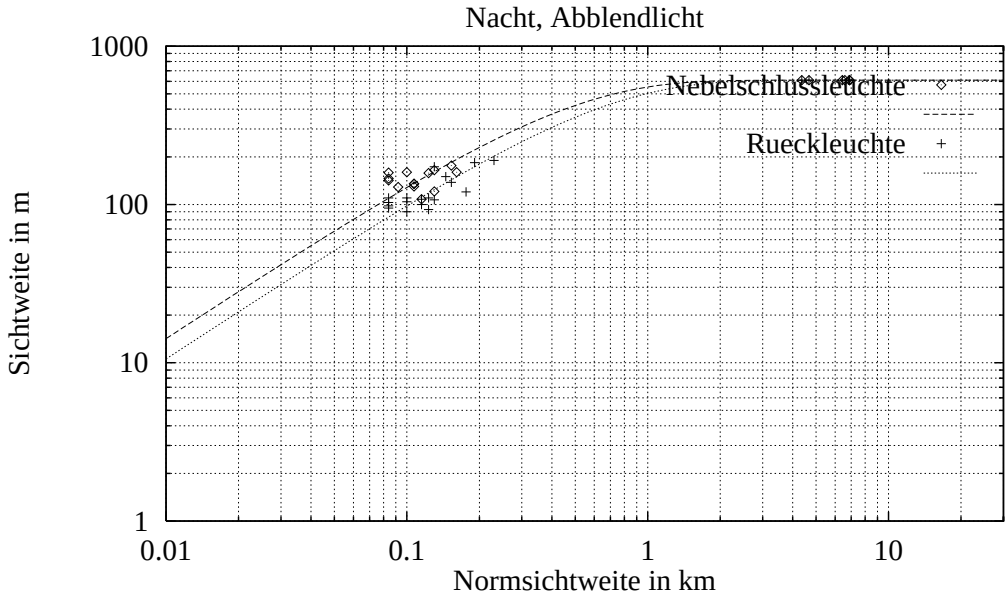


Abbildung 5.14: Nachtsituation, Abblendlicht am Versuchspersonenfahrzeug, sicher erkannt, Parameter: Art der rückwärtigen Signalleuchten am Versuchsfahrzeug (Sehobjekt)

Tagsituation

In den Abb. (5.15) bis Abb. (5.21) sind analog zur Nachtsituation alle Einzelergebnisse dargestellt. Gezeigt werden wieder die Ergebnisse für die Kriterien „Das Sehobjekt wurde gerade so erkannt“ und „Das Sehobjekt wurde sicher erkannt“. Die Abb. (5.22) bis Abb. (5.25) zeigen die 4 Diagramme mit den Parameterkombinationen der Kernuntersuchungen. Hierbei wurden jeweils die Werte für das Sichtbarkeitskriterium „sicher erkannt“ verwendet.

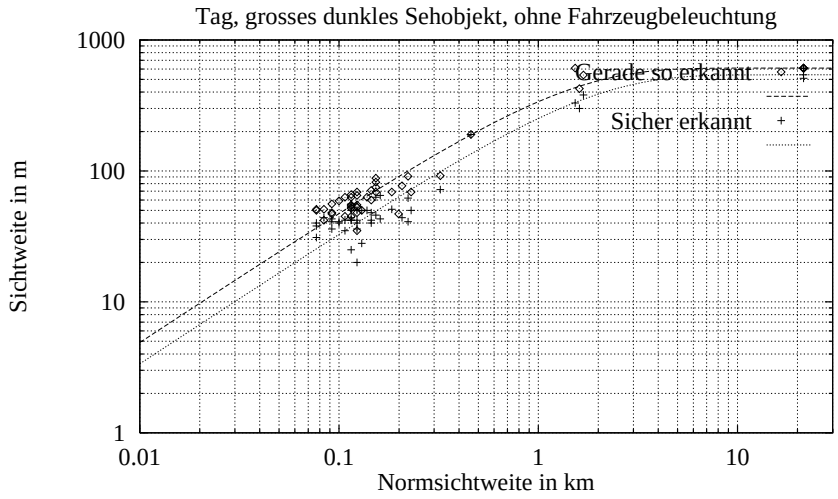


Abbildung 5.15: Tagsituation, großes dunkles Sehobjekt, kein Licht am Versuchspersonenfahrzeug, Parameter: Erkennungssicherheit (siehe Tabelle B.9)

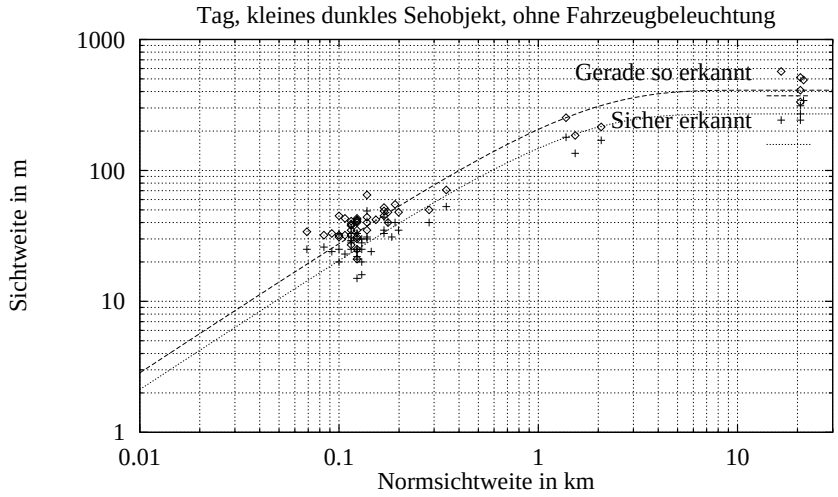


Abbildung 5.16: Tagsituation, kleines dunkles Sehobjekt, kein Licht am Versuchspersonenfahrzeug, Parameter: Erkennungssicherheit (siehe Tabelle B.10)

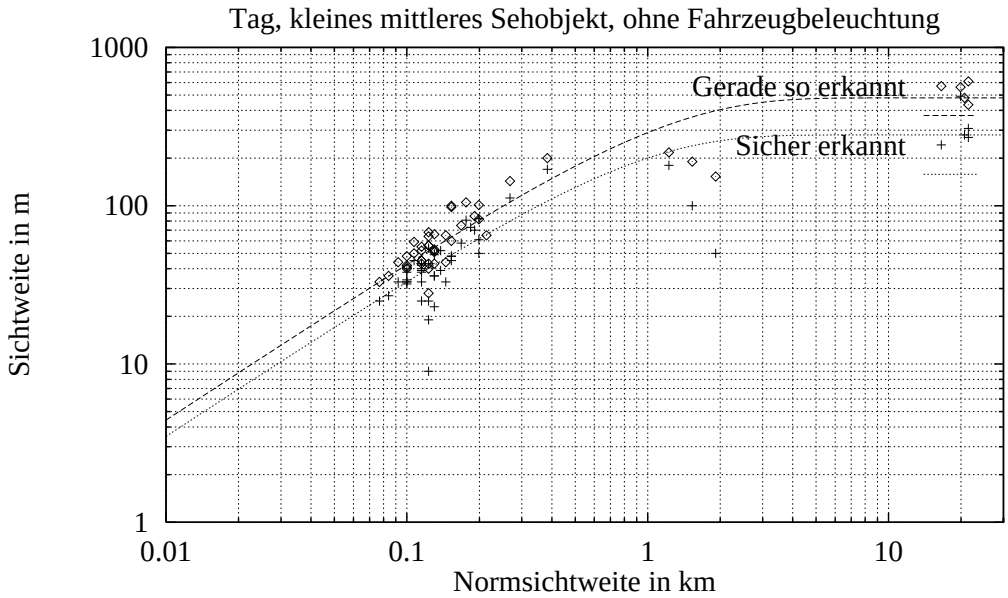


Abbildung 5.17: Tagsituation, kleines mittelhelles Sehobjekt, kein Licht am Versuchspersonenfahrzeug, Parameter: Erkennungssicherheit (siehe Tabelle B.11)

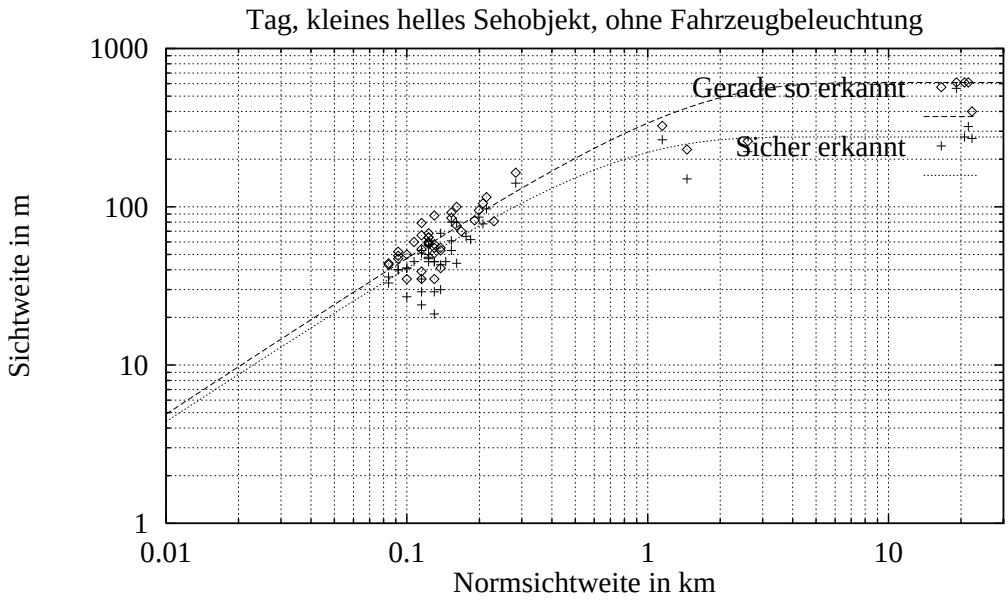


Abbildung 5.18: Tagsituation, kleines helles Sehobjekt, kein Licht am Versuchspersonenfahrzeug, Parameter: Erkennungssicherheit (siehe Tabelle B.12)

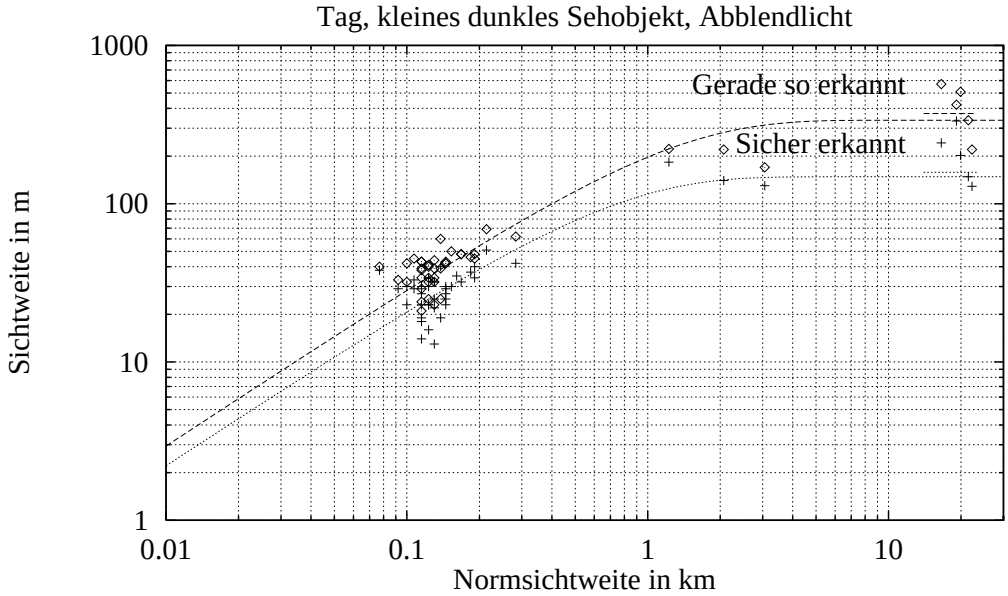


Abbildung 5.19: Tagsituation, kleines dunkles Sehobjekt, Abblendlicht am Versuchspersonenfahrzeug, Parameter: Erkennungssicherheit (siehe Tabelle B.13)

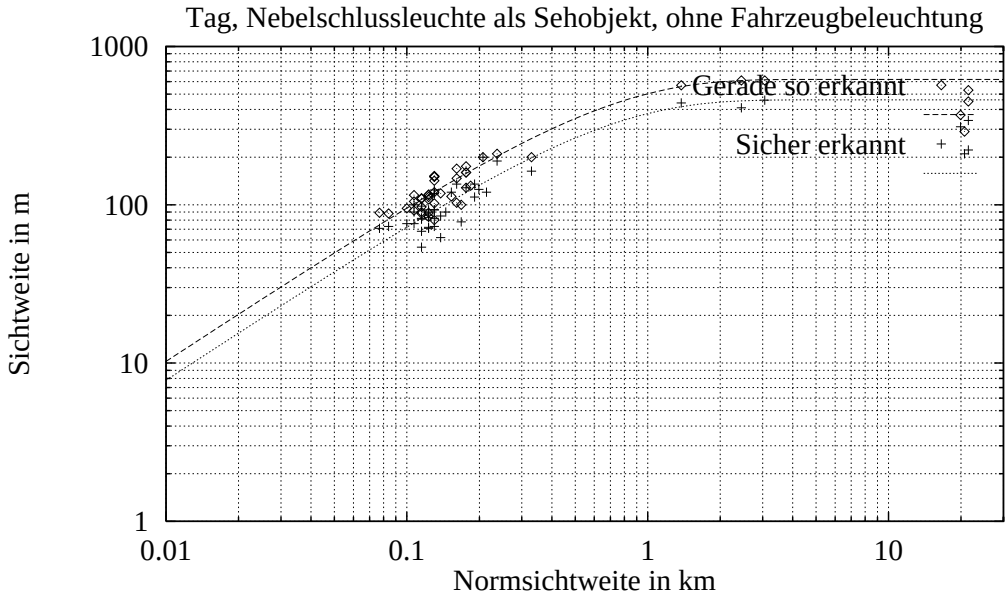


Abbildung 5.20: Tagsituation, Nebelschlussleuchte als Sehobjekt, kein Licht am Versuchspersonenfahrzeug, Parameter: Erkennungssicherheit (siehe Tabelle B.14)

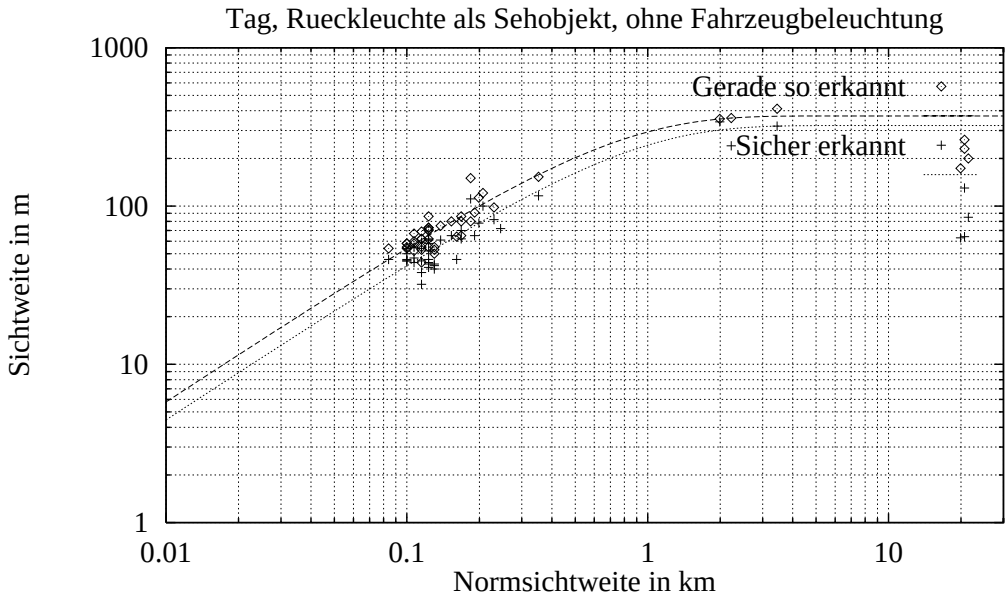


Abbildung 5.21: Tagsituation, Schlussleuchten (Rückleuchten)als Sehobjekt, kein Licht am Versuchspersonenfahrzeug, Parameter: Erkennungssicherheit (siehe Tabelle B.15)

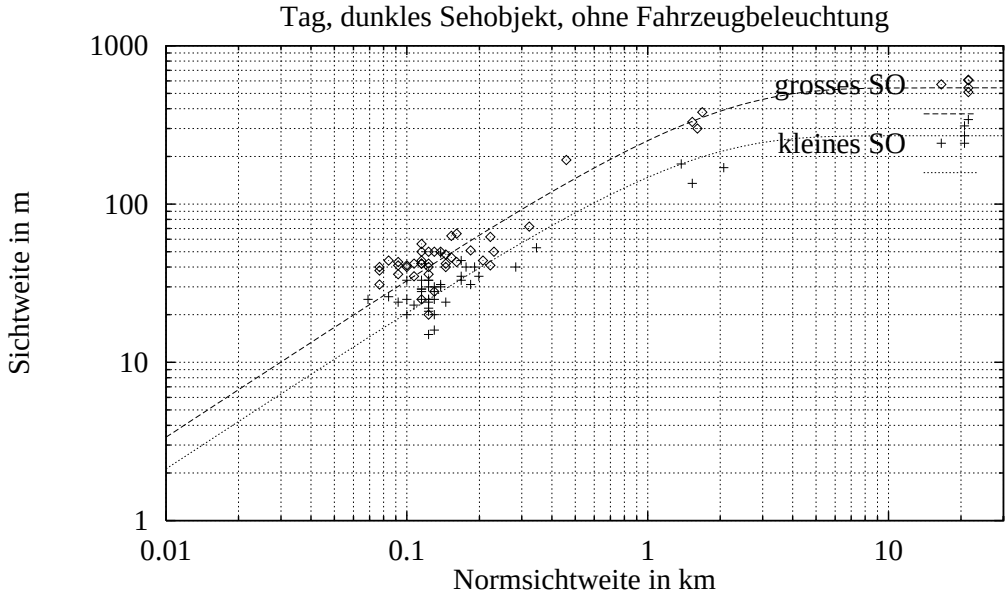


Abbildung 5.22: Tagsituation, dunkles Sehobjekt, kein Licht am Versuchspersonenfahrzeug, sicher erkannt, Parameter: Sehobjektgröße

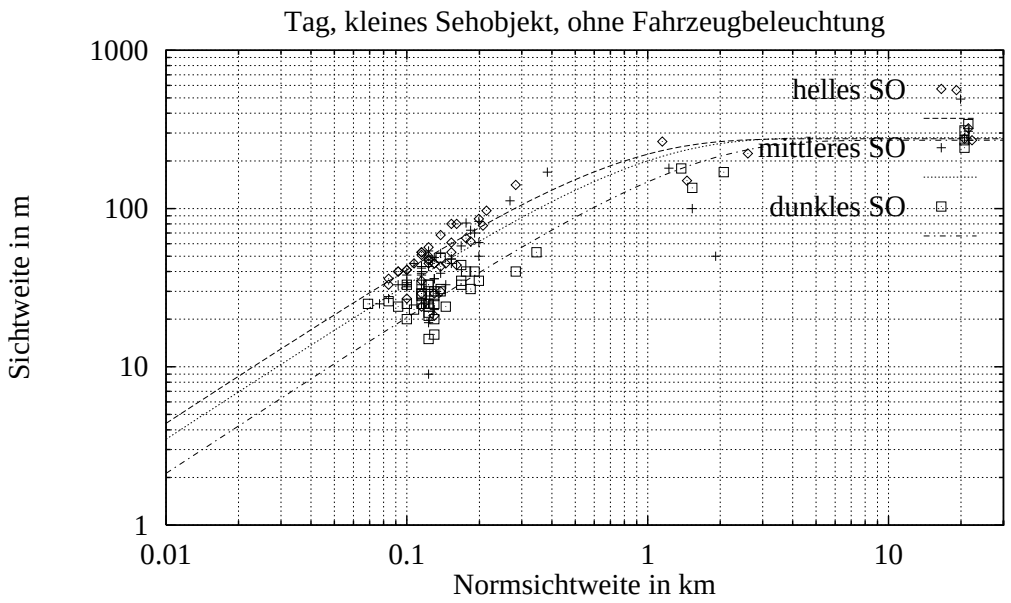


Abbildung 5.23: Tagsituation, kleines Sehobjekt, kein Licht am Versuchspersonenfahrzeug, sicher erkannt. Parameter: Reflexionsgrad des Sehobjektes

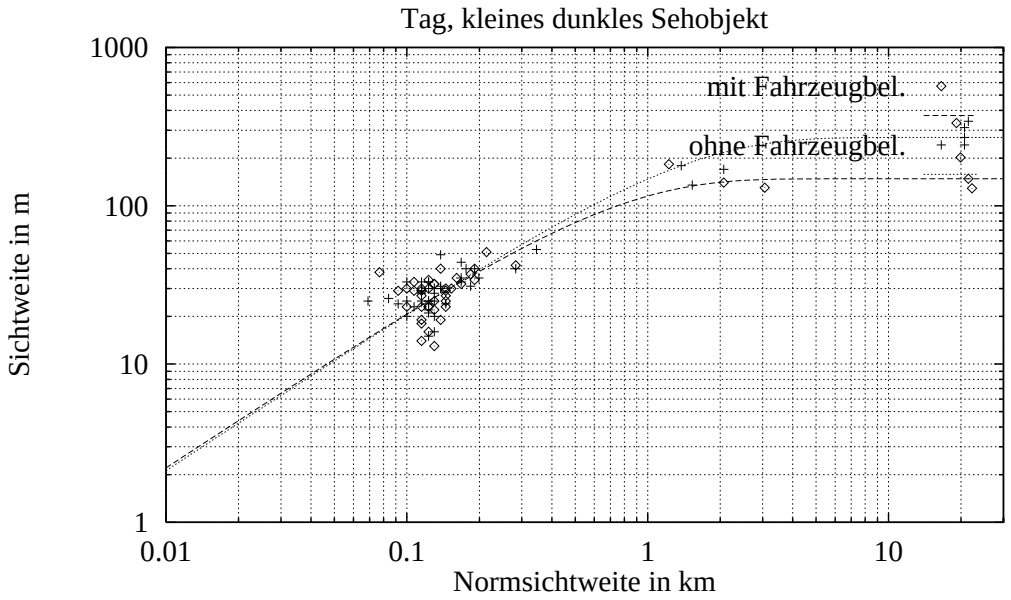


Abbildung 5.24: Tagsituation, kleines dunkles Sehobjekt, sicher erkannt. Parameter: Beleuchtung am Versuchspersonenfahrzeug

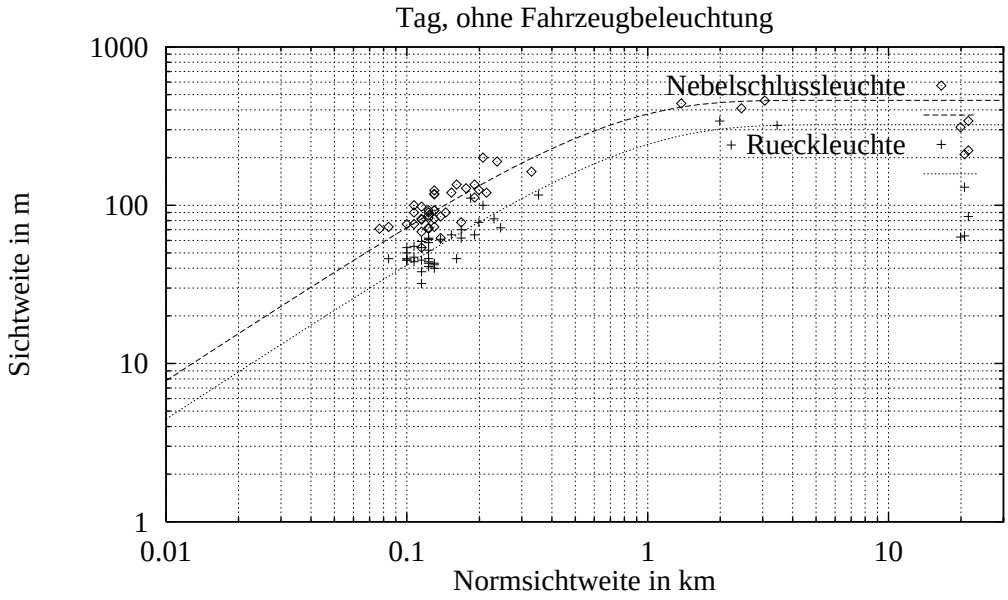


Abbildung 5.25: Tagsituation, kein Licht am Versuchspersonenfahrzeug, sicher erkannt. Parameter: Art der rückwärtigen Signalleuchten am Versuchsfahrzeug (Sehobjekt)

5.3.2 Subjektive Bewertung der Sichtverhältnisse

Während der Durchführung der experimentellen Messungen wurde jede Versuchsperson gebeten, auf einer Ratingskala die allgemeinen Sichtverhältnisse (unabhängig vom Sehobjekt) einzuschätzen. Dazu wurde eine Skala mit 15 Markierungen verwendet, bei der die Randwerte mit den verbalen Urteilen „ungenügend“ und „sehr gut“ vorgegeben waren.

Für die Auswertung wurden jeweils drei Markierungen zusammengefasst, so dass sich fünf mögliche Urteile ergeben, die mit den Noten „1“ (sehr gut) bis „5“ (ungenügend) bezeichnet wurden. In den Abb. (5.26) und Abb. (5.27) sind die Beobachterurteile getrennt für die Nacht- und Tagsituation und in Abb. (5.28) für alle Situationen in Abhängigkeit von der Normsichtweite dargestellt. Zur besseren visuellen Darstellung wurde zusätzlich versucht, ein Funktionsgraph einzuzeichnen. Hierzu diente eine modifizierte Wurzelfunktion, bei der die Parameter manuell angepasst wurden.

In allen drei Diagrammen fällt auf, dass das wertneutrale Urteil (Note 3) bei ca. 2 km Normsichtweite liegt. Vergleicht man dieses Ergebnis mit den experimentell bestimmten Fahrersichtweiten, so stellt man fest, dass in keiner Situation und bei keinem Sehobjekt bei 2 km Normsichtweite eine wesentliche trübungsbedingte Verkürzung der Fahrersichtweite erfolgt. Das subjektive Fahrerurteil (bei Fahrtbeginn) stimmt hier also sehr gut mit den tatsächlichen Sichtverhältnissen überein.

Anders ist dieser Zusammenhang bei Normsichtweiten kleiner als 300 m. Während für die Nachtsituation die Versuchspersonen bei diesen Normsichtweiten durchgehend Urteile mit der Note 5 abgeben, liegt bei den Tagsituationen diese Grenze bei ca. 100 m Normsichtweite.

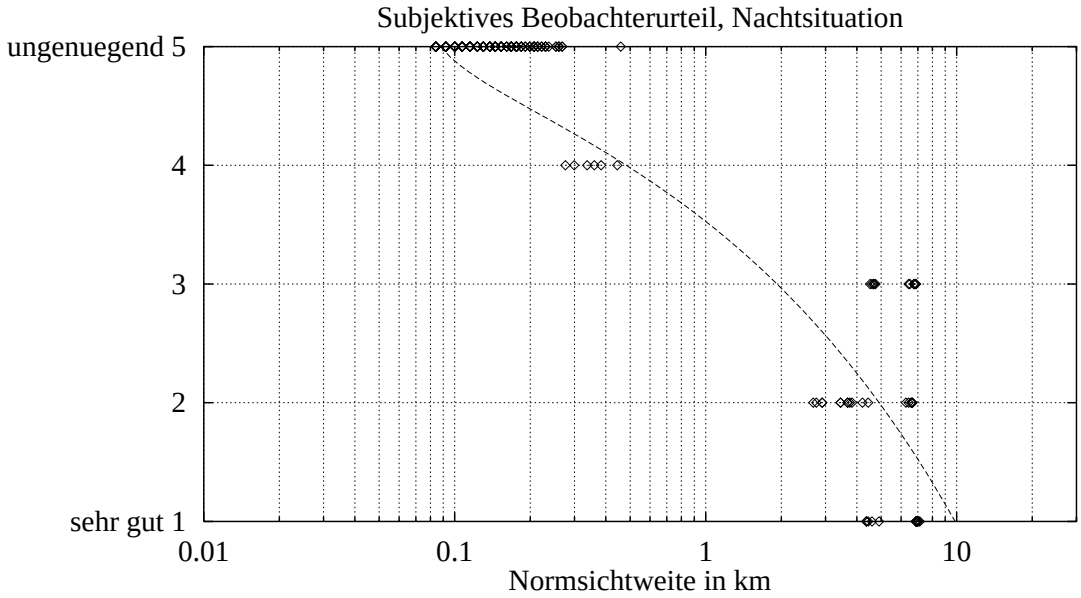


Abbildung 5.26: Subjektives Beobachterurteil über die allgemeinen Sichtverhältnisse für die Nachtsituationen in Abhängigkeit von der Normsichtweite

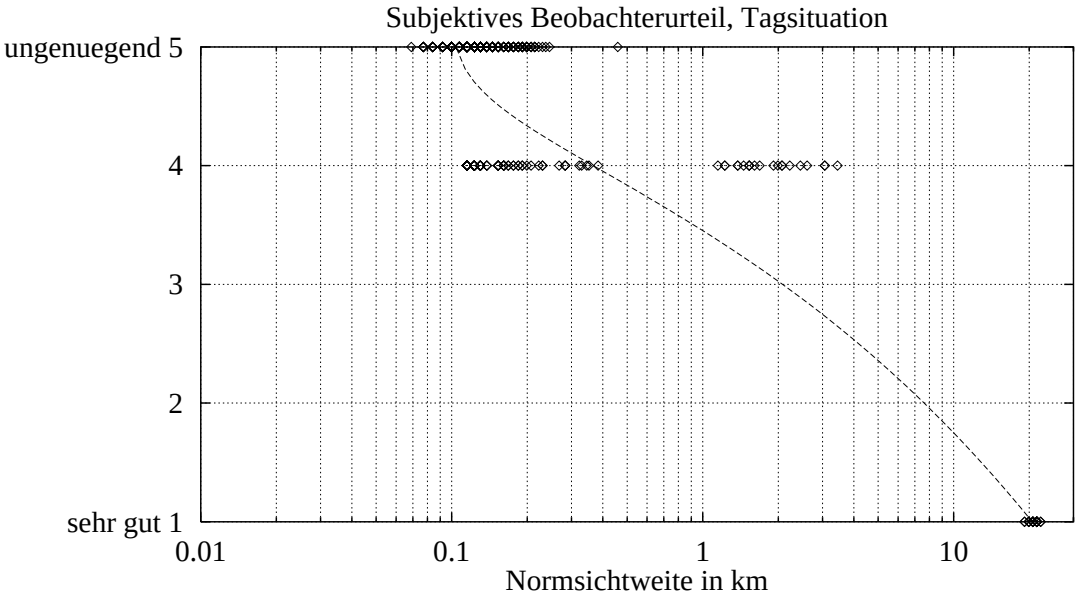


Abbildung 5.27: Subjektives Beobachterurteil über die allgemeinen Sichtverhältnisse für die Tagsituationen in Abhängigkeit von der Normsichtweite

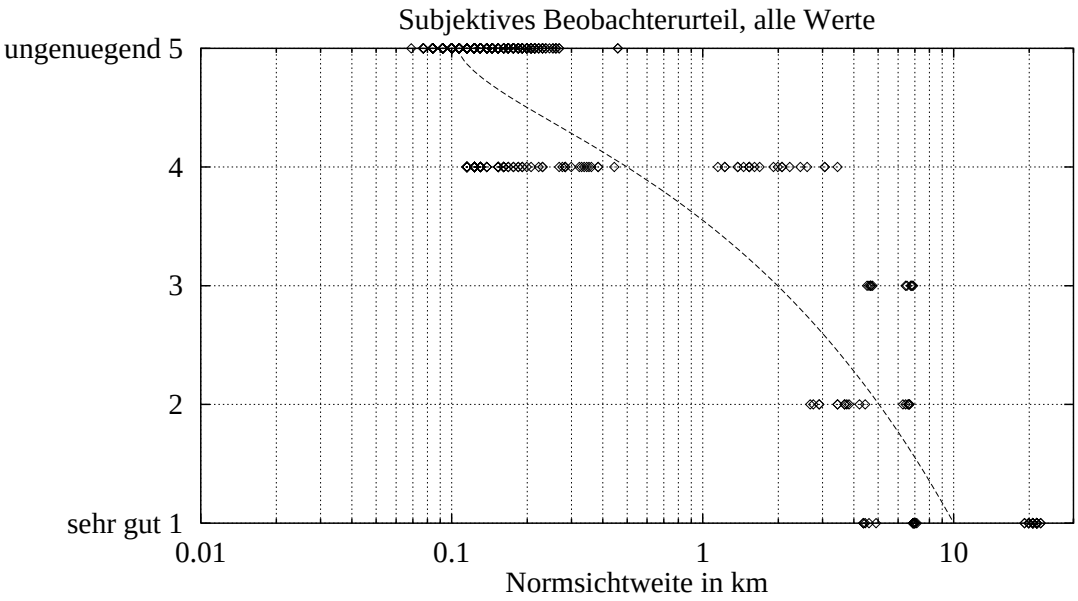


Abbildung 5.28: Subjektives Beobachterurteil über die allgemeinen Sichtverhältnisse für alle Versuchssituationen in Abhängigkeit von der Normsichtweite

5.3.3 Ergebnisse mit großem Versuchspersonenkollektiv bei trübungsfreier Atmosphäre (Nachtsituation)

Zur Datengewinnung aus einer größeren Testpersonenzahl als bei den Feldversuchen zur Messung lichttechnischer Variablen und realer Sichtweiten wurde ein Versuchspersonenkollektiv aus 29 Teilnehmern zusammengestellt, welche keine oder nur sehr geringe lichttechnische Kenntnisse besaßen. Die Ergebnisse enthält Tabelle B.16 von Anhang B. Ziel dieser Untersuchungen war ebenfalls die Bestimmung realer Sichtweiten auf der Teststrecke, jedoch wurden zuvor Kontrastempfindlichkeit und Visus der einzelnen Personen bestimmt, um den Einfluss dieser Größen auf die Sichtweite näher zu untersuchen.

Genaue Daten zu den Versuchspersonen sind in der Tabelle B.16 enthalten. Die Messungen wurden auf der kurzen Messstrecke (200 m, asphaltiert, gerade) bei Nacht und trübungsfreier Atmosphäre vorgenommen. Bei der vorhergehenden Messung von Kontrastempfindlichkeit und Visus der Versuchspersonen wurden diese über die Messmethodik und den Versuchsablauf auf der Teststrecke informiert. In diesem Feldversuch wurde die Anzahl der Sehobjekte aus Zeitgründen auf die kleinen Sehobjekte ($0,3 \times 0,3$ m) mit den Reflexionsgraden 23,3 % (dunkel) und 70,5 % (hell) begrenzt und auf Messungen mit der Leuchtdichtekamera verzichtet. Ansonsten gestaltete sich der Versuchsablauf analog zu dem der Kernuntersuchungen. Nach Bekanntgabe der zu erwartenden Sehsituation wurde die Versuchsperson gebeten, zunächst langsam auf das noch unsichtbare Sehobjekt zuzufahren und anzuhalten, wenn das Sehobjekt gerade wahrgenommen wurde (Schwellensituation). Nach Messung der Entfernung fuhr das Versuchspersonenfahrzeug weiter, bis das Sehobjekt nach Einschätzung der Versuchsperson sicher erkannt werden konnte. Dieser Entfernungswert wurde ebenfalls festgehalten.

Jede Versuchsperson bekam beide Parameterkombinationen zweimal zu sehen, so dass sich insgesamt 232 Messwerte ergaben. Während der gesamten Messzeit (ca. 5 Stunden) wurden die Leuchtdichte im 10°-Messfeld und die horizontale Beleuchtungsstärke auf dem Fahrzeugdach durch das Demonstrations-Messsystem gemessen und protokolliert. Die Ergebnisse sind in den Abb. (7.5) und Abb. (7.6) enthalten.

Statistische Untersuchungen der Häufigkeitsverteilungen der Sichtweitenmesswerte ergaben nicht, dass diese Werte keiner Normalverteilung unterliegen (Abb. (5.29), Abb. (5.30), Abb. (5.31) und Abb. (5.32)). Wie der Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest belegt, ist die Irrtumswahrscheinlichkeit der Annahme einer Nicht-Normalverteilung bei allen Sehsituationen stets größer als 5 %. Die Irrtumswahrscheinlichkeiten sehen konkret wie folgt aus:

- kleines dunkles Sehobjekt - gerade erkannt: 98,5 %
- kleines dunkles Sehobjekt - sicher erkannt: 93,3 %
- kleines helles Sehobjekt - gerade erkannt: 74,4 %
- kleines helles Sehobjekt - sicher erkannt: 10,5 %

Deshalb ist eine Nicht-Normalverteilung statistisch nicht belegt. Wie Abb. (5.33) zeigt, besteht zwischen den Sichtweiten bei verschiedenen Reflexionsgraden ein sehr signifikanter Unterschied. Die Annahme einer Korrelation zwischen Sichtweite und Reflexionsgrad ergab eine Irrtumswahrscheinlichkeit von weniger als 0,5 %. Deshalb ist die Abhängigkeit der Sichtweite vom Reflexionsgrad statistisch belegt.

Ein Zusammenhang der Sichtweite mit der Kontrastempfindlichkeit der Versuchspersonen konnte nicht gefunden werden, da die Versuchsgruppe eine homogene Kontrastempfindlichkeit ohne markante Ausreißer aufwies. Die Kontrastempfindlichkeiten wurden mittels einer Raumfrequenz-Mustertafel „Vistec“ ermittelt.

Obwohl in Abb. (5.34) mit steigendem Visus eine Tendenz zu größeren Sichtweiten hin erkennbar ist, konnte diese statistisch nicht belegt werden. Die Annahme einer Korrelation zwischen Sichtweite und Visus ergab stets eine Irrtumswahrscheinlichkeit größer als 5 %. Folgende Irrtumswahrscheinlichkeiten wurden ermittelt:

- kleines dunkles Sehobjekt - gerade erkannt: 35,4 %
- kleines dunkles Sehobjekt - sicher erkannt: 81,2 %
- kleines helles Sehobjekt - gerade erkannt: 10,5 %
- kleines helles Sehobjekt - sicher erkannt: 53,8 %

Die Zusammenfassung aller Sichtweitenmittelwerte (Stichprobenzahlerhöhung) ergab bei der Annahme einer Korrelation zwischen Sichtweite und Visus eine Irrtumswahrscheinlichkeit von 27,7 % (Abb. (5.35)). Daher besteht kein signifikanter Unterschied zwischen den Sichtweiten bei verschiedenem Visus. Eine Abhängigkeit der Sichtweite vom Visus ist statistisch nicht belegt.

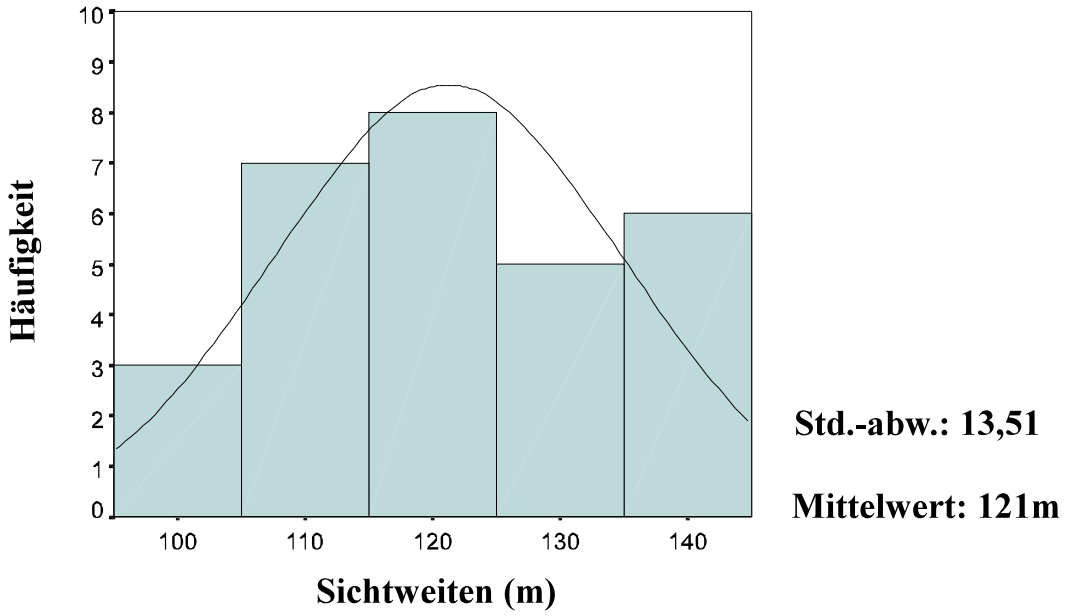


Abbildung 5.29: Häufigkeitsverteilung der Sichtweitenmesswerte (kleines dunkles Sehobjekt, gerade erkannt)

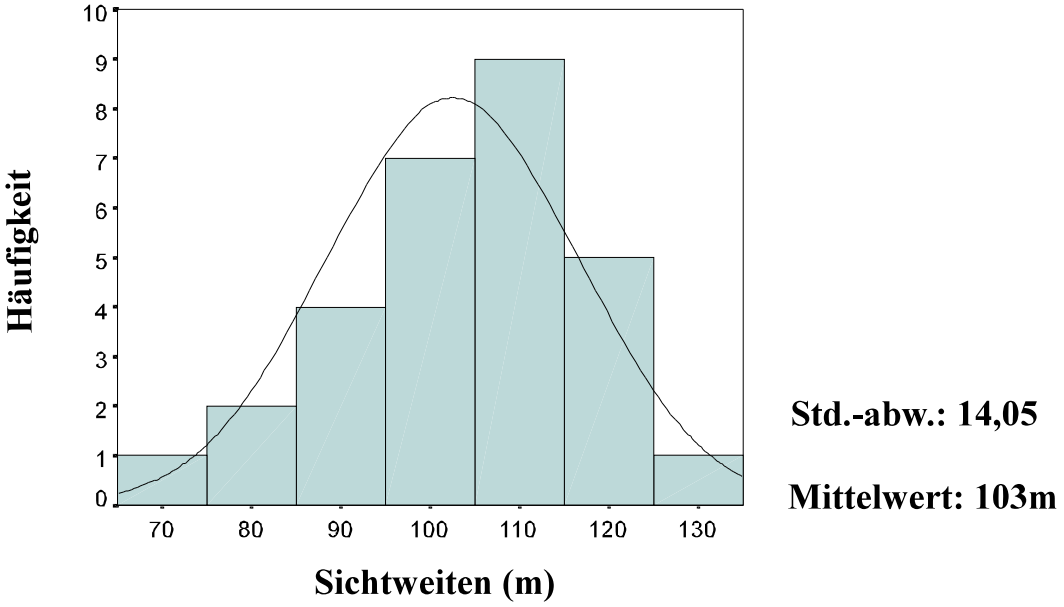


Abbildung 5.30: Häufigkeitsverteilung der Sichtweitenmesswerte (kleines dunkles Sehobjekt, sicher erkannt)

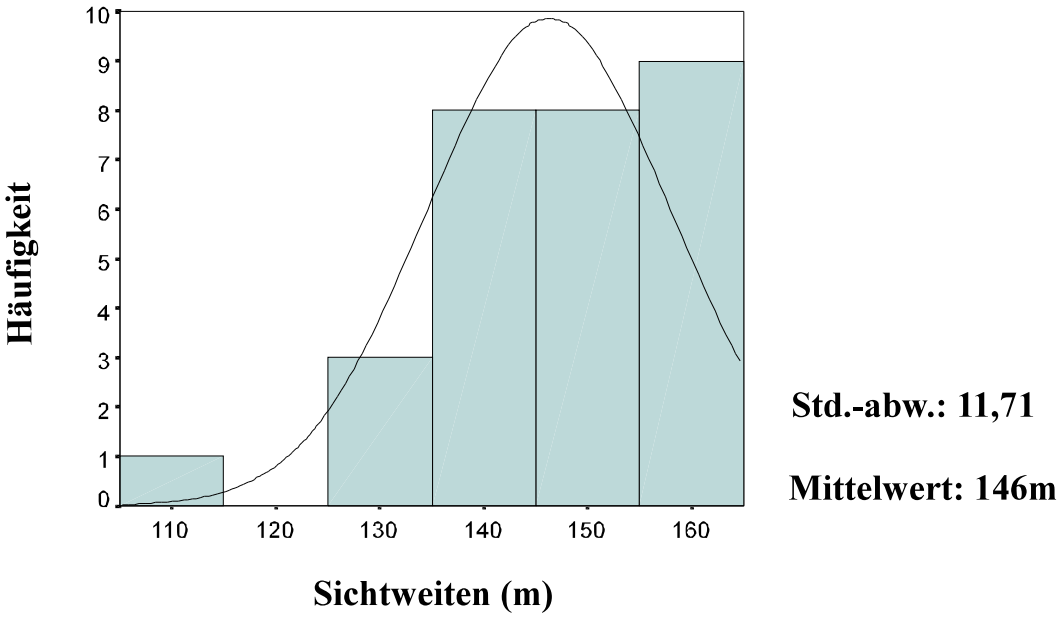


Abbildung 5.31: Häufigkeitsverteilung der Sichtweitenmesswerte (kleines helles Sehobjekt, gerade erkannt)

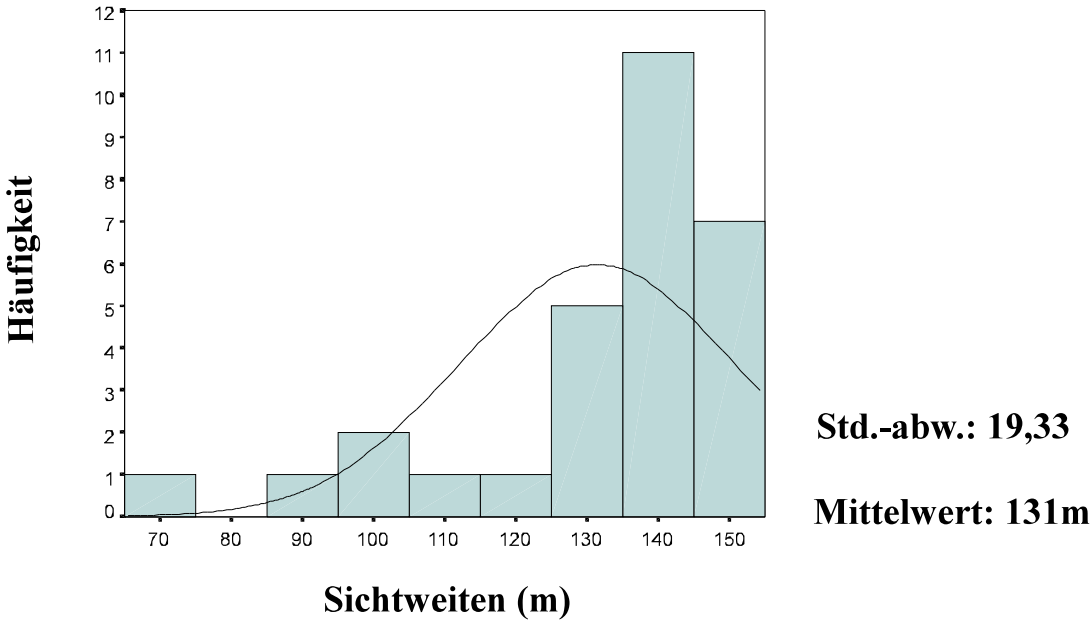


Abbildung 5.32: Häufigkeitsverteilung der Sichtweitenmesswerte (kleines helles Sehobjekt, sicher erkannt)

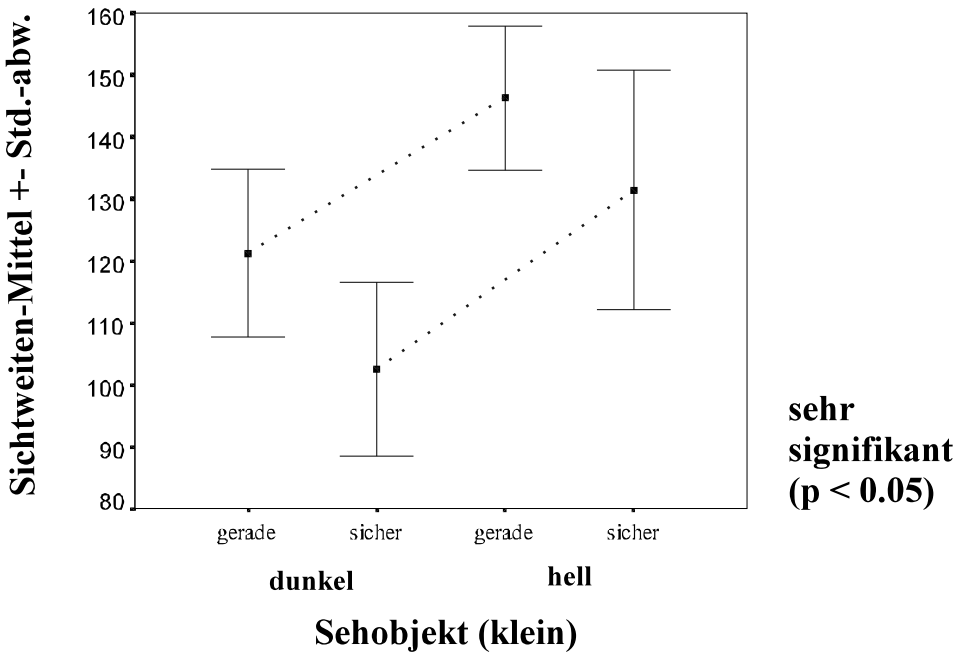


Abbildung 5.33: Sichtweitenmittelwerte und -standardabweichung in Abhängigkeit vom Sehobjekt

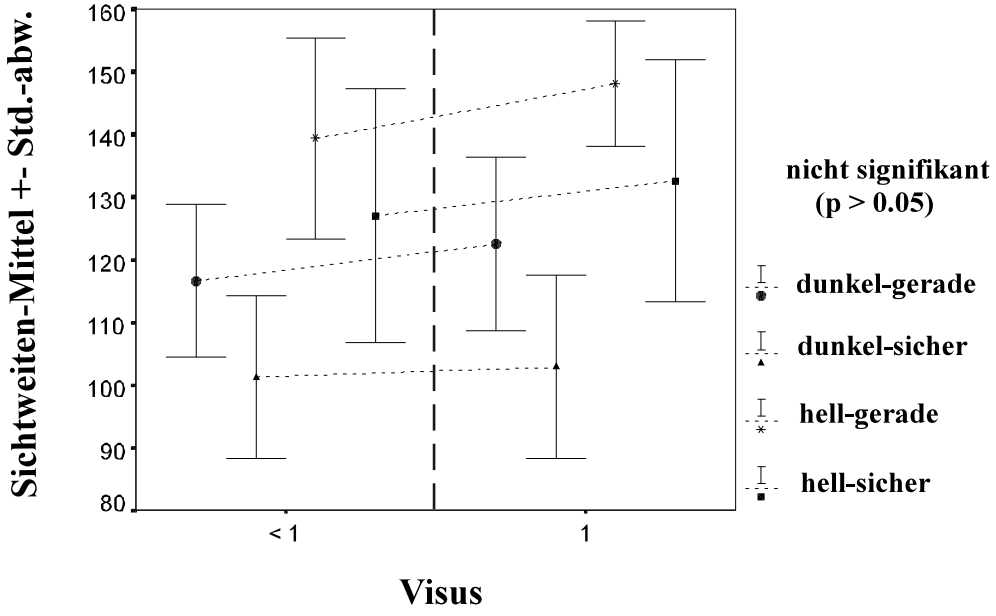


Abbildung 5.34: Sichtweitenmittelwerte und -standardabweichung in Abhängigkeit vom Visus der Versuchspersonen

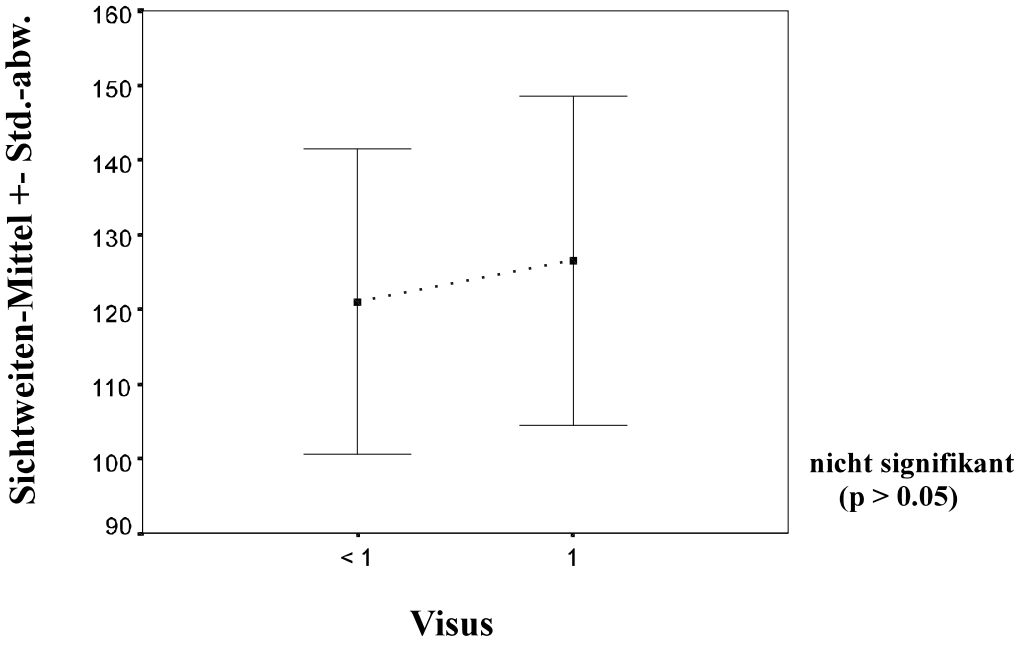


Abbildung 5.35: Sichtweitenmittelwerte und -standardabweichung in Abhängigkeit vom Visus der Versuchspersonen (Mittelwerte für alle Sehobjekte)

Kapitel 6

Messung des Visibility Levels

Inhalt dieses Kapitels ist die Darstellung der Ergebnisse von direkten Messungen des Visibility Levels einer ausgewählten Beobachtungssituation.

In einer diesen Untersuchungen vorausgehenden Projektstudie (Völker,Gall, 1997) wurde gezeigt, dass man mit Sichtbarkeitsmessgeräten (Visibilitymetern) den Überschwelligkeitsfaktor (Visibility Level VL) für die Erkennbarkeit von verkehrsrelevanten Sehobjekten reproduzierbar ermitteln kann. Da in den vorliegenden Untersuchungen in Nebelsituationen auf den Einsatz der Visibilitymeter aus Zeitgründen verzichtet werden musste, sollte zumindest mit den lichttechnischen Parametern, die in den Nebelsituationen bei Nacht typisch waren, einige Tauglichkeitstests mit den Visibilitymetern in einem Feldversuch durchgeführt werden. Da sich bei der Versuchsdurchführung der Nebelexperimente gezeigt hatte, dass die Bewertung der Selbstleuchter anders erfolgte als bei den nichtleuchtenden Sehobjekten, wurden einige VL- Messungen für einen Selbstleuchter durchgeführt.

6.1 Auswahl der lichttechnischen Parameter

Um den Selbstleuchter bei verschiedenen Nebelsituationen zu simulieren, wurde die linke Schlussleuchte des Versuchsfahrzeuges stufenlos dimmbar gemacht. Sie diente dann als Sehobjekt ($13 \times 4\,\mathrm{cm}$) in einem aufgehellten Umfeld ($3 \times 2\,\mathrm{m}$), dessen Leuchtdichte aus großer Anstrahlentfernung (Gleichmäßigkeit) ebenfalls mit stufenloser Dimmung geändert werden konnte. Somit bestand die Möglichkeit, den Kontrast der gesamten Sehsituation zu variieren. Um Retroreflexionseffekte der Schlussleuchte zu vermeiden, erfolgte die Aufhellung des Umfeldes seitlich, da sich der Beobachter im Versuchspersonenfahrzeug sitzend in einer Flucht (gerade, asphaltierte Straße, 100 m Messentfernung) mit dem Sehobjekt befand. Die Messungen wurden auf der 200 m Messstrecke durchgeführt. Abb. (6.1) zeigt eine solche typische Sehsituation für den Beobachter.

Für die Festlegung der relevanten Leuchtdichten, die in Nebelsituationen bei Normsichtweiten $V_N < 150\ m$ auftreten, wurden alle Leuchtdichtebilder für Selbstleuchter ausgewertet und daraus für die VL-Messungen folgende Parameter ausgewählt:

Objektleuchtdichte L_z in $[cd/m^2]$	Umfeldleuchtdichte L_u in $[cd/m^2]$	Leuchtdichteverhältnisse L_z/L_u	Kontrast $C = (L_z/L_u) - 1$
3		53	52
11	0,056	196	195
110		1964	1963
3		9	8
11	0,336	33	32
110		327	326

Da nach Gl. (2.3) der Kontrast C über die Objekt- und Umfeldleuchtdichte definiert ist, gilt:

$$C = \frac{|L_z - L_u|}{L_u} = \left|\frac{L_z}{L_u} - 1\right| \tag{6.1}$$

Es bedeuten C den Sehobjektkontrast, L_z die Sehobjektleuchtdichte und L_u die Untergrundleuchtdichte, die hier identisch mit der Leuchtdichte des Umfeldes ist.

Bei großen Leuchtdichteverhältnissen ($L_z/L_u \gg 1$) wird damit $C \approx L_z/L_u$. Mit den oben genannten Leuchtdichtekombinationen ergeben sich pro VL-Messgerät und Versuchsperson bei zehn Messwerteinstellungen pro Situation 60 Messwerte. Die VL-Messungen wurden mit drei Versuchspersonen durchgeführt. Die Ergebnisse enthält Tabelle B.17 in Anhang B

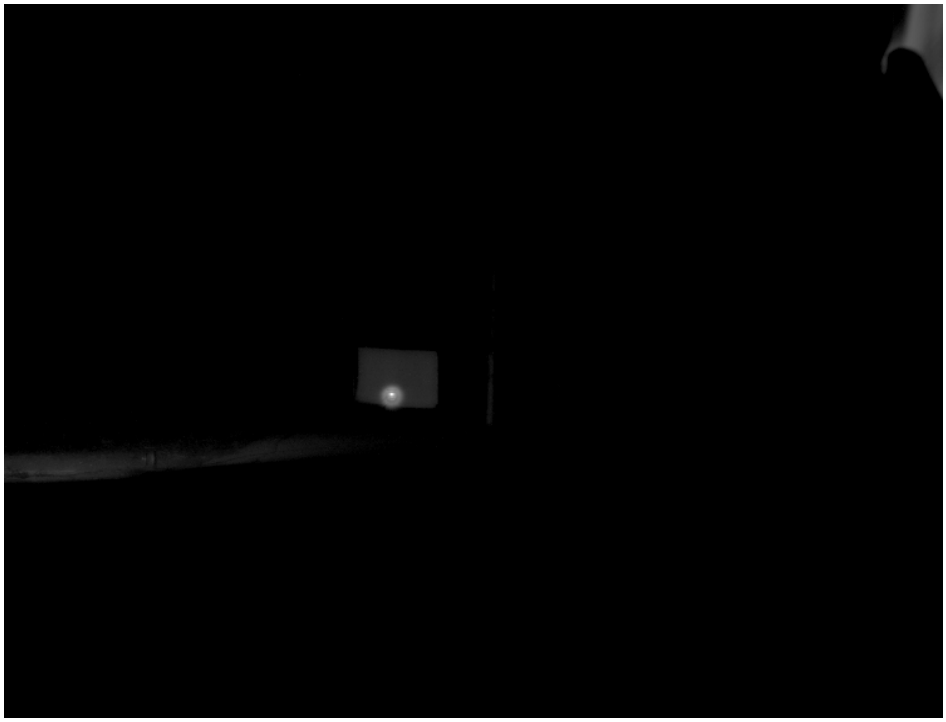


Abbildung 6.1: Typische Versuchssituation während der VL-Messungen (Messentfernung 100 m)

6.2 Auswahl des Visibilitymeterprinzips und Messergebnisse

In der Projektstudie (Völker,Gall, 1997) wurden drei Typen von VL-Metern getestet:

1. VL-Meter nach dem Prinzip der Störüberlagerung der Leuchtdichte (Stör-VL-Meter)
2. VL-Meter zur Ermittlung des Schwellenleuchtdichteniveaus bei gegebenem Kontrast (Schwellenleuchtdichte-VL-Meter)
3. VL-Meter zur Ermittlung des Schwellenkontrastes von realen Sehobjekten (Schwellenkontrast-VL-Meter)

In diesem Projekt zeigte sich, dass alle drei VL-Metertypen zur Vermessung der Sichtbarkeit geeignet sind. Da jedoch das Stör-VL-Meter auf einer anderen Kontrastmetrik aufbaut, als die in den vorliegenden Untersuchungen verwendete Kontrastmetrik, wurde auf den Einsatz des Gerätes aus Zeitgründen verzichtet.

Das **Schwellenleuchtdichte-VL-Meter** schwächt das Leuchtdichteniveau einer beleuchteten Szene soweit ab, bis das Objekt nicht mehr wahrgenommen werden kann. Bei den vorliegenden Untersuchungen wurde die Schwächung durch gekreuzte Polarisatoren bewirkt (sog. Polavis-Gerät). Die Schwellenleuchtdichte $\overline{L}$ kann dann aus dem Verdrehungswinkel α der Polarisatoren gegeneinander und der Adaptationsleuchtdichte L_a nach der Beziehung

$$\overline{L} = 0,097 \cdot \sin^2 \alpha \cdot L_a \tag{6.2}$$

bestimmt werden. Der Faktor 0,097 gibt dabei den Transmissionsgrad des Polavis-Gerätes bei Parallelstellung beider Polarisationsfilter an. Als Adaptationsleuchtdichte L_a wurde die Umfeldleuchtdichte $L_U = 0,056\,\mathrm{cd/m^2}$ bzw. $0,336\,\mathrm{cd/m^2}$ angesetzt. Aufgrund seiner mechanischen Konstruktion engt das Polavis-Gerät das freie Gesichtsfeld auf einen Gesamtöffnungswinkel von ca. 20° ein. Bei den durchgeführten Messungen ergaben sich die folgenden Abhängigkeiten der so ermittelten Schwellenleuchtdichten vom angebotenen Kontrast $C = (L_z/L_U) - 1$. (siehe Abb. (6.2)).

Da beim Schwellenleuchtdichte-VL-Meter der Adaptationszustand geändert wird, müsste zur Bewertung der ermittelten Schwellenleuchtdichte $\overline{L}$ der dafür verantwortliche transiente Schwellenerhöhungsfaktor ermittelt werden. Dies bedürfte aber weitergehender Untersuchungen. Deshalb wird auf einen direkten Bezug der so ermittelten Schwellenleuchtdichten auf die anderen Mess- und Rechenergebnisse verzichtet.

Mit einem **Schwellenkontrast-VL-Meter** kann man den Wert von VL nach Gl. (2.10) direkt messen. In der vorliegenden Untersuchung wurde ein Schwellenkontrast-VL-Meter (Gall, 1978) eingesetzt, dessen Aufbau in Abb. (6.3) gezeigt wird.

Charakteristisch für dieses Visibilitymeter ist die konstant bleibende Adaptationsleuchtdichte L_a. Der Kontrast des Sehobjektes wird so lange verringert, bis es gerade noch erkannt wird. Als Schwächungseinrichtungen fungieren die Polarisationsfilter PF1 ... PF4. Die Schwingungsebenen von PF2 und PF3 stehen senkrecht zueinander. Mit PF4 wird für jedes Leuchtdichteniveau die Schleierleuchtdichte auf die Umfeldleuchtdichte abgeglichen. Danach wird PF1 so lange gedreht, bis die Sichtbarkeitsschwelle des Sehobjektes für den Beobachter erreicht ist, ohne dass sich dessen Adaptationszustand ändert. Mit dem Verdrehungswinkel α von PF1 gegenüber der Null-Lage kann der VL-Wert direkt nach folgender Beziehung berechnet werden:

$$VL = \frac{1}{0,1087 \cdot \sin^2 \alpha} \tag{6.3}$$

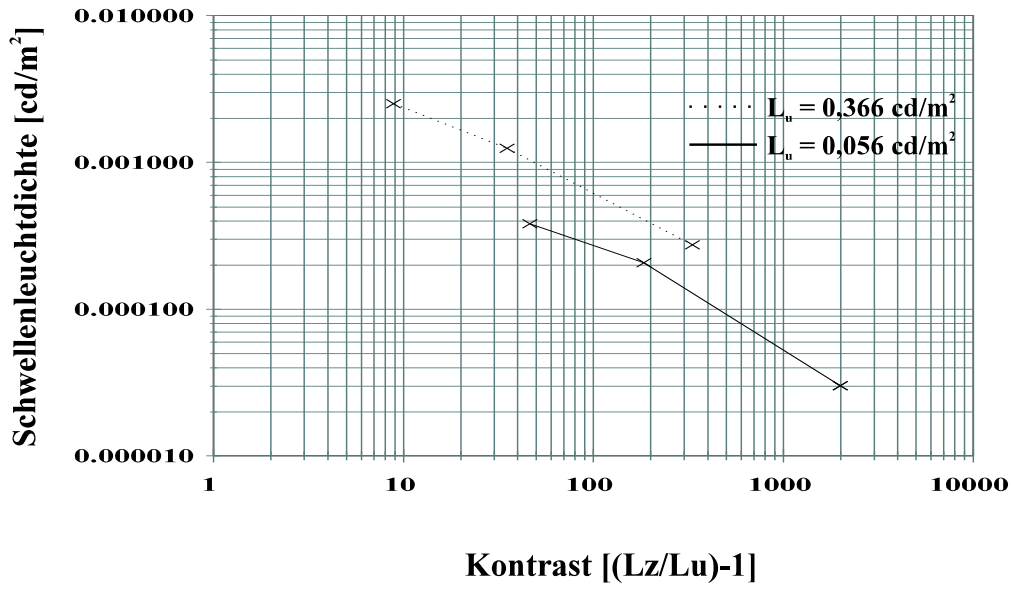


Abbildung 6.2: Gemessene Schwellenleuchtdichten $\overline{L}$ des Sehobjektes (Mittelwert aus 3 Personen, Messentfernung 100 m)

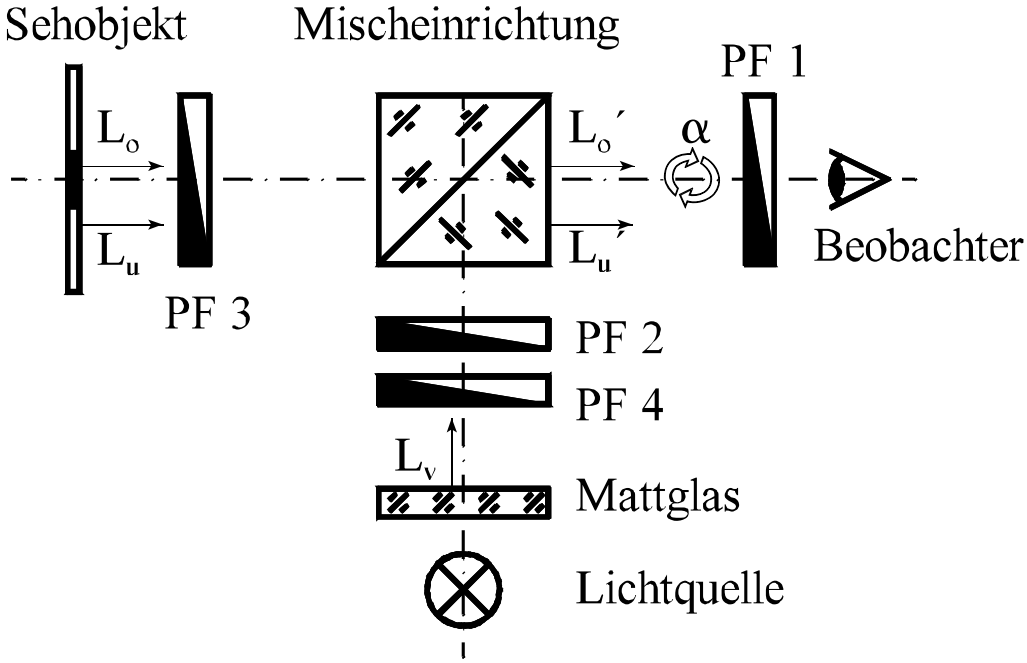


Abbildung 6.3: Aufbau des verwendeten Schwellenkontrast-VL-Meters

Der Faktor 0,1087 in dieser Gleichung gibt den Transmissionsgrad des Gerätes bei Parallelstellung von PF1 und PF3 an. Auch dieses Gerät engt aufgrund seiner mechanischen Abmessungen das freie Gesichtsfeld ein. Die Messungen erfolgten in einem Sichtfeld von ca. 13° (Gesamtöffnungswinkel). Die Unsicherheit der VL-Angabe, die aus der Unsicherheit des Verdrehungswinkels $\Delta\alpha$ resultiert, ist

$$\Delta VL = 18,4 \cdot \sin^{-3}(\alpha) \cdot \cos(\alpha) \cdot \Delta\alpha \tag{6.4}$$

Die Schleierleuchtdichte im Gerät wurde bei den Messungen jeweils auf die Leuchtdichte des Umfeldes (entspricht L_U) abgeglichen. Im Anhang B sind die so ermittelten VL-Werte angegeben. Abb. (6.4) zeigt die VL-Werte von drei Versuchspersonen.

Wie man erkennt, liefert die Person 2 immer kleinere VL-Werte als die beiden anderen. Person 2 ist ein Brillenträger. Über die drei Personen gemittelt ergeben sich die Abhängigkeiten in Abb. (6.5).

Wie man aus dieser Abbildung erkennen kann, ergibt sich eine klare Tendenz zwischen den angebotenen Leuchtdichteverhältnissen und den gemessenen VL-Werten, die man durch

$$VL = a \cdot C^b \tag{6.5}$$

approximieren kann.

$$\begin{array}{lllllllll} L_U & = & 0,056\,\mathrm{cd/m^2}: & a & = & 3,047 & b & = & 0,979 \quad (r^2 = 1,000) \\ L_U & = & 0,336\,\mathrm{cd/m^2}: & a & = & 30,498 & b & = & 0,727 \quad (r^2 = 0,978) \end{array}$$

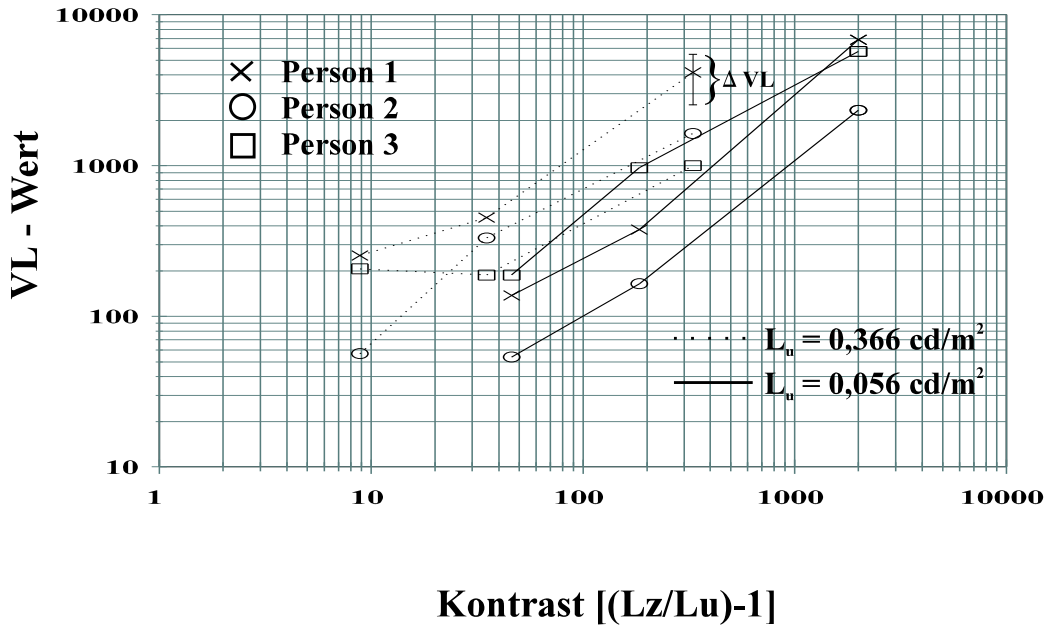


Abbildung 6.4: VL-Messungen mit drei Versuchspersonen (siehe Tabelle B.17) (Parameter: $L_U = 0,056$ bzw. $0,336\,\mathrm{cd/m^2}$, Messentfernung 100 m)

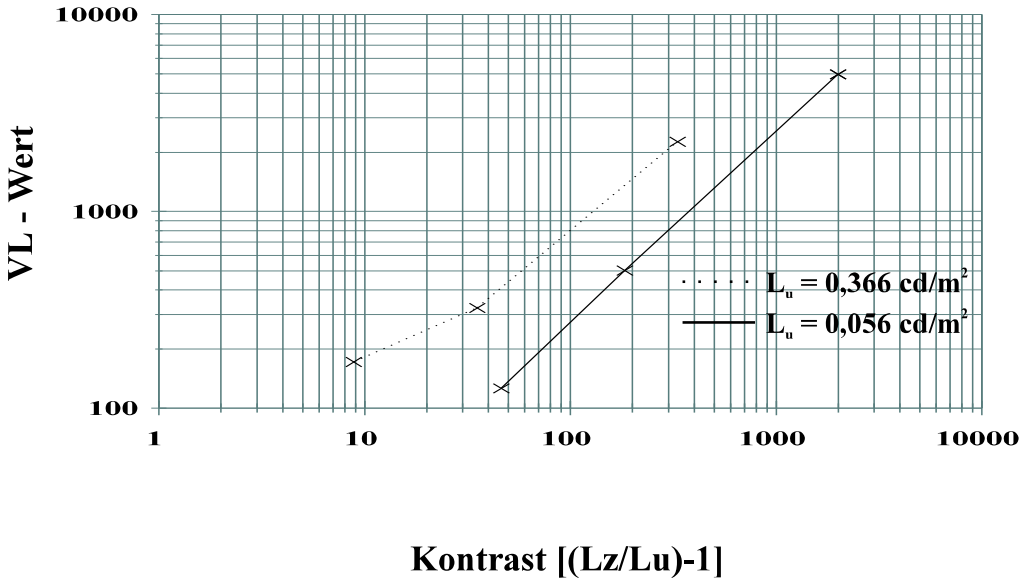


Abbildung 6.5: VL-Mittelwerte (siehe Tabelle B.17) (Parameter: $L_U = 0,056$ bzw. $0,336\,\mathrm{cd/m^2}$, Messentfernung 100 m)

6.3 Vergleich der VL-Messungen mit den VL-Berechnungen

Da die Messung der Schwellenleuchtdichten durch die Variation der Gesamtleuchtdichten erfolgte, wären bei der Berechnung der Schwellenleuchtdichten transiente Schwellenerhöhungsfaktoren zu berücksichtigen, die aber aus Zeitgründen nicht ermittelt wurden. Deshalb wird auf eine Gegenüberstellung der gemessenen und der gerechneten Schwellenleuchtdichten verzichtet.

Eine Gegenüberstellung der mit dem **Schwellenkontrast-VL-Meter** ermittelten VL-Werte mit den berechneten VL-Werten zeigt Abb. (6.6).

Zur Berechnung der VL-Werte wurden die Schwellenkontraste nach Gl. (2.4) mit folgenden Eingangsdaten ermittelt:

Adaptationsleuchtdichte	$L_a = L_U = 0,56\ cd/m^2$ bzw. $0,336\ cd/m^2$
Sehwinkel der Schlussleuchte	$\alpha = 3,72'$
(Abmessung 13 x 4 cm, Abstand 100 m)	

Die tatsächlichen Kontraste wurden nach Gl. (2.3) bestimmt. Es zeigte sich, dass die gemessenen mit den berechneten Werten gut übereinstimmen, obgleich nur eine grobe Anpassung $L_a = L_U$ gemacht wurde. Dies ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass die Schleierleuchtdichte des VL-Meters auf die Umfeldleuchtdichte L_U eingestellt wurde. Eine direkte Gegenüberstellung der Mess- und Rechenwerte zeigt Abb. (6.6).

Parameter:
Entfernung: 100 m, Sehobjekt: $\alpha = 3,72'$, Umfeld: $\alpha_U = 1,82° = 109,2'$

Kontrast C $C = (L_z/L_U) - 1$	Umfeldleuchtdichte L_U $in\,\mathrm{cd/m^2}$	VL-Werte gemessen	VL-Werte gerechnet
46,32	0,056	126,15	98,7
184,71		502,01	393,6
1999,00		4965,57	4260,6
8,88	0,336	171,72	66,8
35,31		323,48	265,5
332,33		2261,22	2498,8

Bei einer nebelfreien Situation kann man mit diesen Messwerten die Sichtweite berechnen, bei der o.g. Kontraste die Schwellenkontraste darstellen (Beispiel: $S = 1061\ m$ bei $C = 52$; $L_U = 0,056\,\mathrm{cd/m^2}$). Für Nebelsituationen müsste die Umrechnung der VL-Werte über den experimentell gefundenen Zusammenhang zwischen Sichtweite und Normsichtweite (z.B. Abb. (5.10)) erfolgen. Der Vorteil der VL-Messungen gegenüber der direkten Bestimmung der Sichtweiten besteht in dem erheblich reduzierten Messaufwand.

Auch ein direkter Vergleich an verschieden gestalteten Sehobjekten (z.B. Schlussleuchten) ist mit dem Schwellenkontrast-VL-Meter sehr gut möglich.

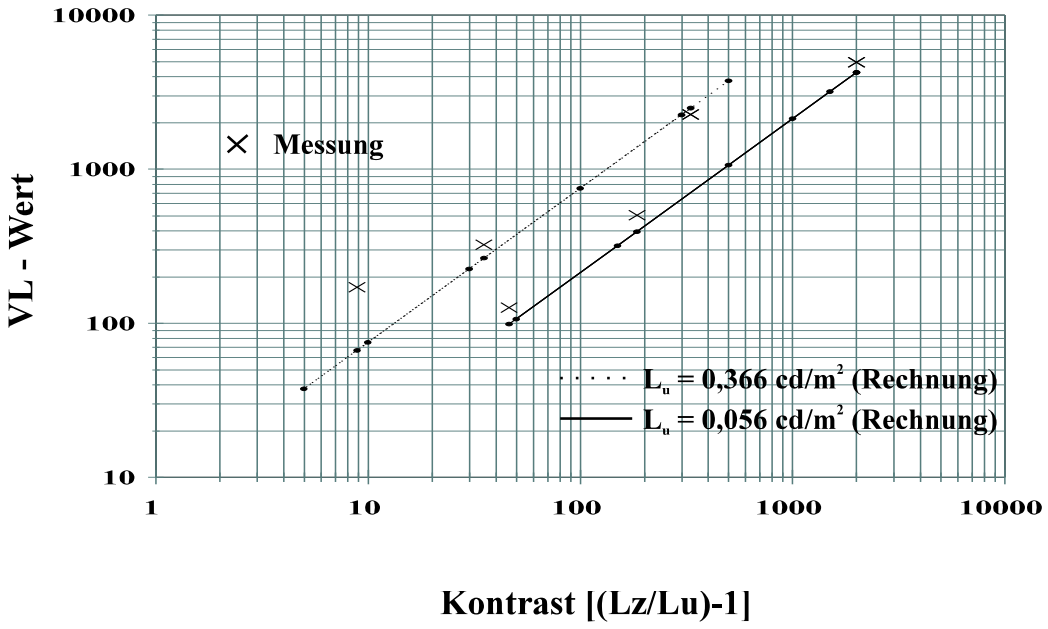


Abbildung 6.6: Vergleich der gemessenen VL-Werte mit den berechneten VL-Werten

Kapitel 7

Einsatzmöglichkeiten des Sichtweiten-Demonstrationsmessgerätes

In diesem Kapitel wird die praktische Anwendbarkeit des entwickelten Sichtweitenmessgerätes demonstriert.

7.1 Aufbau des Sichtweiten-Demonstrationsmessgerätes

1999 wurde an der TU Ilmenau im Fachgebiet Lichttechnik im Rahmen einer Diplomarbeit (Blankenhagen, 1999) ein Messgerät zur kombinierten Erfassung von Leuchtdichten und Beleuchtungsstärken entwickelt und gebaut. Die technischen Parameter dieser Entwicklung orientierten sich an den Messergebnissen aus den Feldversuchen zur experimentellen Sichtweitenbestimmung bei Nebelsituationen. Daher weist das Gerät einen Leuchtdichtemessbereich von $0,1-3000\,\mathrm{cd/m^2}$ bei einem Gesichtsfeldwinkel von 5° bzw. 10° auf. Die „Umschaltung“ der Leuchtdichte-Erfassungswinkel erfolgt einerseits durch eine auf den Leuchtdichtetubus aufschraubbare Kappe zur Raumwinkelbegrenzung und andererseits durch eine entsprechende Eingabe in die Betriebssoftware des Rechners. Die Beleuchtungsstärke kann in einem Bereich von $0,1 - 20\,000\,\mathrm{lx}$ gemessen werden. Der mittlere Linearitätsfehler des Messgerätes liegt zwischen 6 % und 8 %. Siehe Tabelle B.18 in Anhang B.

Die Messwerte werden vom Messgerät an einen PC zur Auswertung übertragen, welcher die Berechnung von Leuchtdichte, Beleuchtungsstärke und letztendlich der Sichtweite vornimmt. Dabei erfolgt die Aktualisierung der Anzeige nach jeweils fünf Sekunden, da dann ein neuer Messwert-Datensatz vorliegt. Die Messung der lichttechnischen Größen erfolgt gleichzeitig. In die Betriebssoftware ist die Normsichtweite einzugeben.

Die Messung der lichttechnischen Größen selbst erfolgt durch zwei angepasste Fotoelemente, welche ihr Signal an zwei geschaltete, hochempfindliche Transimpedanzverstärker weitergeben. Diese werden durch einen Mikrocontroller gesteuert, wodurch die Fotoströme in umgekehrt proportionale Integrationszeiten gewandelt werden. Diese sind mit dem verwendeten Controller sehr genau messbar. Durch das angewendete Integrationsmessverfahren werden die Rauschströme der Fotoelemente weitgehend eliminiert und es ist trotz des großen Dynamikbereiches von fünf Zehnerpotenzen keine Messbereichsumschaltung erforderlich. Da die Integrationszeiten vom Controller als eine Anzahl Zeitscheibchen verarbeitet werden, steigt die digitale Auflösung des Gerätes bei

kleinen Fotoströmen und entsprechend großen Integrationszeiten (max. 5 s) bis auf 23 Bit an. Die Grundauflösung am oberen Messbereichsende wurde auf 10 Bit festgelegt. Die so codierten Integrationszeiten werden durch den Mikrocontroller zeitgleich an einen PC übertragen, welcher per Messsystem- Approximationsfunktion die Berechnung der zu messenden lichttechnischen Größen vornimmt. Abb. (7.1) zeigt das Funktionsschema im Überblick.

Wie bereits erwähnt wurde, liegen die Linearitätsmessfehler des entwickelten Demonstrationsmessgerätes im Bereich zwischen 6 und 8 %. Die genauen Fehlerverläufe beruhen auf lichttechnischen Labormessungen mittels präzisem Leuchtdichtenormal und sind in den Abb. (7.2), Abb. (7.3) und Abb. (7.4) dokumentiert. Weitergehende Ausführungen zu Funktionsweise, Aufbau, Entwicklung und technischen Daten des Demonstrationsmessgerätes sind in (Blankenhagen, 1999) enthalten.

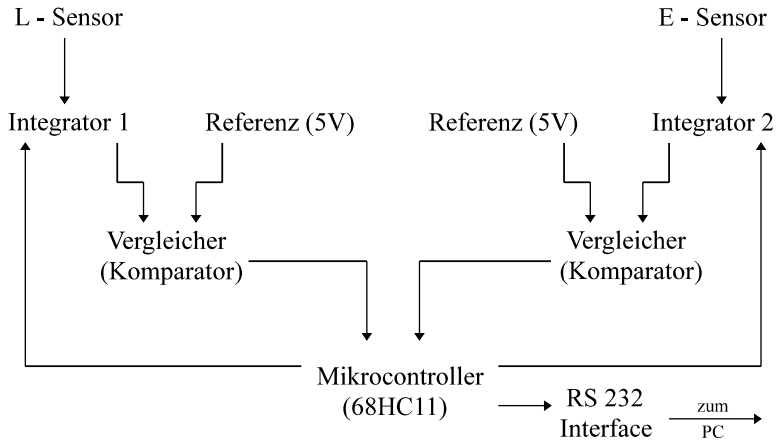


Abbildung 7.1: Blockschaltbild des Demonstrationsmessgerätes

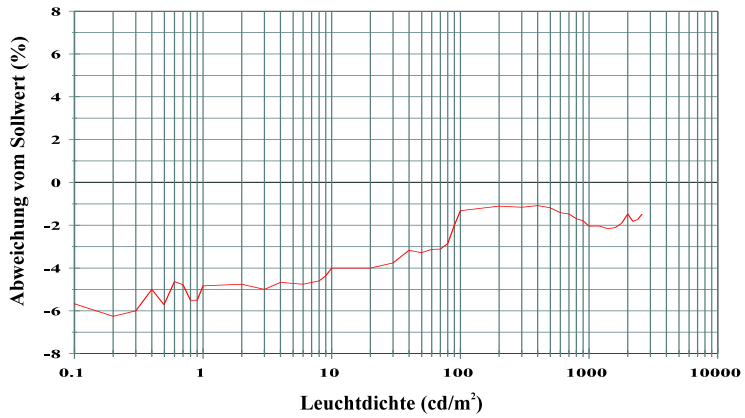


Abbildung 7.2: Linearitätsfehler des Leuchtdichtekanals für 5° Messfeld (siehe Tabelle B.18)

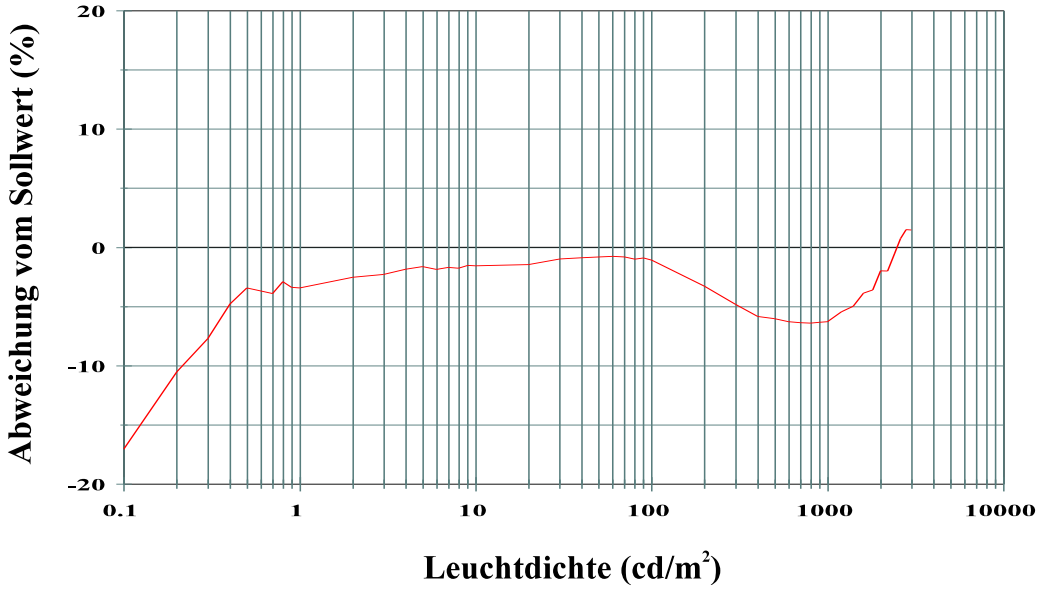


Abbildung 7.3: Linearitätsfehler des Leuchtdichtekanals für 10° Messfeld (siehe Tabelle B.19)

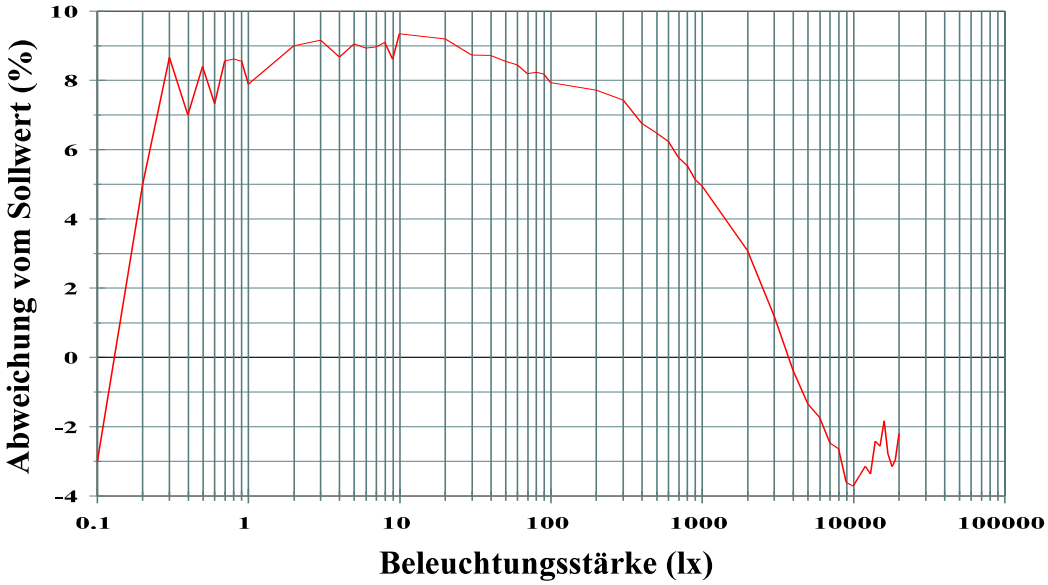


Abbildung 7.4: Linearitätsfehler des Beleuchtungsstärkekanals (siehe Tabelle B.20)

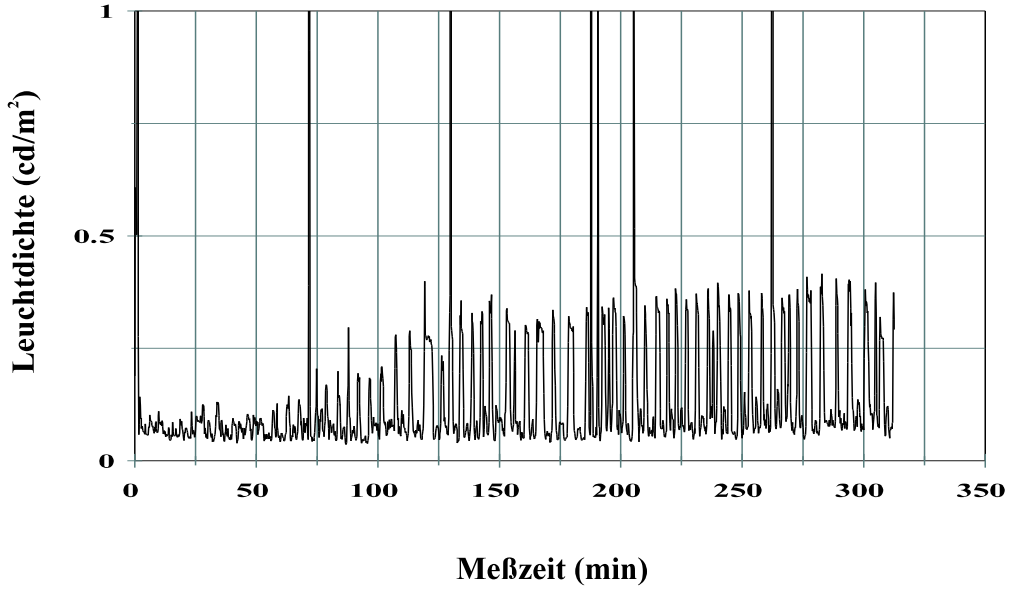


Abbildung 7.5: Leuchtdichteverlauf während der Messung mit dem großen Versuchspersonenkollektiv

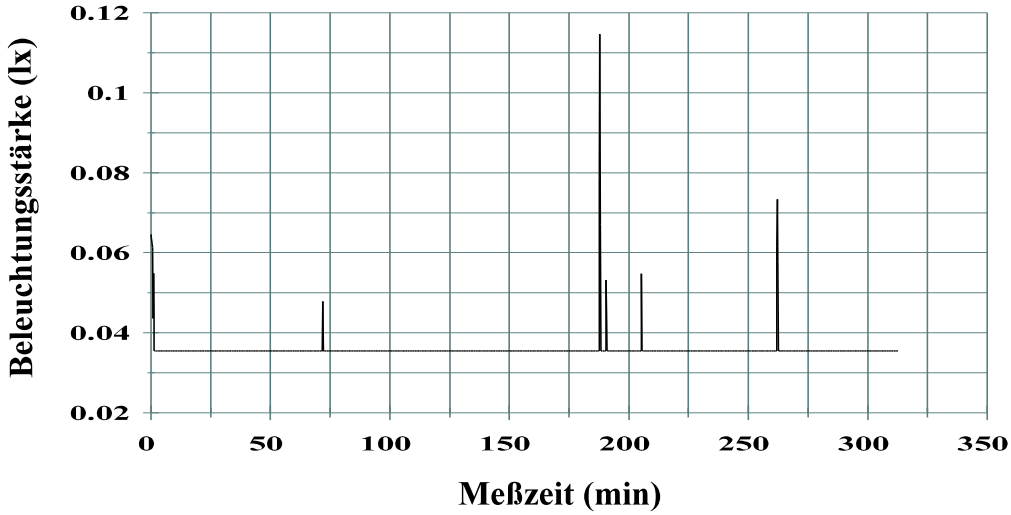


Abbildung 7.6: Verlauf der Beleuchtungsstärke während der Messung mit dem großen Versuchspersonenkollektiv

7.2 Einsatz des Sensors für die horizontale Beleuchtungsstärke

Eine wesentliche Grundlage bei der Suche nach einer geeigneten Sichtweitengleichung stellt die aus den Feldexperimenten abgeleitete Gleichung der Form

$$S = a \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{-V_N}{b}\right)\right) \tag{7.1}$$

mit den Parametern a und b dar. Diese Gleichung enthält jedoch abgesehen von der Normsichtweite keine weiteren physikalischen Größen. Als lichttechnischer Parameter für die Sichtweitengleichung wurde im FASIVAL-Projekt die horizontale Beleuchtungsstärke verwendet, für welche auch umfassende theoretische Sichtweitenberechnungen existieren. Aus diesen Berechnungen wurde der Sichtweitenverlauf (kleines dunkles Sehobjekt, sicher erkannt) in Abhängigkeit von der horizontalen Beleuchtungsstärke für eine Normsichtweite von 2,4 km herausgegriffen und approximiert. Es ergab sich dabei eine Boltzmann-Funktion der Form

$$a = a_1 + \frac{(b_1 - a_1)}{1 + \exp\left(\frac{E_h - c_1}{d_1}\right)} \tag{7.2}$$

Die Parameter lauten (Funktionsverlauf siehe Abb. 7.7):

$$\begin{array}{rclrcl} a_1 & = & 206,2962 & b_1 & = & -\ 140,7875 \\ c_1 & = & 5,8252 & d_1 & = & 360,7859 \end{array}$$

Da diese Gleichung für praktisch trübungsfreie Bedingungen gilt, kann sie in der obigen Sichtweitengleichung aus den Feldexperimenten für den Parameter a eingesetzt werden. Der zweite Faktor der Sichtweitengleichung bestimmt deren Funktionsverlauf bei stärker werdender Trübung, geht aber bei hohen Normsichtweiten gegen 1.

Die Sichtweitengleichung enthält jetzt also die Kenngrößen horizontale Beleuchtungsstärke und Normsichtweite. Für den Parameter b der Sichtweitengleichung wird zunächst der Wert 0,277 eingesetzt, welcher durch die anfangs erfolgte Approximation der Messwerte (Sichtweitengleichung) gewonnen wurde.

Im nächsten Schritt wurden die Vorgaben der theoretischen Berechnungen für die horizontale Beleuchtungsstärke (E_h: 0,1 lx, 1 lx, 10 lx, 100 lx, 1000 lx, 10000 lx und 30000 lx) und die Normsichtweite (V_N: 75 m, 150 m, 300 m, 600 m, 1200 m und 2400 m) zugrundegelegt, eingesetzt und die resultierenden Sichtweiten berechnet.

Diese Ergebnisse wurden in die Sichtweitendiagramme der theoretischen Berechnungen eingetragen und der grafische Verlauf verglichen. Aufgrund der deutlichen Abweichungen stellte sich heraus, dass der Parameter b der Sichtweitengleichung von der horizontalen Beleuchtungsstärke abhängig ist. Seine Approximation ergab ebenfalls eine Boltzmannfunktion der Form

$$b = a_2 + \frac{(b_2 - a_2)}{1 + \exp\left(\frac{E_h - c_2}{d_2}\right)} \tag{7.3}$$

Die Parameter lauten (Funktionsverlauf siehe Abb. (7.8)):

$$\begin{array}{rclrcl} a_2 & = & 0,275 & b_2 & = & -\,0,1443 \\ c_2 & = & 3,2676 & d_2 & = & 108,8782 \end{array}$$

Der anschließende nochmalige Vergleich mit den berechneten theoretischen Funktionsverläufen ergab eine zufriedenstellende Übereinstimmung mit ihnen (siehe Abb. (7.9) bis Abb. (7.15)).

Abschließend wurde die gewonnene Sichtweitengleichung in der Betriebssoftware des Demonstrationsmessgerätes verankert und Laboruntersuchungen bei verschiedenen Beleuchtungsstärken durchgeführt. Die Normsichtweite wurde dabei direkt als Zahl in das Programm eingegeben. Die berechneten Sichtweitenwerte ergaben im Vergleich mit den Messwerten der Feldversuche (Abb. (5.6) und Abb. (5.16)) immer noch Differenzen, welche aber durch Variation der Parameter b_1 und b_2 minimiert werden konnten. Die neuen Werte sind:

$$b_1 = -80 \qquad \text{und} \qquad b_2 = -0,01$$

Zur besseren Übersicht wird das Formelgerüst noch einmal insgesamt dargestellt:

$$S = a \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{-V_N}{b}\right)\right) \tag{7.4}$$

$$a = a_1 + \frac{(b_1 - a_1)}{1 + \exp\left(\frac{E_h - c_1}{d_1}\right)} \tag{7.5}$$

$$b = a_2 + \frac{(b_2 - a_2)}{1 + \exp\left(\frac{E_h - c_2}{d_2}\right)} \tag{7.6}$$

$$\begin{array}{llllllll} a_1 = 206,2962 & b_1 = -80 & c_1 = 5,8252 & d_1 = 360,7859 \\ a_2 = 0,275 & b_2 = -0,01 & c_2 = 3,2676 & d_2 = 108,8782 \end{array}$$

Wie eingangs bereits erwähnt wurde, erfolgte die Bestimmung dieser Gleichung für die sichere Erkennung des kleinen dunklen Sehobjektes bei allen im FASIVAL-Projekt untersuchten Sehsituationen sowie deren Kombinationen (Tag / Nacht / mit und ohne Trübung).

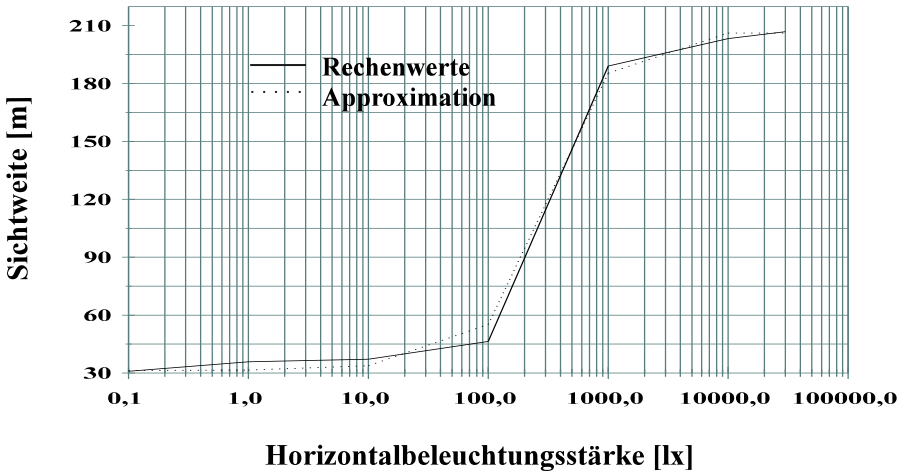


Abbildung 7.7: Sichtweitensensor: Kleines dunkles Sehobjekt (Nacht/Tag), Normsichtweite 2,4 km („trübungsfrei“)

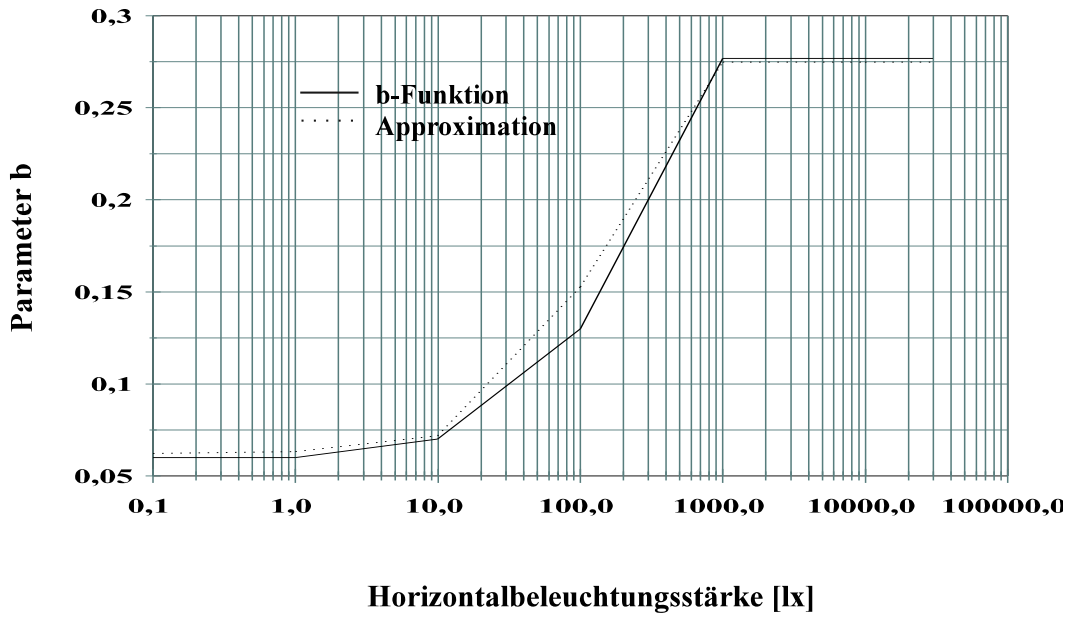


Abbildung 7.8: Sichtweitensensor: Verlauf und Approximation des Parameters b in Abhängigkeit von der horizontale Beleuchtungsstärke

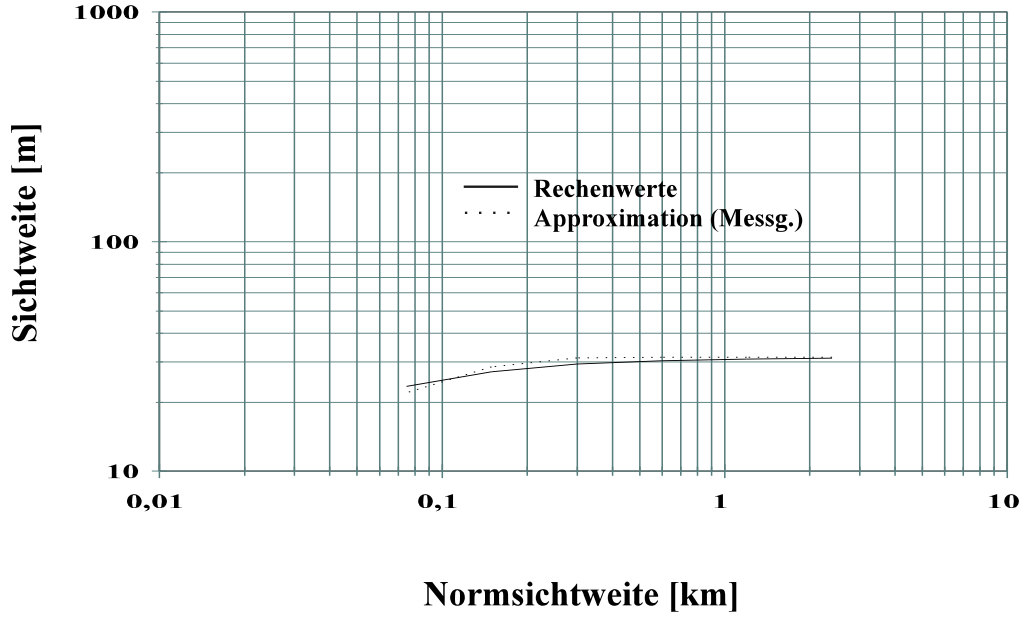


Abbildung 7.9: Sichtweitensensor: Kleines dunkles Sehobjekt, Vergleich Rechnung-Messung, ($E_h = 0,1\ lx$)

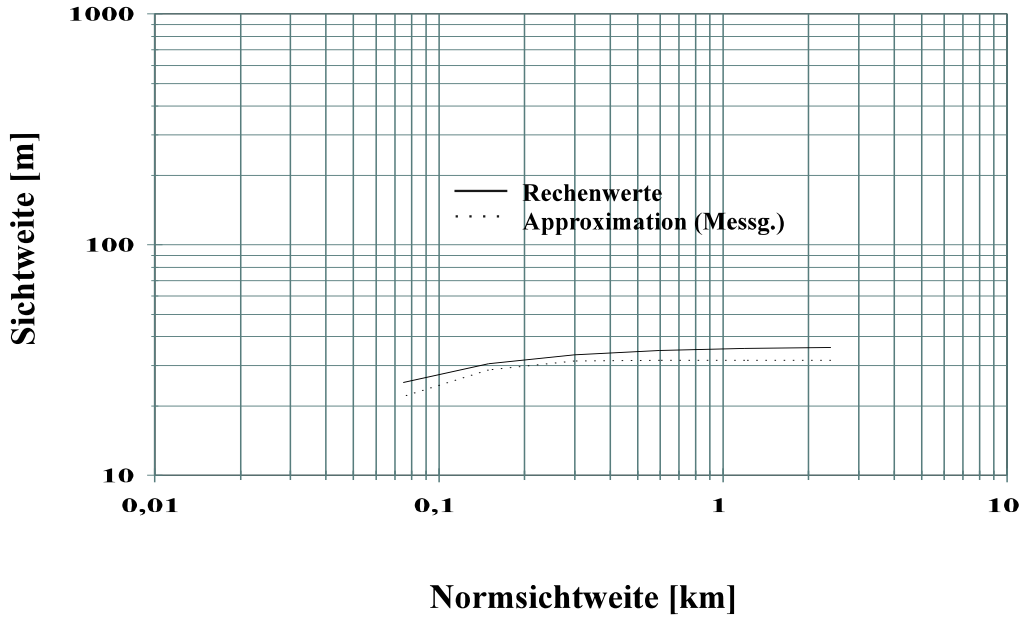


Abbildung 7.10: Sichtweitensensor: Kleines dunkles Sehobjekt, Vergleich Rechnung-Messung, ($E_h = 1\ lx$)

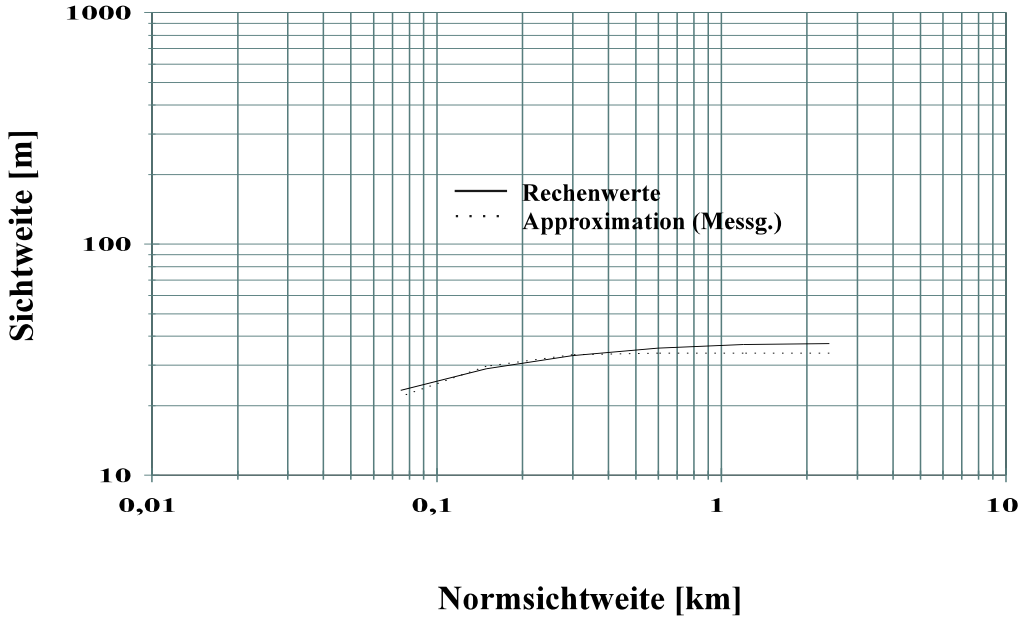


Abbildung 7.11: Sichtweitensensor: Kleines dunkles Sehobjekt, Vergleich Rechnung-Messung, ($E_h = 10\ lx$)

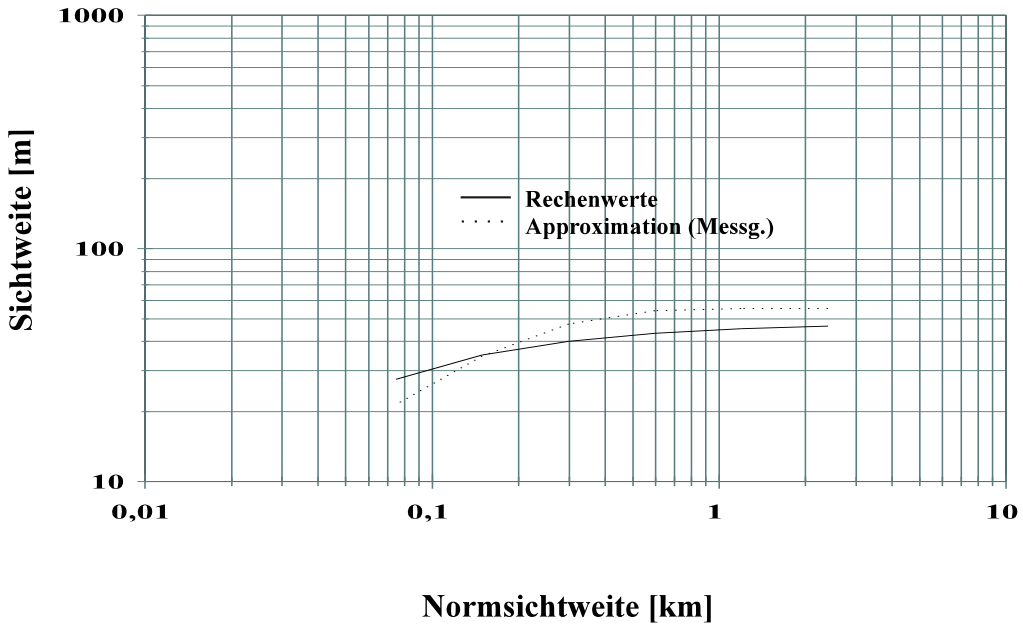


Abbildung 7.12: Sichtweitensensor: Kleines dunkles Sehobjekt, Vergleich Rechnung-Messung, ($E_h = 100\ lx$)

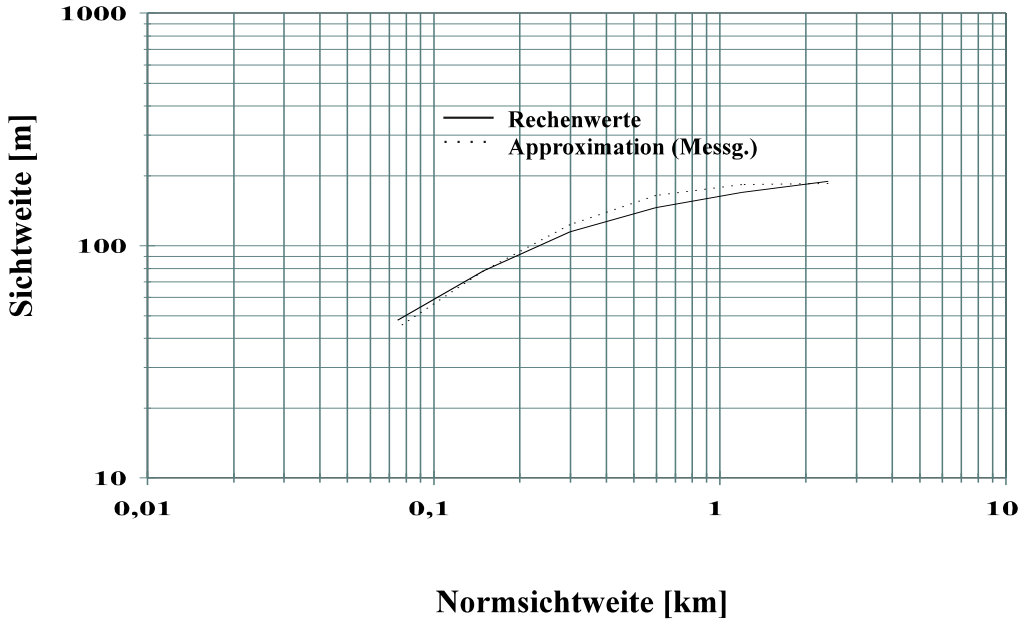


Abbildung 7.13: Sichtweitensensor: Kleines dunkles Sehobjekt, Vergleich Rechnung-Messung, ($E_h = 1000\ lx$)

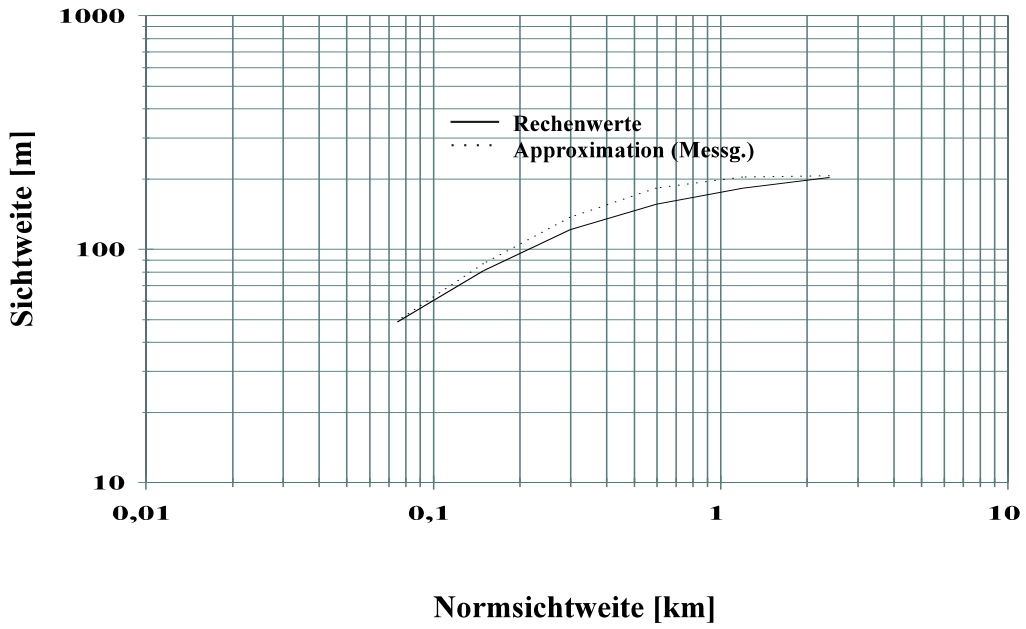


Abbildung 7.14: Sichtweitensensor: Kleines dunkles Sehobjekt, Vergleich Rechnung-Messung, ($E_h = 10\,000\ lx$)

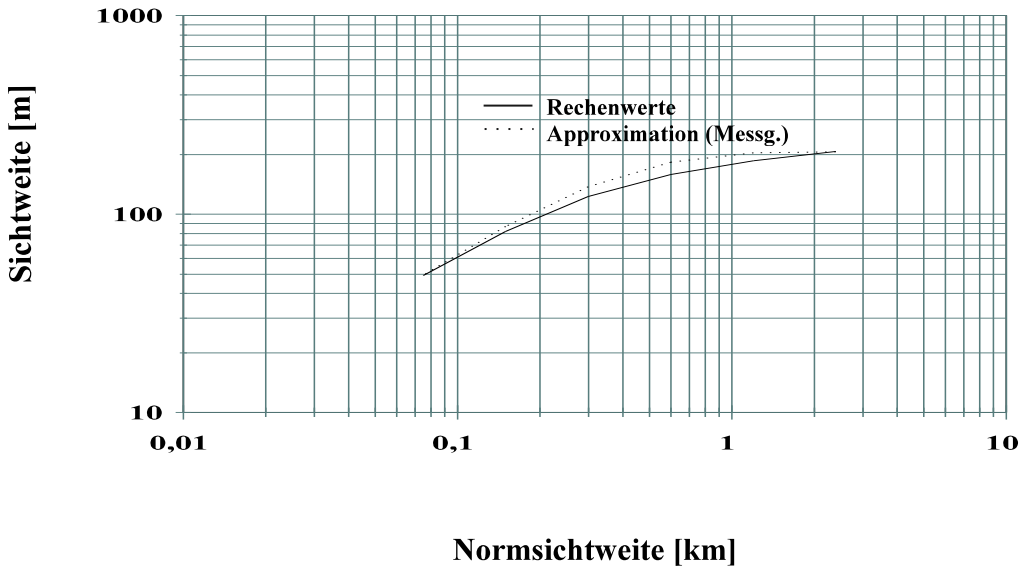


Abbildung 7.15: Sichtweitensensor: Kleines dunkles Sehobjekt, Vergleich Rechnung-Messung, ($E_h = 30\,000\ lx$)

7.3 Einsatz des Sensors für die mittlere Gesichtsfeldleuchtdichte

In den bisherigen Untersuchungen wurde als lichttechnisch messbarer Parameter die horizontale Beleuchtungsstärke der Sehsituation in den Berechnungen berücksichtigt. Der Einfluss der Leuchtdichte auf die Sichtweite blieb dagegen zunächst unberücksichtigt. Da bei Nacht die horizontale Beleuchtungsstärke der Sehsituation gegen Null geht, bestand die Vermutung, dass die Sichtweite außer von der aktuellen Normsichtweite auch durch die mittlere Leuchtdichte im Gesichtsfeld der Sehsituation bestimmt werden könnte. Wie bereits im Kapitel 5.2 beschrieben, wurde bei den experimentellen Feldversuchen die Leuchtdichte der Sehsituation mittels ortsauflösender Kameramesstechnik erfasst und in Form von Leuchtdichtebildern gespeichert.

Da in die theoretischen Betrachtungen die mittleren Gesichtsfeldleuchtdichten nicht direkt eingebunden waren, sollen in diesem Abschnitt einige Beispiele ausgewertet werden, deren Parameter experimentell bestimmt wurden. Dazu wurden am Beispiel des kleinen dunklen Sehobjektes sämtliche Leuchtdichtebilder von Nachtmessungen ($E_h < 0,5\,\mathrm{lx}$), kurze Versuchsstrecke (200 m)) mit Normsichtweiten unter 300 m ausgewertet. Die Berechnung der mittleren Leuchtdichte aus den Bildern erfolgte in einem Feld von 10° Öffnungswinkel um die angenommene Blicklinie (Sehobjektmittelpunkt) herum. Sie wurde für die Parameter „gerade erkannt“ und „sicher erkannt“ berechnet und gemeinsam mit den gemessenen Sichtweiten als Punkteschar in einem Diagramm erfasst. Die mittleren Leuchtdichtewerte sind in den Tabellen B.4 und B.6 dokumentiert.

Trotz der Streuung der Messwerte war eine Tendenz zu einem linearen Zusammenhang zwischen Sichtweite S und mittlerer Gesichtsfeldleuchtdichte L_g zu vermuten. Deshalb wurde die Punkteschar linear approximiert. Die Darstellung der Parameter „gerade erkannt“ und „sicher erkannt“ in jeweils einem gemeinsamen Diagramm ergab überraschenderweise, dass die approximierten Geraden fast parallel verlaufen (Abb. (7.16) und Abb. (7.17)). Die Parameter der linearen Approximationsfunktion

$$S = a + (b \cdot L_g) \tag{7.7}$$

sind im Folgenden aufgeführt:

Abblendlicht - „gerade erkannt“	$a = 58,8644$	$b = -63,3791$
Abblendlicht - „sicher erkannt“	$a = 50,7621$	$b = -58,6996$
Abblendlicht und Nebellicht - „gerade erkannt“	$a = 61,5878$	$b = -54,4324$
Abblendlicht und Nebellicht - „sicher erkannt“	$a = 54,2163$	$b = -50,4405$

Für eine Sichtweitenbestimmung wäre demnach die Auswertung der Gesichtsfeldleuchtdichte durchaus anwendbar.

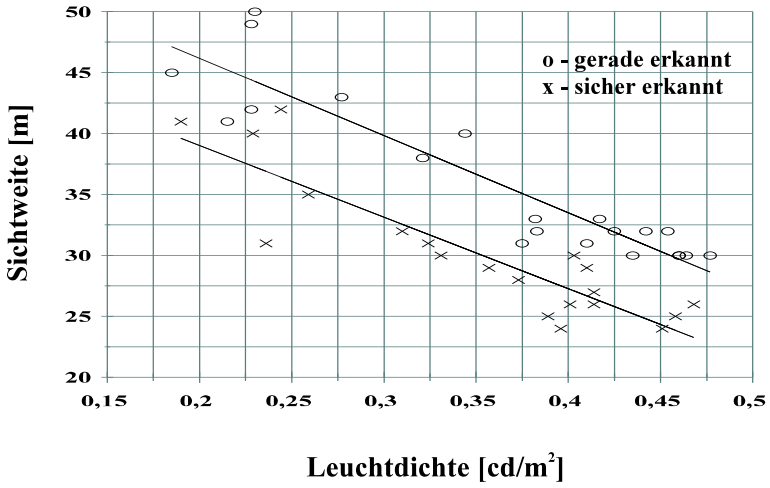


Abbildung 7.16: Sichtweitensensor: Sichtweite und Leuchtdichte (Nachtsituation, kleines dunkles Sehobjekt, Abblendlicht, 10°-Messfeld)

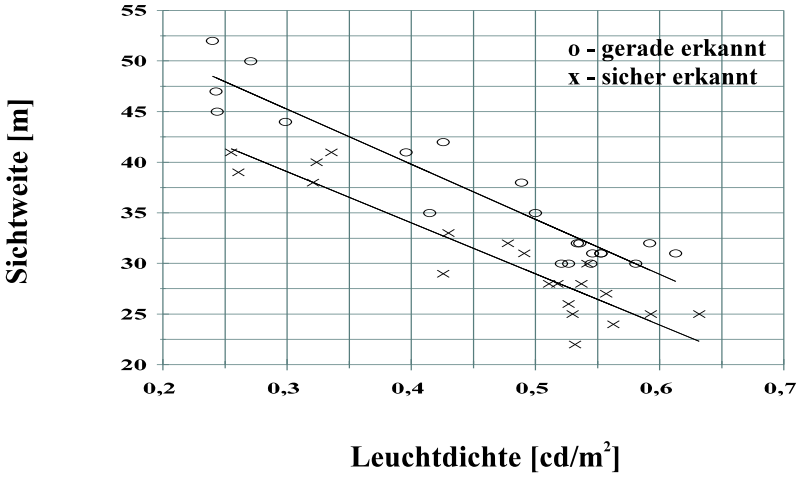


Abbildung 7.17: Sichtweitensensor: Sichtweite und Leuchtdichte (Nachtsituation, kleines dunkles Sehobjekt, Abblend- und Nebellicht, 10°-Messfeld)

Kapitel 8

Vergleich von gemessenen und berechneten Sichtweiten

Inhalt dieses Kapitels ist der Vergleich der modellierten Sichtweiten mit den in den Feldexperimenten ermittelten Sichtweiten.

8.1 Die Vergleichsbedingungen

Verglichen wurden die vom Partner TU-Ilmenau in den Feldexperimenten gemessenen Sichtweiten mit den vom Partner TU-Karlsruhe mit dem Sichtweitenprogramm FASIVALSICHT berechneten Werten bei dem Kriterium "Sehobjekt sicher gesehen".

Die Berechnungen erfolgten für diejenigen Beobachtungsbedingungen, die auch während der Messungen vorlagen. Definiert sind die Beobachtungsbedingungen erstens durch die festen Parameter, d.h.:

- die Art des Sehobjektes
- die Art der Fahrzeugbeleuchtung.

Die Beobachtungsbedingungen sind zweitens definiert durch die abhängigen Variablen, d.h.:

- die Normsichtweite V_N als Maß für die Trübung
- die horizontale Beleuchtungsstärke E_h als Maß für die natürliche Himmelsbeleuchtung.

Wie vereinbart, wurden die Sichtweiten bei 2 Wahrnehmungskriterien bestimmt und zwar:

- Sehobjekt gerade gesehen
- Sehobjekt sicher gesehen.

wobei bei den Experimenten das erste Wahrnehmungskriterium mit "Sehobjekt gerade (so) gesehen (erkannt)" bezeichnet wurde, um den Versuchspersonen durch die Ergänzung "so" den Schwellencharakter dieses Kriteriums zu verdeutlichen.

Die Interpretation der beiden Wahrnehmungskriterien steht in engem Zusammenhang mit der Art und Weise, wie die Sichtweiten in den Feldexperimenten durchgeführt wurden. Das Versuchsfahrzeug näherte sich ausgehend von relativ großen Beobachtungsabständen, bei denen das Sehobjekt nicht wahrgenommen werden konnte, dem Sehobjekt. Die Fahrgeschwindigkeit lag bei etwa 5-10 km/h. Es wurde derjenige Sehobjektabstand notiert, bei dem die Versuchsperson das Sehobjekt "gerade so" erkannte. Dabei sollte sich die Versuchsperson daran halten, dass das Sehobjekt in seiner spezifischen Form gerade so gesehen bzw. erkannt wurde, ohne sich aber ganz sicher darüber zu sein, um was für ein Sehobjekt es sich handelt. Bei weiterer Annäherung des Fahrzeuges wurde dann derjenige Abstand notiert, bei dem das Sehobjekt erstmalig sicher erkannt wurde. Bei beiden Kriterien wird also der Beginn der jeweiligen Wahrnehmungskategorie ermittelt.

Der Vergleich bezieht sich wie erwähnt auf die bei dem Kriterium "sicher gesehen" ermittelten Sichtweiten, weil nur diese für die Praxis relevant sind.

Insgesamt wurden 511 Sichtweiten bei den Kernuntersuchungen für das Kriterium "sicher gesehen" gemessen. Davon wurden 481 Situationen mit den Messwerten verglichen. Nicht verglichen wurden die Dämmerungsergebnisse (zwischen 0 lx und 100 lx, 17 Fälle) sowie 13 Fälle von Tarnsituationen.

Tabelle 8.1: Anzahl der verglichenen Sichtweiten, gruppiert nach den Merkmalen "Beleuchtungsniveau" und "Normsichtweite". Wahrnehmungskriterium "sicher gesehen".

	Beleuchtungsniveau E_h		
	Nacht	Tag	
Normsichtweite V_N	0 - 1 lx	> 100 lx	Summe
Nebel $V_N \leq 1000\ m$	99	270	369
Dunst, klare Sicht $V_N > 1000\ m$	56	56	112
Summe	155	326	481

8.2 Vergleich der Sichtweiten

In den Abb. (8.1) bis Abb. (8.22) wurden die gemessenen und berechneten Sichtweiten für folgende Sehobjekte jeweils bei Nacht und Tag verglichen:

- Nr.1: Großes dunkles Sehobjekt; Tag und Nacht
- Nr. 2: Kleines dunkles Sehobjekt; Tag und Nacht
- Nr. 3: Kleines mittelhelles Sehobjekt; Tag (für Nacht keine Messwerte vorhanden)
- Nr. 4: Kleines helles Sehobjekt; Tag und Nacht
- Nr. 5: Schlussleuchte; Tag und Nacht
- Nr. 6: Nebelschlussleuchte; Tag und Nacht.

In der oberen Abbildung einer jeden Ergebnisseite sind die Sichtweiten über der Normsichtweite aufgetragen. Die Beobachtungssituationen unterscheiden sich in der horizontalen Beleuchtungsstärke und der Art der Scheinwerferbeleuchtung. Dabei wurden die Nachtsituation (im Anhang B in den Tabelle B.3 bis Tabelle B.15 mit $E_h < 1$ lx gekennzeichnet) mit $E_h = 0$ lx simuliert. Es wurde im gesamten Trübungsbereich mit den im Nebelbereich ermittelten Praxisfaktoren gerechnet. Abweichend davon wurden in Abb. (8.5) die Sichtweiten mit dem individuellen Praxisfaktor (PF(s)=25 für Normsichtweiten unter 1000 m, PF(s)=7,3 für Normsichtweiten darüber) berechnet, um dem Tarnungseffekt besser Rechnung zu tragen.

In der unteren Abbildung einer jeden Ergebnisseite ist die Korrelation zwischen gemessenen und berechneten Sichtweiten im Nebelbereich dargestellt. Eingezeichnet ist die Regressionsgerade, deren Gleichung, das Bestimmtheitsmaß R^2 bzw. das Quadrat des Korrelationskoeffizienten r, sowie die Anzahl der Vergleiche.

Im Anhang C in den Tabelle C.1 bis Tabelle C.11 sind die zu den Abbildungen zugehörigen Daten zusammengefasst. Jede Zeile der Vergleichstabellen enthält die Daten einer bestimmten Messsituation, in der eine Sichtweite von einer nicht näher spezifizierten Versuchsperson ermittelt wurde. Das sind einmal die während der Experimente gemessenen Normsichtweiten V_N sowie die gemessenen Beleuchtungsstärken E_h. In der Spalte "Fahrzeugbeleuchtung" ist die Art der eingeschalteten Scheinwerfer eingetragen. Die Spalte "Praxisfaktor" enthält die Praxisfaktoren der berechneten Schwellenkontraste, die Spalte "Sichtweite Messung" die gemessene Sichtweite der jeweiligen Versuchspersonen und die Spalte "Sichtweite Rechnung" die mit dem Sichtweitenprogramm berechneten Sichtweiten. Die letzte Spalte der Vergleichstabellen zeigt die relative Abweichung zwischen gemessener und berechneter Sichtweite, definiert als die Betragsdifferenz, bezogen auf die berechnete Sichtweite.

8.3 Bewertung des Vergleichs

Die prozentualen Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Sichtweiten enthält zusammenfassend Tabelle 8.2. Danach beträgt im Nebelbereich die Abweichung über alle Tag- und Nachtsituationen gemittelt 33 %, wobei die Abweichungen bei den Nachtsituationen mit 17 % erheblich geringer sind als mit 39 % bei Tage. Die Abweichungen zwischen berechneten und gemessenen Sichtweiten im Bereich geringer Trübung mit Normsichtweiten über 1000 m sind mit 67 % erheblich größer als im Nebelbereich. Das liegt einmal daran, dass die Sichtweitenberechnungen im Dunstbereich der besseren Übersicht wegen mit dem gleichen Praxisfaktor für die Schwellenkontraste berechnet wurden wie im Nebelbereich. Dadurch wird die mittlere Abweichung um etwa 10-20 % erhöht. Hinzu kommt, dass im Dunstbereich wegen der erheblich größeren Absolutwerte für die gemessenen Sichtweiten die Unsicherheit der Versuchspersonen bei der Sichtweitenbestimmung größer ist als im Nebelbereich mit den geringen Sichtweiten. Über alle Trübungssituationen gemittelt beträgt die Abweichung zwischen gemessenen und berechneten Sichtweiten etwa 40 %. Die mittlere Abweichung zwischen gemessenen und berechneten Sichtweiten im Nebelbereich von etwa 30 % wird bestätigt durch eine Korrelationsanalyse. Wie aus Tabelle 8.3 hervorgeht, beträgt der Korrelationskoffizient der berechneten und gemessenen Sichtweiten im Nebelbereich bei Tag etwa 0,74 und bei Nacht 0,63, im Mittel also etwa 0,7.

Tabelle 8.2: Mittlere prozentuale Abweichung zwischen gemessenen und berechneten Sichtweiten. Die Randmittelwerte berücksichtigen die Häufigkeit der Messsituation nach Tabelle 8.1

Normsichtweite V_N	Beleuchtungsniveau E_h Nacht 0 - 0,1 lx	Tag > 100 lx	Mittel
Nebel $V_N \leq 1000\ m$	17%	39%	33%
Dunst, klare Sicht $V_N > 1000\ m$	62%	74%	67%
Mittel	33%	44%	40%

Tabelle 8.3: Korrelationskoeffizient r (identisch mit R in Abb. (8.2) bis Abb. (8.22)) zwischen gemessenen und berechneten Sichtweiten im Nebelbereich. (n: Anzahl der Vergleichswerte)

Sehobjekt	Tag r	Tag n	Nacht r	Nacht n
Nr. 1: großes dunkles Sehobjekt	0,81	39	0,83	17
Nr. 2: kleines dunkles Sehobjekt	0,57	77	0,58	30
Nr. 3: kleines mittelhelles Sehobjekt	0,91	40	keine Messwerte	
Nr. 4: kleines helles Sehobjekt	0,84	38	0,69	20
Nr. 5: Schlussleuchte	0,56	38	0,77	18
Nr. 6: Nebelschlussleuchte	0,73	38	0,28	14
im Mittel	0,74		0,63	

Auf den ersten Blick mag eine mittlere Abweichung von 30 % oder ein Korrelationskoeffizient von 0,70 als eine eher mäßige Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Sichtweiten bewertet werden. Realistisch gesehen kann aber kaum eine bessere Übereinstimmung erwartet werden. Feldexperimente unter schwierigen Bedingungen, die zweifelsfrei bei den durchgeführten Untersuchungen vorlagen, sind erfahrungsgemäß immer mit erheblichen Streuungen zwischen und innerhalb der Versuchspersonen verbunden. Hinzu kommt, dass wichtige Einflussgrößen, z.B. die Reflexionseigenschaften der Fahrbahn und die lichttechnischen Eigenschaften der Fahrzeugscheinwerfer nur näherungsweise kontrolliert werden konnten. Darüber hinaus hängt die Sichtbarkeit von Sehobjekten auch von physikalischen Variablen ab, die im Modell nicht erfasst wurden, z.B. Kanteneffekte, Schattenbildungen oder der Einfluss der Farbe bei den selbstleuchtenden Sehobjekten. Insgesamt stehen die gemessenen und berechneten Sichtweiten im Einklang und gehorchen den gleichen Trends. Abweichungen in Einzelfällen liegen im Rahmen der Mess- und Modellunsicherheiten.

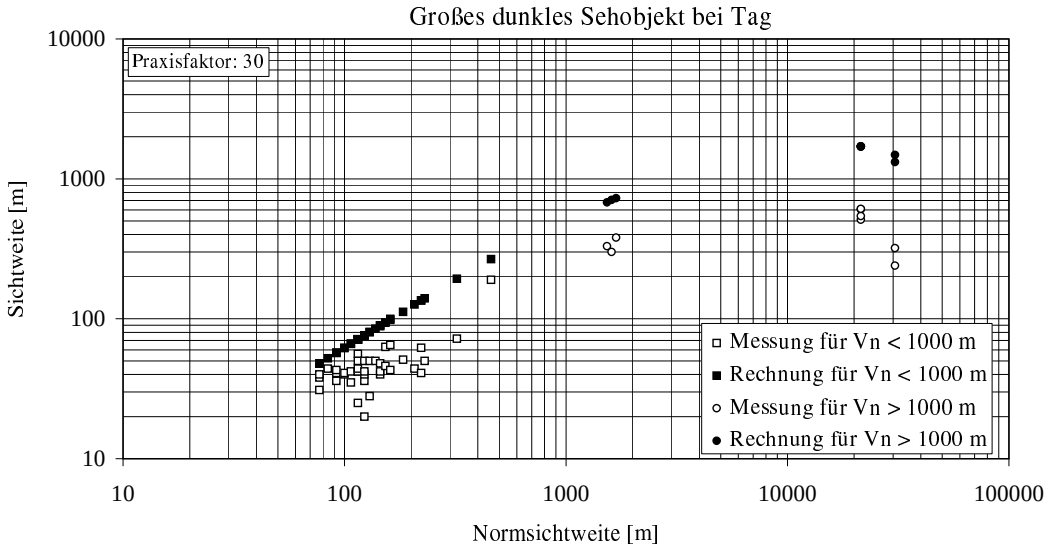


Abbildung 8.1: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Sichtweiten für das große dunkle Sehobjekt bei Tage

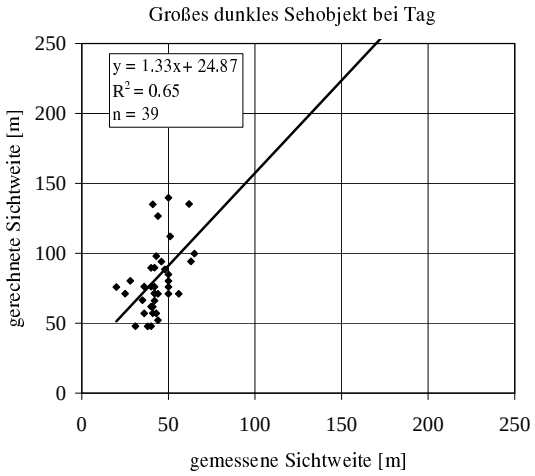


Abbildung 8.2: Sichtweiten-Korrelationsdiagramm für die Beobachtungssituationen von Abb. (8.1) im Nebelbereich

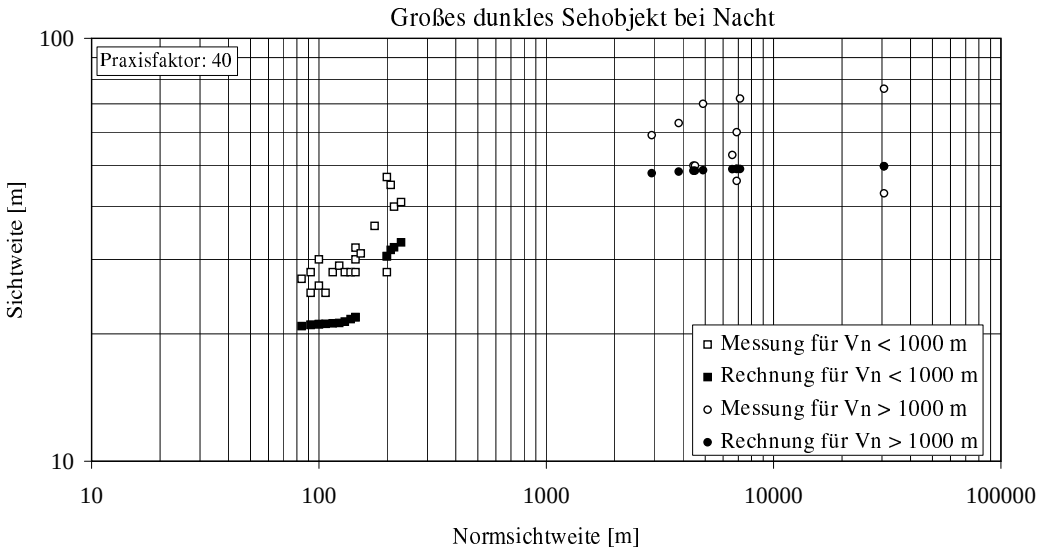


Abbildung 8.3: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Sichtweiten für das große dunkle Sehobjekt bei Nacht

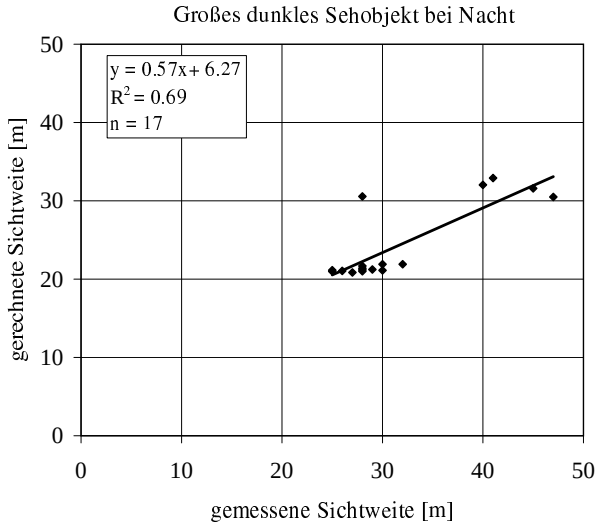


Abbildung 8.4: Sichtweiten-Korrelationsdiagramm für die Beobachtungssituationen von Abb. (8.3) im Nebelbereich

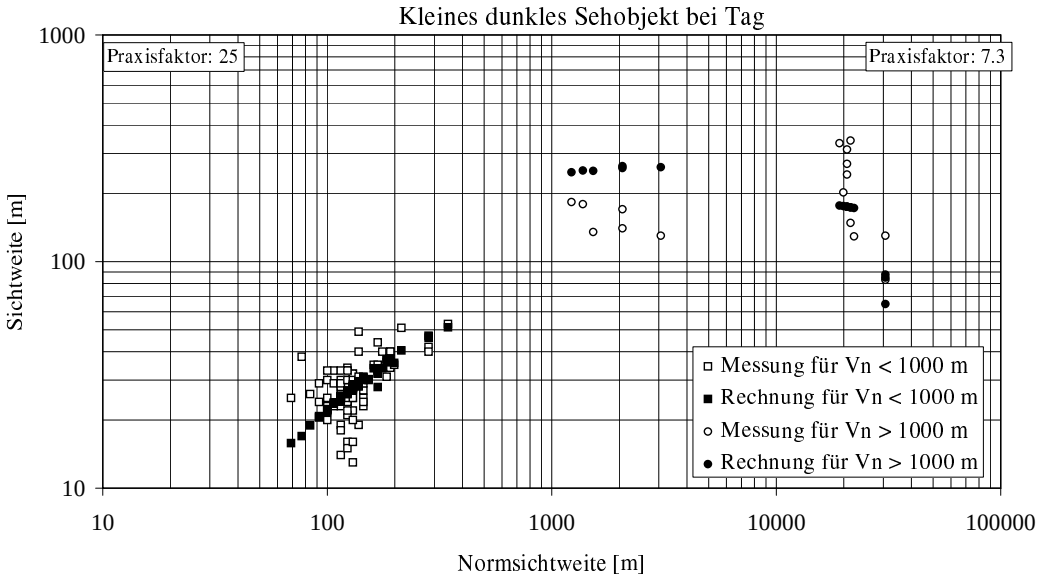


Abbildung 8.5: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Sichtweiten für das kleine dunkle Sehobjekt bei Tage

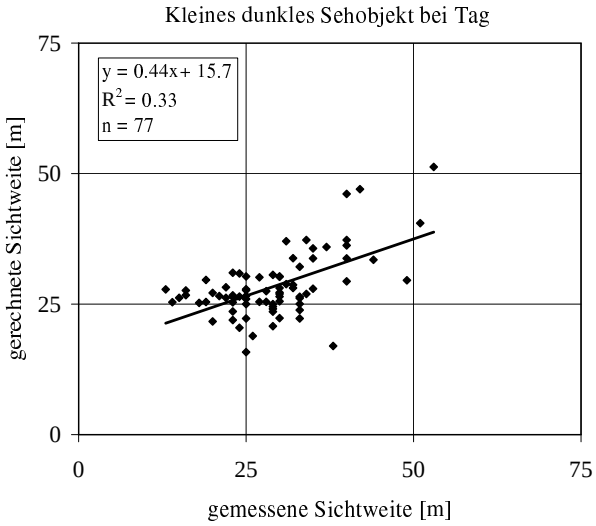


Abbildung 8.6: Sichtweiten-Korrelationsdiagramm für die Beobachtungssituationen von Abb. (8.5) im Nebelbereich

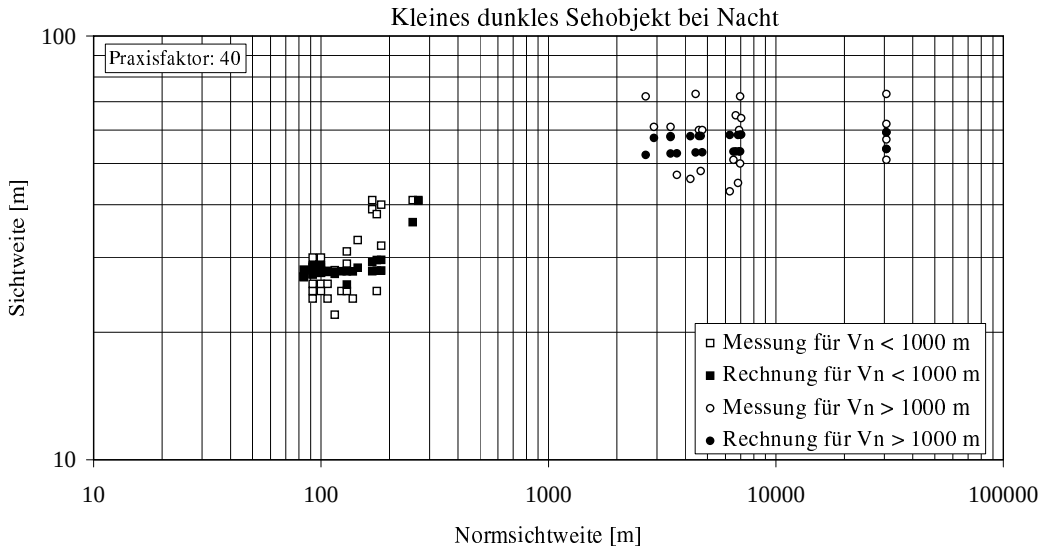


Abbildung 8.7: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Sichtweiten für das kleine dunkle Sehobjekt bei Nacht

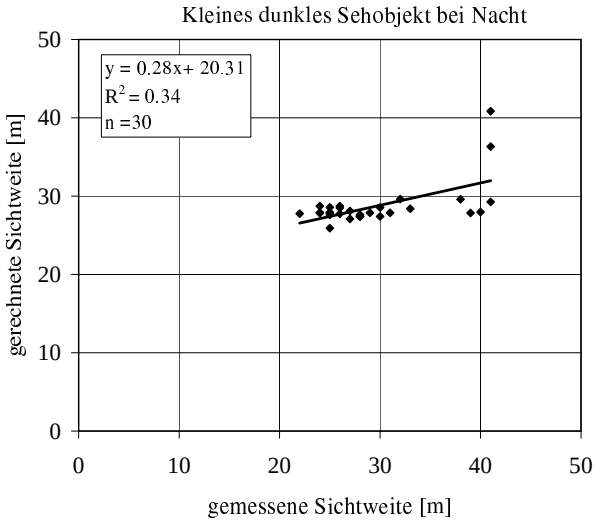


Abbildung 8.8: Sichtweiten-Korrelationsdiagramm für die Beobachtungssituationen von Abb. (8.7) im Nebelbereich

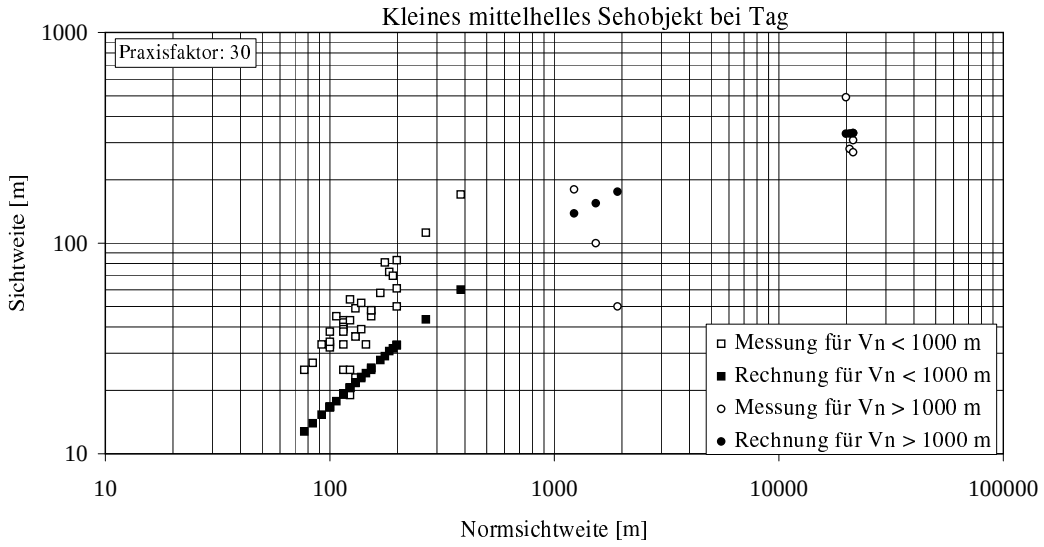


Abbildung 8.9: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Sichtweiten für das kleine mittelhelle Sehobjekt bei Tage

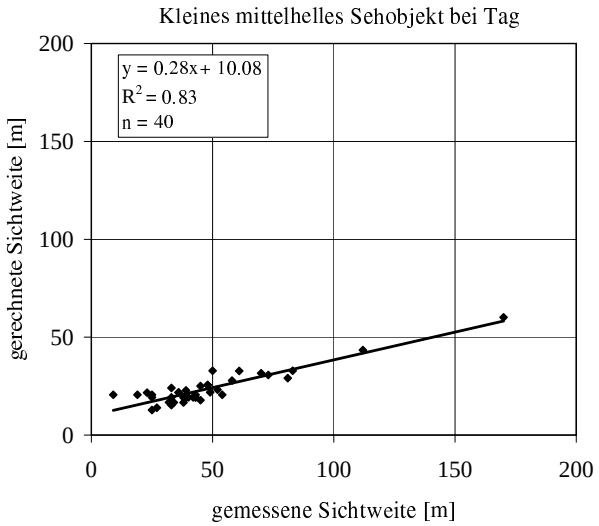


Abbildung 8.10: Sichtweiten-Korrelationsdiagramm für die Beobachtungssituationen von Abb. (8.9) im Nebelbereich

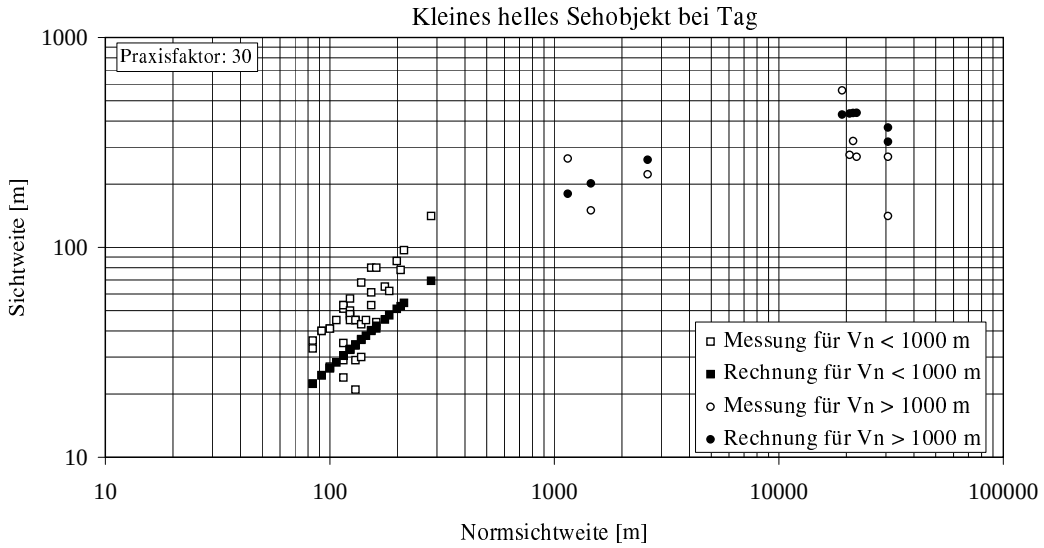


Abbildung 8.11: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Sichtweiten für das kleine helle Sehobjekt bei Tage

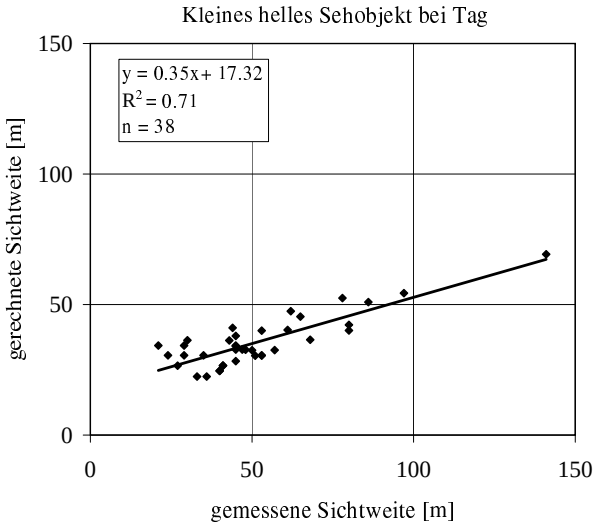


Abbildung 8.12: Sichtweiten-Korrelationsdiagramm für die Beobachtungssituationen von Abb. (8.11) im Nebelbereich

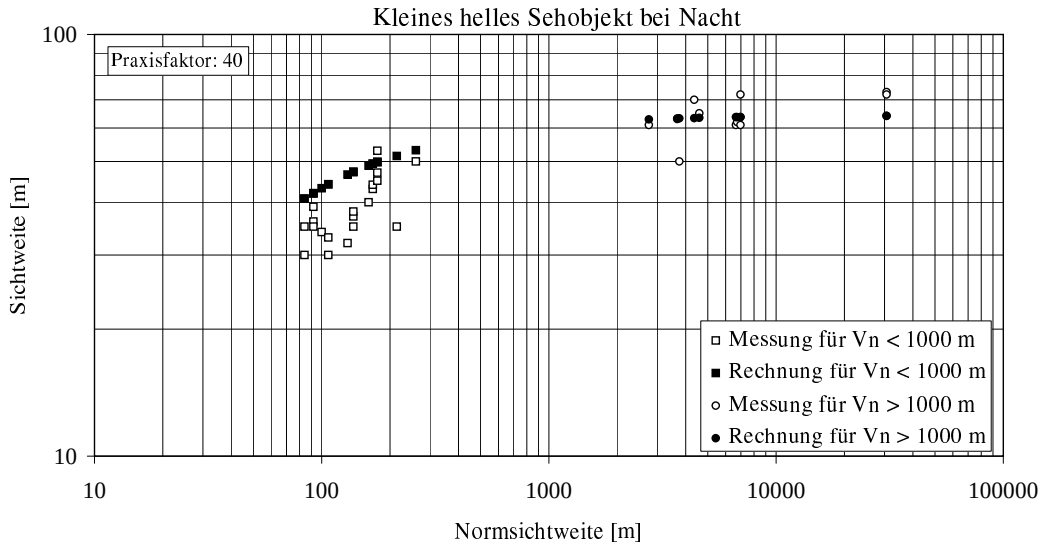


Abbildung 8.13: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Sichtweiten für das kleine helle Sehobjekt bei Nacht

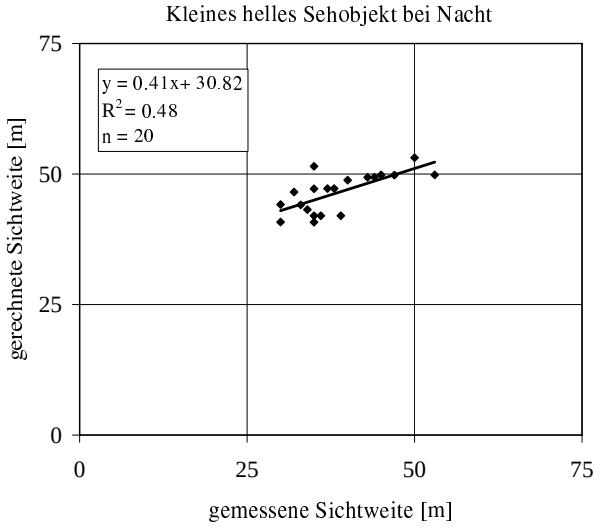


Abbildung 8.14: Sichtweiten-Korrelationsdiagramm für die Beobachtungssituationen von Abb. (8.13) im Nebelbereich

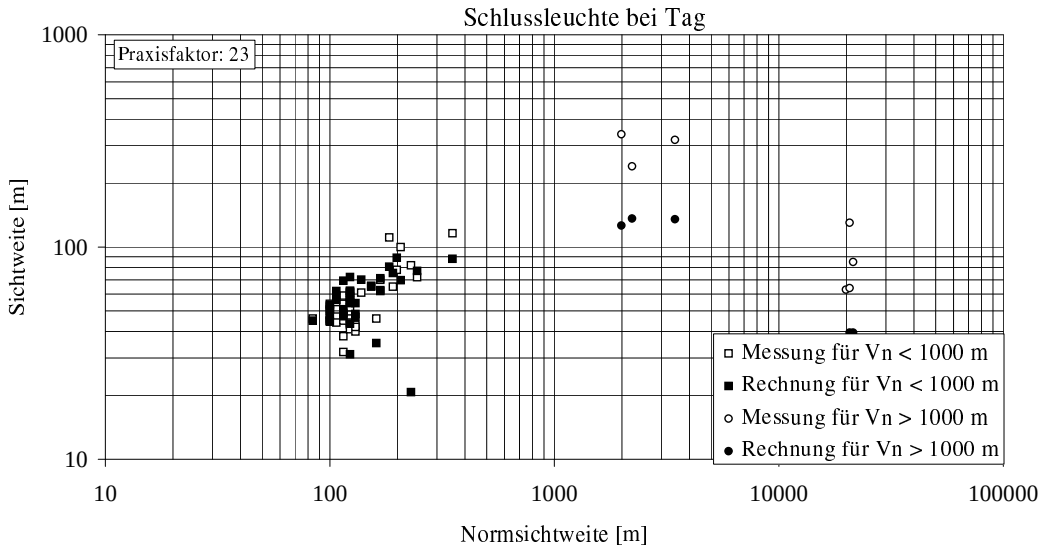


Abbildung 8.15: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Sichtweiten für die Schlussleuchte bei Tage

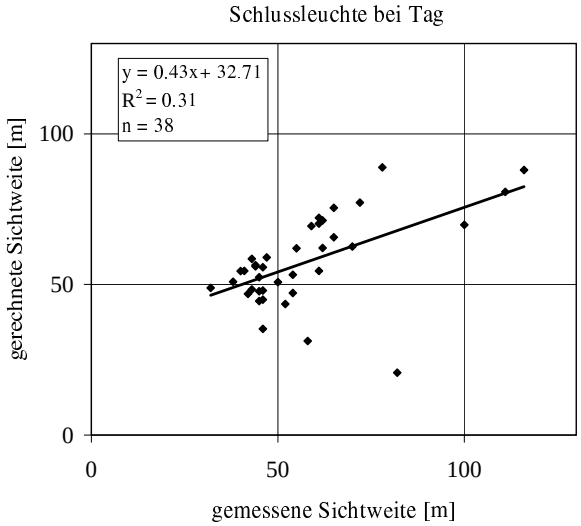


Abbildung 8.16: Sichtweiten-Korrelationsdiagramm für die Beobachtungssituationen von Abb. (8.15) im Nebelbereich

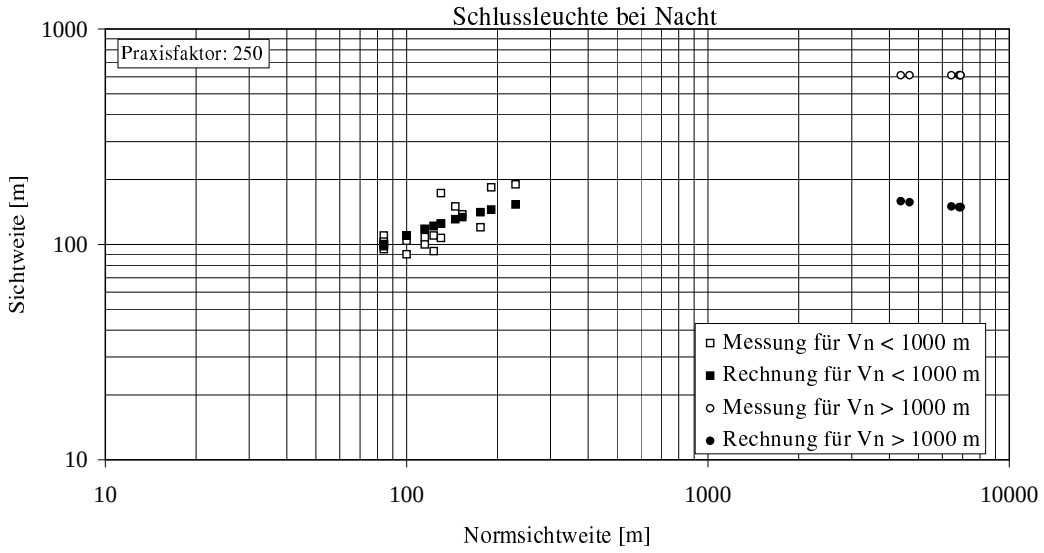


Abbildung 8.17: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Sichtweiten für die Schlussleuchte bei Nacht

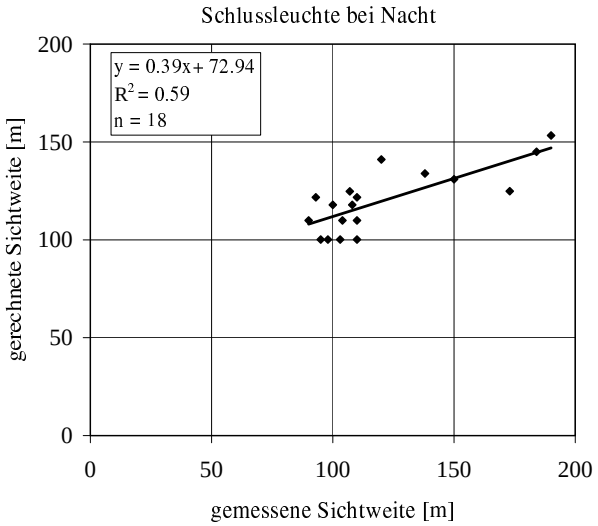


Abbildung 8.18: Sichtweiten-Korrelationsdiagramm für die Beobachtungssituationen von Abb. (8.17) im Nebelbereich

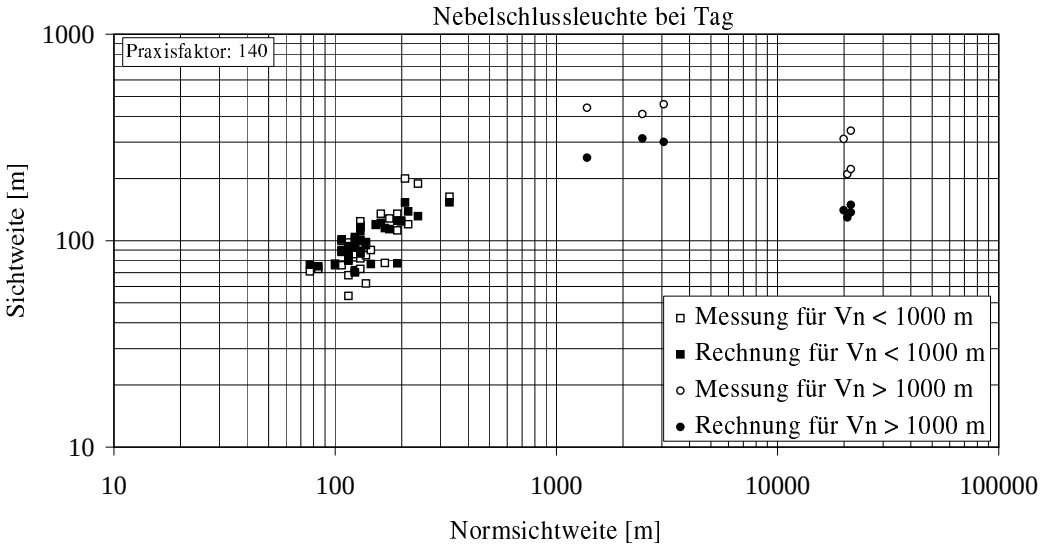


Abbildung 8.19: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Sichtweiten für die Nebelschlussleuchte bei Tage

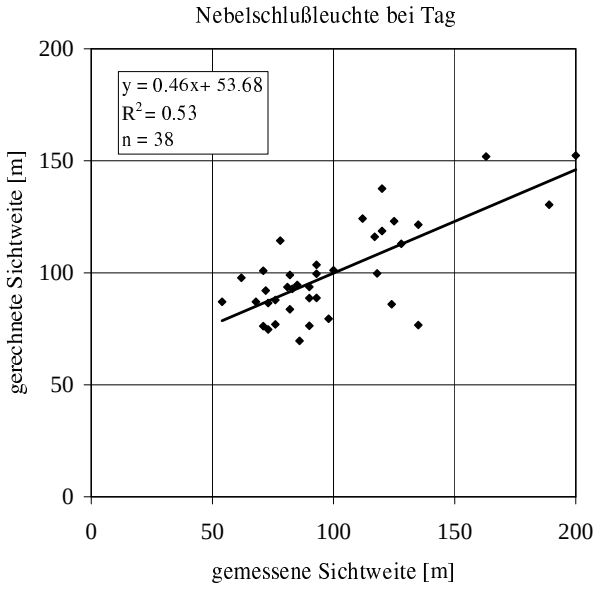


Abbildung 8.20: Sichtweiten-Korrelationsdiagramm für die Beobachtungssituationen von Abb. (8.19) im Nebelbereich

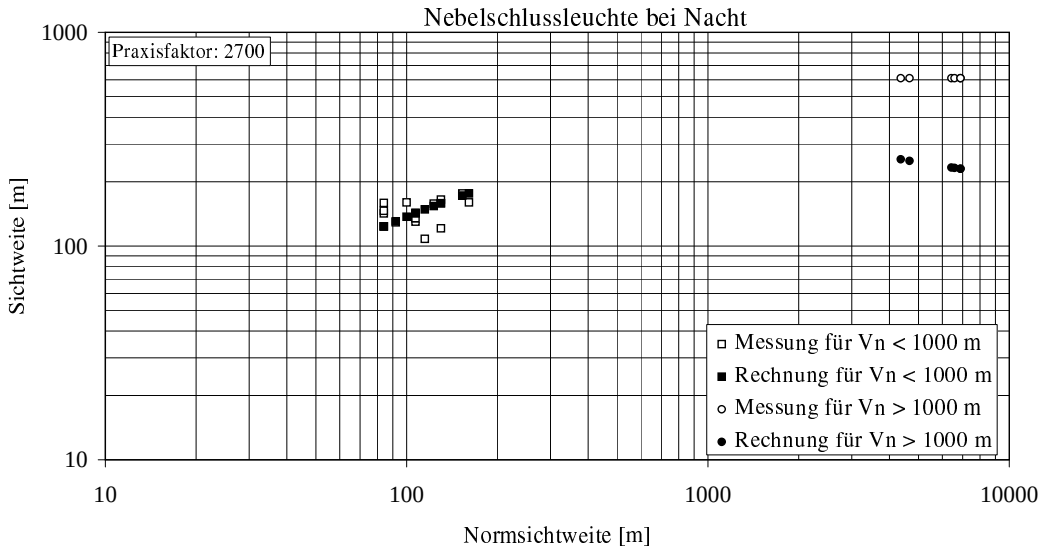


Abbildung 8.21: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Sichtweiten für die Nebelschlussleuchte bei Nacht

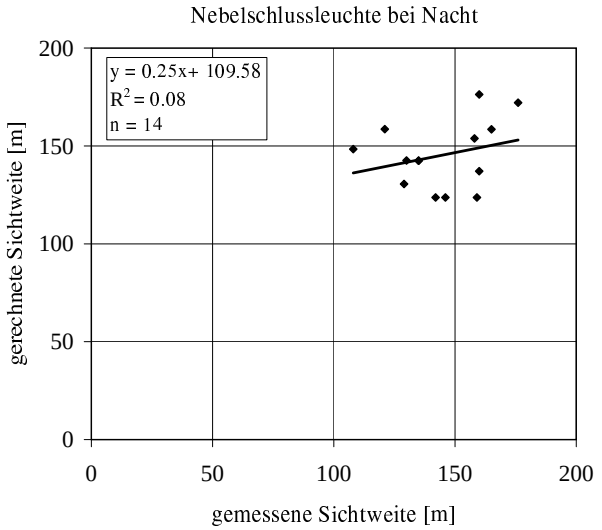


Abbildung 8.22: Sichtweiten-Korrelationsdiagramm für die Beobachtungssituationen von Abb. (8.21) im Nebelbereich

Kapitel 9

Zusammenfassung

Aufgabe und Ziel dieses Projektes war die Entwicklung und Validierung eines Modells zur Bestimmung von Sichtbarkeitsmaßen im Straßenverkehr bei Nebel, insbesondere von Sichtweiten verkehrrelevanter Sehobjekte und der Kontrastüberschwelligkeit.

Das im Rahmen dieses Projektes entwickelte und experimentell validierte Sichtweitenmodell ermöglicht eine umfassende Vorhersage der Sichtweiten von beleuchteten und selbstleuchtenden Sehobjekten in Abhängigkeit von den wichtigsten Einflussgrößen des Nebelsehens. Das sind vor allem die die Trübung kennzeichnende Normsichtweite, das natürliche Beleuchtungsniveau, spezifische Sehobjekteigenschaften wie Ausdehnung und Reflexionsgrad sowie die lichttechnischen Eigenschaften der Fahrzeugscheinwerfer.

Die im Rahmen dieses Projektes unter realen Umgebungsbedingungen durchgeführten Feldexperimente ergaben eine umfangreiche Datenbasis experimentell ermittelter Sichtweiten. Diese Daten sind von besonderer Bedeutung, da bisher nur sehr spärliche Nebeluntersuchungen im Freien vorliegen. Darüber hinaus dienten diese Daten zur Anpassung von Modellparametern an die realen Bedingungen des Nebelsehens mit Hilfe sog. Praxisfaktoren.

Die Analyse der ermittelten Sichtweitenergebnisse hat einmal die im Prinzip erwarteten Abhängigkeiten von der Trübung, dem Beleuchtungsniveau und den Fahrzeugscheinwerfern bestätigt und vor allem quantifiziert. Dabei hat sich gezeigt, dass der Einfluss der Sehobjekteigenschaften auf die Sichtweite gravierender ist als bisher angenommen. Das Konzept in der Meteorologie, die Sicht bei Nebel mit Hilfe der sog. Normsichtweite durch ein einziges Sehobjekt, nämlich das eines ausgedehnten schwarzen Zieles zu beschreiben, ist auf den Straßenverkehr nicht übertragbar. Besonders kritisch sind kleine dunkle Sehobjekte, die je nach Reflexionseigenschaften der Fahrbahn eine sehr geringe Sichtbarkeit ergeben können.

Die Analyse der Sichtweiten hat klar die Bedeutung der rückwärtigen Signalleuchten am Fahrzeug bestätigt. Während die Schlussleuchten mit zunehmender Nebeldichte immer mehr an Wirkung verlieren, bilden die lichtstarken Nebelschlussleuchten bei sehr dichtem Nebel das einzig wirksame Sichtziel. Die Frage nach dem relevanten Sehobjekt eines Fahrersichtweitensystems ist aus wahrnehmungsphysiologischer Sicht nicht eindeutig zu beantworten.

Unabhängig von noch offenen Detailfragen bei der Entwicklung eines Faheresichtweitensystems wurde mit diesem Projekt einmal eine fundierte Datenbasis geschaffen. Durch den in diesem Projekt entwickelten Sichtweitendemonstrator konnte darüber hinaus die praktische Umsetzbarkeit eines Systems zur Messung von Sichtweiten bestätigt werden.

Anhang A

Tabellen der theoretischen Sichtweitenuntersuchungen

Berechnete Sichtweiten der 6 untersuchten Sehobjekte bei dem Wahrnehmungs-Kriterium "Sehobjekt sicher gesehen".

Abhängige Variable:	
- Normsichtweite V_N:	37,5 m - 10 000 m
- Horizontale Beleuchtungsstärke E_h:	0,1 lx - 30 000 lx
Parameter:	
- Art der eingeschalteten Scheinwerfer:	Abblendlicht, Nebellicht

Leerstellen in den folgenden Tabellen bedeuten, dass mit fortschreitender Annäherung an das Sehobjekt das erforderliche Visibility Level bei der Sichtweitenberechnung für das Wahrnehmungs-Kriterium "sicher gesehen" nicht erreicht wurde. In diesen Fällen ist das Wahrnehmungsniveau geringer, als es dem Kriterium "sicher gesehen" entspricht.

Tabelle A.1: Berechnete Sichtweiten in Abhängigkeit von der Normsichtweite V_N und der horizontalen Beleuchtungsstärke E_h für das große dunkle Sehobjekt bei eingeschaltetem Abblendlicht. Siehe Abb. (4.12) und Abb. (4.13)

	Großes dunkles Sehobjekt bei eingeschaltetem Abblendlicht									
V_N / E_h/lx	37,5	75	150	300	600	1200	2400	5 000	10 000	100 000
0.1	15.9	17.8		24.4	36.4	40.8	43.0	44.3	45.2	45.9
1	16.1	21.6	36.5	51.6	61.5	65.0	65.6	65.1	64.5	64.3
10	16.7	35.9	71.1	138.1	249.4	397.2	546.2	664.2	716.7	634.9
100	21.3	42.5	84.2	163.4	301.0	499.0	722.7	941.3	1089.9	1148.2
1000	23.3	46.4	91.8	178.9	334.3	567.6	848.0	1141.5	1363.4	1535.4
10 000	23.6	47.0	93.1	181.8	342.3	589.4	895.0	1222.3	1479.2	1699.6
30 000	23.7	47.1	93.3	182.4	344.1	594.7	906.9	1243.0	1508.2	1744.8

Tabelle A.2: Berechnete Sichtweiten in Abhängigkeit von der Normsichtweite V_N und der horizontalen Beleuchtungsstärke E_h für das große dunkle Sehobjekt bei eingeschaltetem Nebellicht. Siehe Abb. (4.14) und Abb. (4.15)

	Großes dunkles Sehobjekt bei eingeschaltetem Nebellicht									
V_N / E_h/lx	37,5	75	150	300	600	1200	2400	5 000	10 000	100 000
0.1	15.8	19.1	21.0	26.2	33.8	36.9	38.8	39.8	40.4	40.8
1	15.7	18.4		39.3	46.0	49.4	50.5	51.0	51.1	51.7
10	16.6	35.1	69.4	134.2	243.6	390.5	537.4	645.6	681.7	556.1
100	21.3	42.6	84.7	164.6	303.6	502.8	730.2	951.0	1099.0	1146.9
1000	23.3	46.4	91.8	179.1	334.6	568.2	848.9	1142.6	1364.5	1535.1
10 000	23.6	47.0	93.1	181.8	342.3	589.5	895.0	1222.4	1479.3	1699.5
30 000	23.7	47.1	93.3	182.4	344.2	594.7	906.9	1243.1	1508.2	1744.8

Tabelle A.3: Berechnete Sichtweiten in Abhängigkeit von der Normsichtweite V_N und der horizontalen Beleuchtungsstärke E_h für das kleine dunkle Sehobjekt bei eingeschaltetem Abblendlicht. Siehe Abb. (4.16) und Abb. (4.17)

	Kleines dunkles Sehobjekt bei eingeschaltetem Abblendlicht									
V_N / E_h/lx	37,5	75	150	300	600	1200	2400	5 000	10 000	100 000
0.1	21.4	27.3		42.5	51.1	55.1	57.1	58.1	58.7	59.3
1	19.7	25.6	23.4	43.6	51.8	55.6	57.6	58.5	59.3	59.6
10				41.6	49.5	53.2	54.9	55.7	56.0	56.4
100				32.8	39.0	40.7	40.8	40.8	40.7	40.5
1000										
10 000	4.8									
30 000	5.7									

Tabelle A.4: Berechnete Sichtweiten in Abhängigkeit von der Normsichtweite V_N und der horizontalen Beleuchtungsstärke E_h für das kleine dunkle Sehobjekt bei eingeschaltetem Nebellicht. Siehe Abb. (4.18) und Abb. (4.19)

	Kleines dunkles Sehobjekt bei eingeschaltetem Nebellicht									
V_N / E_h/lx	37,5	75	150	300	600	1200	2400	5 000	10 000	100 000
0.1	20.6	26.3	27.7	38.9	45.8	50.1	52.2	53.1	53.8	54.2
1	19.4	25.4	27.6	39.8	46.8	50.9	52.8	53.9	54.4	54.5
10	13.5	15.1		39.8	46.3	49.8	51.4	52.1	52.4	52.7
100				32.0	38.0	39.5	39.6	39.5	39.4	39.3
1000										
10 000										
30 000	5.4									

Tabelle A.5: Berechnete Sichtweiten in Abhängigkeit von der Normsichtweite V_N und der horizontalen Beleuchtungsstärke E_h für das kleine mittelhelle Sehobjekt bei eingeschaltetem Abblendlicht. Siehe Abb. (4.20) und Abb. (4.21)

	Kleines mittelhelles Sehobjekt bei eingeschaltetem Abblendlicht									
V_N / E_h/lx	37,5	75	150	300	600	1200	2400	5 000	10 000	100 000
0.1	26.2	36.0	43.7	48.1	49.8	50.5	50.6	50.7	50.8	50.8
1	25.1	34.7	42.8	48.1	50.7	51.9	52.6	52.9	53.2	53.2
10	20.7	28.7	37.2	46.1	56.2	71.1	85.6	94.4	98.4	101.1
100	14.4	21.3	29.9	45.0	73.7	111.5	150.2	185.0	207.7	233.3
1000	9.3	15.4	26.2	47.9	84.3	131.9	183.4	233.0	269.2	315.0
10 000	6.5	13.0	25.3	48.8	87.4	138.4	195.5	251.6	293.6	348.6
30 000	6.1	12.7	25.3	49.0	88.0	140.1	198.4	256.4	299.8	357.2

Tabelle A.6: Berechnete Sichtweiten in Abhängigkeit von der Normsichtweite V_N und der horizontalen Beleuchtungsstärke E_h für das kleine mittelhelle Sehobjekt bei eingeschaltetem Nebellicht. Siehe Abb. (4.22) und Abb. (4.23)

	Kleines mittelhelles Sehobjekt bei eingeschaltetem Nebellicht									
V_N / E_h/lx	37,5	75	150	300	600	1200	2400	5 000	10 000	100 000
0.1	25.2	33.9	40.9	45.4	47.4	48.3	48.7	48.9	49.0	49.3
1	24.5	33.4	40.8	45.7	48.2	49.6	50.3	50.6	50.7	50.8
10	20.8	28.7	37.0	45.3	53.1	62.9	71.0	75.7	77.7	79.0
100	14.5	21.4	29.9	44.9	73.1	110.5	148.6	181.8	202.9	226.0
1000	9.6	15.5	26.2	47.9	84.2	131.8	183.2	232.6	268.5	313.9
10 000	6.8	13.0	25.3	48.8	87.4	138.4	195.5	251.6	293.5	348.5
30 000	6.2	12.7	25.3	49.0	88.0	140.1	198.4	256.4	299.8	357.2

Tabelle A.7: Berechnete Sichtweiten in Abhängigkeit von der Normsichtweite V_N und der horizontalen Beleuchtungsstärke E_h für das kleine helle Sehobjekt bei eingeschaltetem Abblendlicht. Siehe Abb. (4.24) und Abb. (4.25)

	Kleines helles Sehobjekt bei eingeschaltetem Abblendlicht									
V_N / E_h/lx	37,5	75	150	300	600	1200	2400	5 000	10 000	100 000
0.1	27.9	38.9	48.1	54.5	58.7	61.5	63.0	63.8	64.1	64.5
1	26.9	37.9	48.1	55.7	61.4	65.2	67.2	68.2	68.8	69.2
10	22.7	32.5	44.2	58.6	79.7	104.1	125.6	139.1	145.1	147.7
100	16.8	25.5	39.3	65.3	104.6	151.6	199.7	244.3	275.4	311.3
1000	12.2	21.6	39.4	71.7	119.4	177.7	240.5	303.4	351.7	415.9
10 000	10.3	20.4	39.7	73.7	124.2	187.1	256.0	327.0	382.5	458.4
30 000	10.1	20.3	39.8	74.0	125.1	189.6	260.0	332.6	390.0	469.8

Tabelle A.8: Berechnete Sichtweiten in Abhängigkeit von der Normsichtweite V_N und der horizontalen Beleuchtungsstärke E_h für das kleine helle Sehobjekt bei eingeschaltetem Nebellicht. Siehe Abb. (4.26) und Abb. (4.27)

	Kleines helles Sehobjekt bei eingeschaltetem Nebellicht									
V_N / E_h/lx	37,5	75	150	300	600	1200	2400	5 000	10 000	100 000
0.1	26.8	36.7	45.0	50.8	54.6	56.9	58.1	58.8	59.2	59.9
1	26.3	36.5	45.5	51.9	56.6	59.6	61.2	62.0	62.5	62.9
10	22.7	32.4	43.7	57.0	74.6	94.8	110.2	117.6	119.8	119.8
100	16.9	25.5	39.3	65.2	104.5	151.3	198.2	241.3	270.6	303.0
1000	12.3	21.6	39.4	71.7	119.4	177.7	240.3	303.0	351.1	414.4
10 000	10.4	20.4	39.7	73.7	124.2	187.1	255.9	326.9	382.4	458.2
30 000	10.1	20.3	39.8	74.0	125.1	189.6	260.0	332.5	390.0	469.8

Tabelle A.9: Berechnete Sichtweiten in Abhängigkeit von der Normsichtweite V_N und der horizontalen Beleuchtungsstärke E_h für die Schlussleuchte bei eingeschaltetem Abblendlicht. Siehe Abb. (4.28) und Abb. (4.29)

	Schlussleuchte bei eingeschaltetem Abblendlicht									
V_N / E_h/lx	37,5	75	150	300	600	1200	2400	5 000	10 000	100 000
0.1	59.5	94.5	137.6	181.4	213.6	223.6	209.9	200.5	163.9	158.8
1	59.2	96.4	149.1	218.1	299.9	381.7	441.3	461.3	437.9	377.1
10	51.5	83.0	127.7	187.5	262.3	349.1	439.6	526.1	584.1	623.9
100	40.7	65.2	97.9	140.1	191.7	251.2	314.0	375.9	420.7	474.6
1000	32.9	53.5	80.5	114.2	154.5	199.5	245.2	287.4	316.5	349.2
10 000	9.8	18.0	29.2	42.5	56.0	68.0	76.8	82.9	86.0	88.5
30 000								1.5	1.5	1.5

Tabelle A.10: Berechnete Sichtweiten in Abhängigkeit von der Normsichtweite V_N und der horizontalen Beleuchtungsstärke E_h für die Schlussleuchte bei eingeschaltetem Nebellicht. Siehe Abb. (4.30) und Abb. (4.31)

	Schlussleuchte bei eingeschaltetem Nebellicht									
V_N / E_h/lx	37,5	75	150	300	600	1200	2400	5 000	10 000	100 000
0.1	57.2	88.2	124.1	156.7	175.0	173.5	159.9	155.9	131.9	130.9
1	58.2	93.4	141.5	201.8	268.8	327.4	357.2	351.8	319.0	276.9
10	51.9	84.0	129.5	190.0	264.4	348.0	430.6	500.9	539.6	546.2
100	40.7	65.3	98.3	140.7	192.4	251.7	313.5	373.4	415.6	463.6
1000	32.9	53.5	80.5	114.2	154.5	199.5	245.0	287.0	315.9	348.1
10 000	9.8	18.0	29.2	42.5	56.0	68.0	76.8	82.9	85.9	88.4
30 000								1.5	1.5	1.5

Tabelle A.11: Berechnete Sichtweiten in Abhängigkeit von der Normsichtweite V_N und der horizontalen Beleuchtungsstärke E_h für die Nebelschlussleuchte bei eingeschaltetem Abblendlicht. Siehe Abb. (4.32) und Abb. (4.33)

	Nebelschlussleuchte bei eingeschaltetem Abblendlicht									
V_N / E_h/lx	37,5	75	150	300	600	1200	2400	5 000	10 000	100 000
0.1	71.1	115.9	175.9	246.9	318.2	372.5	383.9	371.8	284.0	256.5
1	70.8	118.1	188.8	288.5	419.1	573.2	724.3	835.1	854.6	721.6
10	63.2	104.2	165.2	251.6	366.9	510.1	675.9	857.9	1008.7	1183.9
100	52.9	86.1	133.2	197.0	279.4	380.6	497.2	627.7	741.4	919.4
1000	50.0	82.0	127.0	187.6	265.3	360.6	470.3	593.2	700.2	872.3
10 000	29.5	48.6	73.7	104.7	141.3	181.5	221.2	257.6	281.2	306.9
30 000	19.7	33.5	51.5	72.8	96.5	120.5	142.0	158.8	168.5	177.8

Tabelle A.12: Berechnete Sichtweiten in Abhängigkeit von der Normsichtweite V_N und der horizontalen Beleuchtungsstärke E_h für die Nebelschlussleuchte bei eingeschaltetem Nebellicht. Siehe Abb. (4.34) und Abb. (4.35)

	Nebelschlussleuchte bei eingeschaltetem Nebellicht									
V_N / E_h/lx	37,5	75	150	300	600	1200	2400	5 000	10 000	100 000
0.1	68.8	109.3	161.2	218.5	268.5	295.3	286.1	275.0	210.7	200.7
1	69.9	115.0	180.5	270.7	384.5	509.7	616.0	668.8	640.5	524.4
10	63.6	105.3	167.4	255.3	371.3	513.7	673.4	837.0	958.8	1042.7
100	53.0	86.3	133.7	197.8	280.8	382.1	498.1	626.2	735.9	901.1
1000	50.0	82.0	127.1	187.6	265.2	360.4	469.9	592.4	699.1	870.3
10 000	29.5	48.6	73.7	104.7	141.1	181.3	221.1	257.1	280.6	306.3
30 000	19.7	33.5	51.4	72.8	96.5	120.5	141.8	158.6	168.6	177.5

Anhang B

Tabellen der Messwerte der experimentellen Sichtweitenuntersuchungen

B.1 Messung lichttechnischer Variablen

B.2 Daten der Versuchspersonen der Kernuntersuchungen

B.3 Sichtweitenergebnisse

B.3.1 Nachtsituationen

B.3.2 Tagsituationen

B.4 Sichtweitenmessungen mit großem Versuchspersonenkollektiv

B.5 Visibility-Messungen für Selbstleuchter

B.6 Sichtweiten-Demonstrationsmessgerät

B.1 Messung lichttechnischer Variablen

Tabelle B.1: Normsichtweiten-Vergleichsmessung zwischen AEG-Streulichtschreiber MS 05 und FUMOSENS E (siehe Abb. 5.3 und 5.4)

Zeit in s seit Messbeginn	Messwerte AEG-Streulicht-schreiber (2 %)	Messwerte AEG-Streulicht-schreiber (5 %)	Messwerte FUMOSENS E (5 %)	Quotient beider 5 %-Messwerte
10	220	168.471	128	1.316
20	160	122.524	131	0.935
30	180	137.840	132	1.044
40	170	130.182	135	0.964
50	180	137.840	137	1.006
60	190	145.497	141	1.032
70	240	183.786	144	1.276
80	190	145.497	145	1.003
90	190	145.497	144	1.010
100	150	114.866	137	0.838
110	160	122.524	132	0.928
120	160	122.524	131	0.935
130	170	130.182	131	0.994
140	160	122.524	131	0.935
150	160	122.524	132	0.928
160	160	122.524	131	0.935
170	180	137.840	130	1.060
180	180	137.840	130	1.060
190	230	176.128	129	1.365
200	180	137.840	141	0.978
210	180	137.840	141	0.978
220	320	245.048	140	1.750
230	170	130.182	139	0.937
240	150	114.866	137	0.838
250	170	130.182	136	0.957
260	210	160.813	136	1.182
270	150	114.866	138	0.832
280	200	153.155	137	1.118
290	170	130.182	138	0.943
300	170	130.182	137	0.950
310	180	137.840	136	1.014
320	180	137.840	129	1.069
330	180	137.840	130	1.060
340	150	114.866	130	0.884
350	140	107.209	129	0.831

Tabelle B.1: Normsichtweiten-Vergleichsmessung zwischen AEG-Streulichtschreiber MS 05 und FUMOSENS E (siehe Abb. 5.3 und 5.4)

Zeit in s seit Messbeginn	Messwerte AEG-Streulicht-schreiber (2 %)	Messwerte AEG-Streulicht-schreiber (5 %)	Messwerte FUMOSENS E (5 %)	Quotient beider 5 %-Messwerte
360	160	122.524	129	0.950
370	170	130.182	129	1.009
380	150	114.866	129	0.890
390	180	137.840	128	1.077
400	180	137.840	129	1.069
410	180	137.840	128	1.077

B.2 Daten der Versuchspersonen der Kernuntersuchungen

Tabelle B.2: Daten von den 12 Versuchspersonen der Kernuntersuchungen der Sichtweitenmessungen

Versuchsperson-Nr.	Alter	Geschlecht m/w	Visus	Anzahl der Messwerte	
				Nacht	Tag
1	27	m.	1	13	7
2	31	m.	1	46	52
3	31	m.	1	4	7
4	26	m.	1	39	63
5	35	w.	1	45	14
9	34	m.	1	12	56
10	25	w.	1	4	7
11	25	w.	1	12	14
12	53	m.	1	14	42
13	31	m.	1	0	14
14	29	w.	1	0	14
15	33	w.	1	0	28

B.3 Sichtweitenergebnisse

B.3.1 Nachtsituationen

Tabelle B.3: Nachtsituation, großes dunkles Sehobjekt, Abblendlicht am Versuchspersonenfahrzeug, Parameter: Erkennungssicherheit (siehe Abb. 5.5)

Normsichtweite in km (5%)	Sichtweite in m „gerade so wahrgenommen“	Sichtweite in m „sicher erkannt“	horizontale Beleuchtungsstärke in lx	mittlere Leuchtdichte in cd/m^2 (10°-Messfeld) gerade / sicher erkannt	Subj. Beurteilung der Sichtverhältnisse 1 (sehr gut) — 5 (ungenügend)	Nr. der Versuchsperson	Datum des Versuchs
6.586	65	53	< 1	– / –	2	4	17.03.98
6.892	94	60	< 1	– / –	3	1	17.03.98
6.892	73	46	< 1	– / –	1	2	17.03.98
7.122	112	72	< 1	– / –	1	5	17.03.98
30.631	400	320	640	– / –	1	2	09.06.98
30.631	350	240	215	– / –	1	1	09.06.98
30.631	223	143	35	– / –	3	3	09.06.98
30.631	110	43	< 1	– / –	3	5	09.06.98
30.631	117	76	< 1	– / –	3	2	09.06.98
4.518	160	50	< 1	– / –	3	5	23.09.98
4.901	100	70	< 1	– / –	1	2	23.09.98
4.441	78	50	< 1	– / –	2	1	23.09.98
3.829	78	63	< 1	– / –	2	4	23.09.98
2.910	85	59	< 1	– / –	2	10	23.09.98
0.337	44	–	26	– / –	4	12	09.11.98
0.299	–	30	26	– / –	4	12	09.11.98
0.253	42	39	3	– / –	5	2	09.11.98
0.222	50	–	< 1	– / –	5	5	09.11.98
0.207	–	45	< 1	– / –	5	5	09.11.98
0.145	40	32	< 1	– / –	5	4	09.11.98
0.207	50	–	< 1	– / –	5	2	09.11.98
0.230	–	41	< 1	– / –	5	2	09.11.98
0.207	52	–	< 1	– / –	5	5	09.11.98
0.214	–	40	< 1	– / –	5	5	09.11.98
0.207	51	–	< 1	– / –	5	12	09.11.98
0.199	–	47	< 1	– / –	5	12	09.11.98
0.153	39	31	< 1	– / –	5	4	09.11.98
0.115	36	28	< 1	– / –	5	4	09.11.98
0.138	35	28	< 1	– / –	5	5	09.11.98
0.153	39	–	< 1	– / –	5	2	09.11.98
0.145	–	30	< 1	– / –	5	2	09.11.98

Tabelle B.3: Nachtsituation, großes dunkles Sehobjekt, Abblendlicht am Versuchspersonenfahrzeug, Parameter: Erkennungssicherheit (siehe Abb. 5.5)

Normsichtweite in km (5%)	Sichtweite in m „gerade so wahrgenommen“	Sichtweite in m „sicher erkannt“	horizontale Beleuchtungsstärke in lx	mittlere Leuchtdichte in cd/m^2 (10°-Messfeld) gerade / sicher erkannt	Subj. Beurteilung der Sichtverhältnisse 1 (sehr gut) — 5 (ungenügend)	Nr. der Versuchsperson	Datum des Versuchs
0.176	43	36	< 1	– / –	5	12	09.11.98
0.199	34	28	< 1	– / –	5	2	13.11.98
0.123	32	29	< 1	– / –	5	5	13.11.98
0.130	35	28	< 1	– / –	5	4	13.11.98
0.145	35	28	< 1	– / –	5	11	13.11.98
0.100	30	26	< 1	– / –	5	9	13.11.98
0.107	30	25	< 1	– / –	5	9	13.11.98
0.100	36	30	< 1	– / –	5	11	13.11.98
0.084	31	27	< 1	– / –	5	2	13.11.98
0.092	34	25	< 1	– / –	5	4	13.11.98
0.092	33	28	< 1	– / –	5	5	13.11.98

Tabelle B.4: Nachtsituation, kleines dunkles Sehobjekt, Abblendlicht am Versuchspersonenfahrzeug, Parameter: Erkennungssicherheit (siehe Abb. 5.6)

Normsichtweite in km (5%)	Sichtweite in m „gerade so wahrgenommen“	Sichtweite in m „sicher erkannt“	horizontale Beleuchtungsstärke in lx	mittlere Leuchtdichte in cd/m^2 (10°-Messfeld) gerade / sicher erkannt	Subj. Beurteilung der Sichtverhältnisse 1 (sehr gut) — 5 (ungenügend)	Nr. der Versuchsperson	Datum des Versuchs
6.279	65	43	< 1	– / –	2	4	17.03.98
6.815	60	45	< 1	– / –	3	1	17.03.98
6.969	72	50	< 1	– / –	1	2	17.03.98
7.045	70	64	< 1	– / –	1	5	17.03.98
30.631	60	40	469	– / –	1	2	09.06.98
30.631	135	83	184	– / –	2	1	09.06.98
30.631	88	35	21	– / –	3	3	09.06.98
30.631	73	57	< 1	– / –	3	5	09.06.98
30.631	73	62	< 1	– / –	3	2	09.06.98
4.671	60	48	< 1	– / –	3	5	23.09.98
4.595	70	60	< 1	– / –	1	2	23.09.98
4.212	75	46	< 1	– / –	2	1	23.09.98
3.446	74	61	< 1	– / –	2	4	23.09.98
2.910	76	61	< 1	– / –	2	10	23.09.98
0.276	40	33	18	– / –	4	12	09.11.98
0.237	42	–	2	– / –	5	2	09.11.98
0.230	–	37	2	– / –	5	2	09.11.98
0.176	45	–	< 1	0.185 / –	5	5	09.11.98
0.168	–	40	< 1	– / 0.229	5	5	09.11.98
0.161	41	31	< 1	0.215 / 0.236	5	4	09.11.98
0.260	49	–	< 1	0.228 / –	5	2	09.11.98
0.268	–	41	< 1	– / 0.190	5	2	09.11.98
0.207	42	–	< 1	0.228 / –	5	5	09.11.98
0.199	–	35	< 1	– / 0.259	5	5	09.11.98
0.191	50	–	< 1	0.230 / –	5	12	09.11.98
0.184	–	42	< 1	– / 0.244	5	12	09.11.98
0.145	43	31	< 1	0.277 / 0.324	5	4	09.11.98
0.107	–	24	< 1	– / 0.396	5	4	09.11.98
0.115	31	–	< 1	0.375 / –	5	4	09.11.98
0.145	38	–	< 1	0.321 / –	5	5	09.11.98
0.153	–	32	< 1	– / 0.310	5	5	09.11.98
0.138	32	26	< 1	0.454 / 0.401	5	2	09.11.98
0.176	40	–	< 1	0.344 / –	5	12	09.11.98
0.168	–	30	< 1	– / 0.331	5	12	09.11.98
0.214	32	29	< 1	0.383 / 0.357	5	2	13.11.98

Tabelle B.4: Nachtsituation, kleines dunkles Sehobjekt, Abblendlicht am Versuchspersonenfahrzeug, Parameter: Erkennungssicherheit (siehe Abb. 5.6)

Normsichtweite in km (5%)	Sichtweite in m „gerade so wahrgenommen“	Sichtweite in m „sicher erkannt“	horizontale Beleuchtungsstärke in lx	mittlere Leuchtdichte in cd/m^2 (10°-Messfeld) gerade / sicher erkannt	Subj. Beurteilung der Sichtverhältnisse 1 (sehr gut) — 5 (ungenügend)	Nr. der Versuchsperson	Datum des Versuchs
0.115	33	28	< 1	0.382 / 0.373	5	5	13.11.98
0.130	32	25	< 1	0.442 / 0.389	5	4	13.11.98
0.145	32	29	< 1	0.425 / 0.410	5	11	13.11.98
0.092	30	24	< 1	0.435 / 0.451	5	9	13.11.98
0.100	31	26	< 1	0.410 / 0.414	5	9	13.11.98
0.100	33	30	< 1	0.417 / 0.403	5	11	13.11.98
0.084	30	27	< 1	0.464 / 0.414	5	2	13.11.98
0.092	30	25	< 1	0.460 / 0.458	5	4	13.11.98
0.092	30	26	< 1	0.477 / 0.468	5	5	13.11.98

Tabelle B.5: Nachtsituation, kleines helles Sehobjekt, Abblendlicht am Versuchspersonenfahrzeug, Parameter: Erkennungssicherheit (siehe Abb. 5.7)

Normsichtweite in km (5%)	Sichtweite in m „gerade so wahrgenommen“	Sichtweite in m „sicher erkannt“	horizontale Beleuchtungsstärke in lx	mittlere Leuchtdichte in cd/m^2 (10°-Messfeld) gerade / sicher erkannt	Subj. Beurteilung der Sichtverhältnisse 1 (sehr gut) — 5 (ungenügend)	Nr. der Versuchsperson	Datum des Versuchs
6.662	80	61	< 1	– / –	2	4	17.03.98
6.739	100	62	< 1	– / –	3	1	17.03.98
6.969	75	61	< 1	– / –	1	2	17.03.98
6.969	90	72	< 1	– / –	1	5	17.03.98
30.631	440	270	483	– / –	1	2	09.06.98
30.631	251	141	139	– / –	2	1	09.06.98
30.631	59	50	15	– / –	3	3	09.06.98
30.631	103	73	< 1	– / –	3	5	09.06.98
30.631	105	72	< 1	– / –	3	2	09.06.98
4.595	110	65	< 1	– / –	3	5	23.09.98
4.365	100	70	< 1	– / –	1	2	23.09.98
3.752	78	50	< 1	– / –	2	1	23.09.98
3.676	77	63	< 1	– / –	2	4	23.09.98
2.757	110	61	< 1	– / –	2	10	23.09.98
0.360	93	–	13	– / –	4	12	09.11.98
0.383	–	76	13	– / –	4	12	09.11.98
0.222	50	44	2	– / –	5	2	09.11.98
0.168	50	–	< 1	– / –	5	5	09.11.98
0.176	–	45	< 1	– / –	5	5	09.11.98
0.168	53	43	< 1	– / –	5	4	09.11.98
0.268	60	–	< 1	– / –	5	2	09.11.98
0.260	–	50	< 1	– / –	5	2	09.11.98
0.184	54	–	< 1	– / –	5	5	09.11.98
0.176	–	47	< 1	– / –	5	5	09.11.98
0.176	65	53	< 1	– / –	5	12	09.11.98
0.138	44	37	< 1	– / –	5	4	09.11.98
0.107	43	30	< 1	– / –	5	4	09.11.98
0.161	50	40	< 1	– / –	5	5	09.11.98
0.138	43	35	< 1	– / –	5	2	09.11.98
0.168	54	44	< 1	– / –	5	12	09.11.98
0.214	42	35	< 1	– / –	5	2	13.11.98
0.107	39	33	< 1	– / –	5	5	13.11.98
0.130	39	32	< 1	– / –	5	4	13.11.98
0.138	40	38	< 1	– / –	5	11	13.11.98
0.084	37	30	< 1	– / –	5	9	13.11.98

Tabelle B.5: Nachtsituation, kleines helles Sehobjekt, Abblendlicht am Versuchspersonenfahrzeug, Parameter: Erkennungssicherheit (siehe Abb. 5.7)

Normsichtweite in km (5%)	Sichtweite in m „gerade so wahrgenommen“	Sichtweite in m „sicher erkannt“	horizontale Beleuchtungsstärke in lx	mittlere Leuchtdichte in cd/m^2 (10°-Messfeld) gerade / sicher erkannt	Subj. Beurteilung der Sichtverhältnisse 1 (sehr gut) — 5 (ungenügend)	Nr. der Versuchsperson	Datum des Versuchs
0.092	42	36	< 1	– / –	5	9	13.11.98
0.092	42	39	< 1	– / –	5	11	13.11.98
0.084	43	35	< 1	– / –	5	2	13.11.98
0.100	42	34	< 1	– / –	5	4	13.11.98
0.092	41	35	< 1	– / –	5	5	13.11.98

Tabelle B.6: Nachtsituation, kleines dunkles Sehobjekt, Abblendlicht und Nebelscheinwerfer am Versuchspersonenfahrzeug, Parameter: Erkennungssicherheit (siehe Abb. 5.8)

Normsichtweite in km (5%)	Sichtweite in m „gerade so wahrgenommen“	Sichtweite in m „sicher erkannt“	horizontale Beleuchtungsstärke in lx	mittlere Leuchtdichte in cd/m^2 (10°-Messfeld) gerade / sicher erkannt	Subj. Beurteilung der Sichtverhältnisse 1 (sehr gut) — 5 (ungenügend)	Nr. der Versuchsperson	Datum des Versuchs
6.662	82	65	< 1	– / –	2	4	17.03.98
6.509	85	51	< 1	– / –	3	1	17.03.98
6.892	86	60	< 1	– / –	1	2	17.03.98
6.969	96	72	< 1	– / –	1	5	17.03.98
30.631	163	130	466	– / –	1	2	09.06.98
30.631	72	41	98	– / –	2	1	09.06.98
30.631	95	46	6	– / –	3	3	09.06.98
30.631	113	73	< 1	– / –	3	5	09.06.98
30.631	74	51	< 1	– / –	3	2	09.06.98
4.748	80	60	< 1	– / –	3	5	23.09.98
4.441	85	73	< 1	– / –	1	2	23.09.98
3.676	80	47	< 1	– / –	2	1	23.09.98
3.446	80	58	< 1	– / –	2	4	23.09.98
2.680	95	72	< 1	– / –	2	10	23.09.98
0.444	51	–	8.7	– / –	4	12	09.11.98
0.459	–	43	8.7	– / –	5	12	09.11.98
0.230	45	39.5	2	– / –	5	2	09.11.98
0.176	45	–	< 1	0.244 / –	5	5	09.11.98
0.184	–	40	< 1	– / 0.324	5	5	09.11.98
0.168	47	39	< 1	0.243 / 0.261	5	4	09.11.98
0.260	50	–	< 1	0.271 / –	5	2	09.11.98
0.253	–	41	< 1	– / 0.255	5	2	09.11.98
0.168	44	–	< 1	0.299 / –	5	5	09.11.98
0.176	–	38	< 1	– / 0.321	5	5	09.11.98
0.168	52	41	< 1	0.240 / 0.336	5	12	09.11.98
0.130	35	29	< 1	0.415 / 0.426	5	4	09.11.98
0.107	30	–	< 1	0.545 / –	5	4	09.11.98
0.115	–	22	< 1	– / 0.532	5	4	09.11.98
0.153	41	–	< 1	0.396 / –	5	5	09.11.98
0.145	–	33	< 1	– / 0.430	5	5	09.11.98
0.138	32	24	< 1	0.592 / 0.563	5	2	09.11.98
0.176	42	–	< 1	0.426 / –	5	12	09.11.98
0.184	–	32	< 1	– / 0.478	5	12	09.11.98
0.176	30	25	< 1	0.521 / 0.530	5	2	13.11.98

Tabelle B.6: Nachtsituation, kleines dunkles Sehobjekt, Abblendlicht und Nebelscheinwerfer am Versuchspersonenfahrzeug, Parameter: Erkennungssicherheit (siehe Abb. 5.8)

Normsichtweite in km (5%)	Sichtweite in m „gerade so wahrgenommen“	Sichtweite in m „sicher erkannt“	horizontale Beleuchtungsstärke in lx	mittlere Leuchtdichte in cd/m^2 (10°-Messfeld) gerade / sicher erkannt	Subj. Beurteilung der Sichtverhältnisse 1 (sehr gut) — 5 (ungenügend)	Nr. der Versuchsperson	Datum des Versuchs
0.100	32	28	< 1	0.536 / 0.518	5	5	13.11.98
0.123	30	25	< 1	0.527 / 0.632	5	4	13.11.98
0.130	38	31	< 1	0.489 / 0.491	5	11	13.11.98
0.107	31	26	< 1	0.546 / 0.527	5	9	13.11.98
0.092	32	28	< 1	0.534 / 0.511	5	9	13.11.98
0.092	35	30	< 1	0.500 / 0.542	5	11	13.11.98
0.084	30	27	< 1	0.581 / 0.557	5	2	13.11.98
0.100	31	25	< 1	0.553 / 0.593	5	4	13.11.98
0.092	31	28	< 1	0.613 / 0.537	5	5	13.11.98

Tabelle B.7: Nachtsituation, Nebelschlussleuchte als Sehobjekt, Abblendlicht am Versuchspersonenfahrzeug, Parameter: Erkennungssicherheit (siehe Abb. 5.9)

Normsichtweite in km (5%)	Sichtweite in m „gerade so wahrgenommen“	Sichtweite in m „sicher erkannt“	horizontale Beleuchtungsstärke in lx	mittlere Leuchtdichte in cd/m^2 (10°-Messfeld) gerade / sicher erkannt	Subj. Beurteilung der Sichtverhältnisse 1 (sehr gut) — 5 (ungenügend)	Nr. der Versuchsperson	Datum des Versuchs
6.586	610	610	< 1	– / –	2	4	17.03.98
6.433	610	610	< 1	– / –	3	1	17.03.98
6.892	610	610	< 1	– / –	1	2	17.03.98
6.892	610	610	< 1	– / –	1	5	17.03.98
4.671	610	610	< 1	– / –	3	5	23.09.98
4.365	610	610	< 1	– / –	1	2	23.09.98
0.123	185	158	< 1	– / –	5	4	09.11.98
0.123	180	–	< 1	– / –	5	4	09.11.98
0.130	–	165	< 1	– / –	5	4	09.11.98
0.153	200	176	< 1	– / –	5	5	09.11.98
0.145	200	–	< 1	– / –	5	2	09.11.98
0.161	–	160	< 1	– / –	5	2	09.11.98
0.130	132	121	< 1	– / –	5	2	13.11.98
0.107	140	130	< 1	– / –	5	5	13.11.98
0.107	143	135	< 1	– / –	5	4	13.11.98
0.100	169	160	< 1	– / –	5	11	13.11.98
0.115	125	108	< 1	– / –	5	9	13.11.98
0.092	145	129	< 1	– / –	5	9	13.11.98
0.084	175	159	< 1	– / –	5	11	13.11.98
0.084	160	142	< 1	– / –	5	2	13.11.98
0.107	148	135	< 1	– / –	5	4	13.11.98
0.084	160	146	< 1	– / –	5	5	13.11.98

Tabelle B.8: Nachtsituation, Schlussleuchten als Sehobjekt,
Abblendlicht am Versuchspersonenfahrzeug,
Parameter: Erkennungssicherheit
(siehe Abb. 5.10)

Normsichtweite in km (5%)	Sichtweite in m „gerade so wahrgenommen“	Sichtweite in m „sicher erkannt“	horizontale Beleuchtungsstärke in lx	mittlere Leuchtdichte in cd/m^2 (10°-Messfeld) gerade / sicher erkannt	Subj. Beurteilung der Sichtverhältnisse 1 (sehr gut) — 5 (ungenügend)	Nr. der Versuchsperson	Datum des Versuchs
6.433	610	610	< 1	– / –	2	4	17.03.98
6.815	610	610	< 1	– / –	3	5	17.03.98
6.892	610	610	< 1	– / –	1	2	17.03.98
6.892	610	610	< 1	– / –	1	5	17.03.98
4.671	610	610	< 1	– / –	3	5	23.09.98
4.365	610	610	< 1	– / –	1	2	23.09.98
0.130	200	–	< 1	– / –	5	5	09.11.98
0.145	–	150	< 1	– / –	5	5	09.11.98
0.230	200	190	< 1	– / –	5	5	09.11.98
0.138	190	–	< 1	– / –	5	12	09.11.98
0.130	–	173	< 1	– / –	5	12	09.11.98
0.123	118	110	< 1	– / –	5	4	09.11.98
0.130	120	107	< 1	– / –	5	4	09.11.98
0.153	151	138	< 1	– / –	5	5	09.11.98
0.168	138	–	< 1	– / –	5	2	09.11.98
0.176	–	120	< 1	– / –	5	2	09.11.98
0.191	184	184	< 1	– / –	5	12	09.11.98
0.123	105	93	< 1	– / –	5	2	13.11.98
0.115	119	108	< 1	– / –	5	5	13.11.98
0.084	105	95	< 1	– / –	5	4	13.11.98
0.100	117	110	< 1	– / –	5	11	13.11.98
0.115	119	100	< 1	– / –	5	9	13.11.98
0.100	119	104	< 1	– / –	5	9	13.11.98
0.084	120	110	< 1	– / –	5	11	13.11.98
0.084	119	103	< 1	– / –	5	2	13.11.98
0.100	102	90	< 1	– / –	5	4	13.11.98
0.084	108	98	< 1	– / –	5	5	13.11.98

B.3.2 Tagsituationen

Tabelle B.9: Tagsituation, großes dunkles Sehobjekt, kein Licht am Versuchspersonenfahrzeug, Parameter: Erkennungssicherheit (siehe Abb. 5.15)

Normsichtweite in km (5%)	Sichtweite in m „gerade so wahrgenommen“	Sichtweite in m „sicher erkannt“	horizontale Beleuchtungsstärke in lx	mittlere Leuchtdichte in cd/m^2 (10°-Messfeld) gerade / sicher erkannt	Subj. Beurteilung der Sichtverhältnisse 1 (sehr gut) — 5 (ungenügend)	Nr. der Versuchsperson	Datum des Versuchs
0.207	77	44	3290	– / –	4	5	27.10.98
0.145	71	48	920	– / –	5	9	27.10.98
0.230	69	50	2000	– / –	4	2	27.10.98
0.459	190	190	2200	– / –	5	4	27.10.98
1.532	610	330	2790	– / –	4	5	07.10.98
1.685	540	380	4560	– / –	4	9	07.10.98
1.608	425	300	4560	– / –	4	10	07.10.98
21.442	610	510	50000	– / –	1	1	10.02.98
21.442	610	605	51000	– / –	1	2	10.02.98
21.442	605	542	39000	– / –	1	3	10.02.98
21.442	610	610	44000	– / –	1	4	10.02.98
0.153	75	–	920	– / –	5	9	11.10.99
0.161	–	43	920	– / –	5	9	11.10.99
0.184	69	51	1450	– / –	5	2	11.10.99
0.145	60	–	1550	– / –	5	11	11.10.99
0.138	–	50	1550	– / –	5	11	11.10.99
0.123	35	20	1750	– / –	4	12	11.10.99
0.123	69	50	2200	– / –	4	13	11.10.99
0.123	53	36	3500	– / –	4	14	11.10.99
0.123	55	40	3200	– / –	5	4	11.10.99
0.123	48	–	5000	– / –	5	2	11.10.99
0.145	–	40	5000	– / –	5	2	11.10.99
0.130	50	28	3000	– / –	5	9	11.10.99
0.115	55	42	4000	– / –	5	11	11.10.99
0.123	53	42	3300	– / –	5	12	11.10.99
0.115	66	56	2610	– / –	4	13	11.10.99
0.115	45	25	2650	– / –	4	14	11.10.99
0.107	45	35	3090	– / –	5	4	11.10.99
0.115	52	–	1500	– / –	5	4	26.10.99
0.100	–	40	1500	– / –	5	4	26.10.99
0.107	63	42	1500	– / –	5	15	26.10.99
0.115	63	50	2200	– / –	5	2	26.10.99
0.115	54	42	5200	– / –	5	9	26.10.99

Tabelle B.9: Tagsituation, großes dunkles Sehobjekt, kein Licht am Versuchspersonenfahrzeug, Parameter: Erkennungssicherheit (siehe Abb. 5.15)

Normsichtweite in km (5%)	Sichtweite in m „gerade so wahrgenommen“	Sichtweite in m „sicher erkannt“	horizontale Beleuchtungsstärke in lx	mittlere Leuchtdichte in cd/m^2 (10°-Messfeld) gerade / sicher erkannt	Subj. Beurteilung der Sichtverhältnisse 1 (sehr gut) — 5 (ungenügend)	Nr. der Versuchsperson	Datum des Versuchs
0.153	69	–	7000	– / –	5	12	26.10.99
0.145	–	42	7000	– / –	5	12	26.10.99
0.153	82	–	7600	– / –	4	4	26.10.99
0.161	–	65	9500	– / –	4	4	26.10.99
0.077	50	38	1700	– / –	5	4	02.11.99
0.077	51	40	1900	– / –	5	2	02.11.99
0.100	59	41	1400	– / –	5	15	02.11.99
0.092	47	36	2300	– / –	5	9	02.11.99
0.084	42	–	2130	– / –	5	12	02.11.99
0.077	–	31	1950	– / –	5	12	02.11.99
0.092	48	41	2740	– / –	5	4	02.11.99
0.115	52	44	2300	– / –	5	15	02.11.99
0.084	51	44	2200	– / –	5	2	02.11.99
0.092	56	43	2400	– / –	5	9	02.11.99
0.199	47	–	1850	– / –	5	12	02.11.99
0.222	–	41	1870	– / –	5	12	02.11.99
0.123	65	–	1950	– / –	5	12	02.11.99
0.130	–	50	1920	– / –	5	12	02.11.99
0.138	63	–	2060	– / –	5	4	02.11.99
0.153	–	46	2160	– / –	5	4	02.11.99
0.153	88	63	2400	– / –	5	15	02.11.99
0.222	91	62	2840	– / –	4	9	02.11.99
0.322	92	72	4160	– / –	4	2	02.11.99

Tabelle B.10: Tagsituation, kleines dunkles Sehobjekt, kein Licht am Versuchspersonenfahrzeug, Parameter: Erkennungssicherheit (siehe Abb. 5.16)

Normsichtweite in km (5%)	Sichtweite in m „gerade so wahrgenommen“	Sichtweite in m „sicher erkannt“	horizontale Beleuchtungsstärke in lx	mittlere Leuchtdichte in cd/m^2 (10°-Messfeld) gerade / sicher erkannt	Subj. Beurteilung der Sichtverhältnisse 1 (sehr gut) — 5 (ungenügend)	Nr. der Versuchsperson	Datum des Versuchs
0.199	48	35	1000	– / –	4	5	27.10.98
0.168	45	33	1000	– / –	5	9	27.10.98
0.191	55	40	1900	– / –	4	2	27.10.98
0.168	49	35	600	– / –	5	4	27.10.98
1.532	185	135	2730	– / –	4	5	07.10.98
1.378	253	179	4300	– / –	4	9	07.10.98
2.068	215	170	6442	– / –	4	10	07.10.98
20.676	513	312	42000	– / –	1	1	10.02.98
20.676	410	270	51000	– / –	1	2	10.02.98
21.442	491	342	44000	– / –	1	3	10.02.98
20.676	333	242	44000	– / –	1	4	10.02.98
0.107	43	–	1150	– / –	5	9	11.10.99
0.115	–	29	1150	– / –	5	9	11.10.99
0.176	48	40	1400	– / –	5	2	11.10.99
0.138	35	30	1300	– / –	5	11	11.10.99
0.123	25	15	2000	– / –	4	12	11.10.99
0.115	41	–	2100	– / –	4	13	11.10.99
0.123	–	33	2100	– / –	4	13	11.10.99
0.123	30	21	3500	– / –	4	14	11.10.99
0.123	40	25	3050	– / –	5	4	11.10.99
0.138	65	49	5400	– / –	5	2	11.10.99
0.123	31	22	3180	– / –	5	9	11.10.99
0.115	38	28	4200	– / –	5	11	11.10.99
0.123	35	24	3200	– / –	5	12	11.10.99
0.123	41	–	3000	– / –	4	13	11.10.99
0.115	–	33	3000	– / –	4	13	11.10.99
0.123	21	–	2750	– / –	4	14	11.10.99
0.130	–	16	2750	– / –	4	14	11.10.99
0.107	32	23	3100	– / –	5	4	11.10.99
0.100	31	20	1400	– / –	5	4	26.10.99
0.123	41	25	1600	– / –	5	15	26.10.99
0.123	43	33	2800	– / –	5	2	26.10.99
0.115	38	–	5300	– / –	5	9	26.10.99
0.123	–	30	5300	– / –	5	9	26.10.99
0.138	40	–	7000	– / –	5	12	26.10.99

Tabelle B.10: Tagsituation, kleines dunkles Sehobjekt, kein Licht am Versuchspersonenfahrzeug, Parameter: Erkennungssicherheit (siehe Abb. 5.16)

Normsichtweite in km (5%)	Sichtweite in m „gerade so wahrgenommen“	Sichtweite in m „sicher erkannt“	horizontale Beleuchtungsstärke in lx	mittlere Leuchtdichte in cd/m^2 (10°-Messfeld) gerade / sicher erkannt	Subj. Beurteilung der Sichtverhältnisse 1 (sehr gut) — 5 (ungenügend)	Nr. der Versuchsperson	Datum des Versuchs
0.145	–	24	7000	– / –	5	12	26.10.99
0.176	40	–	9500	– / –	4	4	26.10.99
0.184	–	31	8000	– / –	4	4	26.10.99
0.069	34	25	1500	– / –	5	4	02.11.99
0.084	32	26	1900	– / –	5	2	02.11.99
0.115	39	29	1700	– / –	5	15	02.11.99
0.092	33	24	2000	– / –	5	9	02.11.99
0.115	27	–	1600	– / –	5	12	02.11.99
0.130	–	20	1800	– / –	5	12	02.11.99
0.115	35	–	2820	– / –	5	4	02.11.99
0.130	–	25	2990	– / –	5	4	02.11.99
0.100	32	25	2500	– / –	5	15	02.11.99
0.100	45	33	2800	– / –	5	2	02.11.99
0.115	32	25	2400	– / –	5	9	02.11.99
0.153	42	–	1750	– / –	5	12	02.11.99
0.130	–	30	1740	– / –	5	12	02.11.99
0.123	42	–	1960	– / –	5	12	02.11.99
0.130	–	28	2080	– / –	5	12	02.11.99
0.138	44	31	2180	– / –	5	4	02.11.99
0.168	52	44	2500	– / –	5	15	02.11.99
0.283	50	40	2540	– / –	4	9	02.11.99
0.345	71	53	4050	– / –	4	2	02.11.99

Tabelle B.11: Tagsituation, kleines mittelhelles Sehobjekt, kein Licht am Versuchspersonenfahrzeug, Parameter: Erkennungssicherheit (siehe Abb. 5.17)

Normsichtweite in km (5%)	Sichtweite in m „gerade so wahrgenommen“	Sichtweite in m „sicher erkannt“	horizontale Beleuchtungsstärke in lx	mittlere Leuchtdichte in cd/m^2 (10°-Messfeld) gerade / sicher erkannt	Subj. Beurteilung der Sichtverhältnisse 1 (sehr gut) — 5 (ungenügend)	Nr. der Versuchsperson	Datum des Versuchs
0.153	100	45	700	– / –	4	5	27.10.98
0.199	82	61	1300	– / –	5	9	27.10.98
0.168	75	58	1900	– / –	4	2	27.10.98
0.199	101	83	2100	– / –	5	4	27.10.98
1.532	190	100	2720	– / –	4	5	07.10.98
1.225	217	180	4520	– / –	4	9	07.10.98
1.914	153	50	6250	– / –	4	10	07.10.98
21.442	610	308	50000	– / –	1	1	10.02.98
20.676	480	280	40000	– / –	1	2	10.02.98
21.442	434	270	38000	– / –	1	3	10.02.98
19.910	561	492	40000	– / –	1	4	10.02.98
0.130	53	–	1150	– / –	5	9	11.10.99
0.138	–	39	1150	– / –	5	9	11.10.99
0.176	105	81	1440	– / –	5	2	11.10.99
0.107	59	45	1300	– / –	5	11	11.10.99
0.130	43	23	2000	– / –	4	12	11.10.99
0.123	56	–	2300	– / –	4	13	11.10.99
0.115	–	43	2300	– / –	4	13	11.10.99
0.123	43	25	3000	– / –	4	14	11.10.99
0.130	52	36	3150	– / –	5	4	11.10.99
0.130	66	49	5400	– / –	5	2	11.10.99
0.123	56	43	3400	– / –	5	9	11.10.99
0.115	52	42	5000	– / –	5	11	11.10.99
0.123	40	9	3200	– / –	5	12	11.10.99
0.115	–	25	3200	– / –	5	12	11.10.99
0.115	45	40	3040	– / –	4	13	11.10.99
0.123	28	19	2700	– / –	4	14	11.10.99
0.115	45	33	3000	– / –	5	4	11.10.99
0.100	48	38	1300	– / –	5	4	26.10.99
0.115	55	39	1800	– / –	5	15	26.10.99
0.123	68	54	3900	– / –	5	2	26.10.99
0.123	64	–	7600	– / –	5	9	26.10.99
0.138	–	52	7600	– / –	5	9	26.10.99
0.145	65	–	7000	– / –	5	12	26.10.99
0.153	–	48	7000	– / –	5	12	26.10.99

Tabelle B.11: Tagsituation, kleines mittelhelles Sehobjekt, kein Licht am Versuchspersonenfahrzeug, Parameter: Erkennungssicherheit (siehe Abb. 5.17)

Normsichtweite in km (5%)	Sichtweite in m „gerade so wahrgenommen“	Sichtweite in m „sicher erkannt“	horizontale Beleuchtungsstärke in lx	mittlere Leuchtdichte in cd/m^2 (10°-Messfeld) gerade / sicher erkannt	Subj. Beurteilung der Sichtverhältnisse 1 (sehr gut) — 5 (ungenügend)	Nr. der Versuchsperson	Datum des Versuchs
0.153	98	–	7800	– / –	4	4	26.10.99
0.184	–	73	10800	– / –	4	4	26.10.99
0.077	33	25	1600	– / –	5	4	02.11.99
0.100	42	33	1800	– / –	5	2	02.11.99
0.092	44	33	1870	– / –	5	15	02.11.99
0.084	36	27	1700	– / –	5	9	02.11.99
0.145	44	33	1870	– / –	5	12	02.11.99
0.115	43	–	3020	– / –	5	4	02.11.99
0.100	–	33	3080	– / –	5	4	02.11.99
0.130	51	36	2500	– / –	5	15	02.11.99
0.100	40	32	3200	– / –	5	2	02.11.99
0.100	41	34	2400	– / –	5	9	02.11.99
0.153	60	48	1580	– / –	5	12	02.11.99
0.107	50	–	1880	– / –	5	12	02.11.99
0.115	–	38	1980	– / –	5	12	02.11.99
0.214	65	–	2340	– / –	5	4	02.11.99
0.199	–	50	2180	– / –	5	4	02.11.99
0.191	86	70	2600	– / –	5	15	02.11.99
0.268	143	112	2460	– / –	4	9	02.11.99
0.383	200	170	3870	– / –	4	2	02.11.99

Tabelle B.12: Tagsituation, kleines helles Sehobjekt, kein Licht am Versuchspersonenfahrzeug, Parameter: Erkennungssicherheit (siehe Abb. 5.18)

Normsichtweite in km (5%)	Sichtweite in m „gerade so wahrgenommen“	Sichtweite in m „sicher erkannt“	horizontale Beleuchtungsstärke in lx	mittlere Leuchtdichte in cd/m^2 (10°-Messfeld) gerade / sicher erkannt	Subj. Beurteilung der Sichtverhältnisse 1 (sehr gut) — 5 (ungenügend)	Nr. der Versuchsperson	Datum des Versuchs
0.161	76	44	700	– / –	4	5	27.10.98
0.207	105	78	1400	– / –	5	9	27.10.98
0.153	92	80	2250	– / –	4	2	27.10.98
0.199	95	86	2400	– / –	5	4	27.10.98
1.455	230	150	3150	– / –	4	5	07.10.98
1.149	325	265	4070	– / –	4	9	07.10.98
2.604	260	223	5640	– / –	4	10	07.10.98
20.676	610	276	40000	– / –	1	1	10.02.98
22.207	400	270	40000	– / –	1	2	10.02.98
21.442	610	321	46000	– / –	1	3	10.02.98
19.144	610	560	39000	– / –	1	4	10.02.98
0.130	58	45	1200	– / –	5	9	11.10.99
0.191	82	–	1200	– / –	5	2	11.10.99
0.176	–	65	1200	– / –	5	2	11.10.99
0.123	64	50	1400	– / –	5	11	11.10.99
0.130	35	21	2050	– / –	4	12	11.10.99
0.123	68	57	2300	– / –	4	13	11.10.99
0.130	51	29	2900	– / –	4	14	11.10.99
0.130	55	45	3140	– / –	5	4	11.10.99
0.123	58	47	5400	– / –	5	2	11.10.99
0.123	60	48	3570	– / –	5	9	11.10.99
0.123	59	45	4700	– / –	5	11	11.10.99
0.115	39	29	3170	– / –	5	12	11.10.99
0.123	64	–	3650	– / –	4	13	11.10.99
0.115	–	53	3650	– / –	4	13	11.10.99
0.115	35	24	2680	– / –	4	14	11.10.99
0.115	54	35	2850	– / –	5	4	11.10.99
0.107	60	45	1300	– / –	5	4	26.10.99
0.115	66	51	1900	– / –	5	15	26.10.99
0.115	79	53	2900	– / –	5	2	26.10.99
0.130	88	–	7400	– / –	5	9	26.10.99
0.138	–	68	7400	– / –	5	9	26.10.99
0.153	85	61	7000	– / –	5	12	26.10.99
0.161	100	–	7600	– / –	4	4	26.10.99
0.161	–	80	8000	– / –	4	4	26.10.99

Tabelle B.12: Tagsituation, kleines helles Sehobjekt, kein Licht am Versuchspersonenfahrzeug, Parameter: Erkennungssicherheit (siehe Abb. 5.18)

Normsichtweite in km (5%)	Sichtweite in m „gerade so wahrgenommen“	Sichtweite in m „sicher erkannt“	horizontale Beleuchtungsstärke in lx	mittlere Leuchtdichte in cd/m^2 (10°-Messfeld) gerade / sicher erkannt	Subj. Beurteilung der Sichtverhältnisse 1 (sehr gut) — 5 (ungenügend)	Nr. der Versuchsperson	Datum des Versuchs
0.100	35	27	1600	– / –	5	4	02.11.99
0.084	44	36	1700	– / –	5	2	02.11.99
0.092	47	40	2300	– / –	5	15	02.11.99
0.084	43	33	1800	– / –	5	9	02.11.99
0.138	41	30	2320	– / –	5	12	02.11.99
0.092	52	–	2820	– / –	5	4	02.11.99
0.100	–	41	2830	– / –	5	4	02.11.99
0.100	50	41	2400	– / –	5	15	02.11.99
0.092	49	40	3200	– / –	5	2	02.11.99
0.138	53	43	2300	– / –	5	9	02.11.99
0.168	70	–	1650	– / –	5	12	02.11.99
0.153	–	53	1720	– / –	5	12	02.11.99
0.138	55	–	1800	– / –	5	12	02.11.99
0.145	–	45	1870	– / –	5	12	02.11.99
0.230	81	–	2400	– / –	5	4	02.11.99
0.184	–	62	2300	– / –	5	4	02.11.99
0.214	115	97	2600	– / –	5	15	02.11.99
0.283	164	141	2750	– / –	4	9	02.11.99

Tabelle B.13: Tagsituation, kleines dunkles Sehobjekt, Abblendlicht am Versuchspersonenfahrzeug, Parameter: Erkennungssicherheit (siehe Abb. 5.19)

Normsichtweite in km (5%)	Sichtweite in m „gerade so wahrgenommen“	Sichtweite in m „sicher erkannt“	horizontale Beleuchtungsstärke in lx	mittlere Leuchtdichte in cd/m^2 (10°-Messfeld) gerade / sicher erkannt	Subj. Beurteilung der Sichtverhältnisse 1 (sehr gut) — 5 (ungenügend)	Nr. der Versuchsperson	Datum des Versuchs
0.153	50	30	800	– / –	4	5	27.10.98
0.168	48	32	1500	– / –	5	9	27.10.98
0.138	60	40	2050	– / –	4	2	27.10.98
0.191	45	40	2500	– / –	5	4	27.10.98
2.068	220	140	3590	– / –	4	5	07.10.98
1.225	222	183	4300	– / –	4	9	07.10.98
3.063	170	130	6850	– / –	4	10	07.10.98
19.910	510	202	40000	– / –	1	1	10.02.98
22.207	220	129	45000	– / –	1	2	10.02.98
21.442	337	148	46000	– / –	1	3	10.02.98
19.144	422	333	34000	– / –	1	4	10.02.98
0.138	39	–	1300	– / –	5	9	11.10.99
0.145	–	27	1300	– / –	5	9	11.10.99
0.184	46	37	1400	– / –	5	2	11.10.99
0.123	41	30	1200	– / –	5	11	11.10.99
0.130	23	13	2050	– / –	4	12	11.10.99
0.130	39	32	2230	– / –	4	13	11.10.99
0.138	25	19	3430	– / –	4	14	11.10.99
0.130	32	22	3500	– / –	5	4	11.10.99
0.115	34	23	3800	– / –	5	2	11.10.99
0.123	34	23	3850	– / –	5	9	11.10.99
0.115	39	30	4400	– / –	5	11	11.10.99
0.123	25	16	2850	– / –	5	12	11.10.99
0.115	43	–	3500	– / –	4	13	11.10.99
0.123	–	34	3500	– / –	4	13	11.10.99
0.115	21	14	2810	– / –	4	14	11.10.99
0.115	29	19	2750	– / –	5	4	11.10.99
0.100	32	23	1200	– / –	5	4	26.10.99
0.115	43	29	1500	– / –	5	15	26.10.99
0.107	45	33	3500	– / –	5	2	26.10.99
0.130	44	32	7600	– / –	5	9	26.10.99
0.145	42	23	6800	– / –	5	12	26.10.99
0.168	48	–	9500	– / –	4	4	26.10.99
0.161	–	35	8500	– / –	4	4	26.10.99

Tabelle B.13: Tagsituation, kleines dunkles Sehobjekt, Abblendlicht am Versuchspersonenfahrzeug, Parameter: Erkennungssicherheit (siehe Abb. 5.19)

Normsichtweite in km (5%)	Sichtweite in m „gerade so wahrgenommen“	Sichtweite in m „sicher erkannt“	horizontale Beleuchtungsstärke in lx	mittlere Leuchtdichte in cd/m^2 (10°-Messfeld) gerade / sicher erkannt	Subj. Beurteilung der Sichtverhältnisse 1 (sehr gut) — 5 (ungenügend)	Nr. der Versuchsperson	Datum des Versuchs
0.130	34	25	1800	– / –	5	4	02.11.99
0.077	40	38	1600	– / –	5	2	02.11.99
0.092	33	29	2300	– / –	5	15	02.11.99
0.123	32	23	1970	– / –	5	9	02.11.99
0.115	24	18	2070	– / –	5	12	02.11.99
0.123	40	–	2780	– / –	5	4	02.11.99
0.145	–	25	2760	– / –	5	4	02.11.99
0.100	42	30	2300	– / –	5	15	02.11.99
0.115	38	27	3300	– / –	5	2	02.11.99
0.145	42	29	2200	– / –	5	9	02.11.99
0.145	43	–	1610	– / –	5	12	02.11.99
0.145	–	30	1840	– / –	5	12	02.11.99
0.123	41	–	1900	– / –	5	12	02.11.99
0.107	–	29	1830	– / –	5	12	02.11.99
0.191	48	34	2400	– / –	5	4	02.11.99
0.214	69	51	2800	– / –	5	15	02.11.99
0.283	62	42	3010	– / –	4	9	02.11.99

Tabelle B.14: Tagsituation, Nebelschlussleuchte als Sehobjekt, kein Licht am Versuchspersonenfahrzeug, Parameter: Erkennungssicherheit (siehe Abb. 5.20)

Normsichtweite in km (5%)	Sichtweite in m „gerade so wahrgenommen“	Sichtweite in m „sicher erkannt“	horizontale Beleuchtungsstärke in lx	mittlere Leuchtdichte in cd/m^2 (10°-Messfeld) gerade / sicher erkannt	Subj. Beurteilung der Sichtverhältnisse 1 (sehr gut) — 5 (ungenügend)	Nr. der Versuchsperson	Datum des Versuchs
0.130	151	93	670	– / –	4	5	27.10.98
0.161	169	135	1490	– / –	5	9	27.10.98
0.130	150	118	2100	– / –	4	2	27.10.98
0.176	175	128	2600	– / –	5	4	27.10.98
2.450	610	410	3810	– / –	4	5	07.10.98
1.378	568	440	4200	– / –	4	9	07.10.98
3.063	610	458	5080	– / –	4	10	07.10.98
21.442	530	222	40000	– / –	1	1	10.02.98
20.676	290	210	52000	– / –	1	2	10.02.98
21.442	449	341	47000	– / –	1	3	10.02.98
19.910	369	311	45000	– / –	1	4	10.02.98
0.207	200	200	1000	– / –	5	9	11.10.99
0.176	160	–	1450	– / –	5	2	11.10.99
0.153	–	120	1450	– / –	5	2	11.10.99
0.123	108	93	1500	– / –	5	11	11.10.99
0.115	97	81	2000	– / –	4	12	11.10.99
0.123	116	83	2500	– / –	4	13	11.10.99
0.138	118	85	3100	– / –	4	14	11.10.99
0.123	112	90	2400	– / –	5	4	11.10.99
0.130	120	93	3500	– / –	5	2	11.10.99
0.130	102	73	3900	– / –	5	9	11.10.99
0.115	110	98	4100	– / –	5	11	11.10.99
0.123	84	72	2600	– / –	5	12	11.10.99
0.115	109	82	3300	– / –	4	13	11.10.99
0.115	90	54	2800	– / –	4	14	11.10.99
0.115	88	68	2790	– / –	5	4	11.10.99
0.107	115	100	1100	– / –	5	4	26.10.99
0.130	142	117	1000	– / –	5	15	26.10.99
0.130	152	124	4000	– / –	5	2	26.10.99
0.123	115	86	8000	– / –	5	9	26.10.99
0.153	113	–	8000	– / –	5	12	26.10.99
0.145	–	90	8000	– / –	5	12	26.10.99
0.176	160	–	9900	– / –	4	4	26.10.99
0.191	–	135	13000	– / –	4	4	26.10.99

Tabelle B.14: Tagsituation, Nebelschlussleuchte als Sehobjekt, kein Licht am Versuchspersonenfahrzeug, Parameter: Erkennungssicherheit (siehe Abb. 5.20)

Normsichtweite in km (5%)	Sichtweite in m „gerade so wahrgenommen“	Sichtweite in m „sicher erkannt“	horizontale Beleuchtungsstärke in lx	mittlere Leuchtdichte in cd/m^2 (10°-Messfeld) gerade / sicher erkannt	Subj. Beurteilung der Sichtverhältnisse 1 (sehr gut) — 5 (ungenügend)	Nr. der Versuchsperson	Datum des Versuchs
0.107	92	76	2200	– / –	5	4	02.11.99
0.077	89	71	1590	– / –	5	2	02.11.99
0.084	88	73	2300	– / –	5	15	02.11.99
0.123	89	71	1700	– / –	5	9	02.11.99
0.161	103	–	2020	– / –	5	12	02.11.99
0.130	–	82	2170	– / –	5	12	02.11.99
0.130	80	–	2740	– / –	5	4	02.11.99
0.138	–	62	2690	– / –	5	4	02.11.99
0.107	105	90	2100	– / –	5	15	02.11.99
0.100	95	76	3300	– / –	5	2	02.11.99
0.168	100	78	2200	– / –	5	9	02.11.99
0.176	128	–	1770	– / –	5	12	02.11.99
0.191	–	112	2090	– / –	5	12	02.11.99
0.184	132	–	1660	– / –	5	12	02.11.99
0.214	–	120	1750	– / –	5	12	02.11.99
0.161	147	–	2240	– / –	5	4	02.11.99
0.199	–	125	2400	– / –	5	4	02.11.99
0.237	210	189	2780	– / –	5	15	02.11.99
0.329	200	163	2910	– / –	4	9	02.11.99

Tabelle B.15: Tagsituation, Schlussleuchten als Sehobjekt,
kein Licht am Versuchspersonenfahrzeug,
Parameter: Erkennungssicherheit
(siehe Abb. 5.21)

Normsichtweite in km (5%)	Sichtweite in m „gerade so wahrgenommen“	Sichtweite in m „sicher erkannt“	horizontale Beleuchtungsstärke in lx	mittlere Leuchtdichte in cd/m^2 (10°-Messfeld) gerade / sicher erkannt	Subj. Beurteilung der Sichtverhältnisse 1 (sehr gut) — 5 (ungenügend)	Nr. der Versuchsperson	Datum des Versuchs
0.123	86	61	780	– / –	4	5	27.10.98
0.184	150	111	1460	– / –	5	9	27.10.98
0.153	80	65	2100	– / –	4	2	27.10.98
0.168	86	70	2800	– / –	5	4	27.10.98
2.221	360	240	4050	– / –	4	5	07.10.98
1.991	355	340	4500	– / –	4	9	07.10.98
3.446	412	320	4730	– / –	4	10	07.10.98
19.910	173	63	42000	– / –	1	1	10.02.98
20.676	230	130	47000	– / –	1	2	10.02.98
21.442	200	85	47000	– / –	1	3	10.02.98
20.676	262	64	44000	– / –	1	4	10.02.98
0.199	113	78	1200	– / –	5	9	11.10.99
0.138	75	61	1400	– / –	5	2	11.10.99
0.123	73	62	1700	– / –	5	11	11.10.99
0.115	62	–	2070	– / –	4	12	11.10.99
0.123	–	43	2070	– / –	4	12	11.10.99
0.123	73	61	2560	– / –	4	13	11.10.99
0.130	50	40	2800	– / –	4	14	11.10.99
0.123	62	46	2400	– / –	5	4	11.10.99
0.130	55	43	3800	– / –	5	2	11.10.99
0.130	53	42	4100	– / –	5	9	11.10.99
0.115	62	54	3400	– / –	5	11	11.10.99
0.123	55	41	2550	– / –	5	12	11.10.99
0.115	53	45	3300	– / –	4	13	11.10.99
0.115	44	32	3100	– / –	4	14	11.10.99
0.115	55	38	2780	– / –	5	4	11.10.99
0.107	67	55	1300	– / –	5	4	26.10.99
0.115	69	59	1000	– / –	5	15	26.10.99
0.123	71	52	4500	– / –	5	2	26.10.99
0.123	70	58	8000	– / –	5	9	26.10.99
0.161	64	46	8500	– / –	5	12	26.10.99
0.230	98	82	15000	– / –	4	4	26.10.99
0.100	54	45	2000	– / –	5	4	02.11.99
0.107	58	47	1550	– / –	5	2	02.11.99

Tabelle B.15: Tagsituation, Schlussleuchten als Sehobjekt,
kein Licht am Versuchspersonenfahrzeug,
Parameter: Erkennungssicherheit
(siehe Abb. 5.21)

Normsichtweite in km (5%)	Sichtweite in m „gerade so wahrgenommen“	Sichtweite in m „sicher erkannt“	horizontale Beleuchtungsstärke in lx	mittlere Leuchtdichte in cd/m^2 (10°-Messfeld) gerade / sicher erkannt	Subj. Beurteilung der Sichtverhältnisse 1 (sehr gut) — 5 (ungenügend)	Nr. der Versuchsperson	Datum des Versuchs
0.084	54	46	2300	– / –	5	15	02.11.99
0.107	52	44	1800	– / –	5	9	02.11.99
0.107	60	–	2220	– / –	5	12	02.11.99
0.123	–	44	2360	– / –	5	12	02.11.99
0.100	55	46	2590	– / –	5	4	02.11.99
0.100	58	50	2200	– / –	5	15	02.11.99
0.100	58	45	3200	– / –	5	2	02.11.99
0.168	80	62	1900	– / –	5	9	02.11.99
0.168	65	–	1920	– / –	5	12	02.11.99
0.100	–	54	1900	– / –	5	12	02.11.99
0.184	80	–	1830	– / –	5	12	02.11.99
0.191	–	65	1950	– / –	5	12	02.11.99
0.191	91	–	2530	– / –	5	4	02.11.99
0.245	–	72	2620	– / –	5	4	02.11.99
0.207	121	100	2780	– / –	5	15	02.11.99
0.352	153	116	2870	– / –	4	9	02.11.99

B.4 Sichtweitenmessungen mit großem Versuchspersonenkollektiv

Tabelle B.16: Einzelergebnisse der Sichtweitenmessung mit dem großen Versuchspersonenkollektiv (siehe Abb. 5.29 bis 5.35)

Versuchs-personen-nummer	Visus	Alter	m/w	Fahrersichtweite				Anzahl der Messwerte
				kleines dunkles Sehobj.		kleines helles Sehobj.		
				gerade	sicher	gerade	sicher	
101	1	25	m	140	102	165	150	8
101	1			140	109	160	145	
102	1	26	m	139	99	146	128	8
102	1			140	100	153	143	
103	1	23	m	144	132	160	151	8
103	1			143	131	158	148	
104	1	23	m	145	124	160	146	8
104	1			140	97	160	147	
105	1	25	m	130	100	148	135	8
105	1			133	103	152	141	
106	1	21	w	99	78	139	130	8
106	1			125	98	142	124	
107	1	23	w	122	115	150	145	8
107	1			148	129	160	148	
108	1	23	w	103	99	139	132	8
108	1			143	137	150	142	
109	0.65	23	m	135	124	155	149	8
109	0.65			128	111	151	142	
110	0.75	27	m	105	89	115	100	8
110	0.75			128	102	148	128	
111	1	24	m	100	95	126	115	8
111	1			133	125	149	138	
112	1	20	m	95	48	102	50	8
112	1			120	83	152	89	
113	0.5	21	w	99	92	135	126	8
113	0.5			129	107	155	150	
114	1	21	w	113	100	155	142	8
114	1			132	112	157	142	
115	1	25	m	126	101	155	145	8
115	1			123	109	150	137	
116	0.9	23	m	119	110	155	147	8
116	0.9			112	102	156	135	
117	0.9	22	m	92	75	100	84	8
117	0.9			100	85	124	100	
118	1	22	m	124	94	155	146	8
118	1			101	95	160	149	

Tabelle B.16: Einzelergebnisse der Sichtweitenmessung mit dem großen Versuchspersonenkollektiv (siehe Abb. 5.29 bis 5.35)

Versuchs-personen-nummer	Visus	Alter	m/w	Fahrersichtweite				Anzahl der Messwerte
				kleines dunkles Sehobj.		kleines helles Sehobj.		
				gerade	sicher	gerade	sicher	
119	1	22	m	105	80	112	100	8
119	1			117	108	140	130	
120	1	28	m	143	112	153	142	8
120	1			135	121	160	141	
121	1	25	m	105	97	145	138	8
121	1			120	105	139	130	
122	1	25	m	106	95	149	140	8
122	1			108	102	153	146	
123	1	22	w	122	95	140	130	8
123	1			126	99	154	140	
124	1	24	m	127	115	147	143	8
124	1			130	125	165	157	
125	1	23	w	105	96	140	102	8
125	1			95	85	147	101	
126	1	28	m	93	75	136	100	8
126	1			98	80	137	102	
127	0.85	26	m	123	105	140	132	8
127	0.85			129	113	138	131	
128	1	31	m	126	110	146	133	8
128	1			114	105	140	132	
129	1	20	w	115	105	153	144	8
129	1			141	105	152	140	

B.5 Visibility-Messungen für Selbstleuchter

Tabelle B.17: Messwerte der Visibility-Messungen
(siehe Abb. 6.4, 6.5 und 6.6)

Situation 1	Situation 2	Situation 3	Situation 4	Situation 5	Situation 6	
0.056	0.056	0.056	0.336	0.336	0.336	L-Umfeld
2.65	10.4	112	3.32	12.2	112	L-Objekt
0.9789	0.9946	0.9995	0.8988	0.9725	0.9970	Kontrast
Person 1:						
77	80	88	79	80	88	$90^o - \alpha$
72	80	88	77	83	87	$90^o - \alpha$
76	82	87	79	81	87	$90^o - \alpha$
74	80	88	78	84	87	$90^o - \alpha$
75	80	89	80	81	87	$90^o - \alpha$
74	81	88	80	82	89	$90^o - \alpha$
77	82	89	80	82	87	$90^o - \alpha$
76	81	88	80	81	87	$90^o - \alpha$
76	81	87	79	82	87	$90^o - \alpha$
73	83	87	78	82	87	$90^o - \alpha$
75.00	81.00	87.90	79.00	81.80	87.30	$90^o - \alpha$ (MW)
137.33	375.93	6851.28	252.68	452.23	4145.81	VL-Wert
Person 2:						
68	75	87	70	81	86	$90^o - \alpha$
68	77	86	68	84	84	$90^o - \alpha$
65	75	86	65	82	84	$90^o - \alpha$
69	73	88	62	80	85	$90^o - \alpha$
64	74	87	66	79	87	$90^o - \alpha$
64	77	88	65	80	86	$90^o - \alpha$
65	76	86	66	81	86	$90^o - \alpha$
65	78	88	68	79	87	$90^o - \alpha$
64	79	88	68	80	87	$90^o - \alpha$
64	79	80	64	78	85	$90^o - \alpha$
65.55	76.30	86.40	66.20	80.40	85.70	$90^o - \alpha$ (MW)
hline 53.7	164.01	2333.36	56.49	330.78	1636.42	VL-Wert
Person 3:						
75	84	86	82	78	85	$90^o - \alpha$
68	90	89	76	79	85	$90^o - \alpha$
72	86	89	75	77	82	$90^o - \alpha$
81	85	88	77	78	84	$90^o - \alpha$

Tabelle B.17: Messwerte der Visibility-Messungen
(siehe Abb. 6.4, 6.5 und 6.6)

Situation 1	Situation 2	Situation 3	Situation 4	Situation 5	Situation 6	
85	80	88	81	71	83	$90^o - \alpha$
79	79	86	80	78	85	$90^o - \alpha$
78	83	88	76	75	87	$90^o - \alpha$
81	90	87	79	77	85	$90^o - \alpha$
77	83	90	73	81	85	$90^o - \alpha$
76	84	86	79	78	84	$90^o - \alpha$
77.20	84.40	87.70	77.80	77.20	84.50	$90^o - \alpha$ (MW)
187.43	966.1	5712.07	206	187.43	1001.44	VL-Wert
126.15	502.01	4965.57	171.72	323.48	2261.22	VL-MW

B.6 Sichtweiten-Demonstrationsmessgerät

Tabelle B.18: Messwerte zur Bestimmung des Linearitätsfehlers des Leuchtdichtekanals – 5°-Messfeld (siehe Abb. 7.2)

L-Sollwerte in cd/m^2	L-Istwerte in cd/m^2	Absoluter Fehler	relativer Fehler in %
0.1	0.09	0.010	-10.00
0.2	0.19	0.010	-5.00
0.3	0.283	0.017	-5.67
0.4	0.375	0.025	-6.25
0.5	0.47	0.030	-6.00
0.6	0.57	0.030	-5.00
0.7	0.66	0.040	-5.71
0.8	0.763	0.037	-4.63
0.9	0.857	0.043	-4.78
1	0.945	0.055	-5.50
2	1.89	0.110	-5.50
3	2.855	0.145	-4.83
4	3.81	0.190	-4.75
5	4.75	0.250	-5.00
6	5.72	0.280	-4.67
7	6.67	0.330	-4.71
8	7.62	0.380	-4.75
9	8.58	0.420	-4.67
10	9.54	0.460	-4.60
20	19.13	0.870	-4.35
30	28.8	1.200	-4.00
40	38.4	1.600	-4.00
50	48.12	1.880	-3.76
60	58.1	1.900	-3.17
70	67.7	2.300	-3.29
80	77.5	2.500	-3.13
90	87.2	2.800	-3.11
100	97.15	2.850	-2.85
200	196	4.000	-2.00
300	296.05	3.950	-1.32
400	395.6	4.400	-1.10
500	494.2	5.800	-1.16
600	593.5	6.500	-1.08
700	691.75	8.250	-1.18
800	788.75	11.250	-1.41
900	886.72	13.280	-1.48

Tabelle B.18: Messwerte zur Bestimmung des Linearitätsfehlers des Leuchtdichtekanals – 5°-Messfeld (siehe Abb. 7.2)

L-Sollwerte in cd/m^2	L-Istwerte in cd/m^2	Absoluter Fehler	relativer Fehler in %
1000	983.08	16.920	-1.69
1200	1178.54	21.460	-1.79
1400	1371.42	28.580	-2.04
1600	1567.58	32.420	-2.03
1800	1761.2	38.800	-2.16
2000	1957.62	42.380	-2.12
2200	2158.07	41.930	-1.91
2400	2348.76	51.240	-1.47
2600	2552.55	47.450	-1.82
2800	2751.84	48.160	-1.72
3000	2955.76	44.240	-1.47

Tabelle B.19: Messwerte zur Bestimmung des Linearitätsfehlers des Leuchtdichtekanals – 10°-Messfeld (siehe Abb. 7.3)

L-Sollwerte in cd/m^2	L-Istwerte in cd/m^2	Absoluter Fehler	relativer Fehler in %
0.1	0.083	0.017	-17.00
0.2	0.179	0.021	-10.50
0.3	0.277	0.023	-7.67
0.4	0.381	0.019	-4.75
0.5	0.483	0.017	-3.40
0.6	0.578	0.022	-3.67
0.7	0.673	0.027	-3.86
0.8	0.777	0.023	-2.88
0.9	0.87	0.030	-3.33
1	0.966	0.034	-3.40
2	1.95	0.050	-2.50
3	2.932	0.068	-2.27
4	3.927	0.073	-1.82
5	4.92	0.080	-1.60
6	5.889	0.111	-1.85
7	6.884	0.116	-1.66
8	7.862	0.138	-1.72
9	8.864	0.136	-1.51
10	9.847	0.153	-1.53
20	19.715	0.285	-1.43
30	29.715	0.285	-0.95
40	39.665	0.335	-0.84
50	49.611	0.389	-0.78
60	59.563	0.437	-0.73
70	69.45	0.550	-0.79
80	79.224	0.776	-0.97
90	89.224	0.776	-0.86
100	98.953	1.047	-1.05
200	193.455	6.545	-3.27
300	285.608	14.392	-4.80
400	376.78	23.220	-5.80
500	469.99	30.010	-6.00
600	562.463	37.537	-6.26
700	655.711	44.289	-6.33
800	749.071	50.929	-6.37
900	843.257	56.743	-6.30
1000	937.533	62.467	-6.25
1200	1134.905	65.095	-5.42

Tabelle B.19: Messwerte zur Bestimmung des Linearitätsfehlers des Leuchtdichtekanals – 10°-Messfeld (siehe Abb. 7.3)

L-Sollwerte in cd/m^2	L-Istwerte in cd/m^2	Absoluter Fehler	relativer Fehler in %
1400	1330.763	69.237	-4.95
1600	1538.723	61.277	-3.83
1800	1735.504	64.496	-3.58
2000	1961.023	38.977	-1.95
2200	2156.834	43.166	-1.96
2400	2387.429	12.571	-0.52
2600	2619.562	-19.562	0.75
2800	2842.95	-42.950	1.53
3000	3045.188	-45.188	1.51

Tabelle B.20: Messwerte zur Bestimmung des Linearitätsfehlers des Beleuchtungsstärkekanals (siehe Abb. 7.4)

L-Sollwerte in cd/m^2	L-Istwerte in cd/m^2	Absoluter Fehler	relativer Fehler in %
0.1	0.097	0.003	-3.00
0.2	0.21	-0.010	5.00
0.3	0.326	-0.026	8.67
0.4	0.428	-0.028	7.00
0.5	0.542	-0.042	8.40
0.6	0.644	-0.044	7.33
0.7	0.76	-0.060	8.57
0.8	0.869	-0.069	8.62
0.9	0.977	-0.077	8.56
1	1.079	-0.079	7.90
2	2.18	-0.180	9.00
3	3.275	-0.275	9.17
4	4.347	-0.347	8.68
5	5.453	-0.453	9.06
6	6.536	-0.536	8.93
7	7.628	-0.628	8.97
8	8.728	-0.728	9.10
9	9.775	-0.775	8.61
10	10.935	-0.935	9.35
20	21.84	-1.840	9.20
30	32.62	-2.620	8.73
40	43.49	-3.490	8.73
50	54.28	-4.280	8.56
60	65.07	-5.070	8.45
70	75.74	-5.740	8.20
80	86.59	-6.590	8.24
90	97.37	-7.370	8.19
100	107.94	-7.940	7.94
200	215.44	-15.440	7.72
300	322.31	-22.310	7.44
400	427.07	-27.070	6.77
500	532.43	-32.430	6.49
600	637.45	-37.450	6.24
700	740.44	-40.440	5.78
800	844.32	-44.320	5.54
900	946.21	-46.210	5.13
1000	1049.52	-49.520	4.95
2000	2061.88	-61.880	3.09

Tabelle B.20: Messwerte zur Bestimmung des Linearitätsfehlers des Beleuchtungsstärkekanals (siehe Abb. 7.4)

L-Sollwerte in cd/m^2	L-Istwerte in cd/m^2	Absoluter Fehler	relativer Fehler in %
3000	3035.89	-35.890	1.20
4000	3984.54	15.460	-0.39
5000	4932.57	67.430	-1.35
6000	5896.73	103.270	-1.72
7000	6827.37	172.630	-2.47
8000	7789.44	210.560	-2.63
9000	8674.86	325.140	-3.61
10000	9628.56	371.440	-3.71
11000	10625.31	374.690	-3.41
12000	11623.33	376.670	-3.14
13000	12563	437.000	-3.36
14000	13662.13	337.870	-2.41
15000	14616.47	383.530	-2.56
16000	15708.36	291.640	-1.82
17000	16527.65	472.350	-2.78
18000	17433.15	566.850	-3.15
19000	18438.72	561.280	-2.95
20000	19561.33	438.670	-2.19

Anhang C

Tabellen des Vergleichs von gemessenen mit den berechneten Sichtweiten

Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Sichtweiten bei dem Wahrnehmungs-Kriterium "Sehobjekt sicher gesehen".

In den Tabellen bedeuten:

1. Spalte:	Mittlere Normsichtweite V_N während der Messungen (in m)
2. Spalte:	Horizontale Beleuchtungsstärke E_h während der Messungen (in lx) (Die Nachtsituation wurde mit $E_h = 0$ lx beschrieben)
3. Spalte:	Eingeschaltete Fahrzeugbeleuchtung während der Messungen
4. Spalte:	Gemessene Sichtweite einer Versuchsperson (in m)
5. Spalte:	Praxisfaktor des Schwellenkontrastes
6. Spalte:	Berechnete Sichtweite, gerundet (in m)
7. Spalte:	Relative Abweichung zwischen Messung (m) und Rechnung (r), gemäß: $\lvert m - r \rvert / r$ in %. Mittelwert: Mittelwert der Einzelabweichungen Anzahl: Anzahl der Vergleiche

Tabelle C.1: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Sichtweiten (in m) für das große dunkle Sehobjekt bei Tage. Siehe Abb. (8.1)

Normsicht-weite in m	Horizontale Beleuchtung in lx	Fahrzeug - Beleuchtung	Praxis-Faktor	Sichtweite Messung	Sichtweite Rechnung	Relative Abweichung in %
77	1700	kein Scheinwerfer	30	38	48	20
77	1900	kein Scheinwerfer	30	40	48	16
77	1950	kein Scheinwerfer	30	31	48	35
84	2200	kein Scheinwerfer	30	44	52	16
92	2300	kein Scheinwerfer	30	36	57	37
92	2740	kein Scheinwerfer	30	41	57	28
92	2400	kein Scheinwerfer	30	43	57	25
100	1500	kein Scheinwerfer	30	40	62	35
100	1400	kein Scheinwerfer	30	41	62	34
107	3090	kein Scheinwerfer	30	35	66	47
107	1500	kein Scheinwerfer	30	42	66	36
115	4000	kein Scheinwerfer	30	42	71	41
115	2610	kein Scheinwerfer	30	56	71	21
115	2650	kein Scheinwerfer	30	25	71	65
115	2200	kein Scheinwerfer	30	50	71	30
115	5200	kein Scheinwerfer	30	42	71	41
115	2300	kein Scheinwerfer	30	44	71	38
123	1750	kein Scheinwerfer	30	20	76	74
123	2200	kein Scheinwerfer	30	50	76	34
123	3500	kein Scheinwerfer	30	36	76	53
123	3200	kein Scheinwerfer	30	40	76	47
123	3300	kein Scheinwerfer	30	42	76	45
130	3000	kein Scheinwerfer	30	28	80	65
130	1920	kein Scheinwerfer	30	50	80	38
138	1550	kein Scheinwerfer	30	50	85	41
145	920	kein Scheinwerfer	30	48	88	46
145	5000	kein Scheinwerfer	30	40	90	55
145	7000	kein Scheinwerfer	30	42	90	53
153	2160	kein Scheinwerfer	30	46	94	51
153	2400	kein Scheinwerfer	30	63	94	33
161	920	kein Scheinwerfer	30	43	98	56
161	9500	kein Scheinwerfer	30	65	100	35
184	1450	kein Scheinwerfer	30	51	112	55
207	3290	kein Scheinwerfer	30	44	127	65
222	1870	kein Scheinwerfer	30	41	135	70
222	2840	kein Scheinwerfer	30	62	135	54
230	2000	kein Scheinwerfer	30	50	140	64
322	4160	kein Scheinwerfer	30	72	193	63

Tabelle C.1: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Sichtweiten (in m) für das große dunkle Sehobjekt bei Tage. Siehe Abb. (8.1)

Normsichtweite in m	Horizontale Beleuchtung in lx	Fahrzeug - Beleuchtung	Praxis-Faktor	Sichtweite Messung	Sichtweite Rechnung	Relative Abweichung in %
459	2200	kein Scheinwerfer	30	190	267	29
1532	2790	kein Scheinwerfer	30	330	679	51
1608	4560	kein Scheinwerfer	30	300	707	58
1685	4560	kein Scheinwerfer	30	380	727	48
21442	50000	kein Scheinwerfer	30	510	1706	70
21442	51000	kein Scheinwerfer	30	605	1705	65
21442	39000	kein Scheinwerfer	30	542	1700	68
21442	44000	kein Scheinwerfer	30	610	1705	64
30631	640	Abblendlicht	30	320	1483	78
30631	215	Abblendlicht	32	240	1317	82
					Mittelwert	47.4
					Anzahl	48

Tabelle C.2: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Sichtweiten (in m) für das große dunkle Sehobjekt bei Nacht. Siehe Abb. (8.3)

Normsichtweite in m	Horizontale Beleuchtung in lx	Fahrzeug - Beleuchtung	Praxis-Faktor	Sichtweite Messung	Sichtweite Rechnung	Relative Abweichung in %
84	0	Abblendlicht	40	27	21	29
92	0	Abblendlicht	40	25	21	19
92	0	Abblendlicht	40	28	21	33
100	0	Abblendlicht	40	26	21	23
100	0	Abblendlicht	40	30	21	42
107	0	Abblendlicht	40	25	21	18
115	0	Abblendlicht	40	28	21	32
123	0	Abblendlicht	40	29	21	37
130	0	Abblendlicht	40	28	21	31
138	0	Abblendlicht	40	28	22	29
145	0	Abblendlicht	40	32	22	46
145	0	Abblendlicht	40	30	22	37
145	0	Abblendlicht		28		
153	0	Abblendlicht		31		
176	0	Abblendlicht		36		
199	0	Abblendlicht	40	47	30	54
199	0	Abblendlicht	40	28	31	8
207	0	Abblendlicht	40	45	32	42
214	0	Abblendlicht	40	40	32	25
230	0	Abblendlicht	40	41	33	25
2910	0	Abblendlicht	40	59	48	23
3829	0	Abblendlicht	40	63	48	30
4441	0	Abblendlicht	40	50	49	3
4518	0	Abblendlicht	40	50	49	3
4901	0	Abblendlicht	40	70	49	44
6586	0	Abblendlicht	40	53	49	8
6892	0	Abblendlicht	40	60	49	22
6892	0	Abblendlicht	40	46	49	6
7122	0	Abblendlicht	40	72	49	47
30631	0	Abblendlicht	40	43	50	14
30631	0	Abblendlicht	40	76	50	53
					Mittelwert	28.0
					Anzahl	28

Tabelle C.3: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Sichtweiten (in m) für das kleine dunkle Sehobjekt bei Tag. Siehe Abb. (8.5)

Normsichtweite in m	Horizontale Beleuchtung in lx	Fahrzeug - Beleuchtung	Praxis-Faktor	Sichtweite Messung	Sichtweite Rechnung	Relative Abweichung in %
77	1600	Abblendlicht	25	38	17	124
92	2300	Abblendlicht	25	29	21	40
100	1200	Abblendlicht	25	23	22	5
100	2300	Abblendlicht	25	30	22	34
107	3500	Abblendlicht	25	33	24	38
107	1830	Abblendlicht	25	29	24	23
115	3800	Abblendlicht	25	23	25	9
115	4400	Abblendlicht	25	30	26	17
115	2810	Abblendlicht	25	14	25	45
115	2750	Abblendlicht	25	19	25	25
115	1500	Abblendlicht	25	29	25	16
115	2070	Abblendlicht	25	18	25	29
115	3300	Abblendlicht	25	27	25	6
123	1200	Abblendlicht	25	30	26	13
123	3850	Abblendlicht	25	23	27	14
123	2850	Abblendlicht	25	16	27	40
123	3500	Abblendlicht	25	34	27	26
123	1970	Abblendlicht	25	23	26	13
130	2050	Abblendlicht	25	13	28	53
130	2230	Abblendlicht	25	32	28	14
130	3500	Abblendlicht	25	22	28	22
130	7600	Abblendlicht	25	32	29	12
130	1800	Abblendlicht	25	25	28	10
138	2050	Abblendlicht	25	40	29	36
138	3430	Abblendlicht	25	19	30	36
145	1300	Abblendlicht	25	27	30	10
145	6800	Abblendlicht	25	23	31	26
145	2760	Abblendlicht	25	25	30	18
145	2200	Abblendlicht	25	29	31	5
145	1840	Abblendlicht	25	30	30	1
153	800	Abblendlicht	25	30	30	1
161	8500	Abblendlicht	25	35	34	4
168	1500	Abblendlicht	25	32	34	5
184	1400	Abblendlicht	25	37	36	3
191	2500	Abblendlicht	25	40	37	7
191	2400	Abblendlicht	25	34	37	9
214	2800	Abblendlicht	25	51	40	26
283	3010	Abblendlicht	25	42	47	11

Tabelle C.3: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Sichtweiten (in m) für das kleine dunkle Sehobjekt bei Tag. Siehe Abb. (8.5)

Normsichtweite in m	Horizontale Beleuchtung in lx	Fahrzeug - Beleuchtung	Praxis-Faktor	Sichtweite Messung	Sichtweite Rechnung	Relative Abweichung in %
69	1500	kein Scheinwerfer	25	25	16	58
84	1900	kein Scheinwerfer	25	26	19	38
92	2000	kein Scheinwerfer	25	24	20	17
100	1400	kein Scheinwerfer	25	20	22	8
100	2500	kein Scheinwerfer	25	25	22	12
100	2800	kein Scheinwerfer	25	33	22	48
107	3100	kein Scheinwerfer	25	23	24	2
115	1150	kein Scheinwerfer	25	29	24	20
115	4200	kein Scheinwerfer	25	28	25	10
115	3000	kein Scheinwerfer	25	33	25	32
115	1700	kein Scheinwerfer	25	29	25	18
115	2400	kein Scheinwerfer	25	25	25	0
123	2000	kein Scheinwerfer	25	15	26	43
123	2100	kein Scheinwerfer	25	33	26	26
123	3500	kein Scheinwerfer	25	21	27	21
123	3050	kein Scheinwerfer	25	25	27	6
123	3180	kein Scheinwerfer	25	22	26	16
123	3200	kein Scheinwerfer	25	24	26	9
123	1600	kein Scheinwerfer	25	25	26	4
123	2800	kein Scheinwerfer	25	33	26	25
123	5300	kein Scheinwerfer	25	30	27	11
130	2750	kein Scheinwerfer	25	16	28	42
130	1800	kein Scheinwerfer	25	20	27	26
130	2990	kein Scheinwerfer	25	25	28	10
130	1740	kein Scheinwerfer	25	30	27	10
130	2080	kein Scheinwerfer	25	28	27	2
138	1300	kein Scheinwerfer	25	30	28	7
138	5400	kein Scheinwerfer	25	49	30	66
138	2180	kein Scheinwerfer	25	31	29	8
145	7000	kein Scheinwerfer	25	24	31	22
168	1000	kein Scheinwerfer	25	33	32	3
168	600	kein Scheinwerfer	26	35	28	25
168	2500	kein Scheinwerfer	25	44	33	31
176	1400	kein Scheinwerfer	25	40	34	18
184	8000	kein Scheinwerfer	25	31	37	16
191	1900	kein Scheinwerfer	25	40	36	10
199	1000	kein Scheinwerfer	25	35	36	2
283	2540	kein Scheinwerfer	25	40	46	13

Tabelle C.3: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Sichtweiten (in m) für das kleine dunkle Sehobjekt bei Tag. Siehe Abb. (8.5)

Normsichtweite in m	Horizontale Beleuchtung in lx	Fahrzeug - Beleuchtung	Praxis-Faktor	Sichtweite Messung	Sichtweite Rechnung	Relative Abweichung in %
345	4050	kein Scheinwerfer	25	53	51	3
1225	4300	Abblendlicht	7.3	183	248	26
2068	3590	Abblendlicht	7.3	140	258	46
3063	6850	Abblendlicht	7.3	130	261	50
19144	34000	Abblendlicht	7.3	333	176	89
19910	40000	Abblendlicht	7.3	202	176	15
21442	46000	Abblendlicht	7.3	148	173	14
22207	45000	Abblendlicht	7.3	129	172	25
1378	4300	kein Scheinwerfer	7.3	179	252	29
1532	2730	kein Scheinwerfer	7.3	135	251	46
2068	6442	kein Scheinwerfer	7.3	170	264	36
20676	42000	kein Scheinwerfer	7.3	312	174	79
20676	51000	kein Scheinwerfer	7.3	270	175	54
20676	44000	kein Scheinwerfer	7.3	242	174	39
21442	44000	kein Scheinwerfer	7.3	342	173	98
30631	466	Nebellicht	9.5	130	85	53
30631	469	Abblendlicht	9.5	40	88	55
30631	184	Abblendlicht	12.2	83	65	28
					Mittelwert	25.0
					Anzahl	94

Tabelle C.4: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Sichtweiten (in m) für das kleine dunkle Sehobjekt bei Nacht. Siehe Abb. (8.7)

Normsichtweite in m	Horizontale Beleuchtung in lx	Fahrzeug - Beleuchtung	Praxis-Faktor	Sichtweite Messung	Sichtweite Rechnung	Relative Abweichung in %
84	0	Nebellicht	40	27	27.0811	0
84	0	Abblendlicht	40	27	28.0924	4
92	0	Nebellicht	40	28	27	2
92	0	Nebellicht	40	30	27	9
92	0	Nebellicht	40	28	27	2
92	0	Abblendlicht	40	24	29	16
92	0	Abblendlicht	40	25	29	12
92	0	Abblendlicht	40	26	29	9
100	0	Nebellicht	40	28	28	1
100	0	Nebellicht	40	25	28	9
100	0	Abblendlicht	40	26	29	10
100	0	Abblendlicht	40	30	29	5
107	0	Nebellicht	40	26	28	6
107	0	Abblendlicht	40	24	28	14
115	0	Nebellicht	40	22	28	21
115	0	Abblendlicht	40	28	28	2
123	0	Nebellicht	40	25	28	10
130	0	Nebellicht	40	29	28	4
130	0	Nebellicht	40	31	28	11
130	0	Abblendlicht	40	25	26	3
138	0	Nebellicht	40	24	28	14
138	0	Abblendlicht				
145	0	Nebellicht	40	33	29	16
145	0	Abblendlicht				
145	0	Abblendlicht				
153	0	Abblendlicht				
161	0	Abblendlicht				
168	0	Nebellicht	40	39	28	40
168	0	Nebellicht	40	41	30	40
168	0	Abblendlicht				
168	0	Abblendlicht				
176	0	Nebellicht	40	38	30	28
176	0	Nebellicht	40	25	28	10
184	0	Nebellicht	40	40	28	43
184	0	Nebellicht	40	32	30	8
184	0	Abblendlicht				
199	0	Abblendlicht				
214	0	Abblendlicht				

Tabelle C.4: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Sichtweiten (in m) für das kleine dunkle Sehobjekt bei Nacht. Siehe Abb. (8.7)

Normsichtweite in m	Horizontale Beleuchtung in lx	Fahrzeug - Beleuchtung	Praxis-Faktor	Sichtweite Messung	Sichtweite Rechnung	Relative Abweichung in %
253	0	Nebellicht	40	41	36	13
268	0	Abblendlicht	40	41	41	0
2680	0	Nebellicht	40	72	52	37
2910	0	Abblendlicht	40	61	58	6
3446	0	Nebellicht	40	58	53	10
3446	0	Abblendlicht	40	61	58	6
3676	0	Nebellicht	40	47	53	11
4212	0	Abblendlicht	40	46	58	21
4441	0	Nebellicht	40	73	53	38
4595	0	Abblendlicht	40	60	58	3
4671	0	Abblendlicht	40	48	58	17
4748	0	Nebellicht	40	60	53	13
6279	0	Abblendlicht	40	43	58	26
6509	0	Nebellicht	40	51	53	4
6662	0	Nebellicht	40	65	53	22
6815	0	Abblendlicht	40	45	58	23
6892	0	Nebellicht	40	60	53	12
6969	0	Nebellicht	40	72	53	35
6969	0	Abblendlicht	40	50	58	14
7045	0	Abblendlicht	40	64	59	9
30631	0	Nebellicht	40	73	54	35
30631	0	Nebellicht	40	51	54	6
30631	0	Abblendlicht	40	57	59	4
30631	0	Abblendlicht	40	62	59	5
					Mittelwert	13.9
					Anzahl	52

Tabelle C.5: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Sichtweiten (in m) für das kleine mittelhelle Sehobjekt bei Tag. Siehe Abb. (8.9)

Normsichtweite in m	Horizontale Beleuchtung in lx	Fahrzeug - Beleuchtung	Praxis-Faktor	Sichtweite Messung	Sichtweite Rechnung	Relative Abweichung in %
77	1600	kein Scheinwerfer	30	25	13	96
84	1700	kein Scheinwerfer	30	27	14	93
92	1870	kein Scheinwerfer	30	33	15	115
100	1300	kein Scheinwerfer	30	38	17	129
100	1800	kein Scheinwerfer	30	33	17	98
100	3080	kein Scheinwerfer	30	33	17	97
100	3200	kein Scheinwerfer	30	32	17	91
100	2400	kein Scheinwerfer	30	34	17	104
107	1300	kein Scheinwerfer	30	45	18	153
115	2300	kein Scheinwerfer	30	43	19	124
115	5000	kein Scheinwerfer	30	42	19	118
115	3200	kein Scheinwerfer	30	25	19	30
115	3040	kein Scheinwerfer	30	40	19	108
115	3000	kein Scheinwerfer	30	33	19	72
115	1800	kein Scheinwerfer	30	39	19	104
115	1980	kein Scheinwerfer	30	38	19	98
123	3000	kein Scheinwerfer	30	25	21	22
123	3400	kein Scheinwerfer	30	43	21	109
123	3200	kein Scheinwerfer	30	9	21	56
123	2700	kein Scheinwerfer	30	19	21	8
123	3900	kein Scheinwerfer	30	54	21	162
130	2000	kein Scheinwerfer	30	23	22	6
130	3150	kein Scheinwerfer	30	36	22	65
130	5400	kein Scheinwerfer	30	49	22	125
130	2500	kein Scheinwerfer	30	36	22	66
138	1150	kein Scheinwerfer	30	39	23	71
138	7600	kein Scheinwerfer	30	52	23	125
145	1870	kein Scheinwerfer	30	33	24	37
153	700	kein Scheinwerfer	30	45	25	80
153	7000	kein Scheinwerfer	30	48	26	88
153	1580	kein Scheinwerfer	30	48	25	88
168	1900	kein Scheinwerfer	30	58	28	108
176	1440	kein Scheinwerfer	30	81	29	179
184	10800	kein Scheinwerfer	30	73	31	138
191	2600	kein Scheinwerfer	30	70	32	122
199	1300	kein Scheinwerfer	30	61	33	86
199	2100	kein Scheinwerfer	30	83	33	153
199	2180	kein Scheinwerfer	30	50	33	52

Tabelle C.5: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Sichtweiten (in m) für das kleine mittelhelle Sehobjekt bei Tag. Siehe Abb. (8.9)

Normsichtweite in m	Horizontale Beleuchtung in lx	Fahrzeug - Beleuchtung	Praxis-Faktor	Sichtweite Messung	Sichtweite Rechnung	Relative Abweichung in %
268	2460	kein Scheinwerfer	30	112	43	158
383	3870	kein Scheinwerfer	30	170	60	183
1225	4520	kein Scheinwerfer	30	180	138	30
1532	2720	kein Scheinwerfer	30	100	155	35
1914	6250	kein Scheinwerfer	30	50	175	71
19910	40000	kein Scheinwerfer	30	492	331	49
20676	40000	kein Scheinwerfer	30	280	331	15
21442	50000	kein Scheinwerfer	30	308	333	8
21442	38000	kein Scheinwerfer	30	270	332	19
					Mittelwert	88.1
					Anzahl	47

Tabelle C.6: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Sichtweiten (in m) für das kleine helle Sehobjekt bei Tag. Siehe Abb. (8.11)

Normsicht-weite in m	Horizontale Beleuchtung in lx	Fahrzeug - Beleuchtung	Praxis-Faktor	Sichtweite Messung	Sichtweite Rechnung	Relative Abweichung in %
84	1700	kein Scheinwerfer	30	36	22	61
84	1800	kein Scheinwerfer	30	33	22	47
92	2300	kein Scheinwerfer	30	40	25	63
92	3200	kein Scheinwerfer	30	40	25	63
100	1600	kein Scheinwerfer	30	27	27	2
100	2830	kein Scheinwerfer	30	41	27	54
100	2400	kein Scheinwerfer	30	41	27	54
107	1300	kein Scheinwerfer	30	45	28	59
115	3170	kein Scheinwerfer	30	29	31	5
115	3650	kein Scheinwerfer	30	53	31	74
115	2680	kein Scheinwerfer	30	24	31	21
115	2850	kein Scheinwerfer	30	35	31	15
115	1900	kein Scheinwerfer	30	51	30	68
115	2900	kein Scheinwerfer	30	53	30	74
123	1400	kein Scheinwerfer	30	50	32	54
123	2300	kein Scheinwerfer	30	57	33	75
123	5400	kein Scheinwerfer	30	47	33	44
123	3570	kein Scheinwerfer	30	48	33	47
123	4700	kein Scheinwerfer	30	45	33	38
130	1200	kein Scheinwerfer	30	45	34	32
130	2050	kein Scheinwerfer	30	21	34	39
130	2900	kein Scheinwerfer	30	29	34	16
130	3140	kein Scheinwerfer	30	45	34	31
138	7400	kein Scheinwerfer	30	68	37	86
138	2320	kein Scheinwerfer	30	30	36	17
138	2300	kein Scheinwerfer	30	43	36	19
145	1870	kein Scheinwerfer	30	45	38	19
153	2250	kein Scheinwerfer	30	80	40	100
153	7000	kein Scheinwerfer	30	61	40	51
153	1720	kein Scheinwerfer	30	53	40	32
161	700	kein Scheinwerfer	30	44	41	7
161	8000	kein Scheinwerfer	30	80	42	89
176	1200	kein Scheinwerfer	30	65	45	43
184	2300	kein Scheinwerfer	30	62	47	31
199	2400	kein Scheinwerfer	30	86	51	69
207	1400	kein Scheinwerfer	30	78	52	49
214	2600	kein Scheinwerfer	30	97	54	78
283	2750	kein Scheinwerfer	30	141	69	104

Tabelle C.6: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Sichtweiten (in m) für das kleine helle Sehobjekt bei Tag. Siehe Abb. (8.11)

Normsicht-weite in m	Horizontale Beleuchtung in lx	Fahrzeug - Beleuchtung	Praxis-Faktor	Sichtweite Messung	Sichtweite Rechnung	Relative Abweichung in %
1149	4070	kein Scheinwerfer	30	265	180	47
1455	3150	kein Scheinwerfer	30	150	202	26
2604	5640	kein Scheinwerfer	30	223	261	15
19144	39000	kein Scheinwerfer	30	560	430	30
20676	40000	kein Scheinwerfer	30	276	434	36
21442	46000	kein Scheinwerfer	30	321	437	26
22207	40000	kein Scheinwerfer	30	270	437	38
30631	483	Abblendlicht	31	270	372	27
30631	139	Abblendlicht	32	141	319	56
					Mittelwert	45.3
					Anzahl	47

Tabelle C.7: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Sichtweiten (in m) für das kleine helle Sehobjekt bei Nacht. Siehe Abb. (8.13)

Normsicht-weite in m	Horizontale Beleuchtung in lx	Fahrzeug - Beleuchtung	Praxis-Faktor	Sichtweite Messung	Sichtweite Rechnung	Relative Abweichung in %
84	0	Abblendlicht	40	30	41	26
84	0	Abblendlicht	40	35	41	14
92	0	Abblendlicht	40	36	42	14
92	0	Abblendlicht	40	39	42	7
92	0	Abblendlicht	40	35	42	17
100	0	Abblendlicht	40	34	43	21
107	0	Abblendlicht	40	30	44	32
107	0	Abblendlicht	40	33	44	25
130	0	Abblendlicht	40	32	47	31
138	0	Abblendlicht	40	37	47	22
138	0	Abblendlicht	40	35	47	26
138	0	Abblendlicht	40	38	47	20
161	0	Abblendlicht	40	40	49	18
168	0	Abblendlicht	40	43	49	13
168	0	Abblendlicht	40	44	49	11
176	0	Abblendlicht	40	45	50	10
176	0	Abblendlicht	40	47	50	6
176	0	Abblendlicht	40	53	50	6
214	0	Abblendlicht	40	35	51	32
260	0	Abblendlicht	40	50	53	6
2757	0	Abblendlicht	40	61	63	3
3676	0	Abblendlicht	40	63	63	0
3752	0	Abblendlicht	40	50	63	21
4365	0	Abblendlicht	40	70	63	11
4595	0	Abblendlicht	40	65	63	3
6662	0	Abblendlicht	40	61	64	4
6739	0	Abblendlicht	40	62	64	3
6969	0	Abblendlicht	40	61	64	4
6969	0	Abblendlicht	40	72	64	13
30631	0	Abblendlicht	40	73	64	14
30631	0	Abblendlicht	40	72	64	12
					Mittelwert	14.3
					Anzahl	31

Tabelle C.8: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Sichtweiten (in m) für die Schlussleuchte bei Tag. Siehe Abb. (8.15)

Normsicht-weite in m	Horizontale Beleuchtung in lx	Fahrzeug - Beleuchtung	Praxis-Faktor	Sichtweite Messung	Sichtweite Rechnung	Relative Abweichung in %
84	2300	kein Scheinwerfer	23	46	45	2
100	2000	kein Scheinwerfer	23	45	52	14
100	2590	kein Scheinwerfer	23	46	48	4
100	2200	kein Scheinwerfer	23	50	51	2
100	3200	kein Scheinwerfer	23	45	44	1
100	1900	kein Scheinwerfer	23	54	53	1
107	1300	kein Scheinwerfer	23	55	62	11
107	1550	kein Scheinwerfer	23	47	59	20
107	1800	kein Scheinwerfer	23	44	56	22
115	3400	kein Scheinwerfer	23	54	47	14
115	3300	kein Scheinwerfer	23	45	48	6
115	3100	kein Scheinwerfer	23	32	49	35
115	2780	kein Scheinwerfer	23	38	51	25
115	1000	kein Scheinwerfer	23	59	69	15
123	780	kein Scheinwerfer	29	61	72	15
123	1700	kein Scheinwerfer	23	62	62	0
123	2070	kein Scheinwerfer	23	43	58	26
123	2560	kein Scheinwerfer	23	61	54	12
123	2400	kein Scheinwerfer	23	46	56	17
123	2550	kein Scheinwerfer	23	41	55	25
123	4500	kein Scheinwerfer	23	52	44	19
123	8000	kein Scheinwerfer	23	58	31	86
123	2360	kein Scheinwerfer	23	44	56	21
130	2800	kein Scheinwerfer	23	40	54	27
130	3800	kein Scheinwerfer	23	43	48	11
130	4100	kein Scheinwerfer	23	42	47	10
138	1400	kein Scheinwerfer	23	61	70	13
153	2100	kein Scheinwerfer	23	65	66	1
161	8500	kein Scheinwerfer	23	46	35	31
168	2800	kein Scheinwerfer	23	70	63	12
168	1900	kein Scheinwerfer	23	62	71	13
184	1460	kein Scheinwerfer	23	111	81	37
191	1950	kein Scheinwerfer	23	65	75	14
199	1200	kein Scheinwerfer	23	78	89	12
207	2780	kein Scheinwerfer	23	100	70	43
230	15000	kein Scheinwerfer	23	82	21	296
245	2620	kein Scheinwerfer	23	72	77	7
352	2870	kein Scheinwerfer	23	116	88	32

Tabelle C.8: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Sichtweiten (in m) für die Schlussleuchte bei Tag. Siehe Abb. (8.15)

Normsicht-weite in m	Horizontale Beleuchtung in lx	Fahrzeug - Beleuchtung	Praxis-Faktor	Sichtweite Messung	Sichtweite Rechnung	Relative Abweichung in %
1991	4500	kein Scheinwerfer	23	340	126	169
2221	4050	kein Scheinwerfer	23	240	136	76
3446	4730	kein Scheinwerfer	23	320	135	137
19910	42000	kein Scheinwerfer	23	63	34	85
20676	47000	kein Scheinwerfer	23	130	40	229
20676	44000	kein Scheinwerfer	23	64	36	77
21442	47000	kein Scheinwerfer	23	85	40	115
					Mittelwert	41.0
					Anzahl	45

Tabelle C.9: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Sichtweiten (in m) für die Schlussleuchte bei Nacht. Siehe Abb. (8.17)

Normsicht-weite in m	Horizontale Beleuchtung in lx	Fahrzeug - Beleuchtung	Praxis-Faktor	Sichtweite Messung	Sichtweite Rechnung	Relative Abweichung in %
84	0	Abblendlicht	249	95	100	5
84	0	Abblendlicht	250	110	100	10
84	0	Abblendlicht	250	103	100	3
84	0	Abblendlicht	250	98	100	2
100	0	Abblendlicht	250	110	110	0
100	0	Abblendlicht	250	104	110	5
100	0	Abblendlicht	250	90	110	18
115	0	Abblendlicht	250	108	118	8
115	0	Abblendlicht	250	100	118	15
123	0	Abblendlicht	250	110	122	10
123	0	Abblendlicht	250	93	122	24
130	0	Abblendlicht	250	173	125	39
130	0	Abblendlicht	250	107	125	14
145	0	Abblendlicht	250	150	131	15
153	0	Abblendlicht	250	138	134	3
176	0	Abblendlicht	250	120	141	15
191	0	Abblendlicht	250	184	145	27
230	0	Abblendlicht	250	190	153	24
4365	0	Abblendlicht	250	610	159	285
4671	0	Abblendlicht	250	610	157	289
6433	0	Abblendlicht	250	610	150	307
6815	0	Abblendlicht	250	610	149	309
6892	0	Abblendlicht	250	610	149	310
6892	0	Abblendlicht	250	610	149	310
					Mittelwert	85.3
					Anzahl	24

Tabelle C.10: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Sichtweiten (in m) für die Nebelschlussleuchte bei Tag. Siehe Abb. (8.19)

Normsichtweite in m	Horizontale Beleuchtung in lx	Fahrzeug - Beleuchtung	Praxis-Faktor	Sichtweite Messung	Sichtweite Rechnung	Relative Abweichung in %
77	1590	kein Scheinwerfer	140	71	76	7
84	2300	kein Scheinwerfer	140	73	75	3
100	3300	kein Scheinwerfer	140	76	77	2
107	1100	kein Scheinwerfer	140	100	101	1
107	2200	kein Scheinwerfer	140	76	88	14
107	2100	kein Scheinwerfer	140	90	89	1
115	2000	kein Scheinwerfer	140	81	94	14
115	4100	kein Scheinwerfer	140	98	80	22
115	3300	kein Scheinwerfer	140	82	84	3
115	2800	kein Scheinwerfer	140	54	87	38
115	2790	kein Scheinwerfer	140	68	88	22
123	1500	kein Scheinwerfer	140	93	104	11
123	2500	kein Scheinwerfer	140	83	93	11
123	2400	kein Scheinwerfer	140	90	94	4
123	2600	kein Scheinwerfer	140	72	93	22
123	8000	kein Scheinwerfer	140	86	70	23
123	1700	kein Scheinwerfer	140	71	101	30
130	670	kein Scheinwerfer	250	93	111	16
130	2100	kein Scheinwerfer	140	118	100	18
130	3500	kein Scheinwerfer	140	93	89	4
130	3900	kein Scheinwerfer	140	73	87	16
130	1000	kein Scheinwerfer	140	117	116	0
130	4000	kein Scheinwerfer	140	124	87	43
130	2170	kein Scheinwerfer	140	82	100	18
138	3100	kein Scheinwerfer	140	85	95	11
138	2690	kein Scheinwerfer	140	62	98	37
145	8000	kein Scheinwerfer	140	90	77	17
153	1450	kein Scheinwerfer	140	120	119	1
161	1490	kein Scheinwerfer	140	135	122	11
168	2200	kein Scheinwerfer	140	78	115	32
176	2600	kein Scheinwerfer	140	128	114	13
191	13000	kein Scheinwerfer	140	135	78	74
191	2090	kein Scheinwerfer	140	112	125	10
199	2400	kein Scheinwerfer	140	125	124	1
207	1000	kein Scheinwerfer	140	200	153	31
214	1750	kein Scheinwerfer	140	120	138	13
237	2780	kein Scheinwerfer	140	189	131	44
329	2910	kein Scheinwerfer	140	163	153	6

Tabelle C.10: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Sichtweiten (in m) für die Nebelschlussleuchte bei Tag. Siehe Abb. (8.19)

Normsichtweite in m	Horizontale Beleuchtung in lx	Fahrzeug - Beleuchtung	Praxis-Faktor	Sichtweite Messung	Sichtweite Rechnung	Relative Abweichung in %
1378	4200	kein Scheinwerfer	140	440	252	75
2450	3810	kein Scheinwerfer	140	410	313	31
3063	5080	kein Scheinwerfer	140	458	301	52
19910	45000	kein Scheinwerfer	140	311	140	122
20676	52000	kein Scheinwerfer	140	210	129	62
21442	40000	kein Scheinwerfer	140	222	149	49
21442	47000	kein Scheinwerfer	140	341	137	149
					Mittelwert	26.3
					Anzahl	45

Tabelle C.11: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Sichtweiten (in m) für die Nebelschlussleuchte bei Nacht. Siehe Abb. (8.21)

Normsichtweite in m	Horizontale Beleuchtung in lx	Fahrzeug - Beleuchtung	Praxis-Faktor	Sichtweite Messung	Sichtweite Rechnung	Relative Abweichung in %
84	0	Abblendlicht	2693	159	124	29
84	0	Abblendlicht	2693	142	124	15
84	0	Abblendlicht	2696	146	124	18
92	0	Abblendlicht	2698	129	131	1
100	0	Abblendlicht	2695	160	137	17
107	0	Abblendlicht	2694	130	143	9
107	0	Abblendlicht	2698	135	142	5
107	0	Abblendlicht	2698	135	142	5
115	0	Abblendlicht	2688	108	148	27
123	0	Abblendlicht	2696	158	154	3
130	0	Abblendlicht	2697	165	158	4
130	0	Abblendlicht	2688	121	159	24
153	0	Abblendlicht	2697	176	172	2
161	0	Abblendlicht	2696	160	176	9
4365	0	Abblendlicht	2697	610	254	140
4671	0	Abblendlicht	2696	610	250	144
6433	0	Abblendlicht	2697	610	233	162
6586	0	Abblendlicht	2691	610	232	163
6892	0	Abblendlicht	2697	610	230	165
6892	0	Abblendlicht	2697	610	230	165
					Mittelwert	56.3
					Anzahl	20

Anhang D

Liste der häufig verwendeten Symbole

A	Fläche des Sehobjektes
α	Sehwinkel, unter dem das Sehobjekt aus der Sicht des Beobachters erscheint. Maßgebliche Einflussgröße des Schwellenkontrastes.
C	Leuchtdichtekontrast des Sehobjektes. Maßgebliche Einflussgröße des Visibility Levels VL
$\overline{C}_o(g)$	Theoretischer Schwellenkontrast unter günstigsten Beobachtungsbedingungen bei homogenem Umfeld und dem Wahrnehmungskriterium "Sehobjekt gerade gesehen"
$\overline{C}_p(s)$	Praktischer Schwellenkontrast in der realen Beobachtungssituation bei dem Wahrnehmungskriterium "Sehobjekt sicher gesehen". Maßgebliche Einflussgröße des Visibility Levels
E_a	Beleuchtungsstärke in der Augenebene, die von allen Umfeldelementen einschließlich Blendlichtquellen verursacht wird
E_h	Beleuchtungsstärke (horizontale), die durch die natürliche Beleuchtung auf der Fahrbahn erzeugt wird
$E_{B,o}$	Beleuchtungsstärke auf dem Sehobjekt, die durch Zustrahlung des Bodens bzw. der Fahrbahn erzeugt wird
$E_{H,o}$	Beleuchtungsstärke auf dem Sehobjekt, die durch Zustrahlung des Himmels verursacht wird
I_o	Lichtstärke der Scheinwerfer oder Signale bei ideal trübungsfreier Atmosphäre

$\overline{L}$	Schwellenleuchtdichte bei der Messung des Visibility Levels
L_a	Adaptationsleuchtdichte. Eine mittlere Umfeldleuchtdichte, an die sich das Auge genügend lange angepasst hat. Maßgebliche Einflussgröße des Schwellenkontrastes
L_g	Gesichtsfeldleuchtdichte, abhängig von der Größe des Gesichtsfeldes
L_H	Himmels- bzw. Horizontleuchtdichte
$L_{s,äq}$	Äquivalente Schleierleuchtdichte. Maß für den Streulichtschleier auf der Netzhaut des Auges, der durch Streuung in den Augenmedien verursacht wird. Die äquivalente Schleierleuchtdichte bewirkt eine Reduzierung des Sehobjektkontrastes und eine Erhöhung der Adaptationsleuchtdichte. Die nachteilige Wirkung der Kontrastreduzierung überwiegt
$L_{s,s}$	Streuleuchtdichte, verursacht auch die Nebeltröpfchen auf der Sichtlinie, die von den Fahrzeugscheinwerfern beleuchtet werden. Die Streuleuchtdichte aus der Richtung des Sehobjektes reduziert den Sehobjektkontrast. Die Streuleuchtdichten aus den anderen Richtungen erhöhen die Adaptationsleuchtdichte. Die nachteilige Wirkung der Kontrastreduzierung überwiegt
L_u	Leuchtdichte des unmittelbar an das Sehobjekt grenzenden Sehobjektuntergrundes
$L_{u,n,o}$	Leuchtdichte am Ort des Untergrundes bei natürlicher Himmelseinstrahlung
$L_{u,s,n}$	Leuchtdichte am Ort des Untergrundes bei Scheinwerfereinstrahlung
L_U	Leuchtdichte des Umfeldes
L_z	Leuchtdichte des Sehobjektes
$L_{z,n,o}$	Leuchtdichte am Ort des Sehobjektes bei natürlicher Himmelseinstrahlung
$L_{z,s,o}$	Leuchtdichte am Ort des Sehobjektes bei Scheinwerfereinstrahlung und ideal trübungsfreier Atmosphäre
p	Irrtumswahrscheinlichkeit
$PF(k)$	Praxisfaktor. Das Vielfache des praktischen Schwellenkontrastes gegenüber dem theoretischen Schwellenkontrast bei dem Wahrnehmungskriterium k
q_o	Leuchtdichtekoeffizient, Maß für die reflektierte Leuchtdichte der Fahrbahn bei diffuser Himmelseinstrahlung
q_r	Leuchtdichtekoeffizient der Fahrbahn bei Scheinwerfereinstrahlung

r	Korrelationskoeffizient, Regressionskoeffizient
R^2	Bestimmtheitsmaß als Maß für den Zusammenhang zwischen gemessener und berechneter Sichtweite (R=r)
ρ	Lichtreflexionsgrad der Sehobjekte
S	Sichtweite, Abstand zwischen Sehobjekt und Beobachter, bei dem das Sehobjekt bei dem vereinbarten Wahrnehmungskriterium gesehen bzw. erkannt wird oder bei dem das Visibility Level den vereinbarten Grenzwert erreicht.
SF	Signifikanzfaktor, das Vielfache des Praxisfaktors für sichere Sehobjektwahrnehmung im Vergleich zum Wahrnehmungskriterium "Sehobjekt gerade gesehen"
TSF	Transienter Schwellenerhöhungsfaktor, theoretisches Maß der Sichtbarkeitsverluste bei inhomogenem Gesichtsfeld.
VL	Visibility Level bzw. Kontrastüberschwelligkeit. Das Verhältnis des vorhandenen Leuchtdichtekontrastes C zum praktischen Schwellenkontrast $\overline{C}_p(g)$. Entscheidendes Maß für die Sichtbarkeit eines Sehobjektes.
$V_N(5\%)$	Normsichtweite zur Kennzeichnung der atmosphärischen Trübung bei einem Schwellenkontrast von 5 %
x	Beobachterabstand, Abstand zwischen Sehobjekt und Beobachter

Literaturverzeichnis

(Behrens,Kokoschka, 1976) Behrens, H., Kokoschka, S., Beleuchtung der Kraftfahrzeuge bei Nebel, VDI Deutsche Kraftfahrtforschung und Straßenverkehrstechnik, ISBN 3-18-120252-5, 1976

(Blackwell, 1946) Blackwell, H.R., Contrast thresholds of the human eye, J. Opt. Soc. Am., vol. 36, p.624-643, 1946

(Blackwell, 1971) Blackwell, O.M., Blackwell, H.R., Visual performance data for 156 normal observers of varying age, Journ., Illum. Eng. Soc., p. 3-13, 1971

(Blankenhagen, 1999) Blankenhagen, C., Entwicklung und Aufbau eines Fahrersichtweitenmesssystems einschließlich Implementierung der Betriebssoftware, Diplomarbeit, TU Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik, 1999

(CIE, 1972,1981) CIE Publication No. 19/2.1, 19/2.2, An analytical model for describing the influence of lightning Parameters upon visual performance, 1972, 1981

(CIE, 1992) CIE Publikation Nr. 95, Contrast and Visibility, p. 15, 1992

(DIN 5037) DIN 5037, Lichttechnische Bewertung von Scheinwerfern, DIN 5037, Blatt 2, 1963

(FASIMOD, 1995) Beier, K., Kokoschka, S., Ruppersberg, G., FASIMOD - Entwicklung eines Sichtweitenmodells zur Bestimmung der Fahrersichtweite, PROMETHEUS Phase III, Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt, Institut für Optoelektronik, Lichttechnisches Institut, Universität Karlsruhe, Abschlussbericht, 1995

(Fredriksen, 1978) Fredriksen, E. and Ronte, N., Calculation of visibility in road lightning, Report 17, Danish Illuminating Engineering Laboratory, 1978

(Gall, 1978) Gall, D., Messtechnische Ermittlung der Sehanforderungen, Elektro-Praktiker 32, vol.9, S. 316-318, 1978

(Kokoschka, 1988) Kokoschka, S., Zur Berechnung von Schwellenkontrasten für die Detektion einfacher Sehobjekte, Licht 4/88, S. 305-308, 1988

(Kooß, 1993) Kooß, D., Simulation der Streuleuchtdichte von Autoscheinwerfern im Nebel aus der Sicht eines Autofahrers, VDI, Forschungsbericht Reihe 12 (Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik), Nr. 197, 1993

(Koschmieder, 1925) Koschmieder, H., Theorie der horizontalen Sichtweite, Beiträge zur Physik der freien Atmosphäre, vol.128, S.33-55,171-181, 1925

(PIARC, 1984) PIARC, C., Road Surfaces and Lightning, Joint technical report CIE / PIARC, CIE, vol. 66, 30 p, 1984

(Völker,Gall, 1997) Völker, S., Gall, D., Einsatz von Sichtbarkeitsmessgeräten (Visibilitymeter) zur Bestimmung von Sichtweiten verkehrsrelevanter Objekte, Abschlussbericht, 1997