# Evaluierung von Sicherheitsleitsystemen in Rauchsituationen

## Forschungsbericht

| | |
|---|---|
| **Auftraggeber:** | Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften Sankt Augustin |
| **Auftragnehmer:** | Technische Universität Ilmenau<br>Fachgebiet Lichttechnik |
| **Projektzeitraum:** | 01.01.2001 – 28.02.2003 |
| **Projektleiter:** | Prof. Dr.-Ing. habil. Dietrich Gall * |
| **Projektbearbeitung:** | Dipl.-Ing. Karin Bieske * |
| **Projektpartner:** | Prof. Dr.-Ing. Siegfried Kokoschka ** |

** Lichttechnisches Institut Universität Karlsruhe
* Fachgebiet Lichttechnik der Technischen Universität Ilmenau

D-98693 Ilmenau

März 2003

# Kurzfassung

Der vorliegende Bericht beschreibt die Wirkung verschiedener Sicherheitsleitsysteme in Rauchsituationen. Im Vordergrund stehen dabei Untersuchungen zur Sichtbarkeit und Erkennungsweite der Sicherheitszeichen.

Neben theoretischen Betrachtungen zur Sichtbarkeit bei Rauch wurden in praktischen Versuchen die Erkennungsweiten für hinterleuchtete, beleuchtete und nachleuchtende Sicherheitszeichen für einen Schwächungskoeffizienten im Bereich von 0,5 $m^{-1}$ bis 2,8 $m^{-1}$ bestimmt. 100 Probanden waren unmittelbar in einem Versuchsgang daran beteiligt. Untersucht wurde dabei auch der Einfluss zusätzlicher Beleuchtung und deren räumliche Anordnung auf die Erkennbarkeit von Sicherheitszeichen, Personen und Hindernissen im Bereich des Rettungsweges.

Da die Versuche unter Laborbedingungen durchgeführt wurden, erfolgte eine gesonderte Untersuchung zur Abschätzung der mit der Brandgasentwicklung verbundenen Augenreizung und deren Einfluss auf die Sehschärfe.

Zur Untersetzung der Ergebnisse wurden zwei Sicherheitsleitsystemkonzepte bei unterschiedlichen Sichtbehinderungen direkt miteinander verglichen. Dabei bewältigten 42 Probanden verschiedene Fluchtsituationen und bewerteten die Eigenschaften der Systeme anhand von Fragebögen.

Die Auswertung der Mess- und Befragungsergebnisse der Untersuchungen erbrachten umfangreiche Erkenntnisse zur Anwendung von Sicherheitsleitsystemen in Rauchsituationen. Auf dieser Basis ist auf diesem Fachgebiet eine sachgerechte Beratung der Mitgliedsunternehmen durch die Aufsichtspersonen der Berufsgenossenschaften möglich.

# Inhaltsverzeichnis

Seite

1 Projektziel und Aufgabenstellung 1

2 Grundsätzliche Betrachtungen 4

2.1 Theoretische Untersuchungen zur Sichtbarkeit bei Rauch ** 4

2.1.1 Modellvoraussetzungen 5
2.1.2 Leuchtdichte- und Kontrastanalysen 6
2.1.3 Schwellenkontraste zur Erkennung von Sehobjekten bei Rauch 13
2.1.4 Sichtweiten der Sicherheitszeichen 16
2.1.5 Gestaltungsanalyse 22

2.2 Laboruntersuchungen 27

2.3 Eigenschaften von Brandrauch 28

2.3.1 Relevante Brandrauchparameter 28
2.3.2 Wirkung von Brandrauch auf das Sehen 36

3 Aufbau und Durchführung der Experimente 40

3.1 Sicherheitsleitsysteme 40

3.1.1 Hinterleuchtete Sicherheitszeichen für Rettungswege 41
3.1.2 Beleuchtete Sicherheitszeichen für Rettungswege 42
3.1.3 Nachleuchtende Sicherheitszeichen für Rettungswege 43

3.2 Versuchsaufbau 46

3.2.1 Versuchsgang 46
3.2.2 Beleuchtungssituation 46
3.2.3 Erzeugung der Sichttrübung 48
3.2.4 Messung des Schwächungskoeffizienten 49
3.2.5 Kriterien für die Wahrnehmung 53
3.2.6 Versuchsdurchführung 54

** erarbeitet durch Prof. Dr.-Ing. Siegfried Kokoschka, Lichttechnisches Institut Universität Karlsruhe

4 Ergebnisse der Untersuchungen im Rettungsgang 61

4.1 Bestimmung der Erkennungsweite von Sicherheitszeichen 61

4.1.1 Einfluss der Sichttrübung 61
4.1.2 Einfluss des Sicherheitszeichens 62
4.1.3 Einfluss der Beleuchtung 64
4.1.4 Einfluss des Montageortes des Sicherheitszeichens in Bezug zur Zusatzbeleuchtung 66
4.1.5 Einfluss der Schildgröße bei hinterleuchteten Sicherheitszeichen 68
4.1.6 Einfluss der mittleren Leuchtdichte bei hinterleuchteten Sicherheitszeichen 69
4.1.7 Einfluss des Abklingverhaltens nachleuchtender Sicherheitszeichen 70
4.1.8 Wahrnehmung der Sicherheitsfarbe 72
4.1.9 Einfluss dynamischer Eigenschaften 74

4.2 Bestimmung der Erkennungsweite von Personen 75

4.2.1 Einfluss der Sichttrübung 75
4.2.2 Einfluss der Beleuchtung 76
4.2.3 Einfluss des Standortes 77

4.3 Direktvergleich und Befragung 80

4.3.1 Gesamteinschätzung der Fluchtsituation 81
4.3.2 Orientierungsvermögen im Rettungsgang 83
4.3.3 Sicherheitsgefühl 86
4.3.4 Direktvergleich 88

5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen 90

6 Thesen 92

7 Literaturverzeichnis 98

Anhang 100

Anhang A - Fragebögen 100
Anhang B - Erkennungsweite von Sicherheitszeichen 110
Anhang C - Personenerkennung 134
Anhang D - Diagrammübersicht des Anhangs B und C 138
Anhang E - Fragebogenauswertung 145

# Abbildungsverzeichnis


| | | |
|---|---|---|
| Abb. 1 | Beobachterraum | 5 |
| Abb. 2 | Sehobjekt | 5 |
| Abb. 3 | Mittlere Umfeldleuchtdichte in Rauchsituationen | 8 |
| Abb. 4 | Gesehene Leuchtdichte des Sehobjekts in Rauchsituationen | 9 |
| Abb. 5 | Hintergrundleuchtdichte $L_h$ des Sicherheitszeichens BL bei zunehmender Rauchdichte | 10 |
| Abb. 6 | Sehobjektleuchtdichte $L_z$ des Sicherheitszeichens HLKL bei zunehmender Rauchdichte | 10 |
| Abb. 7 | Gesehener Leuchtdichtekontrast des Sicherheitszeichens BL in Abhängigkeit vom Schwächungsgrad k bei verschiedenen Beleuchtungsniveaus | 12 |
| Abb. 8 | Gesehener Leuchtdichtekontrast des Sicherheitszeichens HLKL in Abhängigkeit vom Schwächungsgrad k bei verschiedenen Beleuchtungsniveaus | 12 |
| Abb. 9 | Praktischer Schwellenkontrast in Abhängigkeit von der Adaptationsleuchtdichte $L_a$ und der relevanten Sehobjektgröße | 15 |
| Abb. 10 | Beispiel zur Bestimmung der Erkennungsweite des Sicherheitszeichens HLKL | 16 |
| Abb. 11 | Erkennungsweite des Sicherheitszeichens HLKL bei dem Wahrnehmungskriterium Detektion | 18 |
| Abb. 12 | Erkennungsweite des Sicherheitszeichens HLKL bei dem Wahrnehmungskriterium Identifikation | 18 |
| Abb. 13 | Erkennungsweite des Sicherheitszeichens BL bei dem Wahrnehmungskriterium Detektion | 19 |
| Abb. 14 | Erkennungsweite des Sicherheitszeichens BL bei dem Wahrnehmungskriterium Identifikation | 19 |
| Abb. 15 | Einfluss des Beleuchtungsniveaus auf die Erkennungsweite | 23 |
| Abb. 16 | Einfluss der Hintergrundleuchtdichte auf die Erkennungsweite | 24 |
| Abb. 17 | Einfluss Zeichenleuchtdichte auf die Erkennungsweite | 25 |
| Abb. 18 | Einfluss der Sehobjektgröße auf die Erkennungsweite | 25 |
| Abb. 19 | Relative Streuung im Rauch bei Verschwelung und Verbrennung von Holz | 30 |
| Abb. 20 | Änderung des Teilchendurchmessers während des Brandes | 31 |
| Abb. 21 | Normierter spektraler Transmissionsgrad von Holzrauch | 33 |

Abb. 22 Normierter spektraler Transmissionsgrad von Tapetenrauch 33
Abb. 23 Normierter spektraler Transmissionsgrad von Teppichrauch 34
Abb. 24 Normierter spektraler Transmissionsgrad von Kabelrauch 34
Abb. 25 Mittlere Streuung bei Schwelbränden 35
Abb. 26 Relative Kontrastabnahme eines Sicherheitszeichens HLKL LED 36
Abb. 27 Farbveränderung durch Streulicht 37
Abb. 28 Einfluss der Reizung des Auges auf die Sehschärfe, Sehzeichen: Landoltring 38
Abb. 29 Einfluss der Reizung des Auges auf die Sehschärfe, Sehzeichen: Pfeil 39
Abb. 30 Systematik von Sicherheitsleitsystemen 40
Abb. 31 Verschiedene Ausführungen hinterleuchteter Sicherheitszeichen 41
Abb. 32 Leuchtdichtebilder hinterleuchteter Sicherheitszeichen 41
Abb. 33 Beleuchtetes Sicherheitszeichen 42
Abb. 34 Leuchtdichtebilder eines beleuchteten Sicherheitszeichens bei verschiedenen Beleuchtungssituationen 42
Abb. 35 Nachleuchtendes Sicherheitszeichen 43
Abb. 36 Typisches Anregungs- und Emissionsspektrum von Erdalkalialuminat 44
Abb. 37 Abklingverhalten von nachleuchtendem Material in Abhängigkeit von der Anregungsbeleuchtungsstärke 45
Abb. 38 Blick in den Versuchsgang und wesentliche Parameter 46
Abb. 39 Beleuchtungsvarianten im Versuchsgang 47
Abb. 40 Normierter spektraler Transmissionsgrad des Nebelfluids in Abhängigkeit vom Schwächungskoeffizienten k 48
Abb. 41 Änderung des Schwächungskoeffizienten des Nebelfluids über der Zeit 49
Abb. 42 Messaufbau im Versuchsgang 51
Abb. 43 Messaufbau zur Bestimmung des Schwächungskoeffizienten k 51
Abb. 44 Zeitliche Stabilität des Leuchtdichtenormals 52
Abb. 45 Definition der Erkennungsweite und Kriterien für die Wahrnehmung 55
Abb. 46 Skalierung der Items der Fragebögen 59
Abb. 47 Abhängigkeit der Erkennungsweite vom Schwächungskoeffizienten bei einem hinterleuchteten Sicherheitszeichen bei Notbeleuchtung und Montage unter einer Leuchte 61

Abb. 48 Erkennungsweite verschiedener Sicherheitszeichen bei Sichttrübung und ohne Zusatzbeleuchtung 63

Abb. 49 Abhängigkeit der Erkennungsweite von der Beleuchtungssituation am Beispiel des hinterleuchteten Sicherheitszeichens HLKL 64

Abb. 50 Einfluss verschiedener Notbeleuchtungsausführungen am Beispiel des hinterleuchteten Sicherheitszeichens HLKL, Montageort: unter Notleuchte 65

Abb. 51 Einfluss des Montageortes auf die Erkennbarkeit eines hinterleuchteten Sicherheitszeichens HLKL bei Notbeleuchtung 66

Abb. 52 Einfluss des Montageortes auf die Erkennbarkeit eines beleuchteten Sicherheitszeichens BL bei Notbeleuchtung 66

Abb. 53 Erkennbarkeit eines separat beleuchteten Sicherheitszeichens BL im Vergleich zu einem hinterleuchteten Sicherheitszeichen HLKL 67

Abb. 54 Einfluss der Schildgröße auf die Erkennungsweite, Vergleich HLKL, HLGR, ohne Zusatzbeleuchtung 68

Abb. 55 Einfluss der mittleren Leuchtdichte des Sicherheitszeichens auf die Erkennungsweite 70

Abb. 56 Einfluss des Abklingverhaltens auf die Erkennungsweite bei nachleuchtenden Sicherheitszeichen NL HI 300 71

Abb. 57 Erkennbarkeit der Farbe am Beispiel des hinterleuchteten Sicherheitszeichens HLKL 72

Abb. 58 Erkennbarkeit der Farbe am Beispiel des beleuchteten Sicherheitszeichens BL 72

Abb. 59 Einfluss der Kontrastfarbe auf die Erkennbarkeit des Richtungspfeils, Vergleich HLKL grün/weiß mit HLKL schwarz/weiß 73

Abb. 60 Einfluss der dynamischen Ansteuerung auf die Erkennbarkeit des Richtungspfeils HLKL LED 74

Abb. 61 Beispiel für die Erkennbarkeit von Personen bei Sichttrübung im Rettungsgang 75

Abb. 62 Exponentieller Trend der Erkennungsweite einer Person bei Notbeleuchtung in Abhängigkeit vom Schwächungskoeffizienten 76

Abb. 63 Erkennungsweiten von Personen in Abhängigkeit vom Schwächungskoeffizienten und der Beleuchtungssituation 77

Abb. 64 Erkennungsweiten von Personen in Abhängigkeit vom Schwächungskoeffizienten und vom Standort 78

Abb. 65 Nachleuchtendes Sicherheitsleitsystem mit kontinuierlicher Leitmarkierung 81

Abb. 66 Ergebnis der Befragung zur Bewertung der Fluchtsituation 82

Abb. 67 Ergebnis der Befragung zur Bewertung des Orientierungsvermögens 82
Abb. 68 Nachleuchtendes Sicherheitszeichen im Vergleich zum in die Leitmarkierung integrierten Richtungspfeil 83
Abb. 69 Ergebnis der Befragung zur Erkennbarkeit von Personen und Hindernissen 84
Abb. 70 Orientierungsprobleme im Rettungsweg 85
Abb. 71 Häufigkeit der Kollision mit Hindernissen im Rettungsgang 86
Abb. 72 Ergebnis der Befragung zur Bewertung des Sicherheitsgefühls 87
Abb. 73 Ergebnis der Befragung – Direktvergleich beider Systeme 88

# Tabellenverzeichnis


| | | |
|---|---|---|
| T1 | Beispiel für den Einfluss des Schwächungskoeffizienten k auf die Erkennungsweiten bei einem mittleren Beleuchtungsniveau von 10 lx | 20 |
| T2 | Berechnete Erkennungsfaktoren des Sicherheitszeichens HLKL | 21 |
| T3 | Berechnete Erkennungsfaktoren des Sicherheitszeichens BL | 21 |
| T4 | Klassifikation der Brandarten | 28 |
| T5 | Grenzwert für das Umkehrverhalten fliehender Personen | 29 |
| T6 | Grenzwert für die Überlebenschance fliehender Personen | 29 |
| T7 | Verhältnis von $k_s/k$ für verschiedene Brandarten und Rauchfarben | 30 |
| T8 | Massebezogener Durchmesser der Teilchen, bei dem 10% bzw. 90% der Masse einen kleineren Durchmesser aufweisen | 31 |
| T9 | Versuchsparameter bei der Untersuchung des Einflusses des Reizzustandes der Augen auf die Sehschärfe | 38 |
| T10 | Untersuchungsparameter | 55 |
| T11 | Versuchsschema für die Befragung | 56 |
| T12 | Übersicht über Mittelwerttest für nicht-normalverteilte intervallskalierte Variablen | 60 |
| T13 | Relative Erkennungsweite verschiedener Sicherheitszeichen ohne Zusatzbeleuchtung bezogen auf die Erkennungsweite nach BGR 216 in Abhängigkeit vom Schwächungskoeffizienten | 63 |
| T14 | Mittlere Schildleuchtdichten der hinterleuchteten Sicherheitszeichen | 69 |
| T15 | Erkennungsweiten von Personen in Abhängigkeit vom Standort, dem Schwächungskoeffizienten und der Beleuchtungssituation | 79 |
| T16 | Zusammenfassung der Bewertung durch 42 Probanden | 80 |
| T17 | Vor- und Nachteile der Sicherheitsleitsysteme | 89 |
| T18 | Ergebnisse der Paarvergleiche nach Wilcoxon für die Befragung zum Direktvergleich zweier Sicherheitsleitsysteme | 151 |
| T19 | Ergebnisse der Paarvergleiche nach Wilcoxon und der Rangfolge nach Friedman für die Befragung zum Direktvergleich zweier Sicherheitsleitsysteme | 151 |

# Bezeichnungen und Abkürzungen

## Bezeichnung

**Absorption**
Fähigkeit von Stoffen, Licht oder Strahlung aufzunehmen und in eine andere Energieform zu wandeln.

**Absorptionskoeffizient**
→ Schwächungskoeffizient

**Adaptation**
Vorgang zur Anpassung des Auges an die → Leuchtdichte im → Gesichtsfeld.

**Adaptationsniveau**
Die → Leuchtdichte bestimmt den → Adaptationszustand des Auges und damit die Erkennbarkeit von Sehobjekten in Abhängigkeit vom Leuchtdichteunterschied.

**Allgemeinbeleuchtung**
Beleuchtungssystem, das einen Raum ohne Berücksichtigung besonderer Erfordernisse einzelner Raumteile beleuchtet und eine Grundhelligkeit schafft.

**Anfangskontrast $C_0$**
→ Sehzeichenkontrast ohne Sichttrübung.

**Beleuchtetes Sicherheitszeichen *BL***
nicht selbstleuchtendes Sicherheitszeichen, das nur durch die Reflektion von Licht einer externen Lichtquelle an der Oberfläche sichtbar wird.

**Beleuchtungsniveau**
Gütemerkmal der Beleuchtung, das sich aus den Faktoren → Beleuchtungsstärke oder → Leuchtdichte zusammensetzt.

**Beleuchtungsstärke *E [lx]***
Lichttechnische Größe, die die Dichte des auf eine Fläche auftreffenden Lichtstroms beschreibt.

**Detektion**
Wahrnehmung der Sehobjektumrisse.

**Erkennungsweite**
Abstand zwischen Beobachter und Sehzeichen, bei dem das Sehzeichen gerade erkannt werden kann.

**Farbort**
Punkt in der Normfarbtafel, der eine Farbe repräsentiert.

**Farbverschiebung**
Änderung des Farbeindrucks.

**Gesichtsfeld**
Gesamtheit der Objektpunkte, die bei ruhendem Auge wahrgenommen werden.

**Identifikation**
Sehen und Erkennen des Sehobjektes, Wahrnehmung der Sehobjektdetails.

**Hinterleuchtetes Sicherheitszeichen *HL***
selbstleuchtendes Sicherheitszeichen, in das eine Lichtquelle integriert ist, wobei über Transmission ein Piktogramm kenntlich gemacht wird.

**Kontrast *C***
Relativer Leuchtdichteunterschied zwischen benachbarten Teilen des → Gesichtsfeldes (Leuchtdichtekontrast).

**Kontrastfarbe**
Bei Sicherheitszeichen für Rettungswege ist die Kontrastfarbe weiß zur grünen Sicherheitsfarbe.

**Leuchtdichte *L [cd/m²]***
Lichttechnische Größe, die die Helligkeit eines Objekts charakterisiert.

**Lichtschwächungsweg**
Abstand zwischen Lichtquelle und Beobachter bei Sichttrübung.

**Lichtstrom $\Phi$ *[lm]***
Lichttechnische Größe zur Charakterisierung der von einem Körper ausgesendeten oder reflektierten Lichtleistung, ist die mit der spektralen Hellempfindung V(λ) bewertete Strahlungsleistung eines Strahlers.

**Nachleuchtendes Sicherheitszeichen *NL***
selbstleuchtendes Sicherheitszeichen, das Strahlung absorbiert und in Form von Licht emittiert.

**Notbeleuchtung**
Beleuchtungssystem, das bei Ausfall der Allgemeinbeleuchtung wirksam wird.

**Reflexion**
Fähigkeit auftreffendes Licht oder Strahlung zurückzuwerfen.

**Reflexionsgrad $\rho$**
Stärke der Reflexionsfähigkeit eines Stoffes, Verhältnis des reflektierten → Lichtstroms zu dem auf den Stoff auftreffenden → Lichtstrom.

**Refraktionszustand**
Brechkraft des Auges.

**Schwächungskoeffizient $k$ [$m^{-1}$]/ Optische Dichte $D_\tau$**
Maß für die Sichttrübung.

**Schwellenkontrast $\overline{C}$**
geringster noch wahrnehmbarer → Kontrast eines → Sehobjektes zu seinem unmittelbaren Umfeld. Das Sehobjekt kann mit einer Wahrscheinlichkeit von 50% wahrgenommen werden.

**Sehzeichenkontrast *C***
Relativer Leuchtdichteunterschied zwischen Sehzeichendetail und Sehzeichenhintergrund (Leuchtdichtekontrast).

**Sehobjekt**
Einzelheit eines Gegenstands, die zur Lösung der Sehaufgabe erkannt werden muss, z.B. der Richtungspfeil in einem Sicherheitszeichen für Rettungswege.

**Sicherheitsfarbe**
Bei Sicherheitszeichen für Rettungswege ist die Sicherheitsfarbe grün und die Kontrastfarbe weiß.

**Streuleuchtdichte $L_S$ [cd/m²]**
Helligkeit, die durch die Streuung an Rauchpartikeln hervorgerufen wird.

**Streuung**
Fähigkeit eines Stoffes, gerichtetes Licht in verschiedene Richtungen zu streuen.

**Streugrad**
Verhältnis des streuenden Anteils zum Gesamtanteil des Schwächungskoeffizienten.

**Transmission**
Fähigkeit von Stoffen, für Licht oder Strahlung durchlässig zu sein.

**Transmissionsgrad $\tau$**
Größe der Durchlassfähigkeit (→ Transmission) eines Stoffes, Verhältnis des durchgelassenen → Lichtstroms zu dem auf den Stoff auftreffenden → Lichtstrom.

**Umfeldleuchtdichte**
mittlere Leuchtdichte des → Gesichtsfeldes.

**Unbunt**
Neutrale Lichtempfindung als Ereignis der Mischung bei der alle drei Normfarbwerte gleich groß sind.

**Visibility Level *VL***
beschreibt die Sichtbarkeit, ist das Verhältnis des tatsächlichen → Kontrastes von → Sehobjekt und Umfeld zu dem bei der vorherrschenden → Umfeldleuchtdichte bewirkten → Schwellenkontrast.

## Abkürzungen

| | |
|---|---|
| $A_{1p}$ | Flächenprojektion der leuchtenden Fläche |
| $A_R$ | Summe aller Raumflächen |
| $c_1$ - $c_6$ | Konstanten |
| $C$ | Leuchtdichtekontrast nach Weber |
| $C_0$ | Leuchtdichtekontrast ohne Sichttrübung |
| $C_{min}$ | minimal erforderlicher Schwellenkontrast |
| $\overline{C}$ | Schwellenkontrast |
| $d$ | Schichtdicke |
| $d_1$ - $d_2$ | Konstanten |
| $D$ | Durchmesser |
| $D\tau$ | optische Dichte |
| $E$ | Beleuchtungsstärke |
| $E_{horizontal}$ | horizontale Beleuchtungsstärke |
| $E_{min}$ | minimale Beleuchtungsstärke |
| $E_{mittel}$ | mittlere Beleuchtungsstärke |
| $f_1$ - $f_4$ | Funktionen |
| $F$ | Korrekturfaktor zur Anpassung an die realen Verhältnisse |
| $g_2 = L_{min} / L_{max}$ | Gleichmäßigkeit der Leuchtdichte |
| $h$ | Äquivalente Schichtdicke |
| $k$ | Schwächungskoeffizient |
| $k_a$ | Absorptionsanteil des Schwächungskoeffizienten |
| $k_s$ | Streuanteil des Schwächungskoeffizienten |
| $K$ | Faktor der durch den Zeichenkontrast bestimmt wird |
| $l$ | Abstand zwischen Sehobjekt und Beobachter |
| $L$ | Leuchtdichte |
| $L_0$ | Anfangsleuchtdichte |
| $L_a$ | Adaptationsleuchtdichte |
| $L_h$ | Hintergrundleuchtdichte des Zeichens |
| $L_{h,0}$ | Hintergrundleuchtdichte des Zeichens ohne Sichttrübung |
| $L_u$ | Umfeldleuchtdichte |
| $L_{u,b}$ | Leuchtdichte der Raumflächen |
| $L_{u,d}$ | Direktanteil der Umfeldleuchtdichte |
| $L_{u,in}$ | Indirektanteil der Umfeldleuchtdichte |
| $L_{u,s}$ | Streuleuchtdichte |

| | |
|---|---|
| $L_z$ | Leuchtdichte des Sehobjekts |
| $L_{z,0}$ | Leuchtdichte des Sehobjekts ohne Sichttrübung |
| $L_\tau$ | transmittierte Leuchtdichte |
| *PF* | Praxisfaktor |
| *r* | effektiver Lichtschwächungsweg |
| $R^2$ | Bestimmtheitsmaß |
| $s_r$ | Rückwärtiges Streuverhältnis |
| *t* | Zeit |
| *T, B, H* | Tiefe, Breite, Höhe |
| *v* | Erhöhungsfaktor |
| *V* | Erkennungsfaktor |
| *VL* | Visibility Level (Sichtbarkeit) |
| *x* | berechnete Erkennungsweite |
| $\alpha$ | Sehobjektgröße |
| $\alpha_d$ | flächenäquivalenter Sehwinkel des kritischen Details |
| $\alpha_j$ | flächenäquivalenter Sehwinkel des gesamten Zeichens |
| $\lambda$ | Wellenlänge |
| $\rho$ | Reflexionsgrad |
| $\tau$ | Transmissionsgrad |
| $\tau_{normiert}$ | normierter Transmissionsgrad |
| $\Phi$ | Lichtstrom |
| $\Phi_0$ | auftreffender Lichtstrom |
| $\Phi_\tau$ | transmittierter Lichtstrom |
| $\Omega$ | Raumwinkel |

| | |
|---|---|
| Allg. 100 lx | Allgemeinbeleuchtung |
| BGR | Berufsgenossenschaftsrichtlinie |
| BL | beleuchtetes Sicherheitszeichen |
| exp. | exponentielle Trendlinie |
| HLKL | kleines hinterleuchtetes Sicherheitszeichen |
| HLGR | großes hinterleuchtetes Sicherheitszeichen |
| HLKL LED | kleines hinterleuchtetes Sicherheitszeichen mit LEDs als interne Lichtquelle |
| H x B | Höhe mal Breite |
| L x B | Länge mal Breite |

| | |
|---|---|
| L-Normal | Leuchtdichtenormal |
| L-Messer | Leuchtdichtemesser |
| NB 1 | Notbeleuchtung Variante 1 |
| NB 2 | Notbeleuchtung Variante 2 |
| NL | nachleuchtendes Sicherheitszeichen |
| NL1 / HL1 | Nachleuchtendes / Hinterleuchtetes Sicherheitsleitsystem bei geringer Sichttrübung ($k = 0{,}7\ m^{-1}$) |
| NL2 / HL2 | Nachleuchtendes / Hinterleuchtetes Sicherheitsleitsystem bei mittlerer Sichttrübung ($k = 1{,}4\ m^{-1}$) |
| NL3 / HL3 | Nachleuchtendes / Hinterleuchtetes Sicherheitsleitsystem bei hoher Sichttrübung ($k = 2{,}3\ m^{-1}$) |
| Max | Maximum |
| Min | Minimum |
| MW | Mittelwert |
| oZB | ohne Zusatzbeleuchtung |
| XBO | Xenon-Kurzbogenlampe |

# Danksagung

Die Festlegungen zur Kennzeichnung von Rettungswegen in den bestehenden Vorschriften basieren auf Erkenntnissen in rauchfreier Umgebung. Brandkatastrophen sind besonders kritische Situationen, in denen einem Sicherheitsleitsystem eine besondere Bedeutung bei der Rettung von Personen zukommt. Detaillierte Untersuchungen sind kaum vorhanden, sodass es notwendig ist, die Leistungsfähigkeit bestehender und neuer Sicherheitsleitkonzepte nachzuweisen und gegebenenfalls neue Anforderungen zu erarbeiten.

Dankenswerterweise haben Herr Dipl.-Ing. Rüschenschmidt, seinerzeitiger Obmann des Berufsgenossenschaftsarbeitskreises „Lichttechnik“, und Herr Dr. Giegerich vom Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften diesen Bedarf gesehen und das Forschungsprojekt „Sicherheitsleitsysteme in Rauchsituationen“ initiiert.

Besonders danken möchten wir Herrn Dr. Willing, der sowohl durch seine konstruktiven Gespräche als auch mit Sicherheitszeichen und Notleuchten das Projekt sehr unterstützte.

Auch den Mitgliedern des Normenausschuss Lichttechnik „Notbeleuchtung“ (FNL 16) sei an dieser Stelle für Diskussionen gedankt, die Eingang in die Untersuchungen gefunden haben.

Wir sind Herrn Beckmann und Herrn Bischoff für die Ausstattung mit einem nachleuchtenden Sicherheitsleitsystem dankbar sowie Herrn Dipl.-Ing. Strube und Herrn Konjer, die die Montage vor Ort durchführten.

Nur durch die Unterstützung von Mitarbeitern und Studierenden am Fachgebiet Lichttechnik der Technischen Universität Ilmenau waren die umfangreichen Montagearbeiten im Rettungsgang und die Durchführung der zahlreichen Versuche realisierbar.

Und nicht zuletzt ein Dank den über 150 Probanden, durch die die Ergebnisse zum vorliegenden Forschungsbericht erst möglich waren.

# 1 Projektziel und Aufgabenstellung

Sicherheitsleitsysteme werden in der Berufsgenossenschaftsrichtlinie BGR 216 „Optische Sicherheitsleitsysteme (einschließlich Sicherheitsbeleuchtung)“ *vom Juli 2001* geregelt.

Danach haben Sicherheitsleitsysteme die Aufgabe, *„... das sichere Verlassen des Arbeitsplatzes im Gefahrfall, insbesondere jedoch bei Ausfall der künstlichen Beleuchtung, zu ermöglichen. Es sind ein oder mehrere optische Sicherheitsleitsysteme zu planen und zu errichten, es sei denn, auf Grund der Beurteilung der Arbeitsbedingungen wurden andere gleichwertige Schutzmaßnahmen getroffen.“* [1].

Basis für die in der DIN EN 1838 [2] geforderten lichttechnischen Parameter für Sicherheitsbeleuchtung und Sicherheitszeichen für Rettungswege sind die Ergebnisse zahlreicher Untersuchungen für beleuchtete und hinterleuchtete Sicherheitszeichen in rauchfreier Umgebung [3, 4, 5, 6].

**Brandkatastrophen sind besonders kritische Situationen, in denen einem Sicherheitsleitsystem eine besondere Bedeutung bei der Rettung von Personen zukommt. Detaillierte Untersuchungen zur Wirksamkeit im Brandfalle sind kaum vorhanden, sodass es notwendig ist, die Leistungsfähigkeit bestehender und neuer Sicherheitsleitkonzepte nachzuweisen und gegebenenfalls neue Anforderungen zu erarbeiten.**

Die Entwicklung von Brandrauch hat toxische Wirkungen, sodass betroffene Bereiche möglichst schnell verlassen werden müssen.

Die Absorptions- und Streueigenschaften sowie die Reizwirkung von Brandrauch verursachen:

- Transmissionsverluste

---

1 BGR 216 Optische Sicherheitsleitsysteme, HVBG, 2001

2 DIN EN 1838: Notbeleuchtung. 1999

3 Weis, B.; Terstiege, H.; Willing, A.: Notbeleuchtung kontra langnachleuchtende Farbe. Zts. LICHT 46. Jhg. Nr. 1,1994, Sonderdruck

4 Ehreneiser, W.; Kokoschka, S.; Weis, B.: Untersuchung der Sichtbarkeit von Sicherheitszeichen für Rettungswege. Zts. LICHT 45. Jhg. Nr. 3, 1993, Sonderdruck

5 Weis, B.: Notbeleuchtung. Zts. LICHT 38. Jhg. Nr. 6, 1987, Sonderdruck

6 Boyce, P. R.; Cibse, M.: Movement under emergency lighting: effect of illuminance. Zts. LIGHTING RESEARCH & TECHNOLOGY Vol. 17 No. 2, 1985

- Kontrastverflachung
- Farbverschiebung
- Streulichtüberlagerung
- Änderung der Adaptationsbedingungen
- Reizwirkung

und führen zu Sehverlusten.

Eine weitere Forderung der BGR 216 lautet: *„Optische Sicherheitsleitsysteme dürfen durch Rauchentwicklung nicht unwirksam werden“* [1].

**Ziel des Forschungsvorhabens ist es, die Wirkung von Sicherheitsleitsystemen für Rauchsituationen zu erfassen. Dabei sollen insbesondere die Sichtbarkeit und die Erkennungsweite von Sicherheitskennzeichen für Rettungswege bestimmt werden. Verschiedene Sicherheitsleitsysteme sind bei unterschiedlichen Sehbedingungen in ihrer Wirkung miteinander zu vergleichen, Vor- und Nachteile aufzuzeigen und auf dieser Basis Empfehlungen zu erarbeiten.**

**Der Forschungsbericht soll den Aufsichtspersonen der Berufsgenossenschaften die sachgerechte Beratung ihrer Mitgliedsunternehmen auf diesem Fachgebiet ermöglichen. Insbesondere sollten Kriterien erarbeitet werden, die die Auswahl von elektrisch betriebenen oder langnachleuchtenden, von nicht bodennah oder bodennah montierten Systemen erleichtern.**

Der Hauptteil des Forschungsvorhabens, die experimentelle Bestimmung und Bewertung der Sichtbarkeit von Sicherheitskennzeichen in Rauchsituationen, wurde an der Technischen Universität Ilmenau unter Leitung von Prof. Dr.-Ing. Dietrich Gall und Dipl.-Ing. Karin Bieske durchgeführt. Bestimmt wurden dabei Erkennungsweiten für hinterleuchtete, beleuchtete und nachleuchtende Sicherheitszeichen bei Sichttrübungen mit einem Schwächungskoeffizienten im Bereich von 0,5 $m^{-1}$ bis 2,8 $m^{-1}$. 100 Probanden waren unmittelbar in einem Versuchsgang daran beteiligt. Untersucht wurde dabei auch der Einfluss zusätzlicher Beleuchtung und deren räumlichen Anordnung auf die Erkennbarkeit von Sicherheitszeichen, Personen und Hindernissen im Bereich des Rettungsweges.

Ein weiterer Schwerpunkt bildete der Direktvergleich zweier Sicherheitsleitsystemkonzepte bei unterschiedlichen Sichtbehinderungen. Dabei bewältigten 42 Proban-

den verschiedene Fluchtsituationen und bewerteten die Eigenschaften der Systeme anhand von Fragebögen. Auf diese Weise konnten die Erkenntnisse der Erkennungsweitenuntersuchung detailliert und untersetzt werden.

Diese Untersuchungen wurden ergänzt durch die theoretischen Betrachtungen zur Sichtbarkeit bei Rauch in Abschnitt 2.1 von Prof. Dr.-Ing. Siegfried Kokoschka von der Universität Karlsruhe.

Da die experimentellen Arbeiten unter Laborbedingungen durchgeführt wurden, erfolgte eine gesonderte Untersuchung zur Abschätzung der mit der Brandgasentwicklung verbundenen Augenreizung und deren Einfluss auf die Sehschärfe in Zusammenarbeit mit der Fachhochschule für Augenoptik Jena.

In Absprache mit den Auftraggebern wird im vorliegenden Bericht im Wesentlichen auf die gewonnenen Ergebnisse eingegangen. Die Beschreibung der Einzelexperimente und deren wissenschaftliche Bearbeitung werden detailliert in einer Promotion ausgeführt.

# 2 Grundsätzliche Betrachtungen

## 2.1 Theoretische Untersuchungen zur Sichtbarkeit bei Rauch

Rauch in Gebäuden bewirkt eine dramatische Verschlechterung der Sichtbarkeit von Sehobjekten, wie zum Beispiel bei Sicherheitszeichen in Rettungswegen.

Aus physiologischer Sicht wird ein Sehobjekt erkannt, wenn der gesehene Kontrast den physiologisch erforderlichen Schwellenkontrast deutlich überschreitet, wobei es dabei hauptsächlich auf Helligkeits- bzw. Leuchtdichtekontraste und weniger auf Farbkontraste ankommt.

Eine theoretische Bestimmung der Sichtbarkeit von Sehobjekten ist entsprechend dem heutigen Kenntnisstand nur in Näherung möglich. Die Bestimmung der Leuchtdichten und Kontraste im Gesichtsfeld ist wegen der Absorptions- und Streuprozesse äußerst aufwendig und komplex. Die Wirkung von Panik erzeugenden Rauchsituationen auf die im Rahmen der theoretischen Modellbildung erforderlichen Schwellenkontraste ist unsicher und kann daher nur geschätzt werden.

Zusätzlich zu experimentellen Untersuchungen vor Ort sind aber theoretische Untersuchungen, auch wenn sie die Realität nur vereinfachend erfassen können, unerlässlich und hilfreich. Sie können die Experimente ergänzen und bestätigen oder auch in Frage stellen. Vor allem ermöglichen sie einen generellen Überblick über die maßgeblichen Zusammenhänge.

Im Folgenden werden in den Abschnitten 2.1.1 bis 2.1.3 die grundsätzlichen Zusammenhänge zwischen den physikalischen Rauchparametern und den für die Sichtbarkeit von Sehobjekten maßgeblichen Leuchtdichten und Kontrasten dargestellt. In Abschnitt 2.1.4 werden die berechneten Erkennungsweiten der untersuchten Sicherheitszeichen analysiert. Daran anschließend werden in Abschnitt 2.1.5 die Modellergebnisse im Hinblick auf die lichttechnische Dimensionierung von Sicherheitszeichen untersucht.

### 2.1.1 Modellvoraussetzungen

Die Modellannahmen, insbesondere die geometrischen Abmessungen der Sicherheitsleuchten, das Beleuchtungsniveau sowie die Rauchdichte orientieren sich an den experimentellen Versuchsbedingungen (Abbildungen 1 und 2). Die Modellparameter werden bei Besprechung der Modellgleichungen angegeben. Die Berechnung der Erkennungsweiten erfolgt aus den Objektkontrasten und den zur Wahrnehmung erforderlichen Schwellenkontrasten. Die Umfeldleuchtdichten und Streuleuchtdichten werden aus den über das Gesichtsfeld gemittelten Leuchtdichten bestimmt.

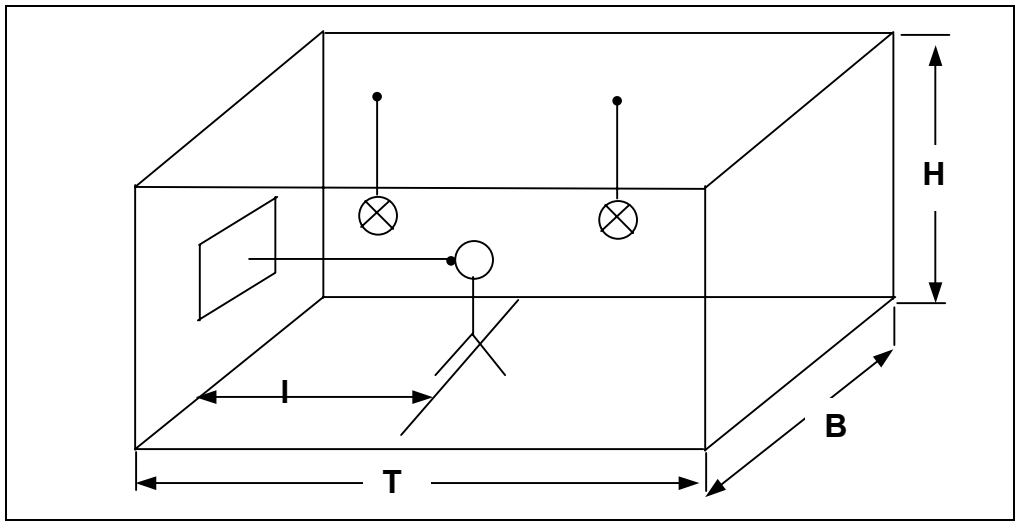



***Abbildung 1:*** ***Beobachterraum. Der Beobachter befindet sich im Abstand l vor einem Sicherheitszeichen für Rettungswege***

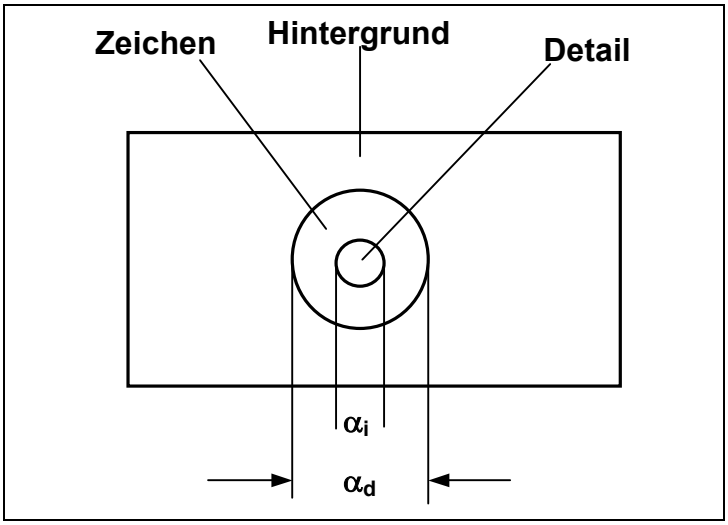



***Abbildung 2:*** ***Sehobjekt. Das zu erkennende Sehobjekt wird bei den Simulationsberechnungen auf die Elemente Zeichenumriss, Hintergrund und Zeichendetail reduziert. $\alpha_i$ ist der flächenäquivalente Sehwinkel des kritischen Details, $\alpha_d$ der flächenäquivalente Sehwinkel des gesamten Zeichens***

## 2.1.2 Leuchtdichte- und Kontrastanalysen

### 2.1.2.1 Umfeldleuchtdichte

Die Umfeldleuchtdichte $L_u$ im Gesichtsfeld eines Beobachters in einem mit Rauch gefüllten Raum setzt sich aus zwei Anteilen zusammen. Einmal aus der Leuchtdichte $L_{u,b}$ der Raumflächen, die von den im Raum befindlichen Lichtquellen beleuchtet werden und zweitens aus der Streuleuchtdichte $L_{u,s}$, die durch Streuung des Raumlichtes an den Rauchpartikeln erzeugt wird.

***Leuchtdichte der Raumbeleuchtung Lu,b***

Die Berechnung der mittleren Umfeldleuchtdichte $L_{u,b}$ basiert auf der bekannten Theorie der Beleuchtung von diffus reflektierenden Hohlräumen. Außerdem wurde eine exponentielle Lichtschwächung wegen der Absorptionsverluste im Rauch berücksichtigt. Danach gilt für die mittlere direkte Leuchtdichte aller Raumflächen:

$$L_{u,d} = F \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{\Omega_0} \cdot \frac{\Phi_0}{A_R} \cdot \rho \cdot e^{-k_a \cdot r} \qquad \textbf{(1)}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | $\phi_o$ | der Lichtstrom der beleuchtenden Lichtquellen | ($\phi_o$ = 12 375 lm)[x)] |
| | $A_R$ | die Summe aller Raumflächen | ($A_R$ = 247,5 m²) |
| | $\rho$ | der mittlere Reflexionsgrad der Raumflächen | ($\rho$ = 0,5) |
| | $k_a$ | der absorbierende Anteil des Schwächungskoeffizienten k | ($k_a/k$ = 0,2) |
| | r | der effektive Lichtschwächungsweg | (r = 3 m) |
| | F | Korrekturfaktor zur Anpassung an die realen Verhältnisse | (F = 1,25) |

[x)] bei diesem Lichtstrom beträgt die mittlere Beleuchtungsstärke im rauchfreien Raum 100 lx.

Entsprechend gilt dann für den indirekten Anteil der beleuchteten Raumflächen:

$$L_{u,in} = F \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{\Omega_0} \cdot \frac{\Phi_0}{A_R} \cdot \frac{\rho \cdot e^{-k_a \cdot r}}{1 - \rho \cdot e^{-k_a \cdot r}} \qquad \textbf{(2)}$$

Die Summe beider Anteile $L_{u,d}$ und $L_{u,in}$ ergibt die mittlere Umfeldleuchtdichte $L_{u,b}$, die sich bei Außerachtlassung der durch den Rauch erzeugten Streuleuchtdichten einstellen würde.

***Mittlere Streuleuchtdichte $L_{u,s}$***

Die Abschätzung der von den Rauchpartikeln erzeugten Streuleuchtdichte basiert auf der Theorie der hemisphären Lichtstromstreuung an ausgedehnten ebenen Schichten [7]. Dabei wird hier angenommen, dass der den Raum beleuchtende Lichtstrom $\phi_o$ die gesamte Raumfläche der Länge T und der Breite B diffus homogen beleuchtet. Die so beleuchtete Schicht der Schichtdicke h erzeugt einen nach vorn und einen nach rückwärts gestreuten Lichtstrom. Letzterer erzeugt in der getrübten Schicht eine homogene Streuleuchtdichte. Nach diesen Annahmen wird die mittlere Streuleuchtdichte im Beobachterraum berechnet zu:

$$L_{u,s} = \rho_0 \cdot \frac{1}{\Omega_0} \cdot \frac{1 - e^{-2 \cdot k \cdot h}}{1 - \rho_0^2 \cdot e^{-k \cdot h}} \cdot \frac{\Phi_0}{\pi \cdot T \cdot B} \qquad \text{mit den Parametern:} \quad \textbf{(3)}$$

$$\rho = \frac{\frac{k}{k_a} - 1}{\frac{k}{k_a} + 1} \qquad \text{und} \qquad k^2 = k_a \cdot (1 + 2 \cdot s_r)$$

mit:

| | |
|---|---|
| $\phi_o$ | der Lichtstrom, der in den mit Rauch gefüllten Raum eindringt |
| h | äquivalente Schichtdicke, hier mit der Raumhöhe identifiziert (h = 2,5 m) |
| T, B, H | Raumabmessungen gemäß Abbildung 1 (T = 30 m; B = 1,5 m; H = 2,5 m) |
| $s_r$ | rückwärtiges Streuverhältnis ($s_r$ = 0,1) |

Auf die Sichtbarkeit von Sehobjekten wirkt sich die Umfeldleuchtdichte durch zwei gegenläufige Effekte aus. Einmal wächst mit wachsender Umfeldhelligkeit die visuelle Leistungsfähigkeit. Zum anderen werden mit wachsender Umfeldleuchtdichte immer größere Streuleuchtdichten an den Rauchpartikeln erzeugt, die letztlich zu einer Schwächung der Sehobjektkontraste führen und damit eine Verringerung der Sichtbarkeit von Sehobjekten zur Folge haben.

Abbildung 3 zeigt die beiden Komponenten der Umfeldleuchtdichte bei einer mittleren Beleuchtungsstärke von 100 lx auf den Raumflächen des rauchfreien Raumes. Dabei nimmt mit wachsender Rauchdichte die Raumlichtkomponente $L_{u,b}$ kontinuierlich ab und die Streulichtkomponente $L_{u,s}$ zu. Insgesamt nimmt die Umfeldleuchtdichte mit wachsender Rauchdichte relativ geringfügig ab.

[7] Bodmann, H.W.: Gerthsen, P., Strahlungstransport in stark streuenden Medien als Diffusionsvorgang. Zts. OPTICA ACTA, Vol.22, No.3, 1975, S. 221-234

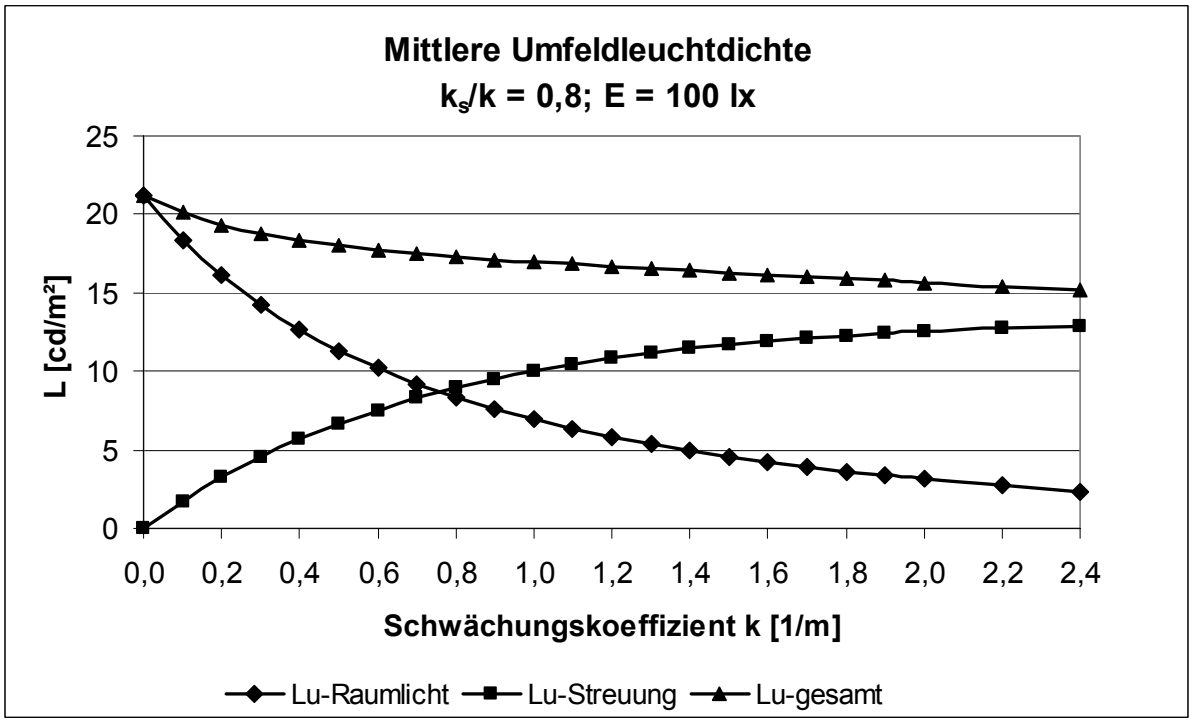



***Abbildung 3:*** ***Mittlere Umfeldleuchtdichte in Rauchsituationen. Die Umfeldleuchtdichte in Rauchsituationen setzt sich aus einer Raumlichtkomponente und einer Streulichtkomponente zusammen. Gemessen wurde im Versuchsraum in Blickrichtung zu den untersuchten Sicherheitszeichen gemäß Abbildung 38 bei einem Schwächungskoeffizienten von etwa 1 $m^{-1}$ eine Umfeldleuchtdichte von etwa 20 cd/m²***

Die mittlere Umfeldleuchtdichte nimmt proportional zu mit dem installierten Leuchtenlichtstrom und nimmt proportional ab mit der Summe aller Raumflächen. Bei schwarzem Rauch ergeben sich erheblich geringere Leuchtdichten. Zum Beispiel beträgt die mittlere Umfeldleuchtdichte bei schwarzem Rauch und mittlerer Rauchdichte ($k_s/k$ = 0,2; k = 1 $m^{-1}$) nur etwa 2 cd/m² anstatt etwa 17 cd/m² bei weißem Rauch und gleichem Schwächungskoeffizient.

### 2.1.2.2 Sehobjektleuchtdichten

Die von einem Beobachter durch eine Rauchschicht gesehene Leuchtdichte eines Objektes wird durch zwei Effekte verändert:

- Die gesehene Leuchtdichte wird durch Streuung und Absorption der beleuchteten Rauchpartikel exponentiell geschwächt.
- Die gesehene Leuchtdichte wird durch das an den gleichen Partikeln gestreute Raum- bzw. Umgebungslicht erhöht.

Geht man vereinfachend von einer räumlich homogenen Lichteinstrahlung in die auf der Sichtlinie zwischen Beobachter und Sehobjekt befindlichen Streuvolumenelemente aus, siehe Abbildung 4, so erhält man für die gesehenen Leuchtdichten des Sehobjektes und des Hintergrundes folgende Beziehungen:

$$L_z = L_{z,0} \cdot e^{-k \cdot l} + L_u \cdot \frac{k_s}{k} \cdot \left(1 - e^{-k \cdot l}\right) \qquad \textbf{(4)}$$

$$L_h = L_{h,0} \cdot e^{-k \cdot l} + L_u \cdot \frac{k_s}{k} \cdot \left(1 - e^{-k \cdot l}\right) \qquad \textbf{(5)}$$

Es bedeuten:

| | |
|---|---|
| $L_z$ | die vom Beobachter gesehene Leuchtdichte des Sehobjektes (z.B. die weiße Leuchtdichte eines Sicherheitszeichens für Rettungswege) |
| $L_h$ | die vom Beobachter gesehene Hintergrundleuchtdichte des Sehobjektes (z.B. die grüne Hintergrundleuchtdichte eines Sicherheitszeichens für Rettungswege) |
| $L_{z,o}; L_{h,o}$ | die Leuchtdichten am Sehobjektort (Anfangsleuchtdichten) |
| $L_u$ | die mittlere Umfeldleuchtdichte im Raum |
| $k, k_s$ | der Schwächungskoeffizient bzw. deren Streuanteil |
| $l$ | der Abstand zwischen Sehobjekt und Beobachter |

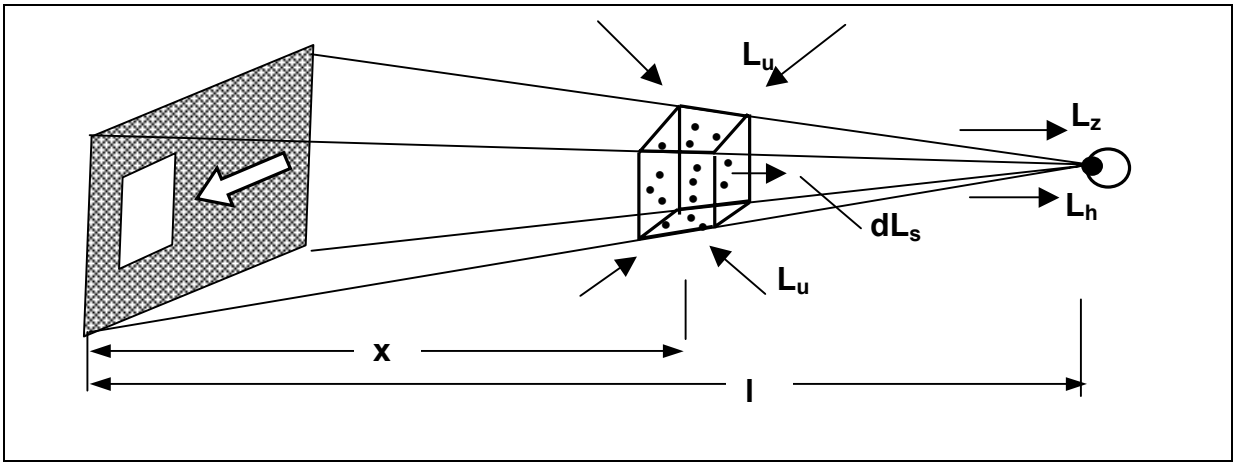



***Abbildung 4:*** ***Gesehenen Leuchtdichten des Sehobjektes. Die gesehenen Leuchtdichten des Sehobjektes setzen sich aus einer exponentiell geschwächten Komponente und der an den Rauchpartikeln gestreuten Komponente zusammen***

Bei Sehobjekten mit Leuchtdichten kleiner als die Umfeldleuchtdichte steigt die gesehene Leuchtdichte mit wachsender Rauchdichte zunächst an, um nach Durchlaufen eines flachen Maximums abzunehmen. Ein Beispiel für diesen Effekt zeigt Abbildung 5 für das leuchtdichteschwache Sicherheitszeichen BL bei einem Beleuchtungsniveau von 100 lx. Der Anteil der Streuleuchtdichte an der gesehenen Hintergrundleuchtdichte ist hier relativ groß. Sind dagegen die Anfangsleuchtdichten von Sehobjekt und Hintergrund größer als die Umfeldleuchtdichte, dann nehmen die

gesehenen Leuchtdichten mit zunehmender Rauchdichte kontinuierlich ab, wie Abbildung 6 für das Sicherheitszeichen HLKL zeigt.

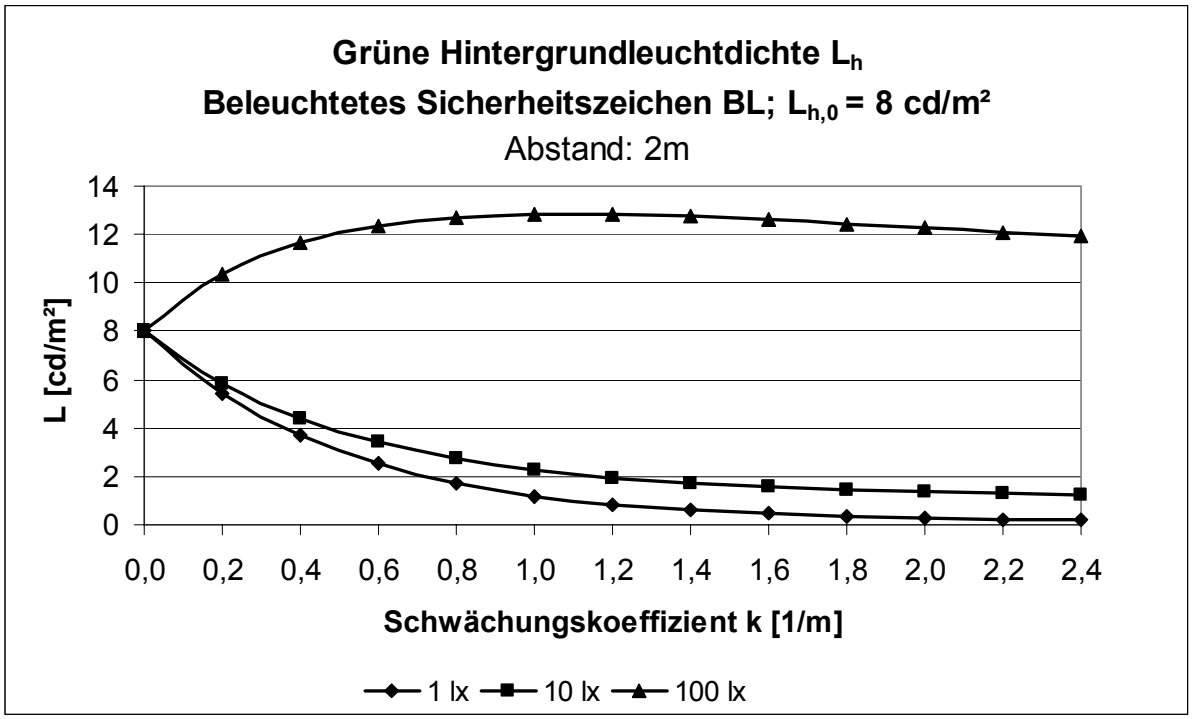



***Abbildung 5:*** *Hintergrundleuchtdichte $L_h$ des Sicherheitszeichens BL bei zunehmender Rauchdichte Parameter: Mittleres Beleuchtungsniveau im Raum*

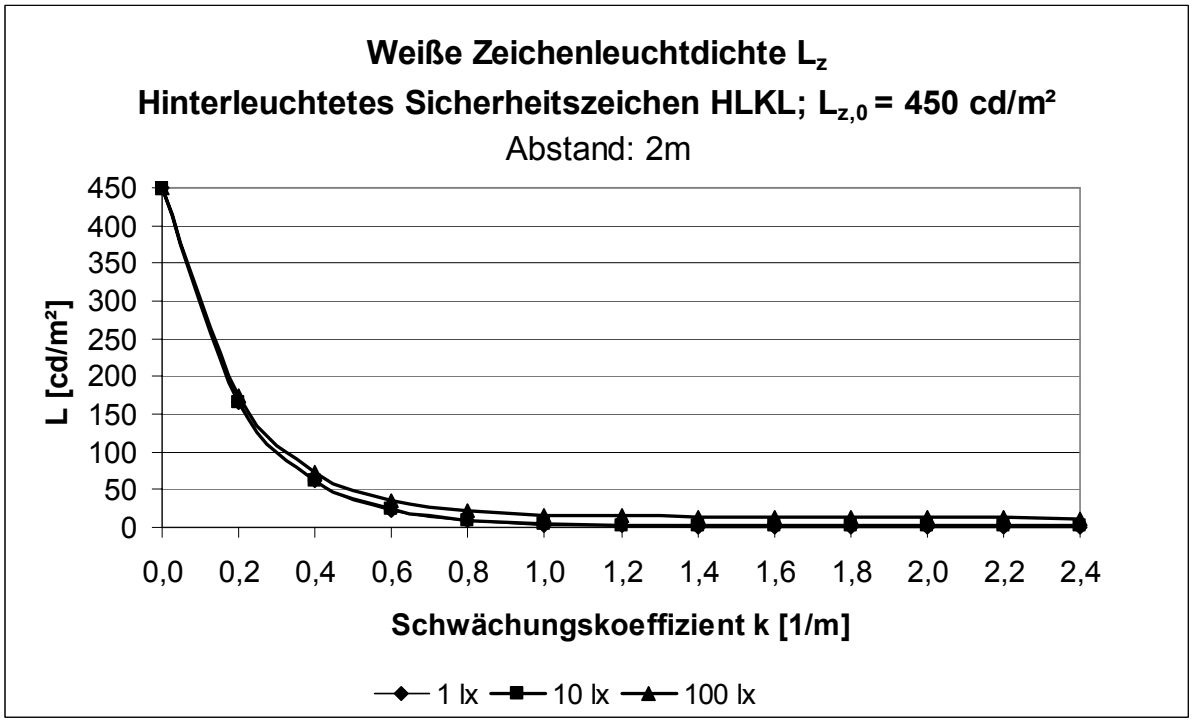



***Abbildung 6:*** *Sehobjektleuchtdichte $L_z$ des Sicherheitszeichens HLKL bei zunehmender Rauchdichte Parameter: Mittleres Beleuchtungsniveau im Raum*

### 2.1.2.3 Sehobjektkontraste

Mit dem Leuchtdichtekontrast C als Verhältnis des Betrages der Leuchtdichtedifferenz von Zeichen und Hintergrund bezogen auf die Leuchtdichte des Hintergrundes gemäß $C = |(L_z – L_h)/L_h|$ erhält man gemäß Gleichung (4) und Gleichung (5) für den gesehenen Leuchtdichtekontrast eines Sehobjektes:

$$C = C_0 \cdot \frac{1}{e^{-k \cdot l} + \frac{k_s}{k} \cdot \frac{L_u}{L_{h,0}} \cdot \left(1 - e^{-k \cdot l}\right)} \cdot e^{-k \cdot l} = C_0 \cdot K \cdot e^{-k \cdot l} \qquad \textbf{(6)}$$

Danach hängt der Leuchtdichtekontrast eines durch Rauch gesehenen Sehobjektes von folgenden Größen ab:

- Erstens vom Anfangskontrast $C_o = |(L_{z,o} – L_{h,o})/L_{h,o}|$ des Sehobjektes. Günstig dafür sind möglichst hohe Werte, die erreicht werden, wenn die Leuchtdichte des Sehobjektes sich möglichst stark von der Leuchtdichte des Hintergrundes unterscheidet. Begrenzend dafür sind Blendungseffekte, die aber hier außer Betracht bleiben.
- Zweitens vom Leuchtdichtekontrast des Zeichenhintergrundes gegenüber dem Umfeld. Dieser Einfluss wird im Faktor K von Gleichung (6) berücksichtigt. Günstig sind möglichst geringe Hintergrundleuchtdichten im Vergleich zur Umfeldleuchtdichte.
- Drittens hängt der gesehene Leuchtdichtekontrast von der Rauchdichte bzw. vom Schwächungskoeffizient des Rauches sowie vom Beobachterabstand ab. Die Kontrastschwächung erfolgt exponentiell entsprechend dem Produkt aus Schwächungskoeffizient und Beobachterabstand.

Handelt es sich um ein Sehobjekt, das direkt gegen das Umfeld beobachtet wird und vernachlässigt man ferner die Absorptionsverluste des Rauches, ($L_u = L_{h,o}$ und $k_s = k$ in Gleichung (6)), dann gilt für den gesehenen Leuchtdichtekontrast:

$$C = C_0 \cdot e^{-k \cdot l} \qquad \textbf{(7)}$$

Der den Kontrast verstärkende Faktor K hat in diesem Fall den Wert von nur 1.

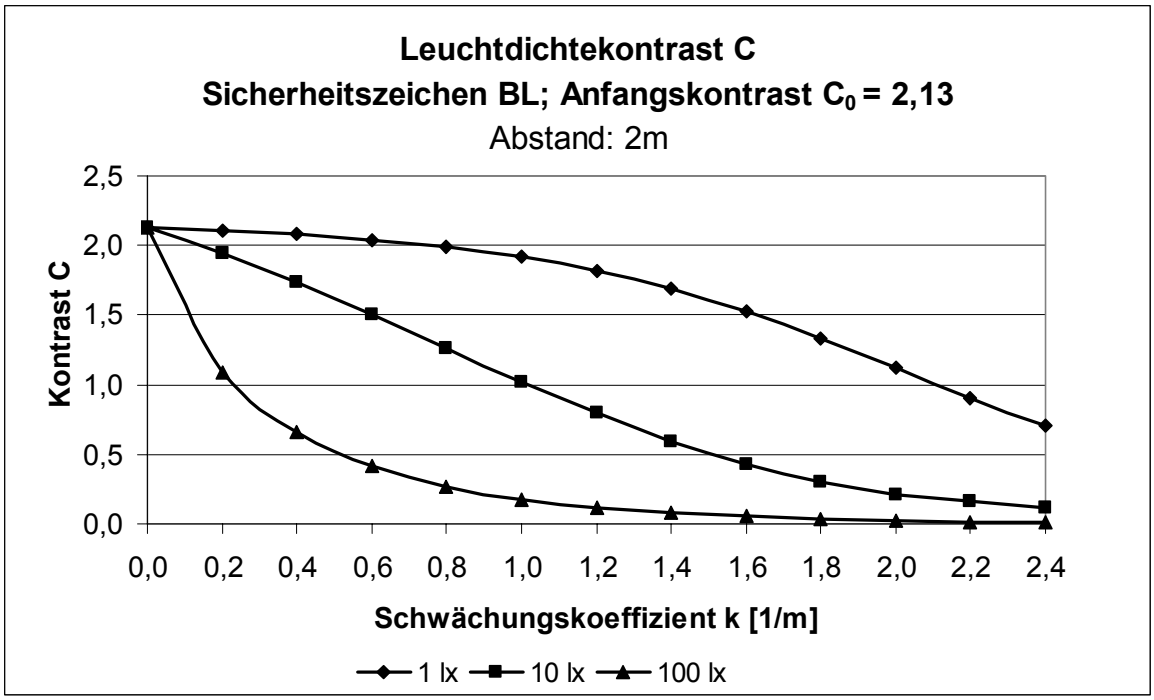



***Abbildung 7:*** ***Gesehener Leuchtdichtekontrast in Abhängigkeit vom Schwächungskoeffizient k bei den Beleuchtungsniveaus 1 lx, 10 lx und 100 lx für das beleuchtete Sicherheitszeichen BL. Beobachtungsabstand: 2 m. Man erhält die größten Kontrastwerte beim niedrigsten Beleuchtungsniveau***

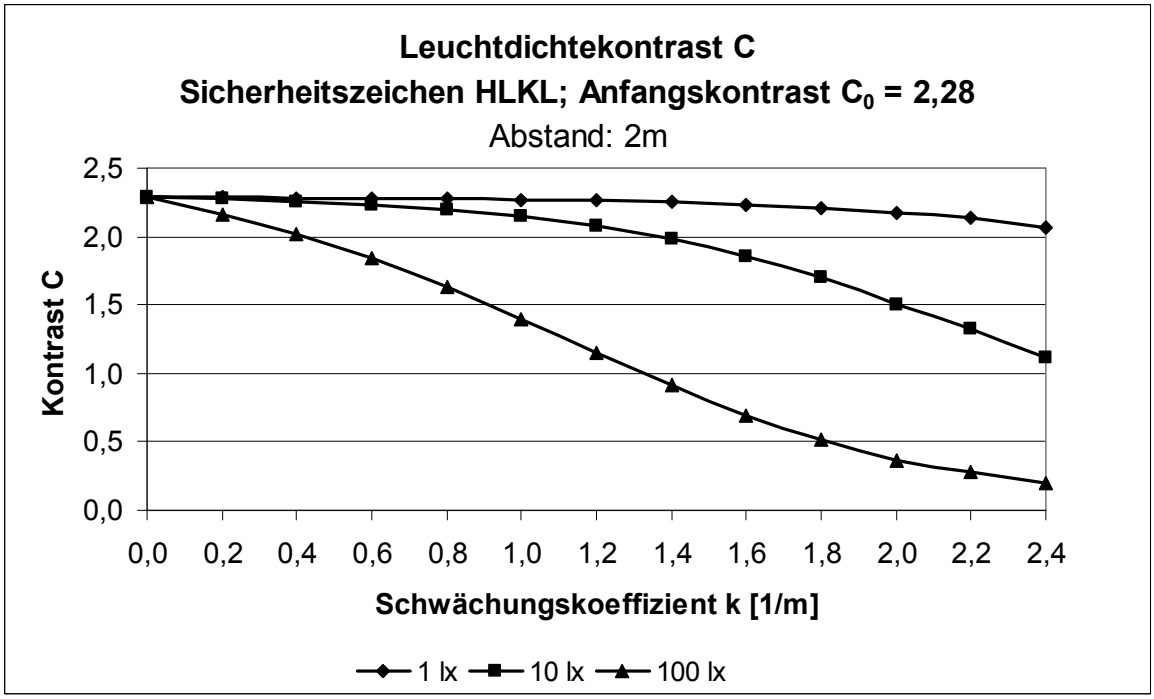



***Abbildung 8:*** ***Gesehener Leuchtdichtekontrast in Abhängigkeit vom Schwächungskoeffizient k bei den Beleuchtungsniveaus 1 lx, 10 lx und 100 lx für das hinterleuchtete Sicherheitszeichen HLKL. Beobachtungsabstand: 2 m. Auch hier erhält man die größten Kontrastwerte beim niedrigsten Beleuchtungsniveau***

Die Abhängigkeit des gesehenen Leuchtdichtekontrastes vom Schwächungskoeffizienten ist in Abbildung 7 und Abbildung 8 am Beispiel eines Bebachtungsabstandes

von 2 m erläutert. Abbildung 7 simuliert das beleuchtete Sicherheitszeichen BL, Abbildung 8 das hinterleuchtete Sicherheitszeichen HLKL. Letzteres zeichnet sich durch relativ hohe Leuchtdichten für die weißen Sehobjektelemente und den grünen Hintergrund aus. Zum Beispiel beträgt bei einem Schwächungskoeffizient k = 1 $m^{-1}$ und einer Allgemeinbeleuchtung von 100 lx beim Zeichen HLKL der Leuchtdichtekontrast C = 1,40, während beim Zeichen BL dieser Kontrast mit C = 0,18 um etwa den Faktor 8 geringer ist. Dabei sei vermerkt, dass die Anfangskontraste beider Sicherheitszeichen (2,28 beim Zeichen HLKL; 2,13 beim Zeichen BL) sich nicht sehr stark unterscheiden. Der Kontrastabfall mit wachsendem Schwächungskoeffizient erfolgt aber beim Zeichen BL wegen der erheblich geringeren Absolutwerte der den Kontrast bildenden Leuchtdichten erheblich rascher.

### 2.1.3 Schwellenkontraste zur Erkennung von Sehobjekten bei Rauch

Hohe Objektkontraste ergeben nicht unbedingt große Erkennungsweiten. Große Erkennungsweiten werden nur dann erzielt, wenn das Verhältnis von Sehobjektkontrast und Schwellenkontrast, das sog. Visibility Level, genügend groß ist.

Schwellenkontraste zur Detektion oder Identifikation von Sehobjekten sind von zahlreichen inneren und äußeren Faktoren abhängig, insbesondere von:

- dem Wahrnehmungskriterium, wobei insbesondere zwischen den Kriterien Detektion (Wahrnehmung der Sehobjektumrisse) und Identifikation (Wahrnehmung von bestimmten Sehobjektdetails) zu unterscheiden ist
- der Entscheidungssicherheit, z.B. bei den Kriterien “gerade gesehen“ und “gerade sicher gesehen“
- Sehobjektfaktoren, wie der Form und Ausdehnung des Sehobjektes
- Helligkeitsfaktoren, wie den Leuchtdichten des Umfeldes, dem Hintergrund des Sehobjektes und der Leuchtdichte des Sehobjektes selbst.
- Zeit- und Ortsfaktoren, wie der Beobachtungszeit und der Lage des Sehobjektes im Gesichtsfeld
- Personenfaktoren, wie Alter, Refraktionszustand, Ermüdung, psychischer Anspannung.

Schwellenkontraste zur Vorherbestimmung der Sichtbarkeit von Sicherheitszeichen für Rettungswege unter Rauchbedingungen und den damit zusammenhängenden Gefahren- und Paniksituationen sind nicht bekannt. Man kann aber davon ausgehen, dass die grundlegenden Einflussgrößen wie z.B. die adaptationsbestimmende Umfeldleuchtdichte oder die Sehobjektgröße auch unter Rauchsituationen im Prinzip die gleiche Wirkung ausüben wie unter einfachen Wahrnehmungsbedingungen. Höhere Adaptationsniveaus und größere Sehobjekte werden auch in Rauchsituationen zu geringeren Schwellenkontrasten und damit zu größeren Erkennungsweiten führen.

Darüber hinaus wird im Folgenden die Reizwirkung von Rauch auf die Augen sowie die örtlich inhomogene Leuchtdichtestruktur der Sicherheitszeichen berücksichtigt.

Zur quantitativen Bestimmung der Schwellenkontraste in Abhängigkeit von der adaptationsbestimmenden Umfeldleuchtdichte, der Sehobjektgröße, der örtlichen Inhomogenität der Sicherheitszeichen sowie der Augenreizung wird von folgender Modellgleichung ausgegangen [8]:

$$\overline{C} = C_{min} \cdot PF \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_4 \quad . \qquad \textbf{(8)}$$

Für die Funktionen $f_1$ bis $f_4$ wurden folgende Beziehungen angenommen:

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

$$f_3 = \frac{1}{4} \cdot \frac{\left(1 + \sqrt{L_h / L_a}\right)^2}{\sqrt{L_h / L_a}} \qquad \text{mit } L_a = L_u$$

$$f_4 = 1 + d_1 \cdot \left(1 - e^{-k \cdot d_2}\right)$$

Für die Konstanten gelten:

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| $C_{min}$ | = 0,00275 | $c_4$ | = 133 | PF | = 10 |
| $c_1$ | = 0,185 | $c_5$ | = 0,00075 | $d_1$ | = 2 |
| $c_2$ | = -0,484 | $c_6$ | = -0,383 | $d_2$ | = 1,5 |
| $c_3$ | = 7,5 | | | | |

8 Kokoschka, S.: Zur Berechnung von Schwellenkontrasten für die Detektion einfacher Sehobjekte. Zts. LICHT 37. Jhg. Nr. 4, 1988, S. 305-308

Es bedeuten:

| | |
|---|---|
| $C_{min}$ | der minimal erforderliche Schwellenkontrast unter günstigsten Beobachtungsbedingungen |
| PF | Praxisfaktor, d.h. Erhöhungsfaktor des Schwellenkontrastes im Vergleich zu den ideal günstigsten Beobachtungsbedingungen unter rauchfreien Bedingungen |
| $f_1$ | Funktion, die vor allem die Adaptationsleuchtdichte $L_a$ berücksichtigt |
| $f_2$ | Funktion, welche die scheinbare Sehobjektgröße durch den Sehwinkel $\alpha$ berücksichtigt |
| $f_3$ | Funktion, welche die Schwellenkontrasterhöhung bei Abweichung der Hintergrundleuchtdichte $L_h$ von der mittleren Umfeldleuchtdichte $L_u$ berücksichtigt |
| $f_4$ | Funktion, welche die Schwellenkontrasterhöhung auf Grund der Reizwirkung des Rauches auf die Augen berücksichtigt |
| $L_a$ | die Adaptationsleuchtdichte |
| $L_h$ | die Hintergrundleuchtdichte des Sehobjektes |
| $\alpha$ | der relevante Sehwinkel des Sehobjektes in Bogenminuten. |

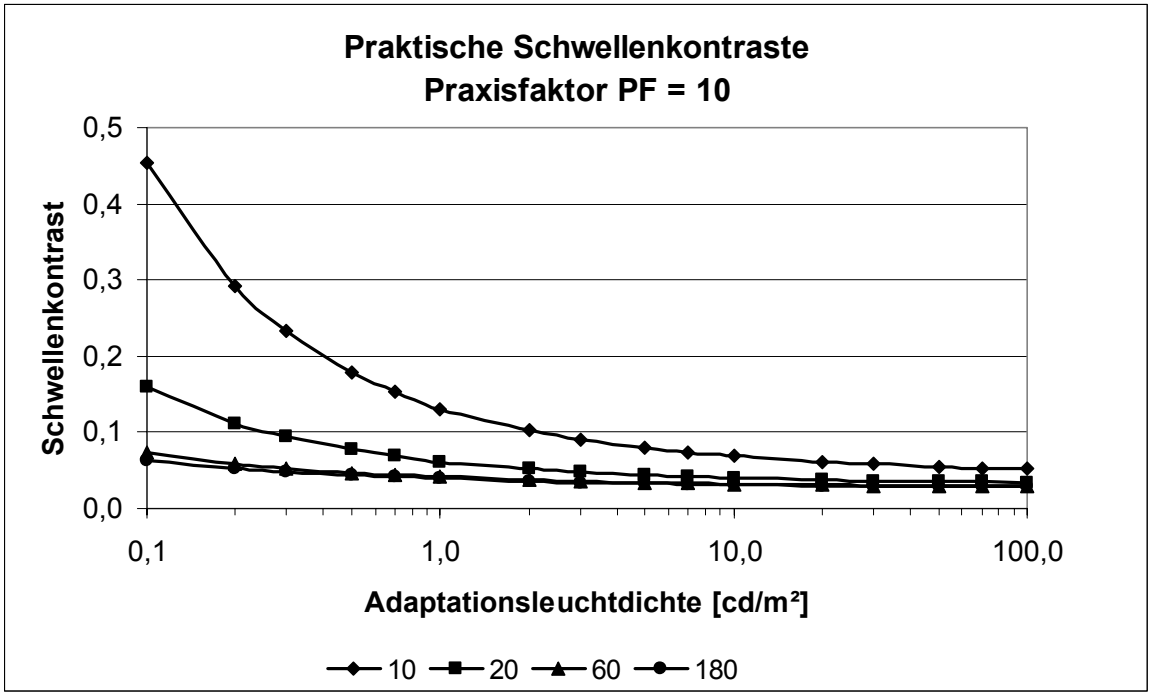



***Abbildung 9:*** ***Praktische Schwellenkontraste in Abhängigkeit von der Adaptationsleuchtdichte $L_a$ und der relevanten Sehobjektgröße $\alpha$ ( in Bogenminuten) bei einem Praxisfaktor von PF=10***

Abbildung 9 zeigt für einem Praxisfaktor von 10 die Abhängigkeit der Schwellenkontraste von der adaptationsbestimmenden Umfeldleuchtdichte und der Winkelgröße des Sehobjektes. Bei sehr dichtem Rauch wächst der Praxisfaktor entsprechend der Funktion f4 von Gleichung (8) bis auf den Wert 30 an.

Bei dem Wahrnehmungskriterium Detektion wurde als relevante Sehobjektgröße der Durchmesser des flächengleichen Sicherheitszeichens angenommen Bei den hier untersuchten Sicherheitszeichen HLKL und BL mit den äußeren Abmessungen von etwa 10 x 20 cm² bzw. 20 x 40 cm² beträgt dann der relevante Sehobjektdurchmesser 16 bzw. 32 cm. Bei dem Wahrnehmungskriterium Identifikation wurde ein Zehntel davon als kritisches Erkennungsdetail angenommen.

### 2.1.4 Erkennungsweiten der Sicherheitszeichen

#### 2.1.4.1 Methodik der Erkennungsweitenberechnung

Die Berechnung der Erkennungsweiten erfolgte aus der Bedingung der Gleichheit von Objekt- und Schwellenkontrast. Aus den Gleichungen (6) und (8) folgt daraus die iterativ zu lösende Beziehung:

$$x = \frac{1}{k} \cdot \ln\left(\frac{C_0 \cdot K}{\overline{C}}\right) \qquad \textbf{(9)}$$

mit:

| | | |
|---|---|---|
| x | Erkennungsweite des Sicherheitszeichens in m |
| k | Schwächungskoeffizient des Rauches |
| $C_o$ | Anfangskontrast des Sicherheitszeichens |
| K | Leuchtdichteparameter gemäß Gleichung (6) |
| $\overline{C}$ | Schwellenkontrast gemäß Gleichung (8) |

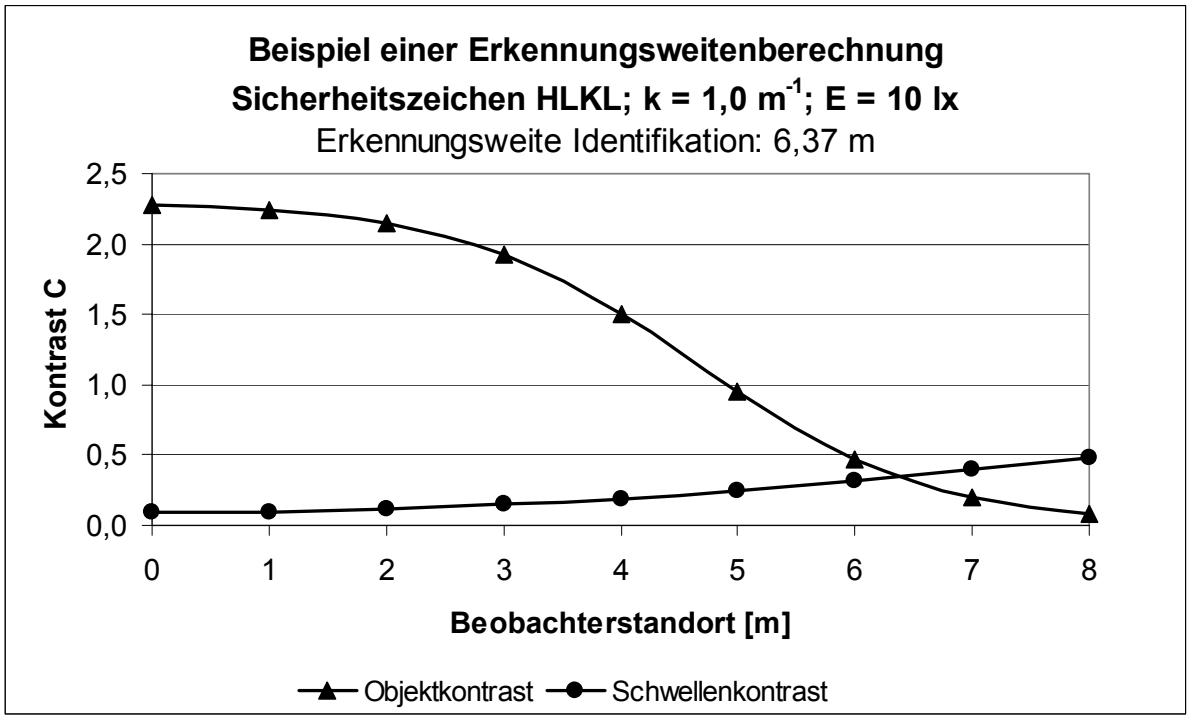



***Abbildung 10: Beispiel zur Bestimmung der Erkennungsweite. Aus dem Schnittpunkt der Funktionen für den Objekt- und Schwellenkontrast erhält man eine Erkennungsweite von 6,37 m***

Abbildung 10 zeigt an Hand eines Beispiels den mit zunehmendem Beobachterabstand geringer werdenden Sehobjektkontrast bei anwachsendem Schwellenkontrast. Bei zum Beispiel einem Abstand von 5 m beträgt der Sehobjektkontrast in der betrachteten Rauchsituation C = 0,95. Der zur Identifizierung des Sicherheitszeichens erforderliche Schwellenkontrast hat bei diesem Abstand den Wert von $\overline{C}$ = 0,25. Das Visibility Level als Verhältnis von Sehobjekt- zu Schwellenkontrast hat

demnach bei diesem Abstand den Wert von VL = 3,8. Das Sicherheitszeichen würde bei diesem Abstand von 5 m überschwellig und daher auffällig wahrgenommen werden. Die Gleichheit von Sehobjekt- und Schwellenkontrast ist aus Abbildung 10 bei etwa 6,5 m abzulesen. Der berechnete Wert für die Erkennungsweite beträgt 6,37 m. Bei diesem Abstand wird das Sicherheitszeichen in seinen charakteristischen Details gerade erkannt.

#### 2.1.4.2 Ergebnisse und Analysen der berechneten Erkennungsweiten

Die Modellergebnisse für das Wahrnehmungskriterium Detektion entsprechen den experimentellen Ergebnissen bei dem Kriterium “*Schild gerade gesehen*“, die theoretischen Identifikationsergebnisse den experimentellen Ergebnissen bei dem Kriterium “*Pfeil gerade erkannt“*.
Die Abbildungen 11 bis 14 zeigen für die berechneten Erkennungsweiten in Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen folgende Trends:

- Die Erkennungsweiten der Sicherheitsleuchten nehmen mit wachsender Rauchdichte exponentiell ab. Im für die Praxis relevanten Bereich der Schwächungskoeffizienten zwischen etwa 0,5 $m^{-1}$ und 2 $m^{-1}$ fallen die Erkennungsweiten von etwa 10 m bis auf etwa 2 m ab.
- Die Erkennungsweiten nehmen generell mit wachsendem Beleuchtungsniveau ab. Mit Ausnahmen ist bei sehr niedrigen Beleuchtungsniveaus zu rechnen.
- Die Erkennungsweiten von leuchtdichteschwachen Sicherheitsleuchten sind erheblich geringer als von Sicherheitsleuchten mit größeren Leuchtdichten.
- Die Erkennungsweiten beim Wahrnehmungskriterium Detektion sind merklich höher als beim Kriterium Identifikation.

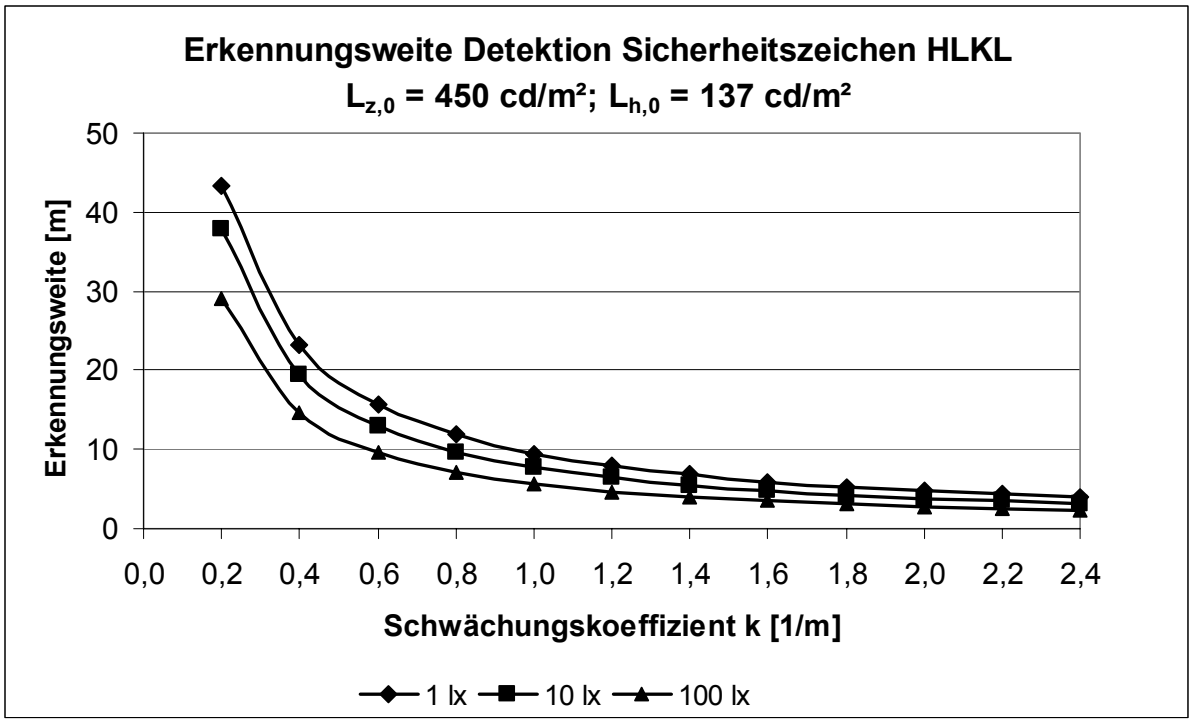



***Abbildung 11:*** ***Erkennungsweite des Sicherheitszeichen HLKL bei dem Wahrnehmungskriterium Detektion. Parameter: Beleuchtungsniveau in der rauchfreien Situation***

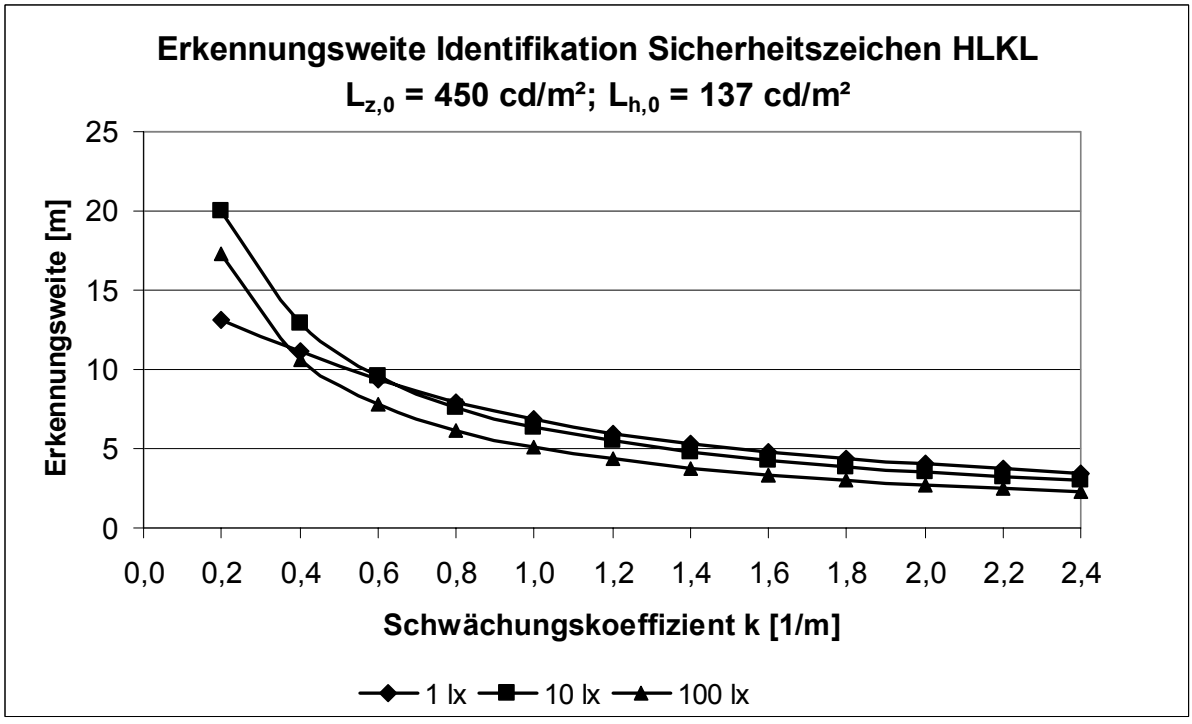



***Abbildung 12:*** ***Erkennungsweite des Sicherheitszeichen HLKL bei dem Wahrnehmungskriterium Identifikation. Parameter: Beleuchtungsniveau in der rauchfreien Situation***

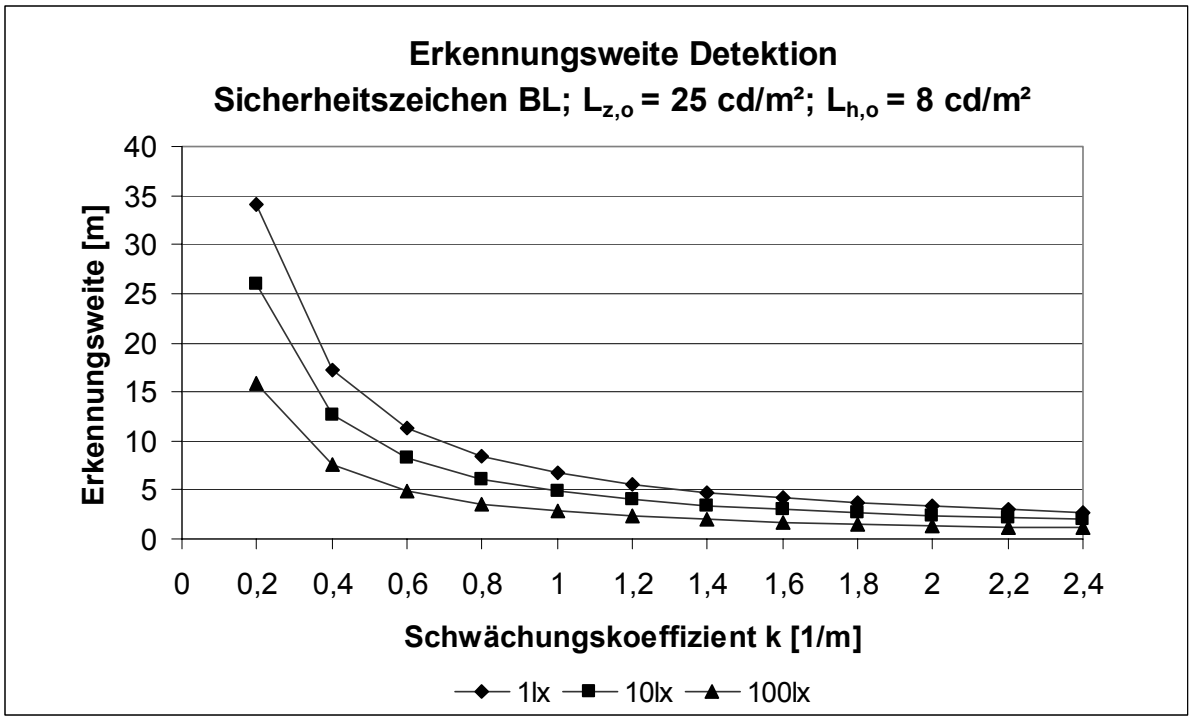



***Abbildung 13:*** ***Erkennungsweite des Sicherheitszeichen BL bei dem Wahrnehmungskriterium Detektion. Parameter: Beleuchtungsniveau in der rauchfreien Situation***

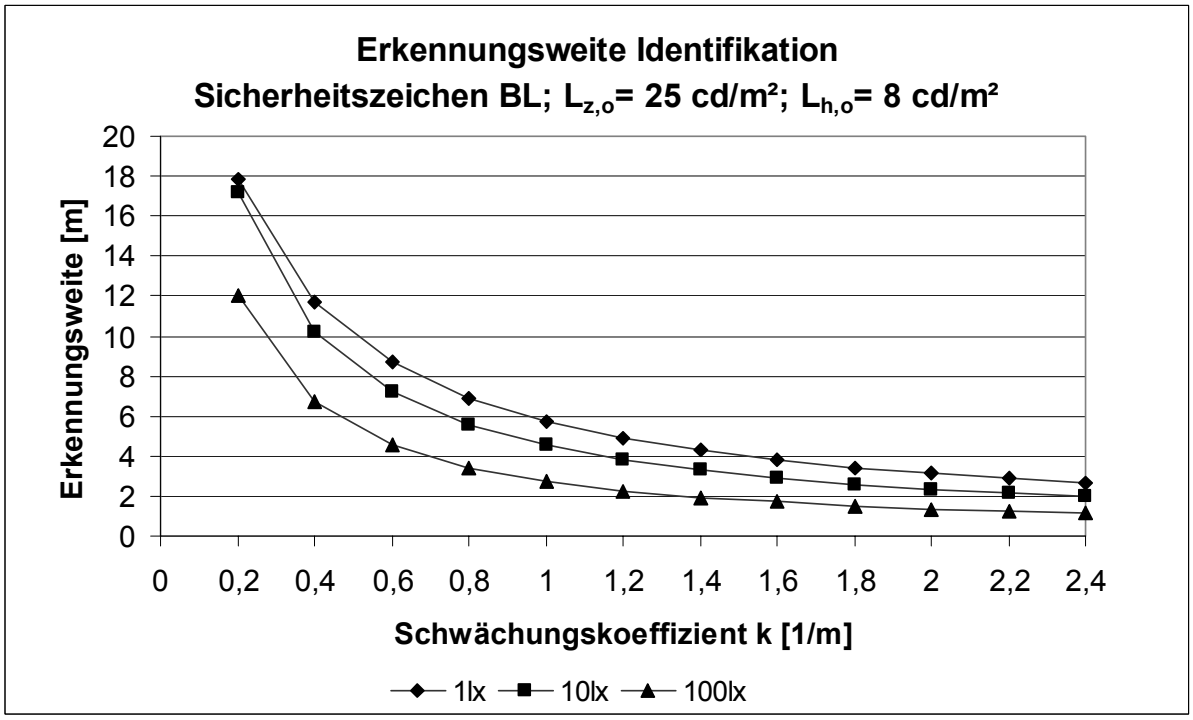



***Abbildung 14:*** ***Erkennungsweite des Sicherheitszeichen BL bei dem Wahrnehmungskriterium Identifikation. Parameter: Beleuchtungsniveau in der rauchfreien Situation***

In Tabelle T1 sind diese Trends durch Beispiele näher erläutert. Danach beträgt beim Sicherheitszeichen HLKL bei einem Schwächungskoeffizient k = 0,6 $m^{-1}$ die berechnete Erkennungsweite für das Wahrnehmungskriterium Identifikation 9,6 m. Bei dichtem Rauch mit einem Schwächungskoeffizient k = 2,0 $m^{-1}$ sinkt die Erkennungsweite auf 3,5 m ab. Entsprechende Ergebnisse wurden experimentell ermittelt, wie aus den in Klammern dargestellten Werten hervorgeht.

| | **Erkennungsweiten [m]** | | | |
|---|---|---|---|---|
| | **BL** $L_{z,o}$ **= 25 cd/m²;** $L_{h,o}$ **= 8 cd/m²** | | **HLKL** $L_{z,o}$ **= 450 cd/m²;** $L_{h,o}$ **= 137 cd/m²** | |
| | **Detektion** | **Identifikation** | **Detektion** | **Identifikation** |
| **k = 0,6** | 8,3 (8,2) | 7,2 (7,3) | 13,0 (11.0) | 9,6 (9,8) |
| **k = 2,0** | 2,4 (2,3) | 2,3 (2,0) | 3,9 (4.0) | 3,5 (3,7) |

***Tabelle T1:*** ***Beispiel für den Einfluss de Schwächungskoeffizienten k auf die Erkennungsweiten bei einem mittleren Beleuchtungsniveau von 10 lx. Die Werte in Klammern sind die gemessenen Werte gemäß Diagramm 39 Anhang B (Sicherheitszeichen BL) und Diagramm 11 Anhang B (Sicherheitszeichen HLKL)***

Die umfangreichen und umfassenden Modellberechnungen ermöglichen eine Verallgemeinerung dieser Beispielergebnisse.

Ausgangspunkt der folgenden Analyse ist der bekannte experimentelle Ansatz, dass zumindest näherungsweise die Erkennungsweite unter Nebel- oder Rauchbedingungen mit dem Schwächungskoeffizienten umgekehrt proportional abnimmt, wobei die Proportionalitätskonstante von der Art des Sehobjektes und den Beleuchtungsbedingungen abhängt. Im Vergleich zur theoretischen Modellbeziehung gemäß Gleichung (9) fasst dieser experimentelle Ansatz die die Erkennungsweite bestimmenden Einflussgrößen zu einer einzigen Konstante zusammen. Danach kann man für die Erkennungsweite x schreiben:

$$x = \frac{V}{k} \qquad \textbf{(10)}$$

wobei bedeuten:

V ein von der Rauchdichte unabhängiger Faktor, hier mit Erkennungsfaktor bezeichnet
k der Schwächungskoeffizient.

Günstig sind möglichst große Erkennungsfaktoren. Sie sind umso größer, je einfacher die Sehbedingungen sind, z.B. bei hohen Leuchtdichten oder großen Sehobjekten.

Zum Beispiel beruht die sog. Normsichtweite beim Sehen unter natürlichen Nebelbedingungen auf der Erkennung von dunklen, ausgedehnten Sehobjekten. Bei einem Schwellenkontrast von 5% folgt daraus ein Erkennungsfaktor von 3. T. Jin [9] hat in seinen Untersuchungen für die Erkennungsfaktoren von Sicherheitszeichen Werte zwischen 3 bis 8 gefunden, je nach Leuchtdichte der Zeichen.

In den Tabellen T2 und T3 wurden die berechneten Erkennungsfaktoren der hier untersuchten Rauchsituationen zusammengefasst. Berechnet wurden die Erkennungsfaktoren als Produkt von Schwächungskoeffizient k und Erkennungsweite x im Bereich zwischen k = 0,4 $m^{-1}$ bis k = 2,2 $m^{-1}$ in Schritten von k = 0,2 $m^{-1}$ Jeder Wert in den Tabellen 2 und 3 ist der Mittelwert aus 10 Einzelwerten entsprechend den berücksichtigten Schwächungskoeffizienten. Die Standardabweichung dieser Einzelwerte ist im Mittel mit etwa 5% relativ gering, was für den Ansatz von Gleichung (10) spricht.

| | **Erkennungsfaktor V** | | | |
|---|---|---|---|---|
| | **1 lx** | **10 lx** | **100 lx** | **Mittelwert** |
| **Detektion** | 9,5 | 7,7 | 5,7 | 7,6 |
| **Identifikation** | 7,4 | 6,5 | 5,2 | 6,4 |
| **Mittelwert** | 8,5 | 7,1 | 5,4 | 7,0 |

***Tabelle T2: Berechnete Erkennungsfaktoren des Sicherheitszeichens HLKL. Zeichenleuchtdichte $L_{zo}$ = 450 cd/m²; Hintergrundleuchtdichte $L_{ho}$ = 137 cd/m²***

| | **Erkennungsfaktor V** | | | |
|---|---|---|---|---|
| | **1 lx** | **10 lx** | **100 lx** | **Mittelwert** |
| **Detektion** | 6,7 | 4,9 | 2,8 | 4,8 |
| **Identifikation** | 5,9 | 4,6 | 2,7 | 4,4 |
| **Mittelwert** | 6,3 | 4,8 | 2,8 | 4,6 |

***Tabelle T3: Berechnete Erkennungsfaktoren des Sicherheitszeichens BL. Zeichenleuchtdichte $L_{zo}$ = 27 cd/m²; Hintergrundleuchtdichte $L_{ho}$ = 17 cd/m²***

9 Jin, T.: Visibility through Fire Smoke, Part 2, Visibility of monochromatic signs through fire smoke. Report of Fire Research Institute of Japan Serial No. 33, 1971, S. 31 – 48

Bei Schwächungskoeffizienten von k = 1 $m^{-1}$ sind die Erkennungsfaktoren zahlenmäßig gleich den Erkennungsweiten in Metern. Bei anderen Schwächungskoeffizienten erhält man die Erkennungsweite gemäß Gleichung (10) aus dem Erkennungsfaktor, dividiert durch den Schwächungskoeffizienten.

Zum Beispiel erhält man bei einem Erkennungsfaktor von V = 6,5 und einem Schwächungskoeffizient von k = 0,5 $m^{-1}$ eine Erkennungsweite von x = 13 m.

Erkennungsfaktoren sind ein informatives Maß für die Effizienz von Sicherheitszeichen. Zusammenfassend haben die Modellrechnungen ergeben:

- Dem Sicherheitszeichen HLKL ist im Mittel ein Erkennungsfaktor von 7,0, dem Sicherheitszeichen BL ein mittlerer Erkennungsfaktor von 4,6 zuzuordnen. Ursache der im Mittel um etwa 52% größeren Erkennungsfaktoren des Zeichens HLKL ist die um etwa den Faktor 8 größere Zeichenleuchtdichte gegenüber dem Zeichen BL.
- Eine Allgemeinbeleuchtung (100 lx) führt im Vergleich zu einer Notbeleuchtung (10 lx) zu einer signifikanten Verringerung der Erkennungsfaktoren und damit auch der Erkennungsweiten. Beim Zeichen HLKL beträgt der Verlust etwa 24%, beim Zeichen BL etwa 40%.
- Bei der Detailerkennung (Identifikation) von Sicherheitszeichen sind die Erkennungsfaktoren durchschnittlich etwa um 10 bis 15% geringer als bei der Umrisserkennung (Detektion).

Zusätzlich zu diesen generellen Zusammenhängen bestehen eine Reihe von Wechselwirkungen, auf die im folgenden Abschnitt eingegangen wird.

### 2.1.5 Gestaltungsanalysen

Im Folgenden wird untersucht, wie sich die lichttechnischen Gestaltungsgrößen Beleuchtungsniveau, Hintergrundleuchtdichte, Zeichenleuchtdichte und Größe der Sicherheitszeichen auf die erzielbaren Erkennungsweiten auswirken.

Zu diesem Zweck werden diese Gestaltungsgrößen systematisch zwischen einem Zehntel und dem Zehnfachen der bisher untersuchten Referenzwerte variiert und zwar bei einer mittleren Rauchdichte entsprechend einem Schwächungskoeffizienten

von k = 1 $m^{-1}$. In den Abbildungen 15 bis 18 sind als Ergebnis dieser Analysen die auf den Referenzwert bezogenen Erkennungsweiten in Abhängigkeit des Erhöhungsfaktors v dargestellt. Die Referenzsituationen sind in den Legenden der Abbildungen genauer spezifiziert.

#### 2.1.5.1 Gestaltungsgröße: Beleuchtungsniveau

Mit wachsendem Beleuchtungsniveau in einem mit Rauch gefüllten Raum wird zum einen das Adaptationsniveau und damit die visuelle Leistungsfähigkeit erhöht. Andererseits hat ein höheres Beleuchtungsniveau größere Streuleuchtdichten und damit geringere Sehobjektkontraste zur Folge. Damit stellt sich die Frage nach dem optimalen Beleuchtungsniveau.

Abbildung 15 zeigt, dass zur Erkennung des leuchtdichteschwachen Sicherheitszeichens BL ein möglichst geringes Beleuchtungsniveau von Vorteil ist. Dagegen ist bei dem leuchtdichtestarken Sicherheitszeichen HLKL ein zu niedriges Beleuchtungsniveau eher ungünstig. Am günstigsten ist dafür ein Beleuchtungsniveau zwischen 0,1 und 1 lx. Dieser Optimum-Effekt ist umso stärker ausgeprägt, je geringer die Rauchdichte ist.

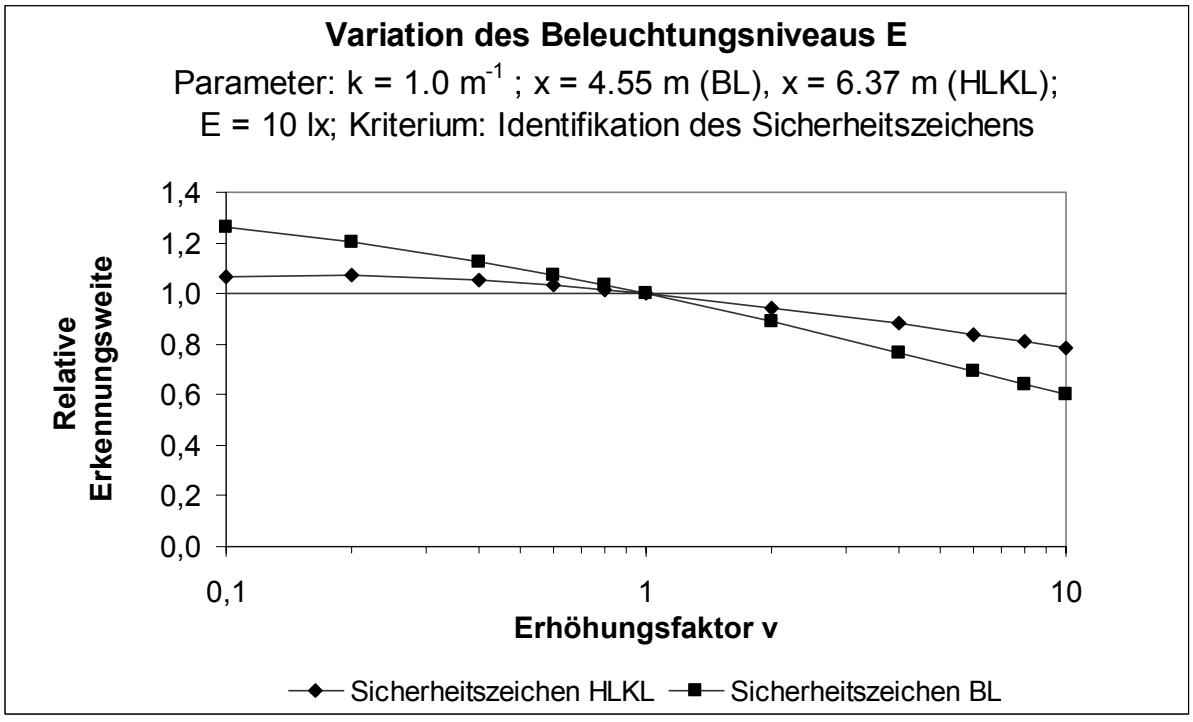



***Abbildung 15: Einfluss des Beleuchtungsniveaus auf die Erkennungsweite***

### 2.1.5.2 Gestaltungsparameter: Hintergrundleuchtdichte

Die Hintergrundleuchtdichte $L_h$ bestimmt neben der Zeichenleuchtdichte den Leuchtdichtekontrast des Zeichens. Günstig sind möglichst geringe Werte (Abbildung 16). Kritisch sind höhere Hintergrundleuchtdichten sobald sich diese der Zeichenleuchtdichte annähern. Erreicht die Hintergrundleuchtdichte die Zeichenleuchtdichte, dann ist die Erkennungsweite erwartungsgemäß null. Letzten Endes zeigt sich in dieser Darstellung wieder die dominierende Rolle des Sehobjektkontrastes.

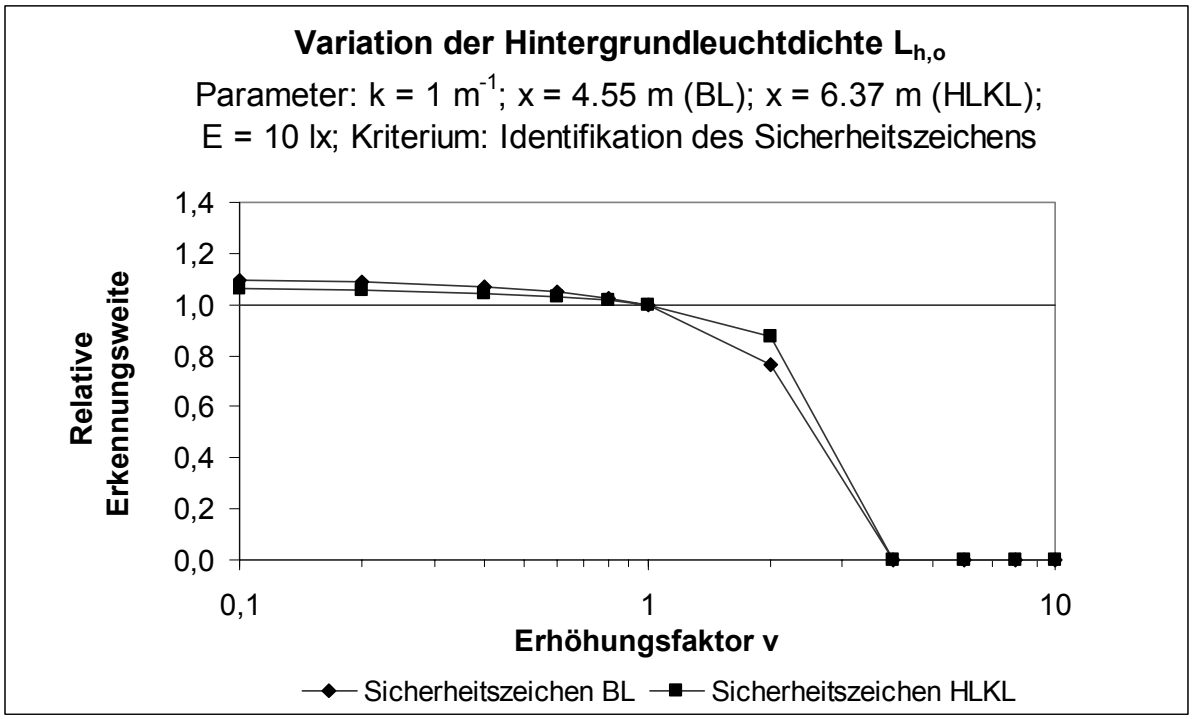



***Abbildung 16: Einfluss der Hintergrundleuchtdichte auf die Erkennungsweite***

### 2.1.5.3 Gestaltungsparameter: Zeichenleuchtdichte

Bei der Variation der Zeichenleuchtdichte sind zwei Fälle zu unterscheiden. Erstens der Fall der parallelen Zunahme der Hintergrundleuchtdichte, sodass der Anfangskontrast unverändert bleibt. Wie Abbildung 17 zeigt, nimmt in diesem Fall die Erkennungsweite etwa linear mit dem Logarithmus des Erhöhungsfaktors v zu. Eine Zunahme der Sehobjektleuchtdichte um z.B. den Faktor 2 hat eine Zunahme der Erkennungsweite um etwa 5% zur Folge.

Kritisch sind Reduzierungen der Zeichenleuchtdichte bei gleichbleibender Hintergrundleuchtdichte wegen der Gefahr der Tarnung, wie auch Abbildung 17 zeigt.

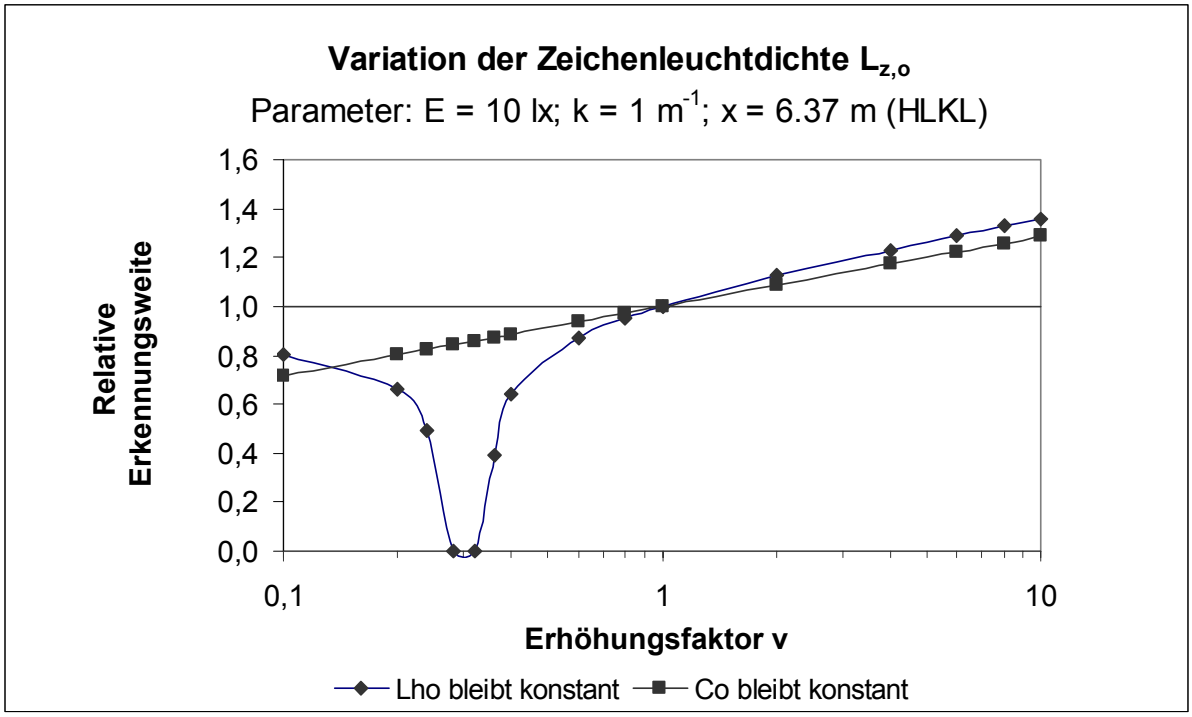



***Abbildung 17: Einfluss Zeichenleuchtdichte auf die Erkennungsweite***

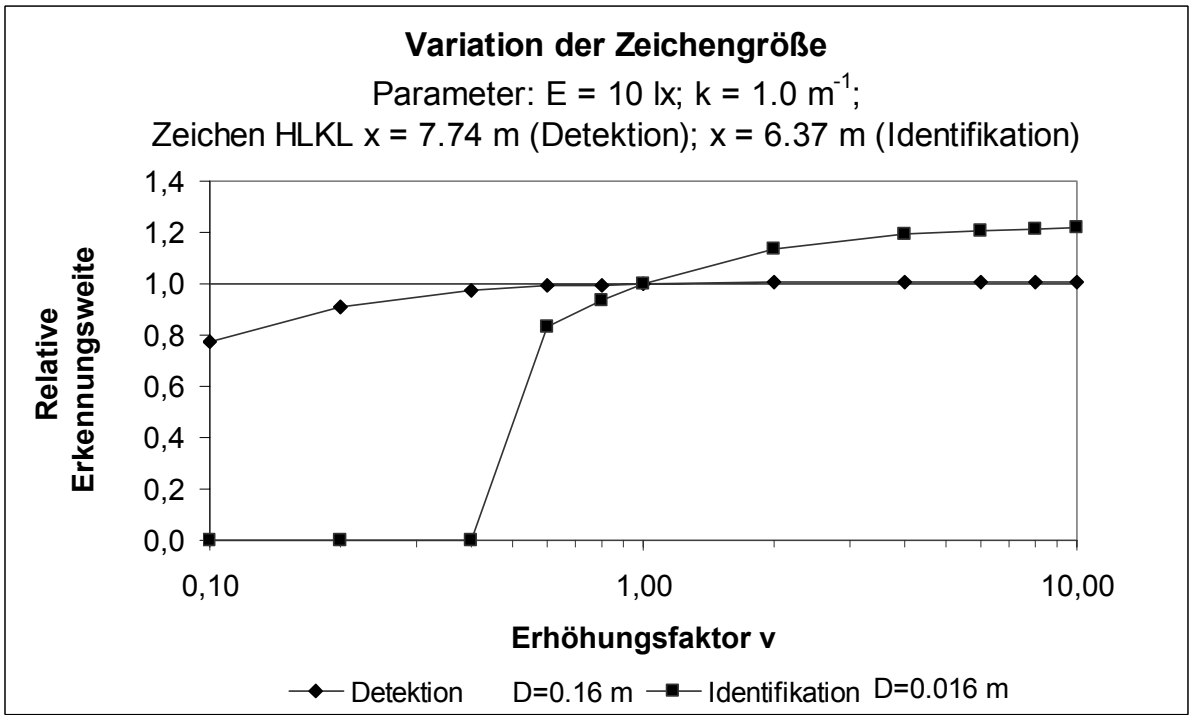



***Abbildung 18: Einfluss der Sehobjektgröße auf die Erkennungsweite***

#### 2.1.5.4 Gestaltungsgröße: Zeichengröße

Die Größe der Sehobjektabmessungen ist von entscheidendem Einfluss auf die Sichtbarkeit von Sicherheitszeichen. Insbesondere für die Identifikation von Details ist eine bestimmte Mindestgröße erforderlich, wie aus Abbildung 18 hervorgeht. Eine Erhöhung dieser Mindestgröße führt zunächst zu einer relativ steil verlaufenden Zunahme der Erkennungsweite, die danach nur relativ langsam anwächst. Unterhalb der Mindestgröße kann es zu verschwindend kleinen Erkennungsweiten kommen.

***Fazit***

***Infolge der komplexen, zum Teil gegenläufigen Abhängigkeiten der Erkennungsweitenparameter in Rauchsituationen bestehen zwischen den lichttechnischen Parametern von Sicherheitszeichen für Rettungswege als Ergebnis der theoretischen Modellanalysen zusammenfassend folgende allgemeine Zusammenhänge:***

- ***Hohe Rauchdichten wirken sich auf die Erkennung oder Identifikation von Zeichendetails nachteiliger aus als auf die Sichtbarkeit oder Detektion des Zeichens als Ganzes. Dieser Effekt nimmt zu mit wachsender Rauchdichte. Fein strukturierte Sicherheitszeichen sind daher bei Rauch unzweckmäßig.***
- ***Das günstigste Beleuchtungsniveau in einem mit Rauch gefüllten Raum hängt von den Leuchtdichten der Sicherheitszeichen ab. Bei Sicherheitszeichen mit relativ niedrigen Zeichenleuchtdichten sind niedrigere Beleuchtungsniveaus günstiger. Entsprechend sind bei höheren Zeichenleuchtdichten höhere Beleuchtungsniveaus von Vorteil.***
- ***Günstig im Allgemeinen sind geringe Hintergrundleuchtdichten und hohe Zeichenleuchtdichten. Zu hohe Zeichenleuchtdichten sind ungünstig, sie können Blendungs- und Streulichteffekte verursachen.***
- ***Die Erzielung ausreichender Erkennungsweiten wird bei großen Rauchdichten entscheidend von der Ausdehnung der Zeichen bestimmt. Mindestwerte hängen von der Rauchdichte, der Zeichenleuchtdichte und der erforderlichen Erkennungsweite ab.***
- ***Die lichttechnische Effizienz von Sicherheitszeichen kann durch den sehr anschaulichen Erkennungsfaktor beschrieben werden.***

## 2.2 Laboruntersuchungen

Untersuchungen mit Probanden sind im realen Brandszenario nicht möglich. Die Giftigkeit des Brandrauches und die Brandsituation selbst gefährden die Gesundheit der Probanden. Reale Bedingungen sind sehr komplex und erlauben keine gezielte Variation von Parametern. Die messtechnische Erfassung ist aufgrund von Wärmedrift, Ablagerungen auf der Optik und Ungleichmäßigkeiten äußerst aufwändig und schwierig. Die Durchführung von Untersuchungen mit entsprechenden Schutzanzügen spiegelt, bedingt durch den eingeschränkten Gesichtskreis, die fehlende Reizwirkung und die ungewohnte Situation, die realen Bedingungen nur sehr begrenzt wider. Für die Untersuchungen zur Sichtbarkeit von Sicherheitsleitsystemen wurden deshalb ungiftige Aerosole zur Simulation des Brandrauches angewendet und der Einfluss der Augenreizung auf die Sehschärfe in einer gesonderten Untersuchung bestimmt.

Die Untersuchungen zur Erkennungsweite erfolgten in einem Rettungsgang und bei Verwendung eines Nebelfluids, das in wesentlichen Parametern (Partikelgröße, Streueigenschaften, spektrale Transmission) mit den Eigenschaften von Brandrauch bei Schwelbränden mit heller Brandrauchentwicklung übereinstimmt und keine Gesundheitsrisiken für Probanden und Versuchsleiter darstellt. Dies hat den Vorteil, dass die Versuche mit Probanden direkt im Rettungsgang und bei Sichttrübung durchgeführt werden konnten und dass sich vergleichbare Umfeldbedingungen für die verschiedenen Versuche realisieren ließen. Auf diese Weise war es möglich, Einflussgrößen zu erfassen und nahezu stabil zu halten. So konnten die Vor- und Nachteile der verschiedenen Systeme bestimmt und verglichen werden.

Die bei diesen Laboruntersuchungen vorhandenen Nachteile:

- fehlende Augenreizung und fehlende Paniksituation
- kein realer Brandrauch
- keine Schichtbildung des Brandrauches
- geringe Komplexität der Rettungssituation
- keine Massenflucht
- fehlende Fensterbereiche

wurden dabei in Kauf genommen. Es ist zu erwarten, das die Sehbedingungen im realen Brandfall noch extremer ausfallen und die Erkennungsweiten noch weiter zurück gehen.

## 2.3 Eigenschaften von Brandrauch

Für die Festlegung der Randbedingungen für die experimentellen Arbeiten ist es notwendig, die wesentlichen Brandrauchparameter zu bestimmen.

### 2.3.1 Relevante Brandrauchparameter

In Auswertung relevanter Veröffentlichungen wurden die folgenden Rauchparameter für die weiteren Untersuchungen bestimmt:

#### 2.3.1.1 Rauchart

Nach der Brandart werden Schwelbrände und offene Brände (Verbrennung mit Flammenbildung) unterschieden. Die Rauchentstehung ist abhängig von den brennenden Stoffen und den Brandbedingungen (Tabelle T4).

| Brandart | Schwelbrände | | offene Brände | |
|---|---|---|---|---|
| | **Pyrolytische Zersetzung** | **Glimmbrände** | **Feste Stoffe** | **Flüssige Stoffe** |
| Brandablauf | nicht selbständig, benötigt ständige Energiezufuhr | selbständig nach Zündung | selbständig nach Zündung | selbständig nach Zündung |
| Rauchart | sehr heller Rauch mit unsichtbaren Anteilen | heller Rauch mit großen unsichtbaren Anteilen | dunkler Rauch mit großen unsichtbaren Anteilen | sehr dunkler Rauch mit großen unsichtbaren Anteilen (ruhend) |

***Tabelle T4: Klassifikation der Brandarten*** [10]

***Fazit:***

***Schwelbrände mit sehr hellem Brandrauch beeinflussen das Sehen aufgrund der starken Lichtstreuung stärker als Verbrennungen mit offener Flammenbildung und dunklem Rauch*** [9]***. Für die Untersuchungen wurde deshalb weißer Rauch gewählt.***

[10] Hagebölling, D.: Taschenbuch Betrieblicher Brandschutz. Vulkan-Verlag Essen, 1999, S. 11

[9] Jin, T.: Visibility through Fire Smoke, Part 2, Visibility of monochromatic signs through fire smoke. Report of Fire Research Institute of Japan Serial No. 33, 1971, S. 31 – 48

### 2.3.1.2 Sichttrübung

Der Schwächungskoeffizient oder Absorptionskoeffizient k ist ein Maß für die Sichttrübung. Er bildet die Bezugsgröße für alle weiteren Betrachtungen. Für eine normierte Entfernung von d = 1 m besteht zwischen dem Schwächungskoeffizienten k und der optischen Dichte $D_\tau$ folgender Zusammenhang [11]:

$$k = D_\tau \cdot 2{,}3 \qquad \textbf{(11)}$$

In einer Studie von Jensen [12] sind die Bereitschaft fliehender Personen den Fluchtweg zu betreten oder umzukehren und die Überlebenschancen in Abhängigkeit von der optischen Dichte des Brandrauches zusammenfassend dargestellt. In den Tabellen T5 und T6 sind diese Werte angegeben und durch den Schwächungskoeffizienten k ergänzt.

| $D_\tau$ [je m] | k [$m^{-1}$] | Grenzwert für das Umkehrverhalten fliehender Personen |
|---|---|---|
| **0,10** | **0,23** | weniger als 10% der fliehenden Personen wollen umkehren |
| **0,25** | **0,58** | 10-25% der fliehenden Personen wollen umkehren |
| **0,30** | **0,69** | Mittelwert der optischen Dichte, bei der fliehenden Personen umkehren wollen |
| **1,10** | **2,53** | 70% der fliehenden Personen wollen umkehren |

***Tabelle T5: Grenzwert für das Umkehrverhalten fliehender Personen*** [12]

| $D_\tau$ [je m] | k [$m^{-1}$] | Grenzwert für die Überlebenschance fliehender Personen |
|---|---|---|
| **0,22** | **0,51** | kurzzeitiger Aufenthalt |
| **1,64** | **3,77** | max. Grenzwert |

***Tabelle T6: Grenzwert für die Überlebenschance fliehender Personen*** [12]

***Fazit:***

***Optische Dichten bis zu 1,1 $m^{-1}$ erscheinen für die Untersuchungen als relevant. 70% der fliehenden Personen würden bei dieser Rauchdichte im Fluchtbereich umkehren. Aufgrund der Giftigkeit des Brandrauches sind die Überlebenschancen bei größeren optischen Dichten sehr gering. Damit ergeben sich für die Untersuchungen Schwächungskoeffizienten im Bereich zwischen 0,5 $m^{-1}$ und 2,8 $m^{-1}$.***

[11] Bear: Beleuchtungstechnik - Grundlagen. Verlag Technik Berlin, 2. Auflage, S.24

[12] Jensen, G.: Evacuating in Smoke. IGP AS - Studie, Trondheim (Norwegen), 1993

### 2.3.1.3 Streuung und Absorption

Die Wirkung des Rauches auf die Lichtausbreitung wird durch die absorbierenden ($k_a$) und streuenden Eigenschaften ($k_s$) der Rauchpartikel bestimmt und kann durch folgende Gleichung für den Schwächungskoeffizienten k beschrieben werden (Vgl. Kapitel 3.2.4):

$$k = k_s + k_a \qquad \textbf{(12)}$$

Die Streueigenschaften des Brandrauches lassen sich über das Verhältnis $k_s/k$ für verschiedene Materialien und Brandsituationen erfassen.
Für verschiedene Brandarten sind diese Verhältnisse in Tabelle T7 angegeben.

| Brandart | $k_s/k$ |
|---|---|
| **Schwelbrände mit weißem Rauch** | 1,0 |
| **Verbrennungen mit nahezu weißem Rauch** | 0,5 – 1,0 |
| **Verbrennungen mit schwarzem Rauch** | 0,5 |

***Tabelle T7: Verhältnis von $k_s/k$ für verschiedene Brandarten und Rauchfarben*** [13]

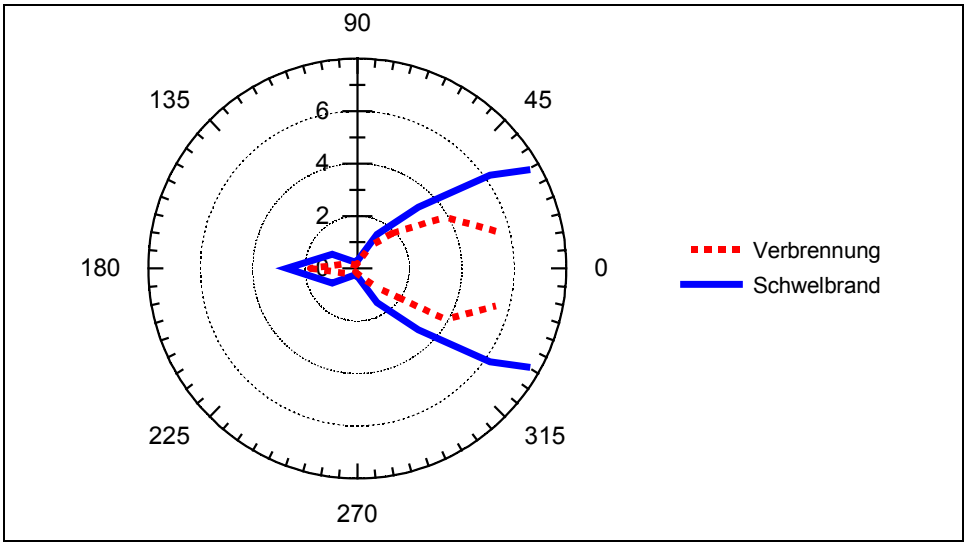



***Abbildung 19: Relative Streuung im Rauch bei Verschwelung und Verbrennung von Holz*** [9]

***Fazit:***

***Bei Schwelbränden tritt im Vergleich zu Verbrennungen mit offener Flamme eine größere Lichtstreuung auf (Abbildung 19).***

[13] Jin, T.: Decrease of smoke density, Part 1, decrease of smoldering smoke with time. Report of Fire Research Institut of Japan serial No. 40, 1975, S.11 - 16

[9] Jin, T.: Visibility through Fire Smoke, Part 2, Visibility of monochromatic signs through fire smoke. Report of Fire Research Institute of Japan Serial No. 33, 1971, S. 31 - 48

### 2.3.1.4 Größe der Rauchpartikel

Bezüglich der Partikelgröße sind in der Literatur unterschiedliche Angaben zu finden. Die Arbeit von Bankston [14] ergab die in Tabelle T8 zusammengefassten Werte.

| Thermische Zersetzung (Verschwelung) | zugeführter Wärmestrom [W/cm$^2$] | Teilchendurchmesser [µm] für 10% Masseanteil | für 90% Masseanteil |
|---|---|---|---|
| **Holz** | 6,2<br>3,2 | 0,34<br>0,20 | 2,10<br>1,10 |
| **Harter Polyurethanschaum** | 6,2<br>3,2 | 0,30<br>0,10 | 2,30<br>1,40 |
| **Hart-PVC** | 6,2 | 0,30 | 1,70 |
| Verbrennung mit Flammenbildung | | | |
| **Holz** | 2,5 | 0,10 | 1,20 |
| **Hart-PVC** | 2,5 | 0,10 | 1,20 |

***Tabelle T8:*** ***Massebezogener Durchmesser der Teilchen, bei dem 10% bzw. 90% der Masse einen kleineren Durchmesser aufweisen*** [14]

Diese Angaben wurden von Mulholland [15] für kleine Räume bestätigt. In großen Räumlichkeiten schätzt er jedoch größere Partikel mit einem massebezogenen Durchmesser von 5 µm.

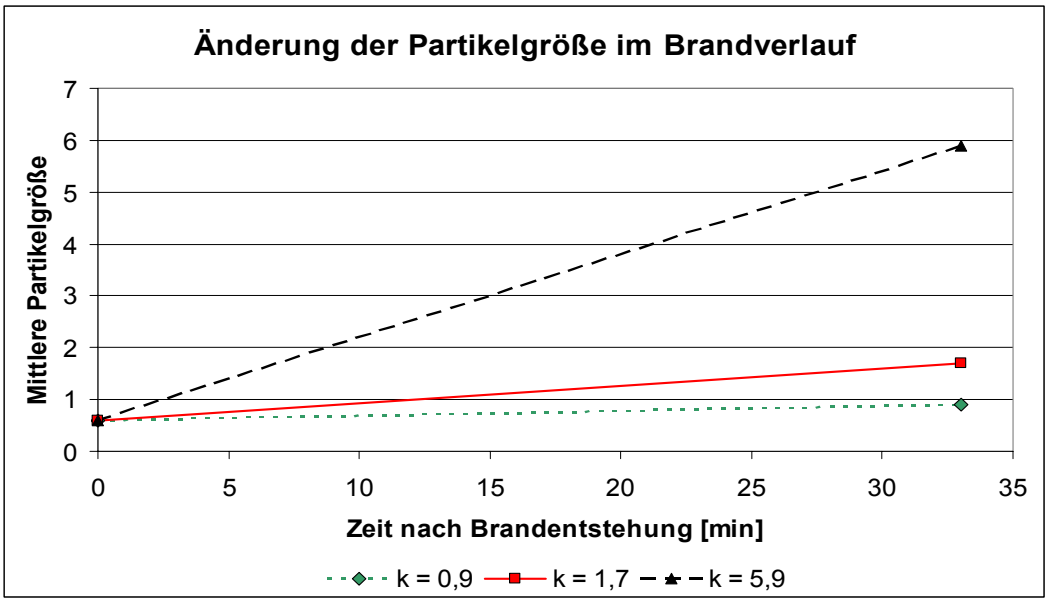



***Abbildung 20:*** ***Änderung des Teilchendurchmessers während des Brandes*** [13]

Jin [13] hat die Änderungen der Partikelgröße während des Brandverlaufs in Abhängigkeit vom Schwächungskoeffizienten untersucht (Abbildung 20).

[14] Bankston, C.P. et all: Aspects of the mechanisms of smoke generation by burning materials. Combustion and Flame. No. 41, 1981

[15] Mulholland, G.W.: How well are we measuring smoke?. Zts. Fire and Materials Vol. 6 No. 2, 1962, S. 65 - 67

[13] Jin, T.: Decrease of smoke density, Part 1, decrease of smoldering smoke with time. Report of Fire Research Institut of Japan serial No. 40, 1975, S.11 - 16

Bei seinen früheren Untersuchungen fand Jin [9] bei Verschwelungen verschiedener Holz- und Kunststoffarten Partikelgrößen zwischen 1 µm bis 1,5 µm. Bei der Verbrennung mit offener Flammenbildung traten hingegen Partikelgrößen bei Holz bis zu 10 µm und bei Kunststoffen bis zu 20 µm auf.

***Fazit:***

***Als für die durchzuführenden Untersuchungen relevant werden Partikelgrößen von 1 µm - 5 µm angesehen.***

#### 2.3.1.5 Spektrale Eigenschaften

Nichtweißer Rauch besitzt eine wellenlängenabhängige Transmission. Damit verbunden sind mögliche Farbverschiebungen.

In Abbildung 21 bis 24 sind Ergebnisse von spektralen Untersuchungen von Schwelbränden verschiedener Materialien bei unterschiedlichen Schwächungskoeffizienten, normiert auf eine Wellenlänge von 440 nm, dargestellt [16]. Die Untersuchungen wurden mit dem SpectraScan PR 705 der Firma Photo Research durchgeführt.

***Fazit:***

***Mit zunehmender Rauchdichte verringert sich die spektrale Transmission besonders in den langwelligeren Bereichen. Für die verschiedenen untersuchten Materialien zeigen sich ähnliche Verläufe in Abhängigkeit vom Schwächungskoeffizienten.***

---

13 Jin, T.: Decrease of smoke density, Part 1, decrease of smoldering smoke with time. Report of Fire Research Institut of Japan serial No. 40, 1975, S.11 - 16

9 Jin, T.: Visibility through Fire Smoke, Part 2, Visibility of monochromatic signs through fire smoke. Report of Fire Research Institute of Japan Serial No. 33, 1971, S. 31 - 48

16 Lühe, A.; Strauß, St.: Spektrale Raucheigenschaften. Projektarbeit, TU Ilmenau, 2002

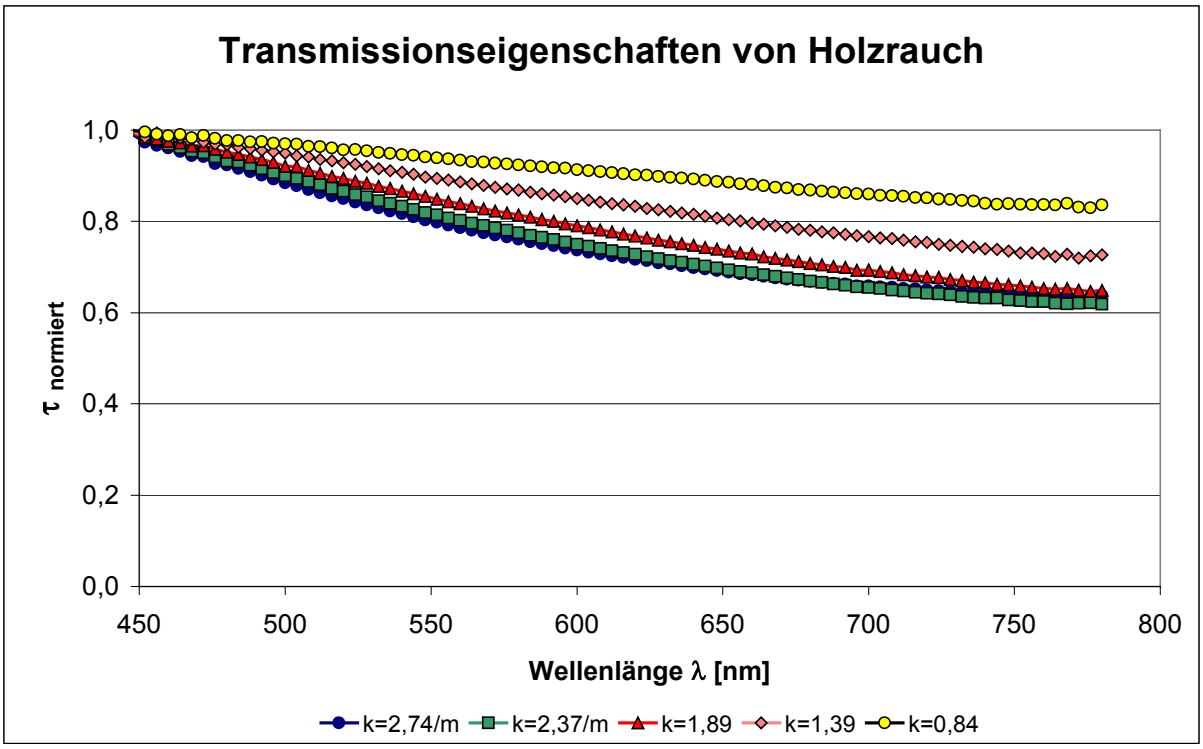



***Abbildung 21: Normierter spektraler Transmissionsgrad von Holzrauch*** [16]

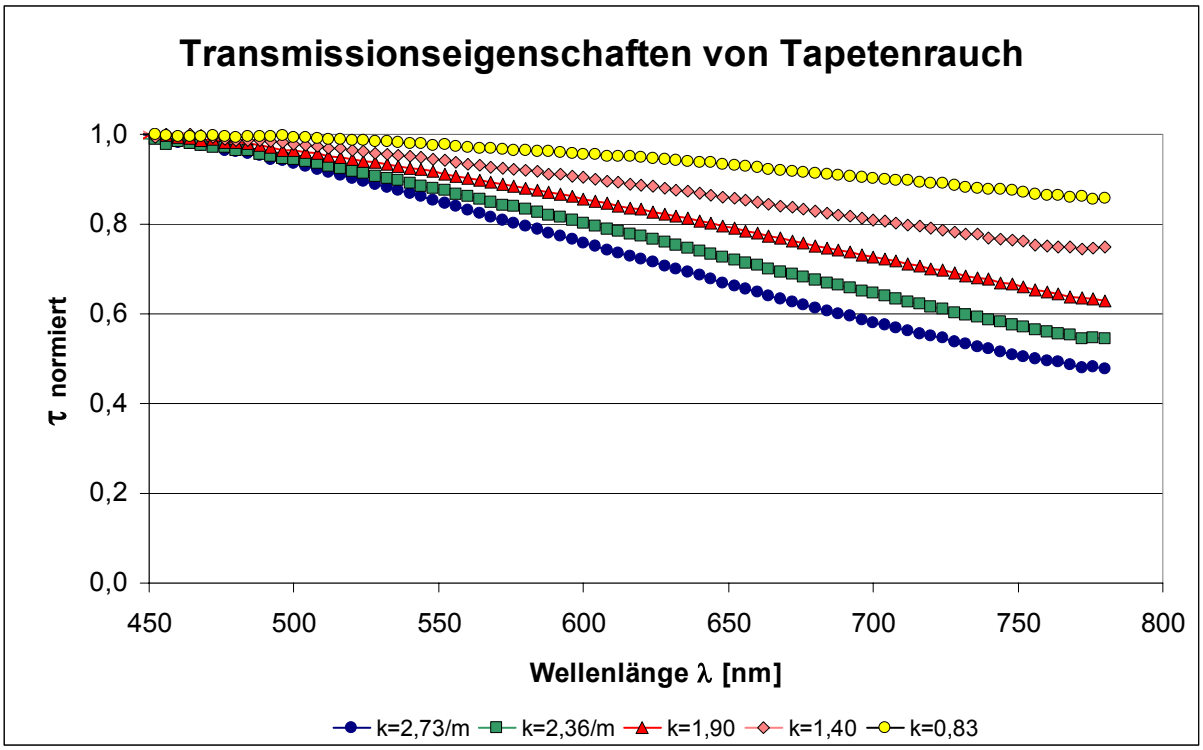



***Abbildung 22: Normierter spektraler Transmissionsgrad von Tapetenrauch*** [16]

[16] Lühe, A.; Strauß, St.: Spektrale Raucheigenschaften. Projektarbeit, TU Ilmenau, 2002

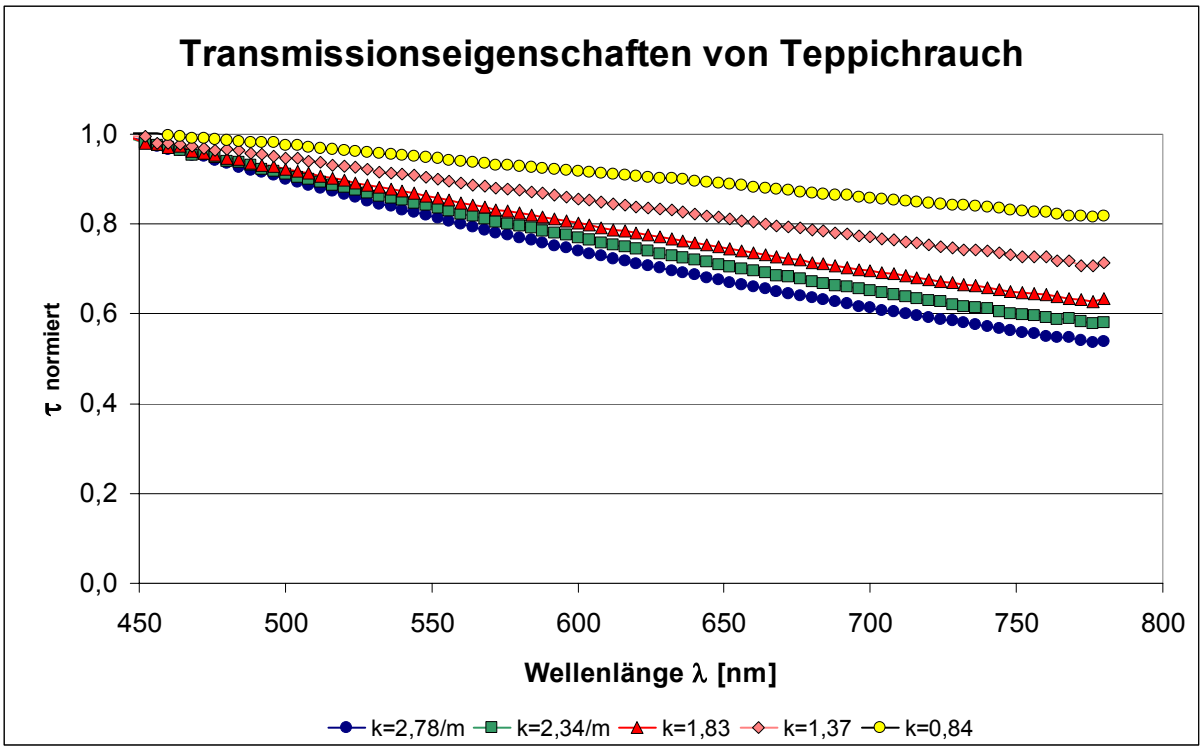



***Abbildung 23: Normierter spektraler Transmissionsgrad von Teppichrauch*** [16]

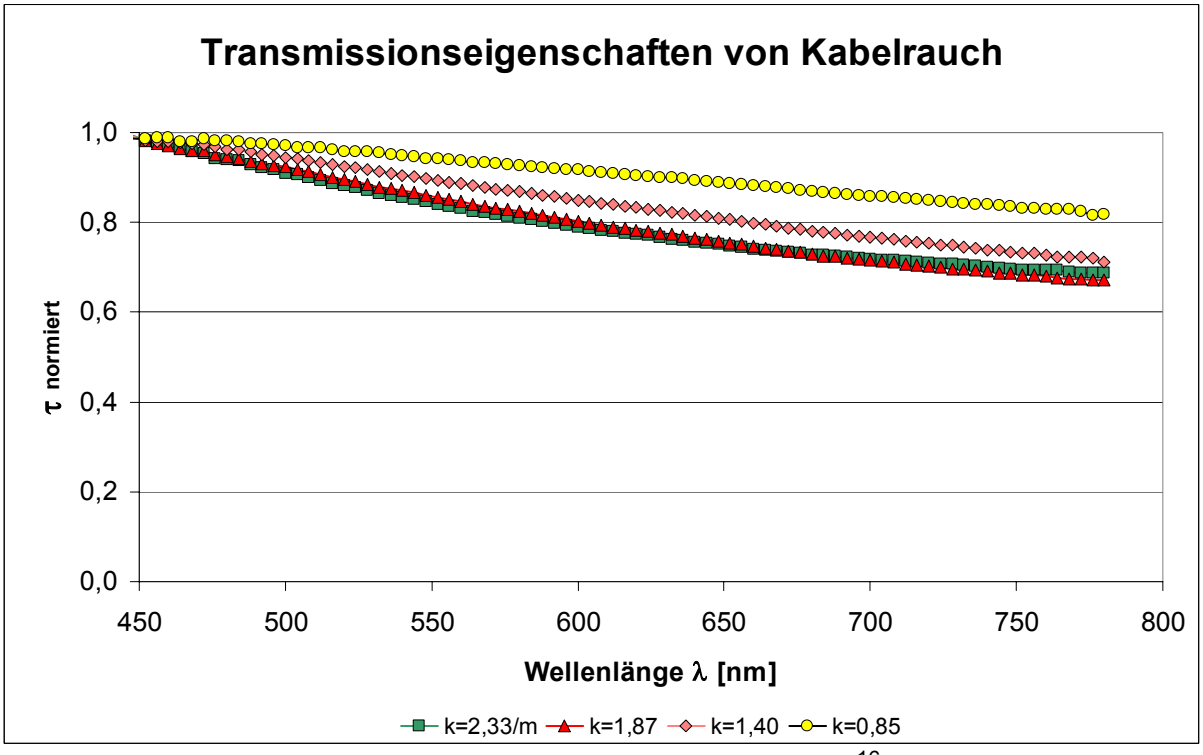



***Abbildung 24: Normierter spektraler Transmissionsgrad von Kabelrauch*** [16]

[16] Lühe, A.; Strauß, St.: Spektrale Raucheigenschaften. Projektarbeit, TU Ilmenau, 2002

### 2.3.1.6 Streueigenschaften

Die Ergebnisse der Untersuchung der Streueigenschaften von Brandrauch bei Schwelbränden sind in Abbildung 25 dargestellt.

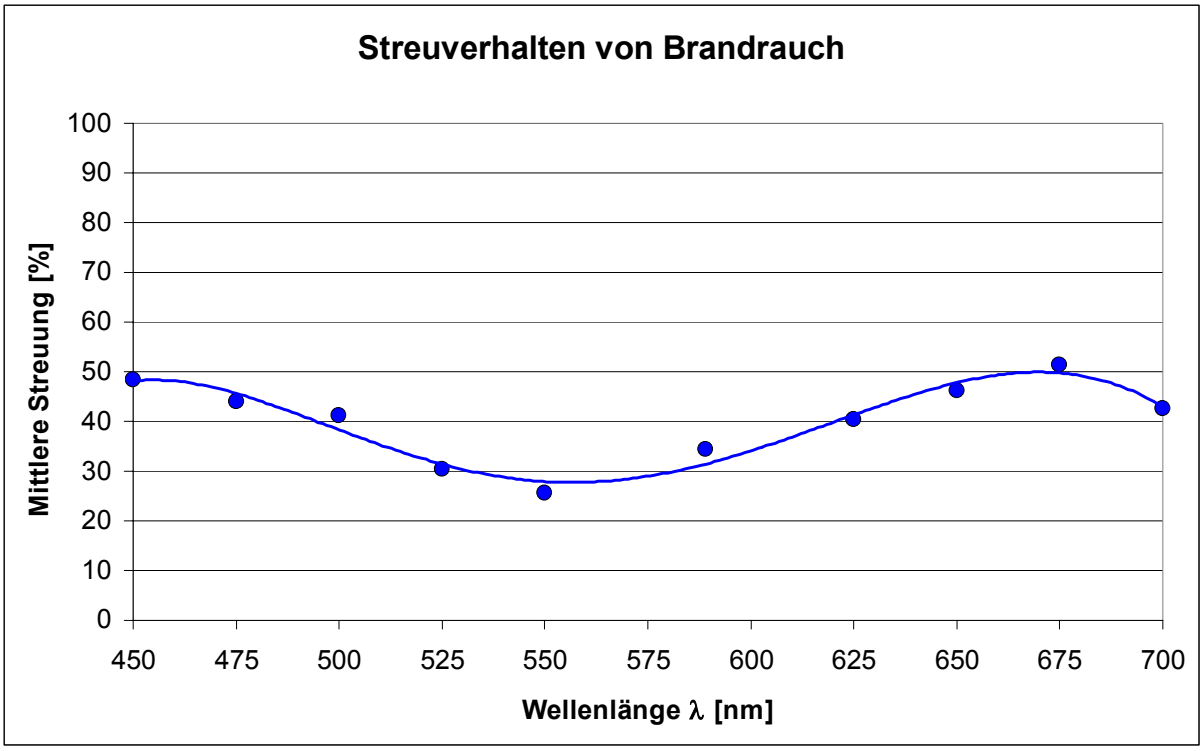



***Abbildung 25: Mittlere Streuung bei Schwelbränden von Holz, Mittel aus zwei Messungen*** [16]

***Fazit:***

***Die Streuung variiert in Abhängigkeit von der Wellenlänge. Im Bereich von 525 nm bis 550 nm ist die Streuung am geringsten. Sie nimmt zu kürzeren und längeren Wellenlängen hin zu.***

[16] Lühe, A.; Strauß, St.: Spektrale Raucheigenschaften. Projektarbeit, TU Ilmenau, 2002

### 2.3.2 Wirkung von Brandrauch auf das Sehen

**Die Absorption** des Lichtes durch den Rauch führt zu einer ***Verringerung der Leuchtdichte des Sehobjektes und des Umfeldes*** und beeinflusst den Adaptationszustand des Auges wesentlich. Das Kontrastverhältnis Sehobjekt / Umfeld bleibt davon unberührt.

**Die streuende Eigenschaft** des Rauches wirkt sich auf die Wahrnehmung eines Sehzeichens so aus, dass sich Schleierleuchtdichten den Leuchtdichten des Objektes und des Umfeldes überlagern. Die Folge ist eine ***Kontrastverflachung*** zwischen Sehobjekt und Umfeld, die ebenfalls die Erkennbarkeit herabsetzt (Abbildung 26).

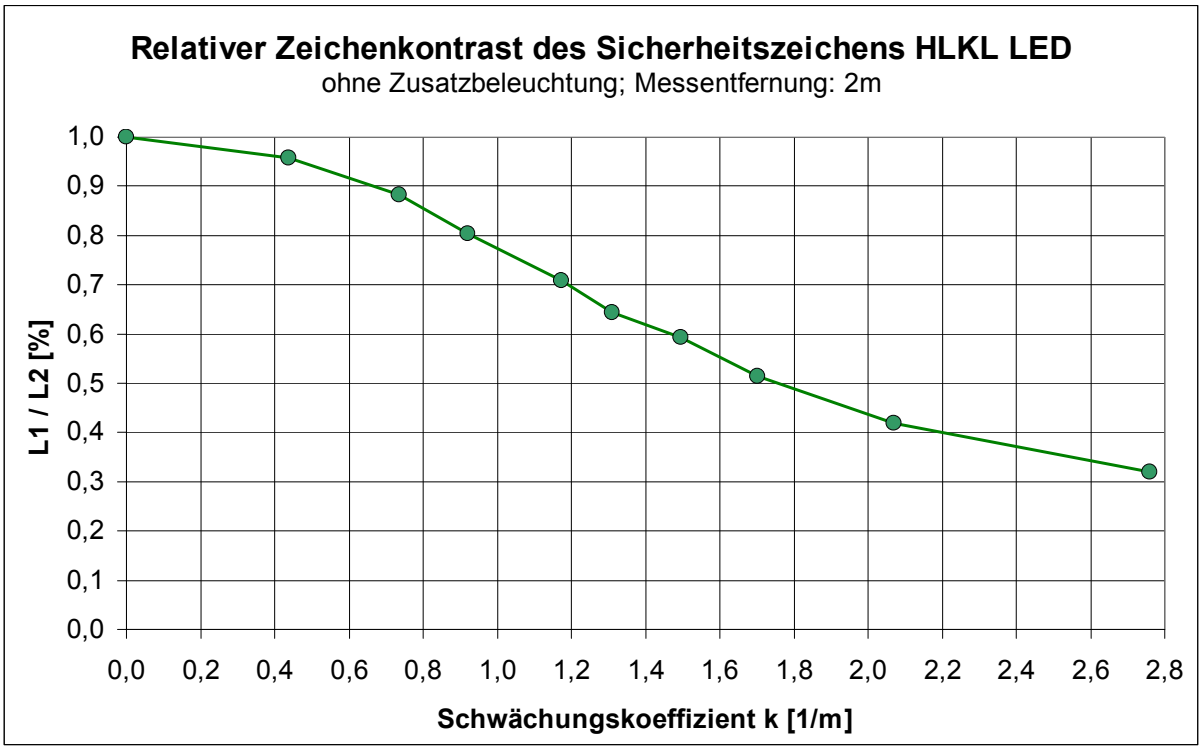



***Abbildung 26: Relative Kontrastabnahme eines Sicherheitszeichens***

Das Streulicht, das durch das selbstleuchtende Sicherheitszeichen für Rettungswege verursacht wird, kann ***zu Farbverschiebungen*** führen (Abbildung 27).

Mit ***Abnahme der Raumhelligkeit*** ändern sich die Sehbedingungen. Der Bereich zwischen 0,001 cd/m$^2$ bis 3 cd/m$^2$ (mesopischen Bereich) ist geprägt durch den Übergang vom Stäbchen- zum Zapfen-Sehen. Im Vergleich zu den Sehbedingungen bei ausreichender Raumhelligkeit lassen Funktionen wie Sehschärfe, Kontrastempfindlichkeit, Farbensehen, Wahrnehmungsgeschwindigkeit und Blendunempfind-

lichkeit nach [11]. Weiterhin können individuelle Sehleistungsunterschiede das Sehen unter diesen extremen Bedingungen einschränken.

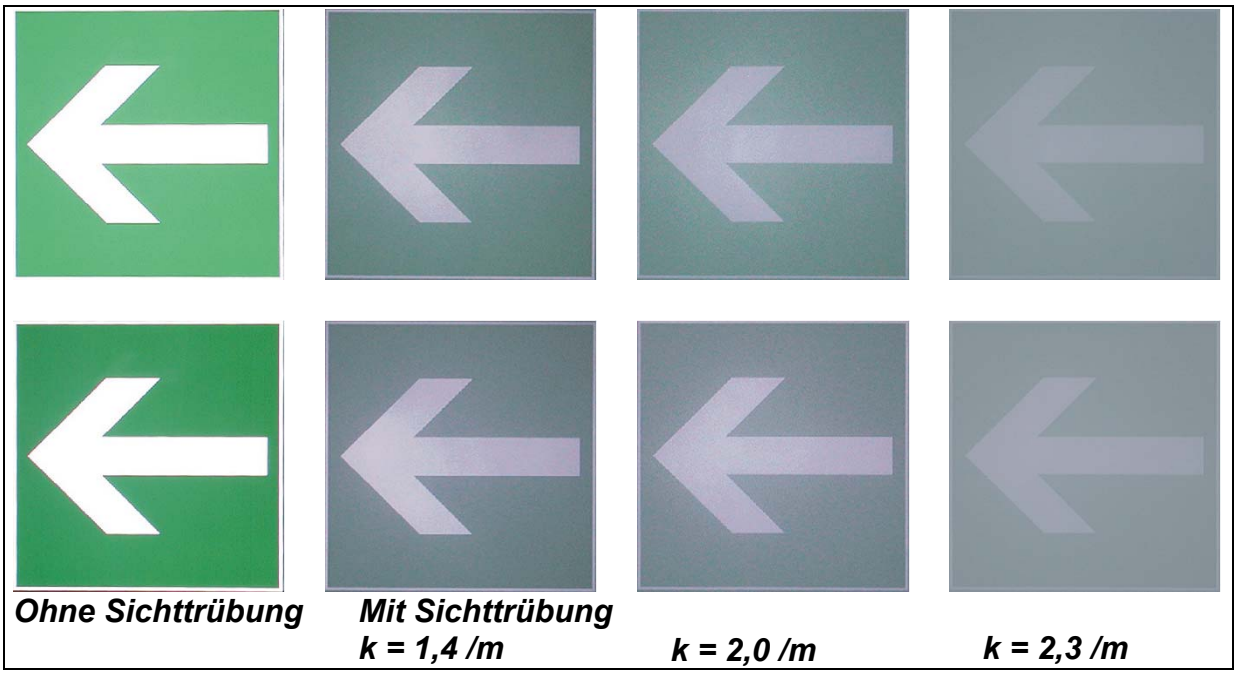



*Abbildung 27: Farbveränderung durch Streulicht*

***Fazit:***

**Brandrauch beeinflusst die lichttechnischen Eigenschaften von Sehzeichen stark und verursacht über Transmissionsverluste, Farbverschiebungen und Kontrastverflachung infolge Streulichtüberlagerung Sehverluste.**

**Die Reizwirkung** des Brandrauches macht sich durch verstärkten Tränenfluss bemerkbar und führt zur Verringerung der Sehschärfe.

Um die mit der Brandgasentwicklung verbundene Augenreizung und damit deren Einfluss auf die Sehschärfe abschätzen zu können, wurde eine gesonderte Untersuchung in Zusammenarbeit mit der Fachhochschule für Augenoptik Jena durchgeführt [17].

Sicherheitszeichen für Rettungswege sind in ihrer Darstellung sehr unterschiedlich und komplex. Wesentlich für die Orientierung entlang des Rettungsweges ist der Richtungspfeil. Zur Vereinfachung der Betrachtungen zur Erkennungsweite, wurde

11 Baer, R.: Beleuchtungstechnik. Verlag Technik, Berlin, 1996, S. 49 ff

17 Bieske, K.; Rohleder St.: Untersuchung des Einflusses von Reizung der Augen auf die Sehschärfe. TU Ilmenau, FH Jena, 2002

der Richtungspfeil (gemäß DIN 4844-2 [18]) an das Normsehzeichen Landoltring (gemäß DIN EN ISO 8596 [19]) angeschlossen. Um die Sehverschlechterung zu erfassen, wurde die Sehschärfe als Funktion des Adaptationszustandes, des dargebotenen Sehzeichenkontrastes und der Reizung der Augen ermittelt. Die Bestimmung der Sehschärfe erfolgte anhand des Normsehzeichens Landoltring gemäß DIN EN ISO 8596. In Tabelle T9 wurden die Untersuchungsparameter zusammengefasst.

| Untersuchungsparameter | | |
|---|---|---|
| **Umfeldleuchtdichte L [cd/m²]** | 0,85 | 82,1 |
| **Sehzeichen** | Landoltring | Richtungspfeil |
| **Sehzeichenkontrast** | 0,28 | 0,95 |
| **Reizzustand** | ohne Reizung | mit Reizung |

***Tabelle T9:*** ***Versuchsparameter bei der Untersuchung des Einflusses des Reizzustandes der Augen auf die Sehschärfe***

Die Untersuchungen wurden mit 27 Probanden durchgeführt. Die Abbildungen 28 und 29 fassen wesentliche Ergebnisse zusammen.

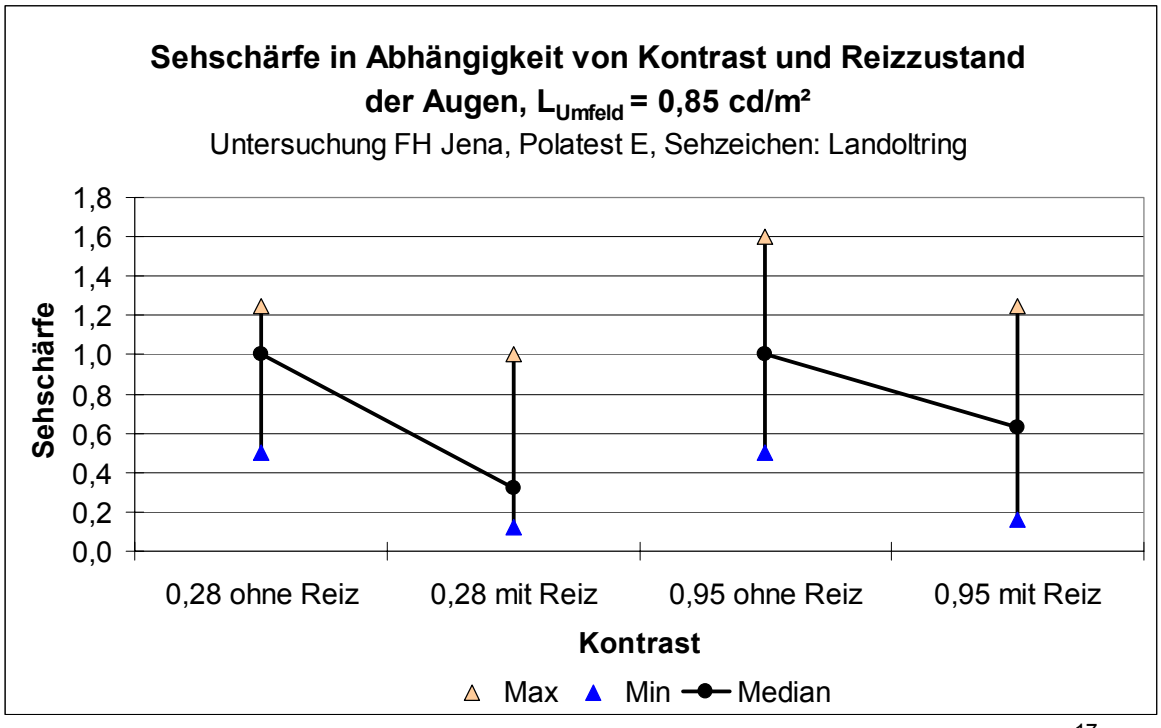



***Abbildung 28:*** ***Einfluss der Reizung des Auges auf die Sehschärfe, Sehzeichen: Landoltring*** [17]

[18] DIN 4844-2: Sicherheitskennzeichnung,.1999

[19] DIN EN ISO 8596: Sehschärfeprüfung. 1996

[17] Bieske, K.; Rohleder St.: Untersuchung des Einflusses von Reizung der Augen auf die Sehschärfe. TU Ilmenau, FH Jena, 2002

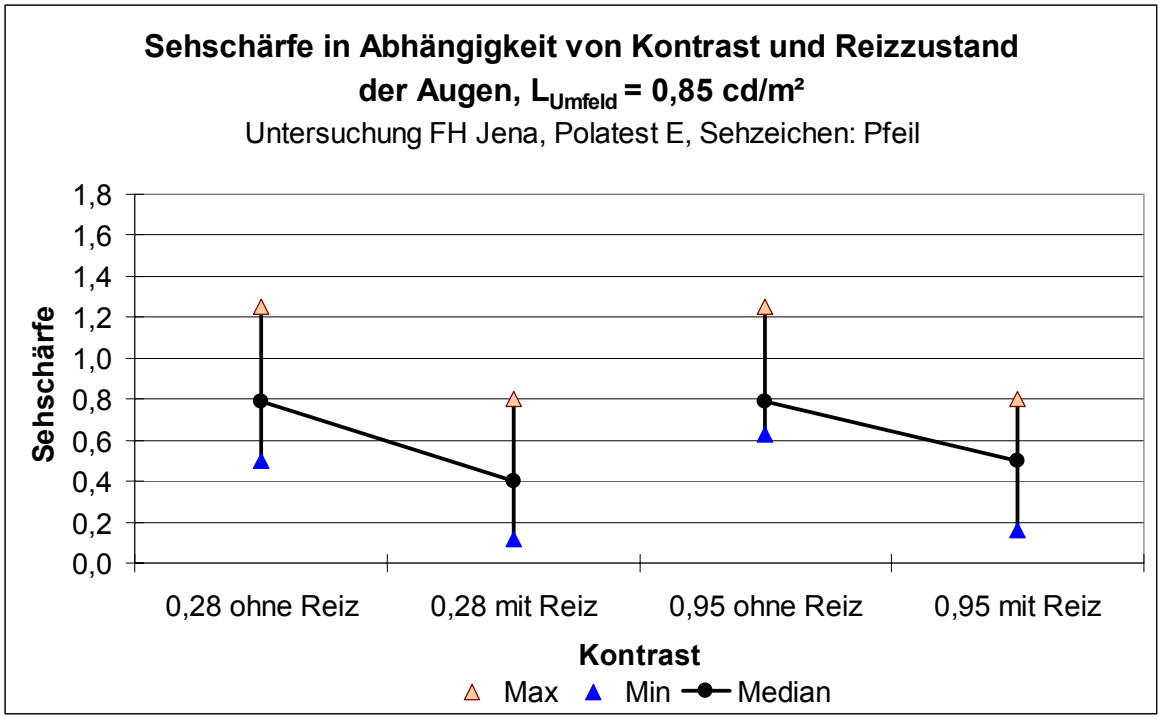



***Abbildung 29: Einfluss der Reizung des Auges auf die Sehschärfe, Sehzeichen: Pfeil*** [17]

***Fazit:***

***Es zeigt sich, dass durch die Reizung der Augen die Sehschärfe deutlich abnimmt. Dies wirkt sich stärker bei geringeren Kontrasten aus. Das bedeutet, dass die in den Untersuchungen gewonnenen Erkennungsweiten unter realen Bedingungen noch geringer sind.***

Neben der Reizwirkung des Brandrauches auf das Auge spielt die Wirkung auf das Nervensystem und die Paniksituation für die Wahrnehmung und Orientierung eine Rolle. Die Angaben hierzu sind in der Literatur sehr unsicher.

[17] Bieske, K.; Rohleder St.: Untersuchung des Einflusses von Reizung der Augen auf die Sehschärfe. TU Ilmenau, FH Jena, 2002

# 3 Aufbau und Durchführung der Experimente

## 3.1 Sicherheitsleitsysteme

Optische Sicherheitsleitsysteme sind Leitsysteme, die mit Hilfe optischer Markierungen, Kennzeichnungen, Sicherheitszeichen und Richtungsangaben einen sicheren Fluchtweg vorgeben, um Personen zu einem Ausgang oder sicheren Bereich zu führen.“ [20] Eine Systematik der Sicherheitsleitsysteme ist in Abbildung 30 zu finden.

<table>
<tr><th colspan="5">Sicherheitsleitsysteme</th></tr>
<tr><th colspan="3">elektrisch betriebene Systeme</th><th colspan="2">lichtspeichernde Systeme</th></tr>
<tr><th rowspan="2">nicht bodennah</th><th colspan="2">bodennah</th><th rowspan="2">nicht bodennah</th><th rowspan="2">bodennah</th></tr>
<tr><th>statisch</th><th>dynamisch</th></tr>
<tr><td>Rettungsweg-kennzeichnung<br>Rettungsweg-beleuchtung</td><td>Rettungsweg-kennzeichnung<br>Leitmarkierung</td><td>Rettungsweg-kennzeichnung<br>Leitmarkierung</td><td>Rettungsweg-kennzeichnung</td><td>Rettungsweg-kennzeichnung<br>Leitmarkierung</td></tr>
<tr><td colspan="3">beleuchtet/ hinterleuchtet</td><td colspan="2"></td></tr>
</table>

***Abbildung 30: Systematik von Sicherheitsleitsystemen*** [21]

In die Untersuchungen wurden folgende Sicherheitszeichen für Rettungswege einbezogen:

- Hinterleuchtete Sicherheitszeichen
- Beleuchtete Sicherheitszeichen
- Nachleuchtende Sicherheitszeichen

Außerdem wurde eine Rettungswegbeleuchtung und lichtspeichernde bodennahe Leitmarkierungen eingesetzt und die Wirkung dynamischer Sicherheitszeichen getestet.

[20] Rüschenschmidt, H.; Reidt: Licht, Gesundheit, Arbeitsschutz. Verlag Technik und Information. 4. Auflage, 2002

[21] Langer, R.: Neue Berufsgenossenschafliche Regel (BGR 216) regelt den Einsatz von optischen Sicherheitsleitsystemen. Zts. Licht 54. Jhg. Nr.1-2, 2002, S. 74

### 3.1.1 Hinterleuchtete Sicherheitszeichen für Rettungswege

Die in den Untersuchungen eingesetzten Sicherheitskennzeichen sind in der Abbildung 31 dargestellt. Die lichttechnischen Parameter zeigt die Abbildung 32 und sind in der darunter stehenden Tabelle für die Situation ohne Sichttrübung und ohne zusätzliche Beleuchtung zusammengefasst.

***Abbildung 31: Verschiedene Ausführungen hinterleuchteter Sicherheitszeichen***

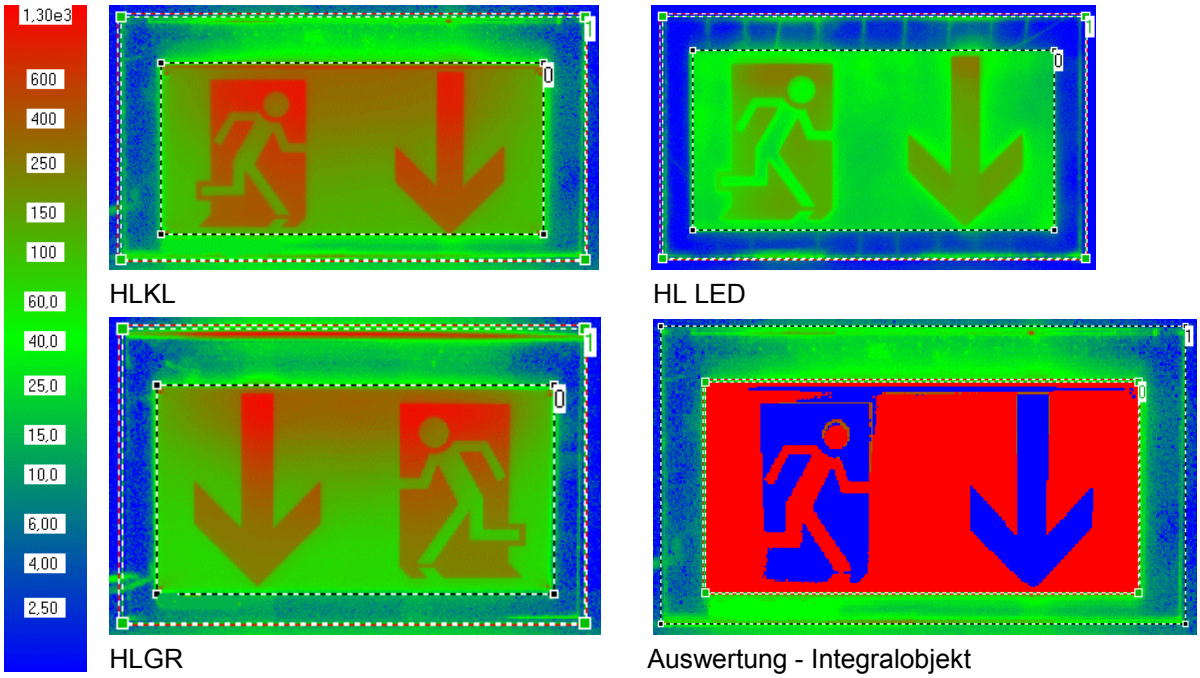



***Abbildung 32: Leuchtdichtebilder hinterleuchteter Sicherheitszeichen (LMK 98 / 2000 Techno Team)***

| | HLKL | HLGR | HL LED |
|---|---|---|---|
| **Piktogrammgröße (H x B)** | 90 x 200 | 140 x 280 | 100 x 195 |
| **Pfeilgröße (L x B)** | 87 x 57 | 132 x 87 | 95 x 62 |
| **$L_{Reg.\ 0\ mittel}$ [cd/m²]** | 290 | 230 | 65 |
| **$L_{weiß\ mittel}$ [cd/m²]*** | 450 | 406 | 143 |
| **$L_{grün\ mittel}$ [cd/m²]*** | 137 | 105 | 30 |
| **$L_{weiß}/L_{grün}$** | 3,3 | 3,9 | 4,7 |
| **$g_{2\ weiß}$ *** | 0,34 | 0,20 | 0,26 |
| **$g_{2\ grün}$ *** | 0,04 | 0,03 | 0,13 |
| **Leuchtmittel** | Leuchtstofflampe 6 W | Leuchtstofflampe 8 W | LED |

** bestimmt aus Integralobjekten LMK 2000 Techno Team*

### 3.1.2 Beleuchtete Sicherheitszeichen für Rettungswege

BL

*Abbildung 33: Beleuchtetes Sicherheitszeichen*

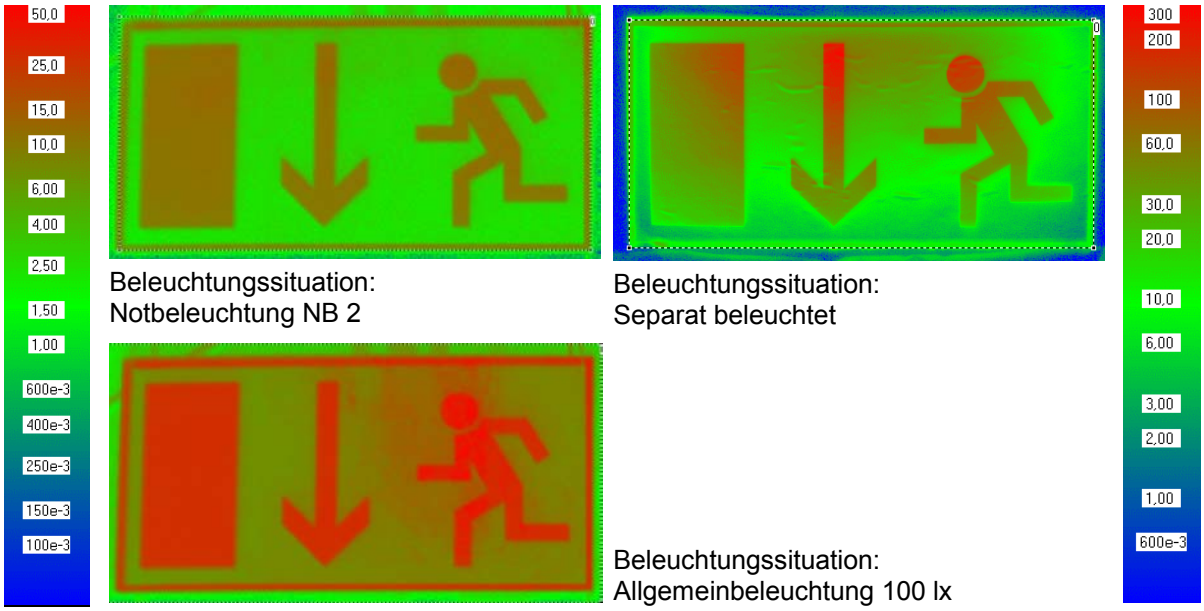



*Abbildung 34: Leuchtdichtebilder eines beleuchteten Sicherheitszeichens bei verschiedenen Beleuchtungssituationen*

| **Piktogrammgröße (H x B)** | 200 x 400 | | |
|---|---|---|---|
| **Pfeilgröße (L x B)** | 113 x 73 | | |
| **$\rho$ weiß** | 86,4% | | |
| **$\rho$ grün** | 16,8 % | | |
| **Beleuchtungssituation** | *Notbeleuchtung NB2* | *Allgemeinbeleuchtung* | *Separate Beleuchtung* |
| **$L_{Reg.\ 0\ mittel}$ [cd/m²]** | 5,70 | 14,46 | 30 |
| **$L_{weiß\ mittel}$ [cd/m²]*** | 10,36 | 24,28 | 53,53 |
| **$L_{grün\ mittel}$ [cd/m²]*** | 2,84 | 7,69 | 11,06 |
| **$L_{weiß}/L_{grün}$** | 3,6 | 3,2 | 4,8 |
| **$g_{2\ weiß}$ *** | 0,23 | 0,32 | 0,09 |
| **$g_{2\ grün}$ *** | 0,41 | 0,17 | 0,04 |

*** bestimmt aus Integralobjekten LMK 2000 Techno Team**

Die Abbildung 33 zeigt ein typisches beleuchtetes Sicherheitszeichen. Die lichttechnischen Parameter dieser Sicherheitszeichen sind abhängig von den Reflexionseigenschaften der Sicherheits- und Kontrastfarbe, den Beleuchtungsverhältnissen im Umfeld und der Lage des Sicherheitszeichens in Bezug auf die Lichtquelle. Die Abbildung 34 zeigt beispielgebend Leuchtdichteverhältnisse auf dem Sicherheits-

zeichen in Abhängigkeit von der Beleuchtungssituation. Für die Montage wurde der Ort unmittelbar hinter der Leuchte, 40 cm unter dem Leuchtenband in der Gangmitte gewählt. In der darunter stehenden Tabelle sind die lichttechnischen Parameter für die verschiedenen Beleuchtungssituationen zusammengefasst. Die Leuchtdichten auf beleuchteten Sicherheitszeichen sind deutlich geringer als bei hinterleuchteten Sicherheitszeichen. Entsprechend wurde der Distanzfaktor in der BGR 216 eingeführt, der für beleuchtete Sicherheitszeichen eine doppelte Größe fordert.

### 3.1.3 Nachleuchtende Sicherheitszeichen für Rettungswege

NL

***Abbildung 35: Nachleuchtendes Sicherheitszeichen***

| | |
|---|---|
| **Piktogrammgröße (H x B)** | 200 x 400 |
| **Pfeilgröße (L x B)** | 114 x 74 |
| **$\rho$ weiß** | 84,7 % |
| **$\rho$ grün** | 17,7 % |
| **Pigment** | Erdalkalialuminat |
| **Produktbezeichnung** | 300 / 45 |

Nachleuchtende Materialien haben die Eigenschaft, in der Aufladephase Strahlung zu speichern und bei Wegfall der Anregung Licht zu emittieren.
Das Emissionsvermögen ist abhängig von:

- dem Absorptionsvermögen des nachleuchtenden Materials
- den spektralen Eigenschaften der Anregungsquelle
- der Bestrahlungsstärke auf der Materialoberfläche
- der Anregungsdauer
- der Umgebungstemperatur

Die Abbildung 36 zeigt ein typisches Anregungs- und Emissionsspektrum von Erdalkalialuminat.

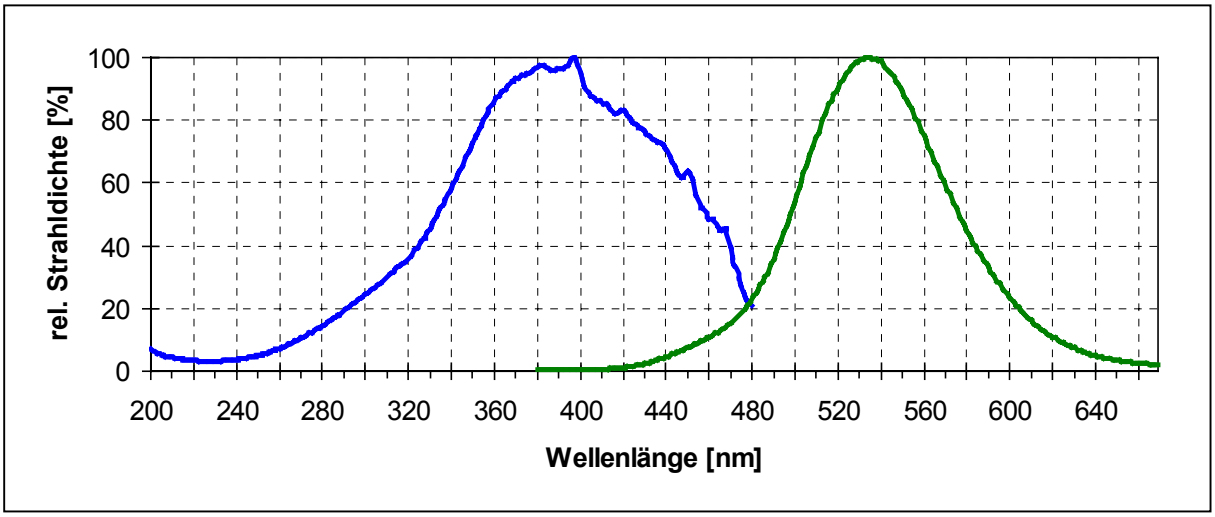



***Abbildung 36: Typisches Anregungs- (links) und Emissionsspektrum (rechts) von Erdalkalialuminat*** [22]

Die Absorption erfolgt bei Wellenlängen zwischen 240 nm und 480 nm mit einem Maximum bei 380 nm. Um eine effiziente Anregung erzielen zu können, muss das für die Anregung genutzte Leuchtmittel über ausreichende spektrale Anteile in diesem Wellenlängenbereich verfügen. Glühlampen und Natriumdampf-Niederdrucklampen sind daher in Bereichen wo nachleuchtende Materialien eingesetzt werden weniger geeignet.

Das in den Untersuchungen verwendete nachleuchtende Material 300 / 45 auf der Basis von Erdalkalialuminat besitzt laut Herstellerangaben 10 Minuten nach Ende der Anregung eine Mindestleuchtdichte von 300 mcd/m² und weist nach 60 Minuten noch eine Leuchtdichte von 45 mcd/m² auf [23]. Die Basis für Messungen nach DIN 67510 Teil 1 [24] ist eine Beleuchtungsstärke von 1000 lx auf der Materialoberfläche, die durch eine Xenon-Kurzbogenlampe (XBO-Lampe) für die Dauer von 5 Minuten erzeugt wird.

In der Realität kommen jedoch andere Leuchtmittel zum Einsatz und auch die Beleuchtungsstärken auf der Materialoberfläche sind deutlich geringer. Aus diesem Grunde erfolgte eine gesonderte Messung. Für die Anregung wurde eine für den Innenraum typische Leuchtstofflampe benutzt. Die Beleuchtungsstärke wurde zwischen 25 lx und 250 lx variiert.

22 Produktinformation Honeywell LUMILUX® Grün SN-F2 9 / 99

23 Produktinformation Ever Glow HI® 300/ Permalight

24 DIN 67510 Teil 1: Langnachleuchtende Pigmente und Produkte. 2002

Gemessen wurden die Leuchtdichten eine Minute und 10, 30 und 60 Minuten nach Ende der Anregung. Die Messung erfolgte mit der Leuchtdichtekamera LMK 98 der Firma Techno Team. Das Ergebnis zeigt die Abbildung 37.

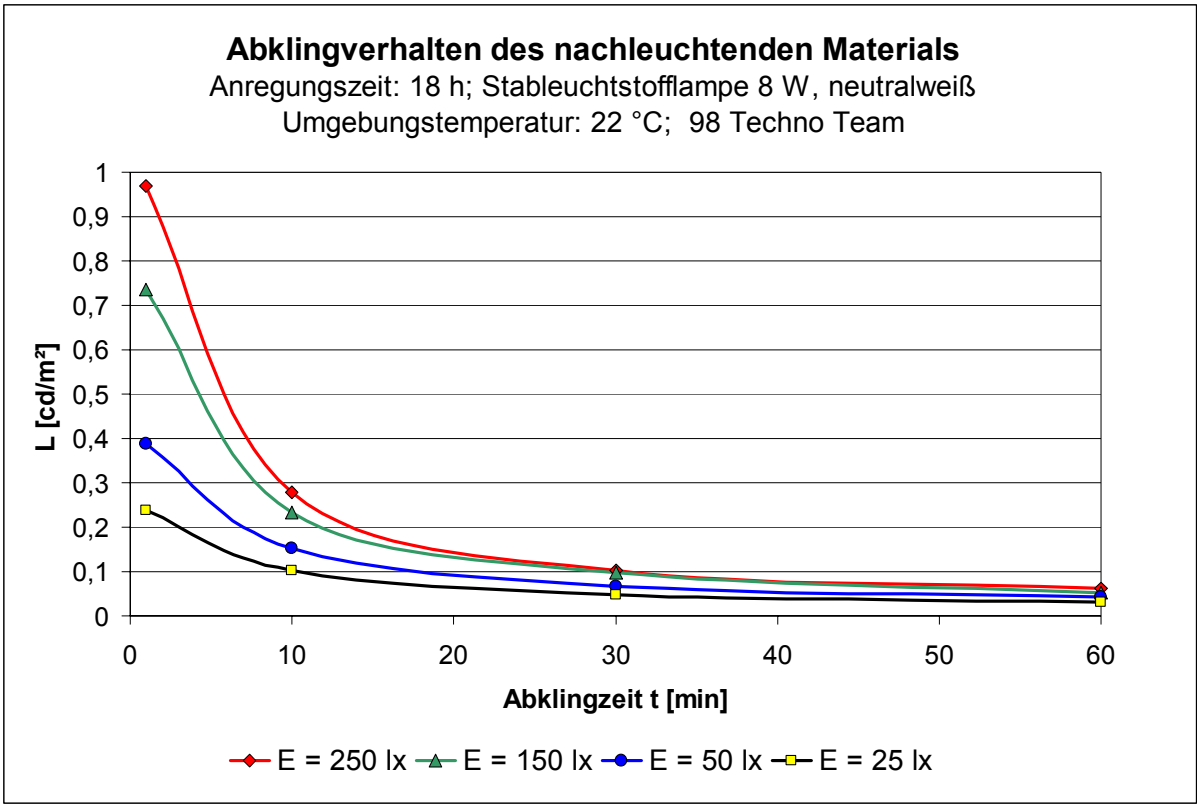



***Abbildung 37:*** ***Abklingverhalten von nachleuchtendem Material in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke auf der Materialoberfläche***

***Fazit:***

***Der wirkungsvolle Einsatz nachleuchtender Materialien ist an Randbedingungen wie die Beleuchtungssituation im Umfeld gekoppelt. Höhere Umgebungstemperaturen verursachen eine schnelleres Abklingverhalten. Dies mindert die Wirksamkeit im unmittelbarem Umfeld des Brandherdes.***

## 3.2 Versuchsaufbau

Um nahezu stabile Versuchsbedingungen realisieren zu können, wurden die Untersuchungen unter Laborbedingungen durchgeführt.

### 3.2.1 Versuchsgang

Die Abbildung 38 zeigt den Versuchsgang und die nebenstehende Tabelle fasst seine wesentlichen Parameter zusammen.

| Parameter | Wert |
|---|---|
| Länge: | 30 m |
| Breite: | 1,5 m |
| Höhe: | 2,5 m |
| Reflexionsgrad | |
| - des Bodens | 25% |
| - der Decke | 40% |
| - der Wände | 60% |
| Beleuchtung: | |
| - Allgemeinbeleuchtung | dimmbare Leuchtstofflampen ($E_{mittel}$ = 100lx) |
| - Notbeleuchtung | 4 Wegeleuchten ($E_{min}$ = 1,5 lx; $E_{mittel}$ = 10 lx) |

***Abbildung 38: Blick in den Versuchsgang und wesentliche Parameter***

### 3.2.2 Beleuchtungssituationen

Um den Einfluss zusätzlicher Beleuchtung auf die Erkennbarkeit von Sicherheitszeichen bestimmen zu können, wurde ein Beleuchtungskonzept entworfen, dass verschiedene Beleuchtungssituationen ermöglichte. Im Brandfalle muss nicht notwendigerweise die Allgemeinbeleuchtung ausfallen, noch sind Fensterbereiche, durch die Tageslicht einfallen kann, im Rettungsgang ausgeschlossen. Möglicherweise ist es sinnvoll, das Beleuchtungsniveau im Rettungsgang im Brandfalle zur Streulichtminimierung abzusenken. Aus diesem Grunde wurde eine Allgemeinbeleuchtung in die Untersuchung mit einbezogen. Gewählt wurde das Beleuchtungsniveau typischer Flurbereiche mit einer mittleren Beleuchtungsstärke von 100 lx.

Im Versuchsgang wurden folgende Beleuchtungssituationen realisiert:

- Allgemeinbeleuchtung ($E_{mittel}$ = 100 lx), realisiert durch 9 Leuchten (2 x 58 W Leuchtstofflampen; dimmbar)
- Notbeleuchtung NB 1, realisiert durch 2 Leuchten (2 x 58 W Leuchtstofflampen; dimmbar)
- Notbeleuchtung NB 2, realisiert durch 4 Wegeleuchten (1 x 8 W Leuchtstofflampe)
- ohne Zusatzbeleuchtung

Die Konzeption der Beleuchtungssysteme erfolgte auf der Basis der mit dem Goniophotometer gemessenen Lichtstärkeverteilungen der Leuchten und unter Verwendung der Planungssoftware DIALux.

In Abbildung 39 sind die räumliche Verteilung der Beleuchtungsniveaus und die Leuchtenanordnung ersichtlich.

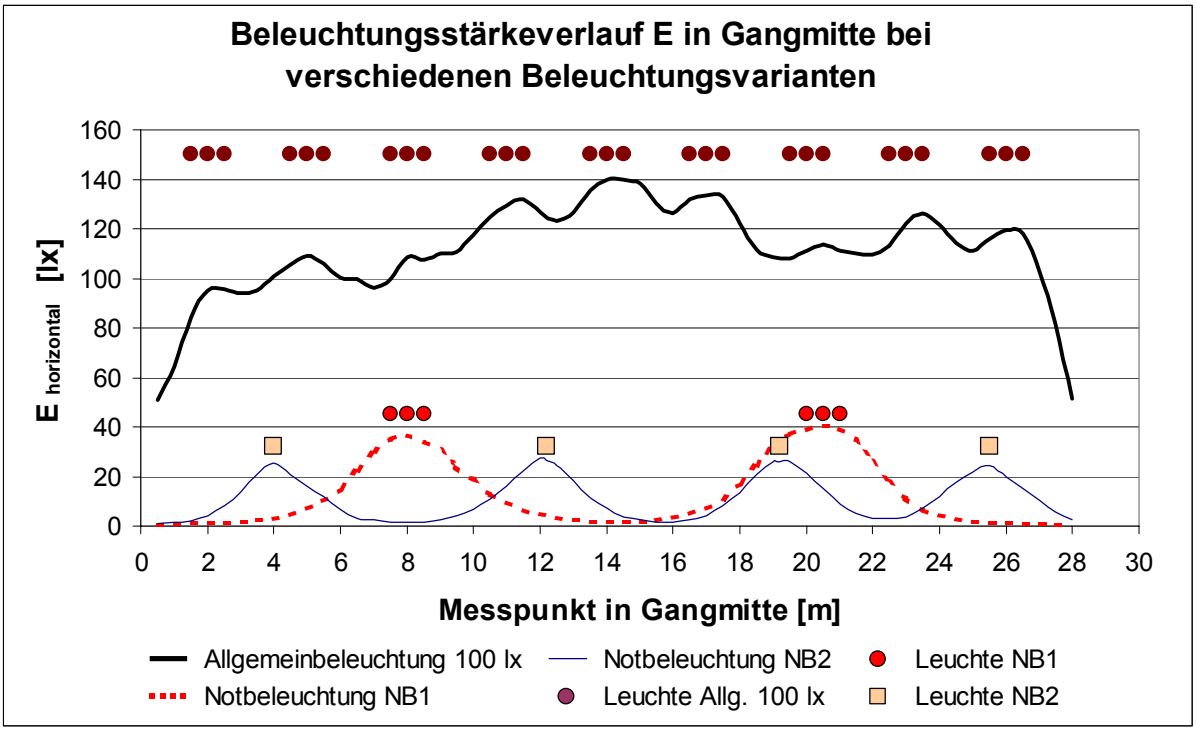



***Abbildung 39: Beleuchtungsvarianten im Versuchsgang***

### 3.2.3 Erzeugung der Sichttrübung

Zur Erzeugung der Sichttrübung mit verschiedenen Schwächungkoeffizienten wurde ein Fluid auf Glykolbasis eingesetzt, das mit einer Nebelmaschine (Magnum Pro 2000) verdampft wurde. Die dabei entstehenden Partikel weisen bei einem Masseanteil von 90 % eine Größe zwischen 0,5 µm und 3 µm auf. 10 % der Partikel sind bis zu 7 µm groß [25]. Damit stimmen die Eigenschaften von Brandrauch bei Schwelbränden und dem verwendeten Fluid hinsichtlich der Partikelgröße sehr gut überein.

Die spektralen Eigenschaften des Nebels wurden mit dem Spektralmessgerät SpectraScan PR 705 und unter Verwendung einer XBO-Lampe vermessen. Dabei zeigten sich für verschiedene Schwächungskoeffizienten k die in Abbildung 40 dargestellten auf eine Wellenlänge von $\lambda$ = 440 nm normierten spektralen Verläufe.

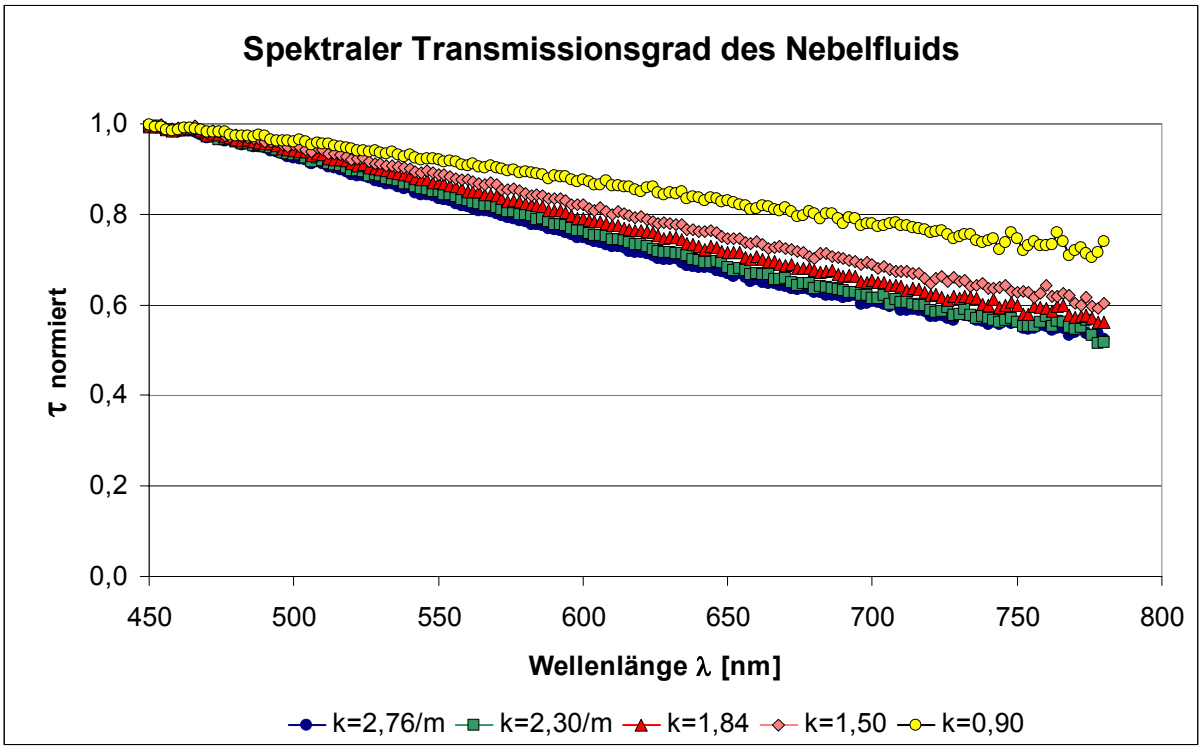



***Abbildung 40: Normierter spektraler Transmissionsgrad des Nebelfluids in Abhängigkeit vom Schwächungskoeffizienten k*** [26]

[25] Herstellerangaben Martin professional , Karlsfeld

[26] Hoffmann, M.; Seydel U.: Visuelle Gestaltung unter erschwerten Bedingungen. Medienprojekt. TU Ilmenau, 2002

Im Vergleich zu den im realen Brandrauch bei Schwelbränden gemessenen spektralen Transmissionsgraden (Abbildungen 21 bis 24 – Kapitel 2.3.1.5) sind die Kurvenverläufe des Nebelfluids ähnliche.

In Abbildung 41 ist die zeitliche Änderung des Schwächungskoeffizienten k dargestellt. Aus dem Diagramm folgt, dass für den zu untersuchenden Bereich des Schwächungskoeffizienten von k = 2,8 $m^{-1}$ bis k = 0,5 $m^{-1}$ etwa 1,5 Stunden je Durchgang zur Verfügung stehen. Es zeigt aber auch, dass sich die Bedingungen stetig ändern, sodass die Versuchsdurchführung entsprechend angepasst werden musste.

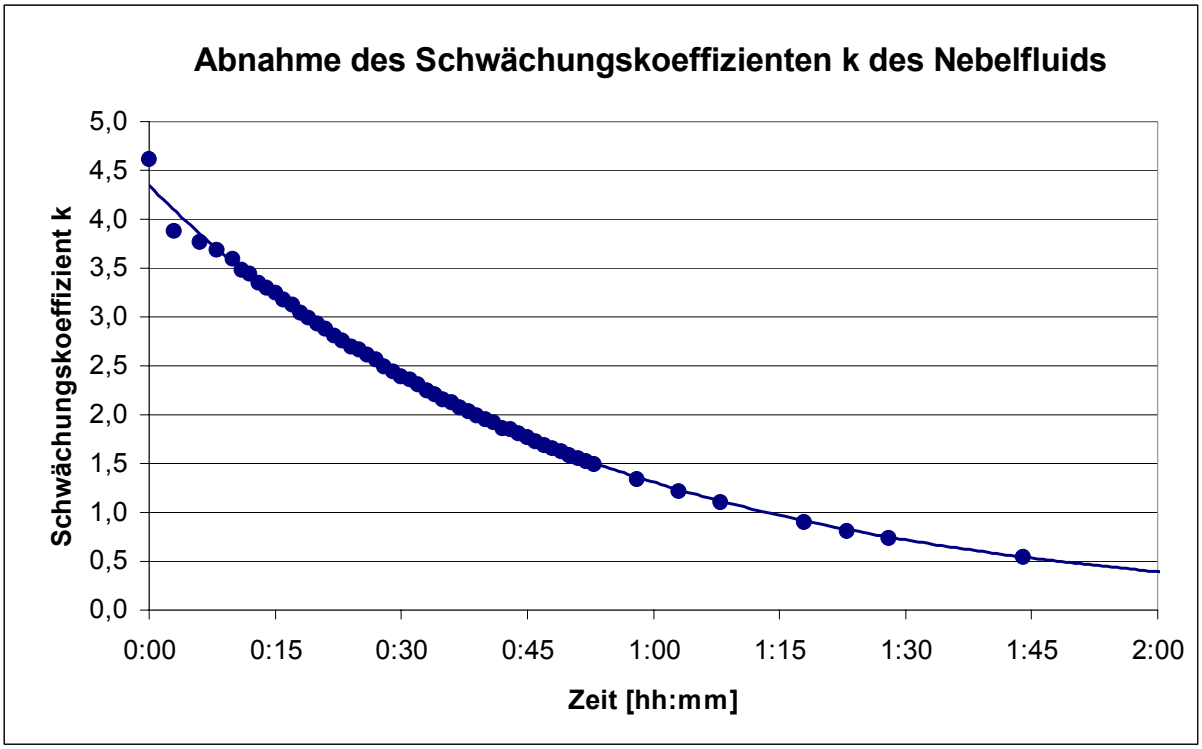



***Abbildung 41: Änderung des Schwächungskoeffizienten des Nebelfluids über der Zeit*** [26]

### 3.2.4 Messung des Schwächungskoeffizienten k

Ein Maß für die Sichttrübung ist der Schwächungskoeffizient k oder die optischen Dichte $D_\tau$. Sie werden durch den Transmissionsgrad $\tau$ des trübenden Mediums bestimmt.

[26] Hoffmann, M.; Seydel U.: Visuelle Gestaltung unter erschwerten Bedingungen. Medienprojekt. TU Ilmenau, 2002

Der Transmissionsgrad ist das Verhältnis des Lichtstromes $\Phi_\tau$, der das Medium durchdringt, zum Lichtstrom $\Phi_{0,}$ der in das Medium eintritt.

$$\tau = \frac{\Phi_\tau}{\Phi_0} \qquad \textbf{(13)}$$

Über die Beziehung des Lichtstromes zur Leuchtdichte L mit:

$$L = \frac{\Phi}{A_{1P} \cdot \Omega_1}$$

$A_{1P}$ scheinbar leuchtende Fläche

$\Omega_1$ Raumwinkel **(14)**

und mit $A_{1P}$ = konst. und $\Omega_1$ = konst. ergibt sich in optisch klaren Medien der Transmissionsgrad zu:

$$\tau = \frac{L_\tau}{L_0} \qquad \textbf{(15)}$$

Die Transmission lässt sich somit über die Messung der Leuchtdichte bei definierten geometrischen Verhältnissen und zeitlich konstanten Verhältnissen bestimmen. Dies wurde in einem Messaufbau realisiert. Das Transmissionsverhalten ist abhängig von der durchdrungenen Schichtdicke d und wird durch den Schwächungskoeffizienten k, der stoffspezifisch ist, bestimmt. Das Bouguer-Lambert-Beersche Gesetz beschreibt diesen Zusammenhang:

$$\tau = e^{-k \cdot d} \qquad \textbf{(16)}$$

Durch Umformung folgt für den Schwächungskoeffizienten k:

$$k = \frac{\ln\left(\frac{1}{\tau}\right)}{d} \qquad \textbf{(17)}$$

Eine andere Kennzahl für das Transmissionsverhalten ist die optische Dichte $D\tau$, die in der Praxis häufig Anwendung findet:

$$D_\tau = \lg\left(\frac{1}{\tau}\right) \qquad \textbf{(18)}$$

Damit ergibt sich folgender Zusammenhang zwischen dem Schwächungskoeffizienten k und der optischen Dichte $D\tau$:

$$k = \frac{2{,}3 \cdot \lg\left(\frac{1}{\tau}\right)}{d} = \frac{2{,}3 \cdot D_\tau}{d} \quad \left[m^{-1}\right] \qquad \textbf{(19)}$$

Zum besseren Vergleich wird die optische Dichte auf eine Distanz von d = 1 m normiert.

Für die optische Dichte ergibt sich damit:

$$D_\tau = \frac{k}{2{,}3} \quad \left[m^{-1}\right] \qquad \textbf{(20)}$$

Als Bezugsbasis für die Untersuchungen wurde aus physikalischen Gründen der Schwächungskoeffizient k gewählt. Der Schwächungskoeffizient hat den Vorteil, dass er entfernungsunabhängig angegeben werden kann und in der Literatur oft bei der Betrachtung im optisch nicht klaren Medium Anwendung findet. Vergleichsbetrachtungen sind so vereinfacht.

***Abbildung 42: Messaufbau im Versuchsgang***

Für den Messaufbau (Abbildungen 42, 43) wurde eine stabilisierte, konstante Lichtquelle (L-Normal) aufgebaut, die in einer festen Messentfernung von 1 m zu einem Leuchtdichtemessgerät (Minolta LS-110; LMT) montiert wurde. Die Leuchtdichte der Lichtquelle betrug im optisch klaren Medium nach einem Einschwingverhalten von 10 Minuten stabil 1004 cd/m² (Abbildung 44).

Eine Vergleichsmessung zwischen Beginn und Ende der Untersuchungen im Rettungsgang ergaben eine Abweichung von 2 cd/m². Das entspricht einer prozentualen Änderung der Bezugsleuchtdichte von 0,002 %.

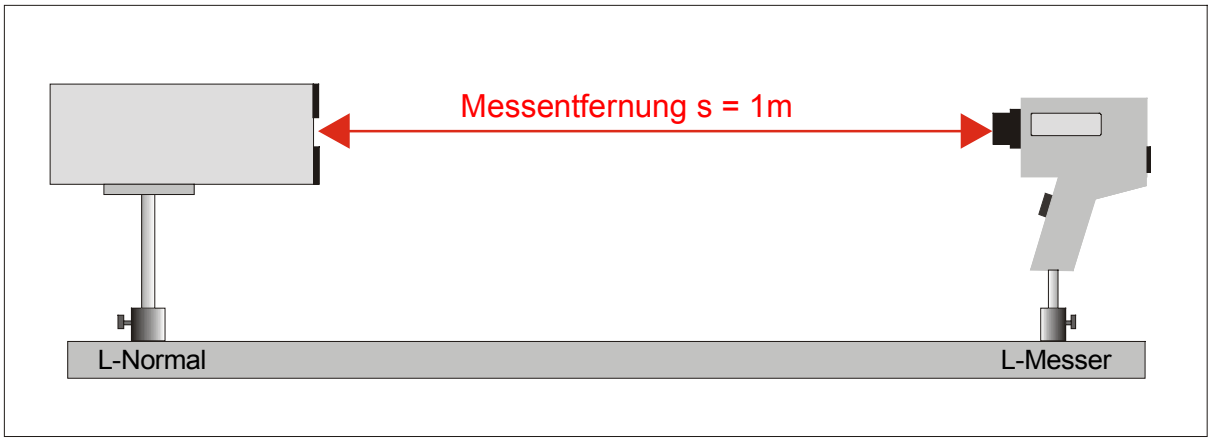



***Abbildung 43: Messaufbau zur Bestimmung des Schwächungskoeffizienten k***

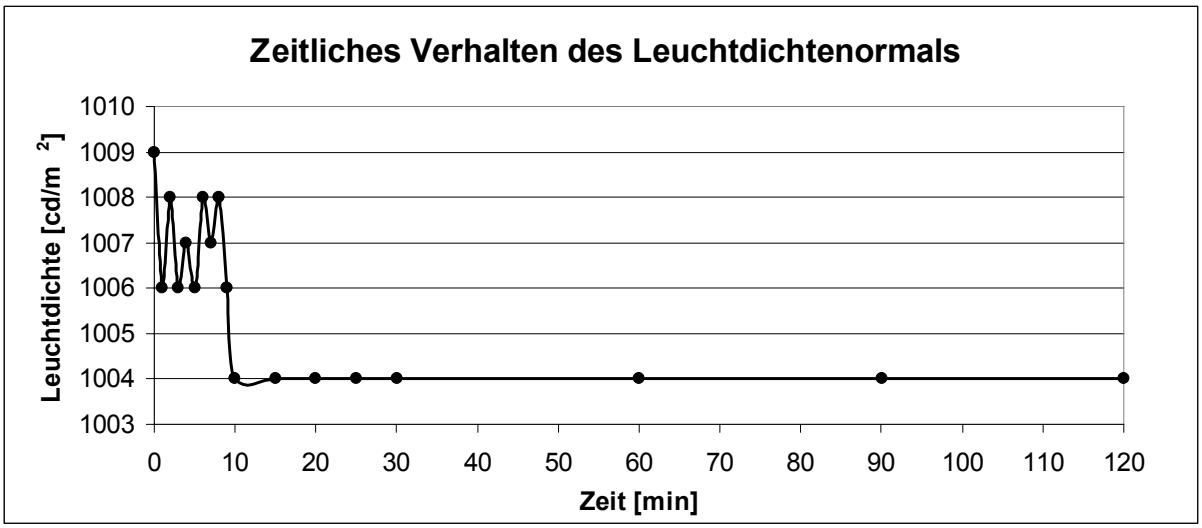



***Abbildung 44: Zeitliche Stabilität des Leuchtdichtenormals***

Über einen Adapter war ein Anschluss des Leuchtdichtemessers an einen Rechner möglich, sodass die Messwerte für ein System automatisch erfasst werden konnten. Die Messungen erfolgten an zwei Positionen (bei 15 m und 30 m) im Versuchsgang. Auf diese Weise ließen sich die Gleichmäßigkeit der Sichttrübung innerhalb des Versuchsganges überprüfen und die Eigenschaften des verwendeten Fluids überwachen.

### 3.2.5 Kriterien für die Wahrnehmung

**Phasen der Wahrnehmung:**

Der Prozess der visuellen Wahrnehmung bei Annäherung an ein Sehzeichen läuft nach Darstellung von Heimsath [27] im Wesentlichen in drei Stufen ab:

1. ***Phase: Wahrnehmen***

   Es wird ein Leuchtdichteunterschied wahrgenommen, jedoch ist keine nähere Angabe zu dem Zeichen möglich. Dadurch ist eine erste Orientierung gegeben und eine Aufmerksamkeit erzeugt.

2. ***Phase: Sehen***

   Es kann zunächst die Form, danach die Farbe erkannt werden. Bei Sicherheitszeichen führt dies zu einer ersten wesentlichen Information für die weitere Erkennung.

3. ***Phase: Erkennen bzw. Lesen***

   Die letzte Phase der Information ist das *Lesen* des Zeichens, wobei Schriftzüge und Symbole deutlich gesehen, gelesen und in einen bereits erlernten Zusammenhang gebracht werden können. In dieser Phase ist sich der Betreffende der Aussage des Zeichens sicher und bewusst.

**Kriterien für die Wahrnehmung:**

***Licht wahrgenommen***

Es wird einer Aufhellung wahrgenommen. Damit ist eine Blickorientierung möglich und Aufmerksamkeit erzeugt.

***Schild gerade gesehen (Detektion)***

Es wird das Schild als Ursache der Lichtaufhellung wahrgenommen, eine Aussage über die Inhalte ist nicht möglich.

***Pfeil gerade erkannt (Identifikation)***

Eine Angabe zur Pfeilrichtung ist möglich und sie wird richtig erkannt.

***Schild sicher erkannt***

Das Sicherheitszeichen wurde als solches in seiner Gesamtheit erkannt.

***Farbe erkannt***

Erkennen der Sicherheitsfarbe

[27] Heimsath, W.; Herzog, K.; Noth, J.P.: Anwendung von Reflexstoffen zur Verkehrsicherheit. Verkehrsblatt-Verlag Best. Nr. 3092

### 3.2.6 Versuchsdurchführung

Die Bearbeitung des Projektes erfolgte in mehreren Stufen:

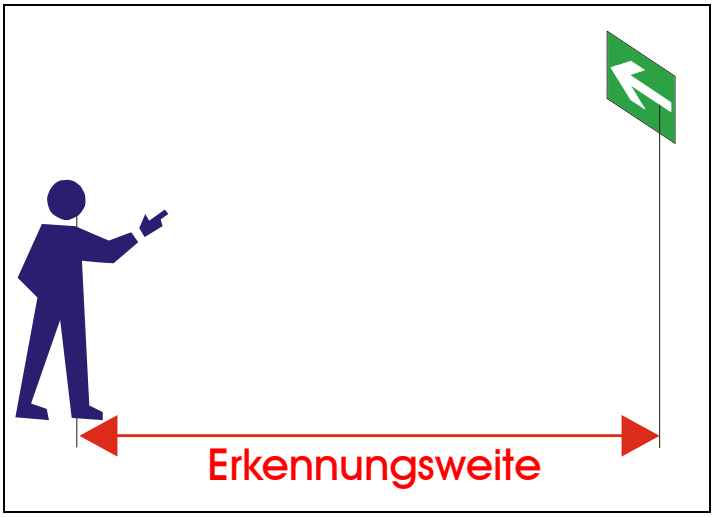
1. **Bestimmung der Erkennungsweite für verschiedenen Sicherheitszeichen für Rettungswege in Abhängigkeit von der Sichttrübung**
   - Variation der Beleuchtungssituation
   - Variation des Montageortes der Sicherheitszeichen bezüglich der Zusatzbeleuchtung
2. **Bestimmung der Erkennungsweite von Personen in Abhängigkeit von der Sichttrübung**
   - Variation der Beleuchtungssituation
   - Variation des Standortes bezüglich der Zusatzbeleuchtung
3. **Direktvergleich und Befragung**

Die Probanden wurden zu Untersuchungsbeginn in einen an den Versuchsgang angrenzenden Aufenthaltsraum gebracht. Sie saßen dort an einem Tisch, der auf der Tischfläche eine Beleuchtungsstärke von 300 lx aufwies. Auf diese Weise waren die Probanden hell adaptiert. Besonders kritisch für die Erkennung ist die Sehsituation beim Übergang aus einem hellen in einen dunklen Bereich.

Der Versuchsgang wurde bis in den relevanten Bereich des Schwächungskoeffizienten k vernebelt und das Fluid gleichmäßig verteilt. Kriterium für die Gleichmäßigkeit war das Übereinstimmen des Schwächungskoeffizienten in Gangmitte und am Ende des Ganges.

Entsprechend der Versuchsplanung erfolgte die Installation der Sicherheitszeichen an die entsprechenden Positionen und die Wahl der Beleuchtungssituation.

Die Probanden bestimmten die Positionen, aus denen sie bei der Annäherung erstmalig in der Lage waren Angaben zur Erkennbarkeit (Kriterien der Erkennbarkeit) zu machen. Die Erkennungsweite ist dabei der Abstand zwischen Beobachter und Sicherheitszeichen für die jeweilige Situation und für das jeweilige Wahrnehmungskriterium (Abbildung 45). Anhand einer im Gang angebrachten Messskala wurde die Erkennungsweiten ermittelt.




**Kriterien:**

- Licht wahrgenommen
- Schild gerade gesehen
- Pfeil gerade erkannt
- Schild sicher erkannt
- Farbe erkannt

**Situation:**

- Schwächungskoeffizient
- Beleuchtungssituation
- Sicherheitszeichen

***Abbildung 45: Definition der Erkennungsweite und Kriterien für die Wahrnehmung***

### 3.2.6.1 Bestimmung der Erkennungsweite von Sicherheitszeichen und Personen

*Versuchsbedingungen*

Variiert wurde bei den Untersuchungen in Abhängigkeit vom Schwächungskoeffizienten der Typ des Sicherheitszeichens, die Beleuchtungssituation und der Montageort des Sicherheitszeichens bezüglich der Zusatzbeleuchtung bzw. der Standort der Personen. Die wesentlichen Untersuchungsparameter sind in Tabelle T10 zusammengefasst.

| Parameter | |
|---|---|
| **Sicherheitszeichen** | HLKL; HLGR; HL LED; BL; NL |
| **Beleuchtungssituation** | ohne Zusatzbeleuchtung (OZB)<br>Notbeleuchtung (NB1)<br>Notbeleuchtung (NB2)<br>Allgemeinbeleuchtung (100 lx) |
| **Montageort/ Personstandort** | unter einer Leuchte<br>zwischen 2 Leuchten<br>vor einer Leuchte<br>hinter einer Leuchte |
| **Schwächungskoeffizient** | 0,5 $m^{-1}$ bis 2,8 $m^{-1}$ |
| **Dynamik** | Blinken der Kontrastfarbe |

***Tabelle T10: Untersuchungsparameter***

*Probanden*

An den Untersuchungen nahmen 100 Versuchspersonen im Alter zwischen 21 und 70 Jahren teil. Bei der Probandenauswahl wurde darauf orientiert, Probanden aller Altersgruppen und beider Geschlechter in die Untersuchung einzubeziehen.

### 3.2.6.2 Direktvergleich und Befragung

*Versuchsbedingungen*

Für die Durchführung des Vergleiches verschiedener Sicherheitsleitsysteme wurde sich auf folgende Situationen beschränkt:

***Situation 1:***

- nachleuchtendes Sicherheitszeichen (NL), nicht bodennah, punktuell montiert, 2 Stück
- kontinuierliche nachleuchtende Leitmarkierungen (Breite: 7 cm), beidseits mit integrierten Richtungspfeilen (70 x 70) für die Fluchtrichtung, bodennah, 6 Stück, Montagehöhe: 0,4 m über dem Boden
- zusätzlich nachleuchtendes Sicherheitszeichen (200 x 400), bodennah, punktuell montiert, 1 Stück
- nachleuchtende Türumrandung (Streifenbreite: 2 cm) und Türgriffhinterlegung
- Beleuchtung: keine

***Situation 2:***

- hinterleuchtetes Sicherheitszeichen (HLKL), nicht bodennah, punktuell montiert, 1 Stück zum Verweis auf die Rettungstür
- hinterleuchtetes Sicherheitszeichen (HLGR), nicht bodennah, punktuell montiert, 1 Stück zur Orientierung am Zimmerausgang
- Beleuchtung: Notbeleuchtung (NB 2), 4 Stück Notleuchten alle 8 m gemäß DIN EN 1838 [2]

[2] DIN EN 1838: Notbeleuchtung. 1999

Als Versuchsbedingungen des Schwächungskoeffizienten k wurden folgende Festlegungen getroffen:

| Sichttrübung | k [1/m] |
|---|---|
| gering | 0,7 |
| mittel | 1,4 |
| hoch | 2,3 |

Die Versuchsbedingungen wurden optimiert bezüglich guter Reproduzierbarkeit, minimaler Versuchsdauer sowie geringer Belastung und Gefährdung für die Probanden. Die Reihenfolge der dargebotenen Versuchssituationen wurde deshalb standardisiert und nicht randomisiert. Jede Versuchssituation wurde mit einem Fragebogen durch die Probanden bewertet (Versuchsschema Tabelle T11). Gewisse Lerneffekte waren auf diese Weise nicht auszuschließen.

| Ablauf | Sichttrübung | Situation | Befragung | Kennung |
|---|---|---|---|---|
| 1. | | Vorbereitung | Fragebogen 1 | |
| 2. | gering | Situation 1 | Fragebogen 2 - 1 | NL1 |
| 3. | gering<br>gering | Situation 2 | Fragebogen 2 - 2<br>Fragebogen 3 - 1 | HL1<br>NL1 - HL1 |
| 4. | mittel | Situation 1 | Fragebogen 2 - 3 | NL2 |
| 5. | mittel<br>mittel | Situation 2 | Fragebogen 2 - 4<br>Fragebogen 3 - 2 | HL2<br>NL2 - HL2 |
| 6. | hoch | Situation 1 | Fragebogen 2 - 5 | NL3 |
| 7. | hoch<br>hoch | Situation 2 | Fragebogen 2 - 6<br>Fragebogen 3 - 3 | HL3<br>NL3 - HL3 |
| 8. | | Auswertung | Gesamteindruck | |

***Tabelle T11: Versuchsschema für die Befragung***

*Probanden*

An der Befragung nahmen 42 Versuchspersonen im Alter zwischen 15 und 73 Jahren teil. In die Untersuchungen wurden Probanden aller Altersgruppen und beider Geschlechter einbezogen.

*Fragebögen - Inhalt*

Bei der Befragung kamen drei verschiedene Fragebögen zum Einsatz.

**Fragebogen 1**

Mit diesem Fragebogen werden die ***persönlichen Angaben*** wie Alter, Geschlecht und Fehlsichtigkeiten zur Versuchsperson erfasst und Einschätzungen zum Sehvermögen bei Dunkelheit, Blendung und von Farben gegeben. Mit Hilfe dieser Angaben ist es möglich, Einflussfaktoren auf die Bewertung zu testen.

**Fragebogen 2**

Die Fragebögen zur ***Bewertung der Fluchtsituationen*** sind wegen der Vergleichbarkeit alle identisch aufgebaut.

***Erfasst werden folgende Kriterien:***

- Gesamteinschätzung der Fluchtsituation
- Orientierungsvermögen im Rettungsweg
    - Erkennbarkeit der räumlichen Begrenzungen des Rettungsweges
    - Erkennbarkeit von Personen und Hindernissen
    - Erkennbarkeit von Sicherheitskennzeichen für Rettungswege
    - Abstand zwischen den Sicherheitskennzeichen
    - Beleuchtungsverhältnisse im Rettungsweg
- Sicherheitsgefühl
    - Fluchtgeschwindigkeit

Zusätzlich wurden zu jeder Versuchssituation neben dem Schwächungskoeffizienten, die Zeit erfasst, die der Proband für den Weg aus dem Probandenraum bis zum korrekten Auffinden des Notausganges benötigte. Beobachtet wurde, wie sich die Probanden durch den Gang bewegten und woran sie sich orientierten. Registriert wurde außerdem:

- die Häufigkeit mit der Hindernisse, die sich als Kartons in Bodennähe oder als Personen im Gang stehend befanden, übersehen wurden,
- wie oft die Probanden orientierungslos im Rettungsweg verweilten,
- wie oft sie eine falsche Fluchtrichtung wählten,
- wie oft sie den Rettungsausgang überliefen

**Fragebogen 3**

Die Fragebögen beinhalten den ***direkten Vergleich zwischen den beiden Test-situationen bei vergleichbarer optischer Dichte***. Darüber hinaus werden Vor- und Nachteile der einzelnen Sicherheitsleitsysteme von den Probanden benannt.

*Fragebögen - Aufbau*

Die Gestaltungsmöglichkeiten von Fragebögen sind vielfältig. Für die vorliegende Untersuchung fand zur Gewinnung der Urteile der Versuchspersonen hauptsächlich die Rating-Skala (rating, engl.: Einschätzung) Anwendung. Diese Skalierungsart wurde bereits in vielen Untersuchungen verwendet und bringt erfahrungsgemäß sehr detaillierte Ergebnisse [28, 29, 30]. Die Beantwortung solcher Fragen ist für die Probanden kaum problematisch.

Eine Variante der Rating-Skala ist die Bipolarskala. Dabei werden jeweils zwei gegensätzliche Items paarweise angeordnet. Auf einer Skala zwischen den Items wird von dem Probanden seiner Empfindung nach eine Bewertung abgegeben (Abbildung 46).

**Bipolare Rating-Skala:**

**Wie wurden von Ihnen Personen und Hindernisse wahrgenommen?**

gar nicht OOOOOOOOOOOOOOOOOOOOOO sehr gut

***Abbildung 46: Skalierung der Items der Fragebögen***

Pro Fragebogen waren maximal 9 Kriterien zu bewerten. Um bei der Kennzeichnung eine visuelle Orientierung an vorherigen Skalenurteilen zu verhindern, wurden die Extrembewertungen eines Polpaares zufällig angeordnet. Da die Befragung auf rein subjektiven Bewertungen beruht, bei der sowohl die innere Einstellung der Versuchsperson zur Untersuchung als auch deren Erfahrungen und andere psychologische Komponenten eine Rolle spielen, sind bei den Ergebnissen zu den jeweiligen Kriterien relativ große Streubreiten zu erwarten.

Für den direkten Vergleich von Sicherheitsleitsystemen wurden darüber hinaus Vor- und Nachteile der Systeme von den Probanden erfragt.

---

28 Völker, St.: Eignung von Methoden zur Ermittlung eines notwendigen Beleuchtungsniveaus. Dissertation TU Ilmenau,1999

29 Gall, D. ea: Einzelplatzbeleuchtung und Allgemeinbeleuchtung am Arbeitsplatz. Schriftreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz Fb 753, Wirtschaftsverlag NM Bremerhaven, 1996

30 Vandahl, C.: Zur Festlegung von Gütemerkmalen der Einzelplatzbeleuchtung. Dissertation TU Ilmenau,1999

Die Fragebögen für die verschiedenen Versuchssituationen sind unter Angabe der Skalierungsvorschriften im *Anhang A - Fragebögen* enthalten.

*Fragebögen - Auswertung*

Mit Hilfe von statistischen Verfahren wurden die Antworten, d. h. die abgegebenen Urteile, der Versuchspersonen weiterverarbeitet. Dafür wurde das Statistik-Programm SPSS Version 10.0 für Windows benutzt. Für die Erfassung der Merkmalsausprägung eines Urteils wurden der Bewertung zunächst Zahlenwerte zugeordnet und damit die Urteile skaliert.

Die Auswahl geeigneter statistischer Verfahren (Tabelle T12) wird durch folgende Randbedingungen bestimmt:

- das Skalierungsniveau der Variablen
- die Art der Stichprobe
- die Verteilungsart bei intervallskalierten Variablen

| Anzahl der miteinander zu vergleichenden Stichproben | Abhängigkeit der Stichproben | Test |
|---|---|---|
| 2 | unabhängig | U-Test nach Mann und Whitney |
| 2 | abhängig | Wilcoxon-Test |
| > 2 | unabhängig | H-Test nach Kruskal and Wallis |
| > 2 | abhängig | Friedman-Test |

***Tabelle T12: Übersicht über Mittelwerttest für nicht-normalverteilte intervallskalierte Variable*** [31]

[31] Bühl, A.; Zöfel P.: SpSS Version 10.0. Addison-Wesley, 7. Auflage, München, 2000

# 4 Ergebnisse der Untersuchungen im Rettungsgang

## 4.1 Bestimmung der Erkennungsweite von Sicherheitszeichen

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind im *Anhang B - Erkennungsweiten von Sicherheitszeichen* detailliert aufgeführt. Dargestellt sind in den Diagrammen wegen der besseren Übersichtlichkeit exponentielle Trendlinien. Diese weisen mehrheitlich ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 > 0{,}80$ auf. Im Einzelnen sind diese Angaben im *Anhang D - Diagrammübersicht* zusammengefasst. Neben dem Bestimmtheitsmaß sind Angaben zu der Messpunktanzahl und der Probandenzahl aufgeführt.

### 4.1.1 Einfluss Sichttrübung

Bereits bei geringen Schwächungskoeffizienten der Sichttrübung nimmt die Erkennungsweite gegenüber der optisch klaren Umgebung drastisch ab und sinkt exponentiell mit dem Anstieg des Schwächungskoeffizienten (Abbildung 47).

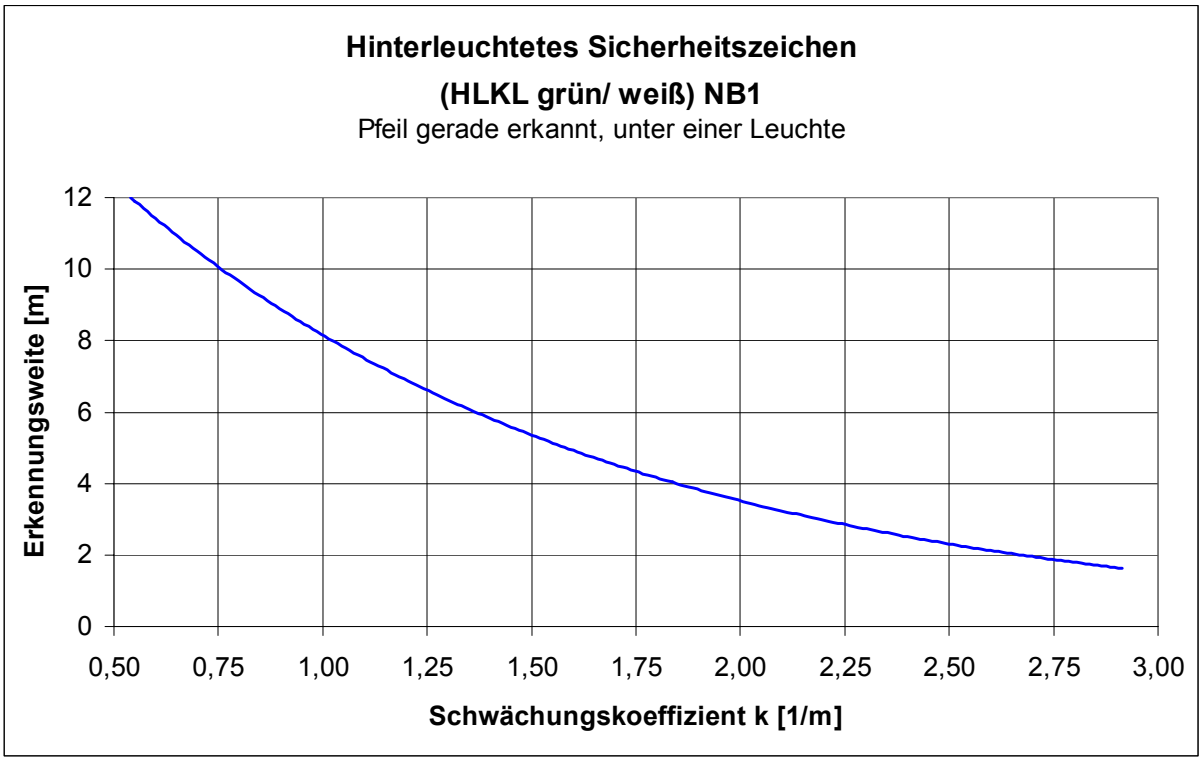



***Abbildung 47:*** ***Abhängigkeit der Erkennungsweite vom Schwächungskoeffizienten bei einem hinterleuchteten Sicherheitszeichen bei Notbeleuchtung und Montage unter einer Leuchte***

***Fazit:***

***Problematisch sind wegen der geringen Erkennungsweiten große Abstände zwischen den Sicherheitszeichen. Bei großen Schwächungskoeffizienten sinkt die Erkennungsweite auf etwa 2 m. Orientierungspunkte sind in dieser Entfernung erforderlich, um eine kontinuierliche Orientierung zu ermöglichen. Das Fehlen von Orientierungspunkten führt zu Suchaktionen, verunsichert und senkt die Fluchtgeschwindigkeit. Damit erhöht sich die Verweildauer fliehender Personen im Gefahrenbereich und es sinkt die Chance zur Selbstrettung. Besonders kritisch ist dies in Bereichen, in denen sich Ortsunkundige aufhalten.***

### 4.1.2 Einfluss des Sicherheitszeichens

Untersuchungen zu Erkennungsweiten von Sicherheitszeichen für Rettungswege ohne Sichttrübung wurden bereits durchgeführt und führten zu Größenfestlegungen für hinterleuchtete und beleuchtete Sicherheitszeichen gemäß der Erkennungsweite nach BGR 216 und DIN EN 1838 [3, 4, 5]. Hierbei wurde die Auffälligkeit der Sicherheitszeichen berücksichtigt, damit ein flüchtiger Blick für die schnelle Orientierung ausreichend ist. Die festgelegten Erkennungsweiten sind keine Grenzwerte für die Erkennbarkeit.

Untersuchungen zu Grenzerkennungsweiten von Sicherheitszeichen für rauchfreie Sehbedingungen waren aufgrund der begrenzten Ganglänge von 30 m nicht möglich. Alle Sicherheitszeichen wurden jedoch von allen Probanden bei allen Beleuchtungssituationen und ohne Sichttrübung aus dieser Entfernung erkannt. Die Grenzentfernungen sind damit größer.

---

3 Weis, B.; Terstiege, H.; Willing, A.: Notbeleuchtung kontra langnachleuchtende Farbe. Zts. LICHT 46. Jhg. Nr. 1,1994, Sonderdruck

4 Ehreneiser, W.; Kokoschka, S.; Weis, B.: Untersuchung der Sichtbarkeit von Sicherheitszeichen für Rettungswege. Zts. LICHT 45. Jhg. Nr. 3, 1993, Sonderdruck

5 Weis, B.: Notbeleuchtung. Zts. LICHT 38. Jhg. Nr. 6, 1987, Sonderdruck

Die Erkennungsweite gemäß BGR 216 wurde als Bezugspunkt für die Auswertungen gewählt (Tabelle T13).

| Sicherheitszeichen | Erkennungsweite nach BGR 216 | relative Erkennungsweite bei Sichttrübung | | |
|---|---|---|---|---|
| | | k = 0,7 $m^{-1}$ | k = 1,4 $m^{-1}$ | k = 2,3 $m^{-1}$ |
| **HLKL** | 18 m | 63,8 % | 38,9 % | 21,1 % |
| **HLKL LED** | 20 m | 50,0 % | 32,5 % | 18,5 % |
| **HLGR** | 28 m | 41,1 % | 25,0 % | 13,6 % |
| **BL (separat beleuchtet)** | 20 m | 47,5 % | 30 % | 17,5 % |
| **NL** | 20 m | 27,5 % | 19,0 % | 10,0 % |

***Tabelle T13:*** ***Relative Erkennungsweite verschiedener Sicherheitszeichen ohne Zusatzbeleuchtung bezogen auf die Erkennungsweite nach BGR 216 in Abhängigkeit vom Schwächungskoeffizienten***

Hinterleuchtete Sicherheitszeichen erzielen die größten absoluten Erkennungsweiten, nachleuchtende Sicherheitszeichen die geringsten (Abbildung 48). Beleuchtete Sicherheitszeichen sind stark von den Beleuchtungsverhältnissen abhängig. Die Unterschiede zwischen den Systemen sind um so geringer je größer der Schwächungskoeffizient ist.

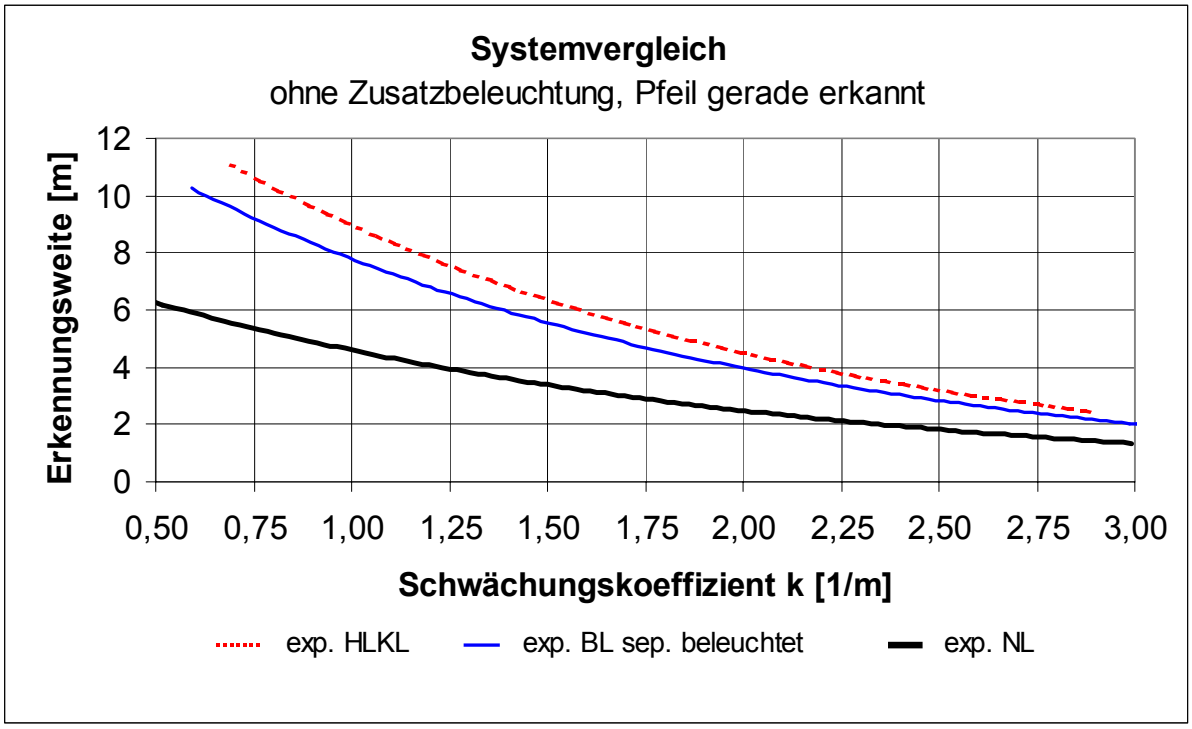



***Abbildung 48:*** ***Erkennungsweite verschiedener Sicherheitszeichen bei Sichttrübung und ohne Zusatzbeleuchtung, Kriterium: Pfeil gerade erkannt***

### 4.1.3 Einfluss der Beleuchtung

Die Zunahme des Beleuchtungsniveaus im Rettungsgang führt zum Anstieg des Streulichtes im Umfeld. Damit sinken die Kontraste auf den Sicherheitszeichen und die Erkennungsweiten nehmen ab.

Die Erkennungsweite bei Notbeleuchtung sinkt durchschnittlich um weitere 20% gegenüber den Sehbedingungen ohne Zusatzbeleuchtung im Rettungsgang. Bei Allgemeinbeleuchtung ist die Erkennungsweite durch die Beleuchtung um durchschnittlich 35% geringer als ohne zusätzliche Beleuchtung (Abbildung 49).

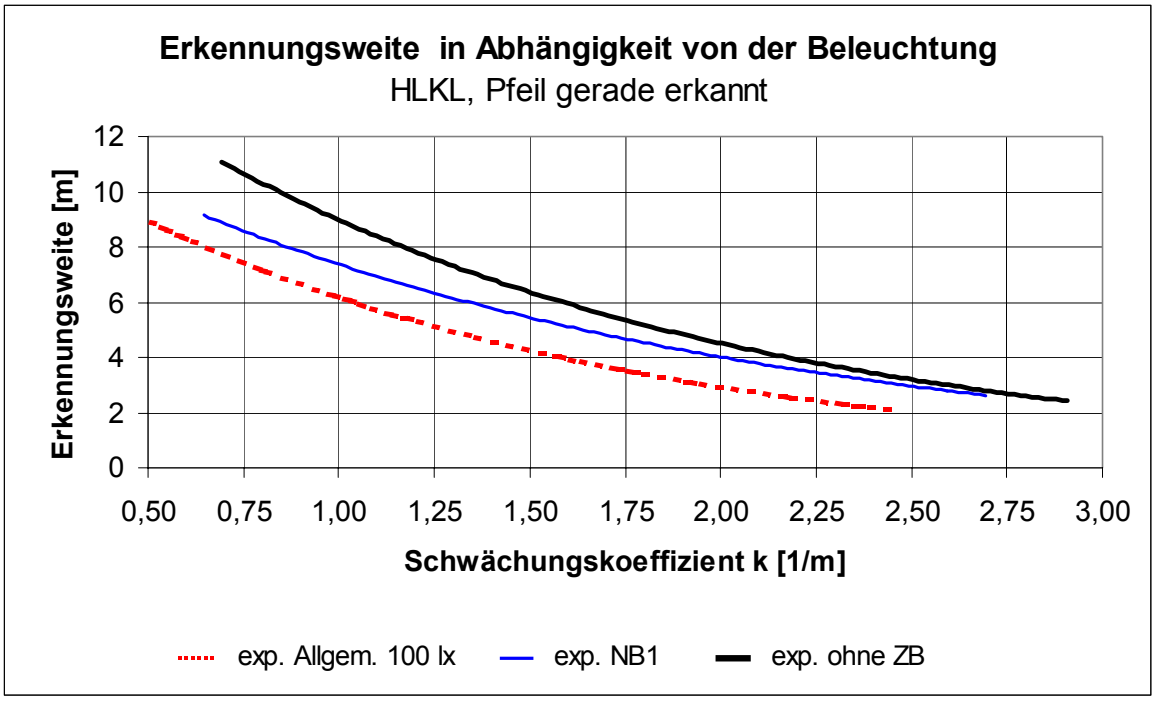



***Abbildung 49:*** ***Abhängigkeit der Erkennungsweite von der Beleuchtungssituation am Beispiel des hinterleuchteten Sicherheitszeichens HLKL, Kriterium: Pfeil gerade erkannt***

Die verschiedenen Ausführungen der Notbeleuchtung (NB1, NB2) mit vergleichbarem mittleren Beleuchtungsniveau führen zu ähnlichen Erkennungsweiten (Abbildung 50).

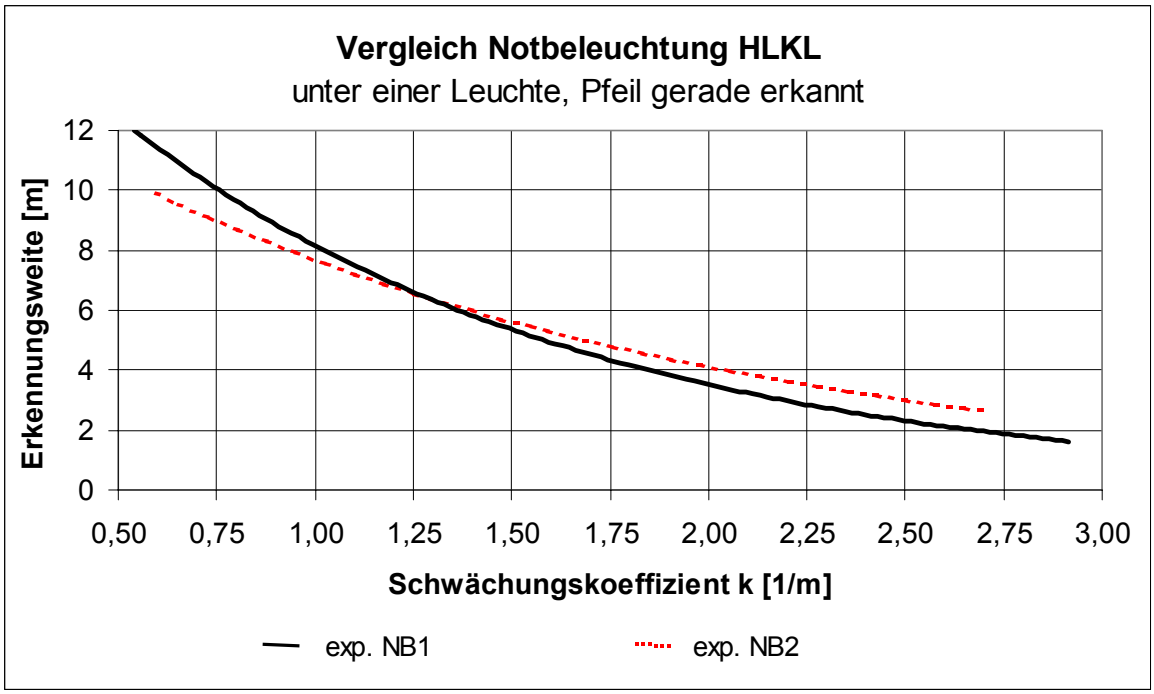



*Abbildung 50: Einfluss verschiedener Notbeleuchtungsausführungen am Beispiel des hinterleuchteten Sicherheitszeichen HLKL, Montageort: unter Notleuchte, Kriterium: Pfeil gerade erkannt*

***Fazit:***

***Die Zunahme der Umgebungshelligkeit bei Sichttrübung führt zur Abnahme der Erkennungsweiten gegenüber den Sehbedingungen ohne Zusatzbeleuchtung im Rettungsgang.***

***Hinterleuchtete Sicherheitszeichen erzielen die größten Erkennungsweiten. Nachleuchtende Sicherheitszeichen können weniger gut erkannt werden. Beleuchtete Sicherheitszeichen sind stark von den Beleuchtungsverhältnissen abhängig. Die Systemunterschiede sind um so geringer je größer die Sichttrübung ist.***

***Die Streulichtwirkung sollte im Gefahrenfalle minimiert werden. Eine Absenkung des Beleuchtungsniveaus erscheint sinnvoll.***

### 4.1.4 Einfluss des Montageortes des Sicherheitszeichens in Bezug zur Zusatzbeleuchtung

Hinterleuchtete Sicherheitszeichen sind nahezu ortsunabhängig vom ihrem Montageort bezüglich der Zusatzbeleuchtung (Abbildung 51).

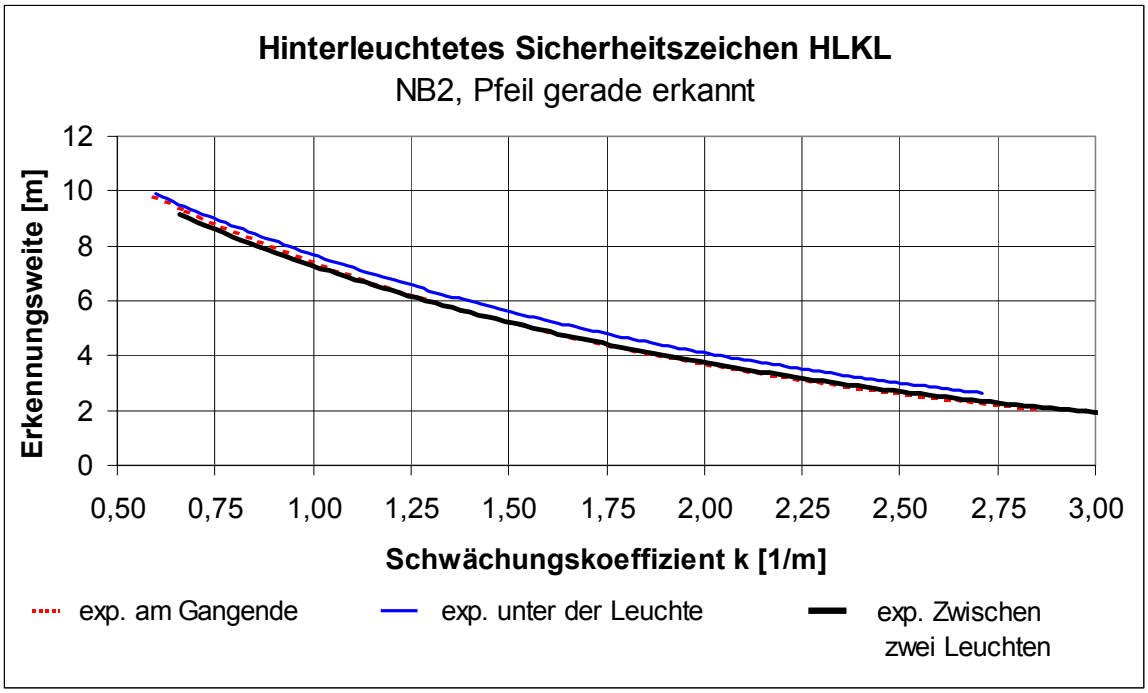



***Abbildung 51:*** ***Einfluss des Montageortes auf die Erkennbarkeit eines hinterleuchteten Sicherheitszeichens HLKL bei Notbeleuchtung, Kriterium: Pfeil gerade erkannt***

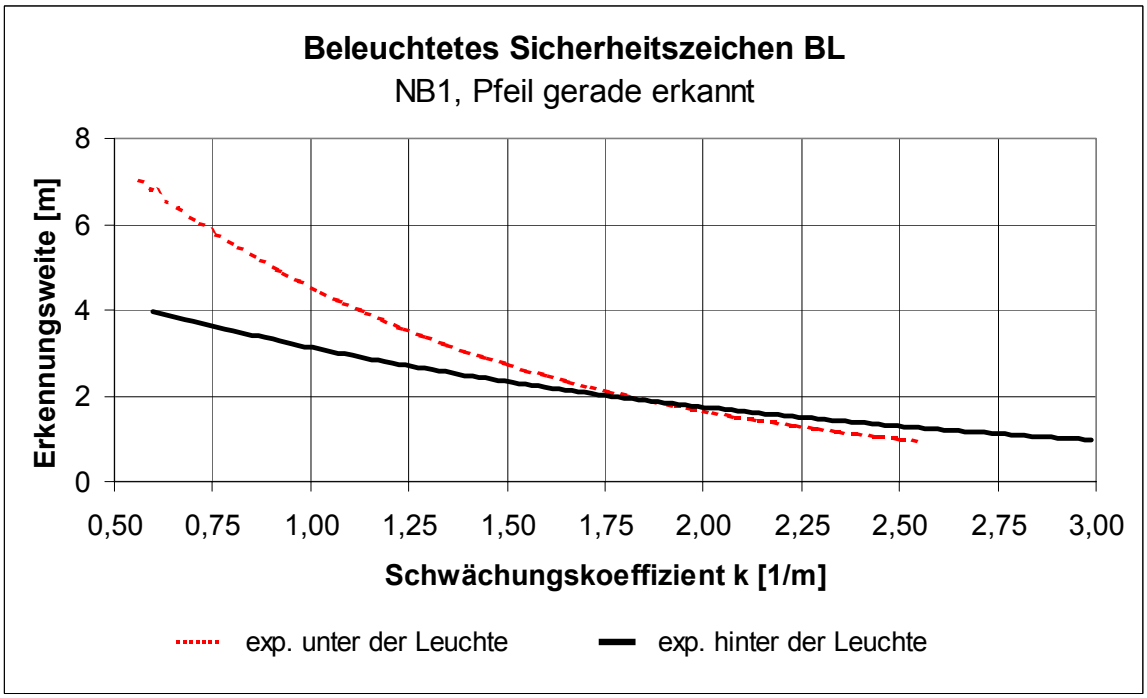



***Abbildung 52:*** ***Einfluss des Montageortes auf die Erkennbarkeit eines beleuchteten Sicherheitszeichens BL bei Notbeleuchtung, Kriterium: Pfeil gerade erkannt***

Beleuchtete Sicherheitszeichen weisen hingegen eine Abhängigkeit vom Montageort

des Sicherheitszeichens in Bezug zur Lichtquelle auf. Bei geringen Schwächungskoeffizienten sind beleuchte Sicherheitszeichen, die direkt unter einer Leuchte montiert sind, besser zu erkennen als Sicherheitszeichen, die sich in größerer Entfernung zur Lichtquelle befinden. Die Unterschiede sind um so geringer, je größer der Schwächungskoeffizient ist (Abbildung 52).

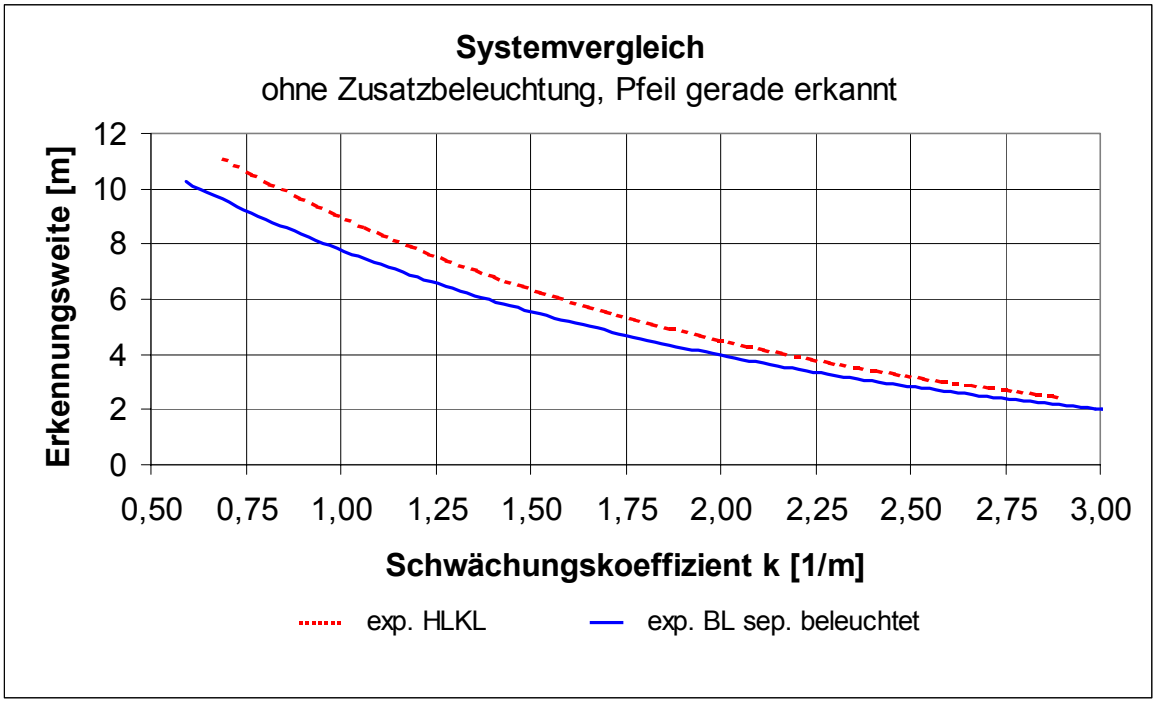



***Abbildung 53:*** ***Erkennbarkeit eines separat beleuchteten Sicherheitszeichens BL im Vergleich zu einem hinterleuchteten Sicherheitszeichen HLKL***
***Bedingungen: ohne Zusatzbeleuchtung, Kriterium: Pfeil gerade erkannt***

***Fazit:***

***Hinterleuchtete Sicherheitszeichen sind gegenüber externen Lichtquellen in ihrer Erkennbarkeit robust.***

***Beleuchtete Sicherheitszeichen sind im geringen Abstand zur Lichtquelle am besten erkennbar. Bei separater Beleuchtung erreichen beleuchtete Sicherheitszeichen bei doppelter Größe fast ähnliche Erkennungsweiten wie hinterleuchtete Rettungszeichen (Abbildung 53).***

### 4.1.5 Einfluss der Schildgröße bei hinterleuchteten Sicherheitszeichen

Untersucht wurden die Sicherheitszeichen HLKL und HLGR. Die Zeichengrößen verhalten sich wie folgt: HLKL : HLGR = 1,0 : 2,25.

Bezüglich der Erkennungsweite zeigte sich keine Einfluss der Schildgröße in Abhängigkeit vom Schwächungskoeffizienten und der Beleuchtungssituation, wie sie nach theoretischen Überlegungen gemäß Abschnitt 2.1.5.4 zu erwarten gewesen wären (Abbildung 54).

Betrachtet man jedoch die Leuchtdichteverhältnisse auf den Sicherheitszeichen gemäß Abbildung 32 (Abschnitt 3.1.1) wird deutlich, dass das große Sicherheitszeichen einen größeren Leuchtdichtegradienten von oben nach unten aufweist und damit der Kontrast unmittelbar in der Pfeilspitze bei senkrechtem Richtungspfeil geringer ist. Beide Tendenzen - Vergrößerung der Erkennungsweite bei Zunahme der Sehdetailgröße und Abnahme der Erkennbarkeit bei Verringerung der Zeichenkontraste - sind gegenläufig und heben sich auf.

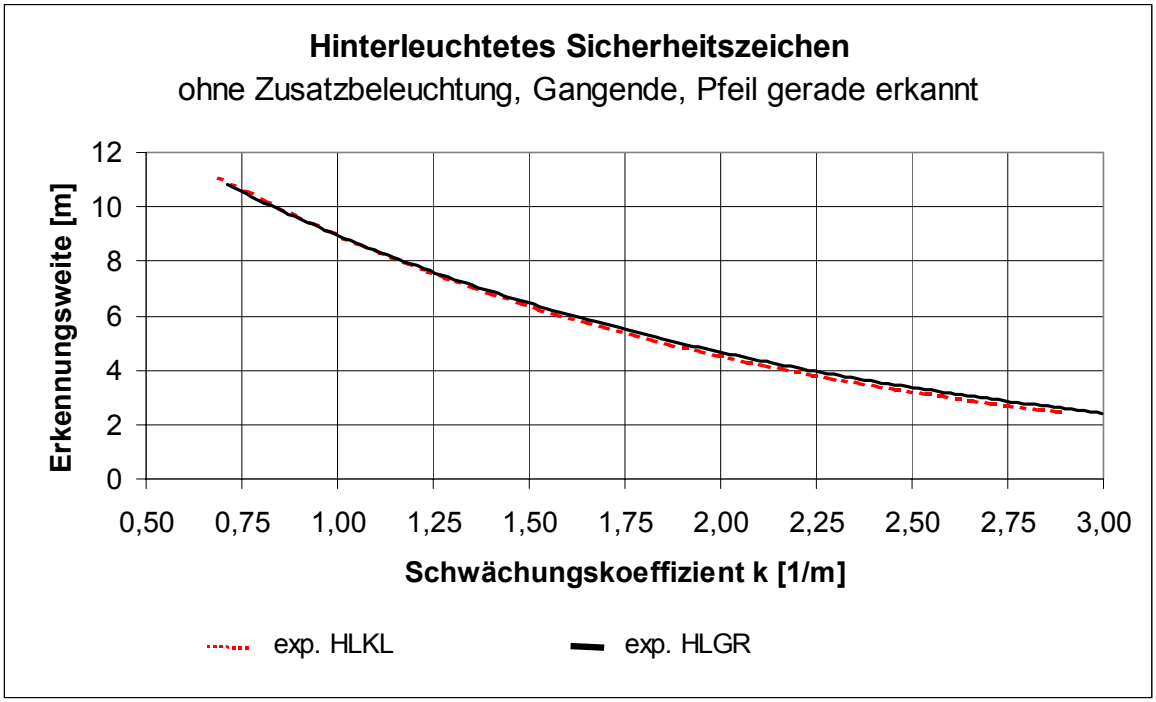



***Abbildung 54:*** ***Einfluss der Schildgröße auf die Erkennungsweite, Vergleich HLKL, HLGR, ohne Zusatzbeleuchtung, Kriterium: Pfeil gerade erkannt***

***Fazit:***

***Größere Sicherheitszeichen erzielen nur dann eine größere Erkennungsweite, wenn die Kontrastverhältnisse auf der Zeichenfläche zwischen Sicherheits- und Kontrastfarbe möglichst groß sind und gering schwanken. Höhere Anforderungen an die Gleichmäßigkeit sind für Sicherheitszeichen, die in Bereichen mit erhöhter Brandgefährdung zum Einsatz kommen, zu stellen.***

### 4.1.6 Einfluss der mittleren Leuchtdichte bei hinterleuchteten Sicherheitszeichen

Die mittleren Schildleuchtdichten der hinterleuchteten Sicherheitszeichen verhielten sich wie in Tabelle T14 zusammengefasst.

| Sicherheitszeichen | HLKL | HLGR | HLKL LED |
|---|---|---|---|
| **Mittlere Schildleuchtdichte** | 290 cd/m²] | 230 cd/m²] | 65 cd/m²] |
| **Verhältnis zu HLKK** | 1,00 | 0,79 | 0,22 |

***Tabelle T14: Mittlere Schildleuchtdichten der hinterleuchteten Sicherheitszeichen***

Die Erkennungsweiten unterscheiden sich zwischen den beiden hinterleuchteten Sicherheitszeichen HLKL und HLGR weder in Abhängigkeit vom Schwächungskoeffizienten noch in Abhängigkeit von der Beleuchtungssituation. Das dunklere Sicherheitsschild HLKL LED ist fast ähnlich gut im Rettungsgang erkennbar wenn keine zusätzliche Beleuchtung vorhanden ist. Je höher das Beleuchtungsniveau und damit der Streulichteintrag im Rettungsgang ist, um so geringer ist die Erkennungsweite des hinterleuchteten Sicherheitsschildes HLKL LED gegenüber den Sicherheitszeichen mit größeren mittleren Leuchtdichten (Abbildung 55).

***Fazit:***

***Die geforderte mittlere Leuchtdichte von 200 cd/m² ist ein sinnvoller Wert für hinterleuchtete Sicherheitszeichen, die in brandgefährdeten Bereichen zum Einsatz kommen.***

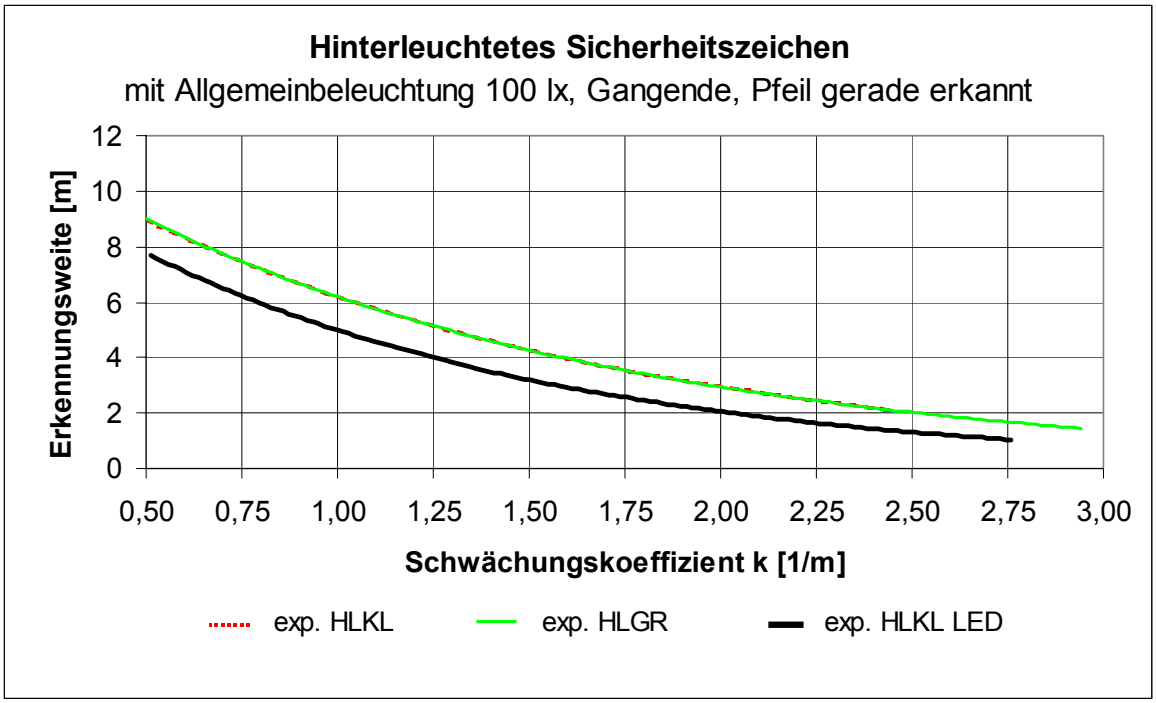



***Abbildung 55:*** ***Einfluss der mittleren Leuchtdichte des Sicherheitszeichens auf die Erkennungsweite, Beleuchtungssituation: Allgemeinbeleuchtung, Montageort: Gangende; Kriterium: Pfeil gerade erkannt***

### 4.1.7 Einfluss des Abklingverhaltens nachleuchtender Sicherheitszeichen

Nachleuchtende Sicherheitszeichen weisen nach Wegfall der Anregung ein typisches Abklingverhalten auf. Dabei sinkt die Zeichenleuchtdichte exponentiell.

Das Anfangsniveau der Leuchtdichte wird durch die spektralen Eigenschaften der Anregungsquelle, die Bestrahlungsstärke auf der Zeichenoberfläche und die Anregungsdauer bestimmt (vgl. Abschnitt 3.1.3).

Die Erkennungsweite von nachleuchtenden Sicherheitszeichen wird durch die Leuchtdichte beeinflusst.

Die Abbildung 56 zeigt das Ergebnis der Untersuchung zum Einfluss des Abklingverhaltens auf die Erkennungsweite in Abhängigkeit vom Schwächungskoeffizienten.

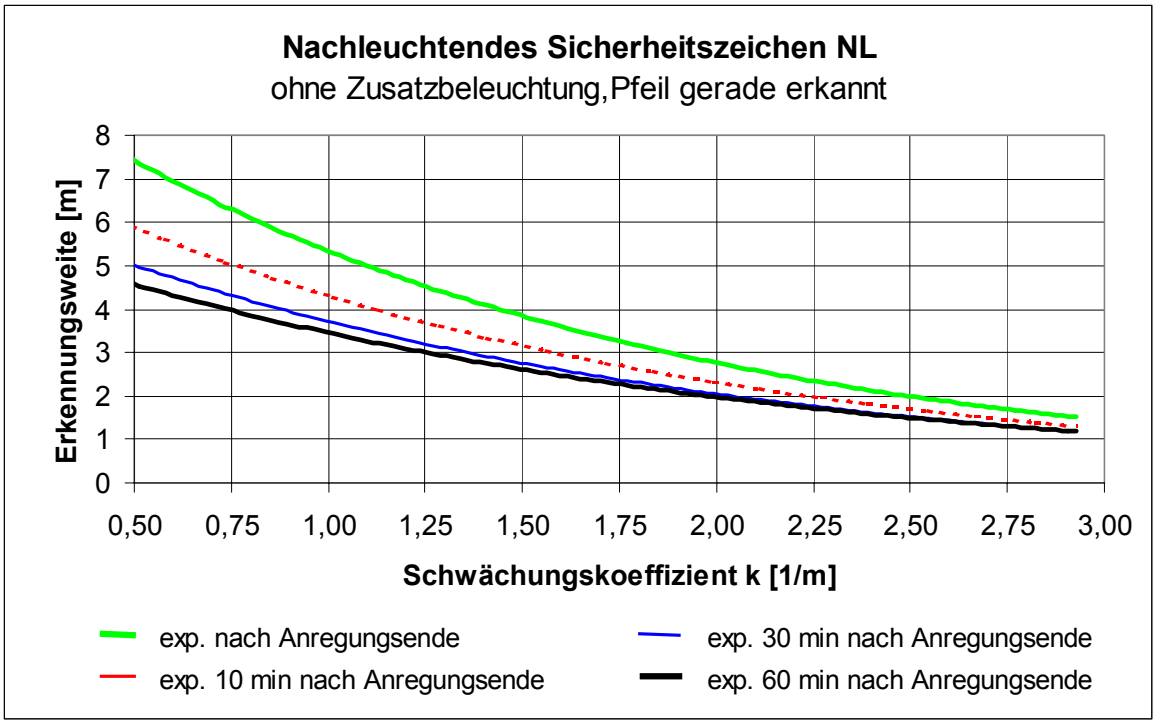



***Abbildung 56:*** ***Einfluss des Abklingverhaltens auf die Erkennungsweite bei nachleuchtenden Sicherheitszeichen NL Hl 300, Anregungsquelle: Leuchtstofflampe $T_f$ = 400 K, Anregungsdauer: 8 h, 250 lx, Untersuchung ohne Zusatzbeleuchtung, Kriterium: Pfeil gerade erkannt***

Innerhalb der ersten 10 min sinkt die Erkennungsweite auf etwa 80% des Wertes, der unmittelbar nach Ende der Anregung erreicht wird. Nach 30 min beträgt die Erkennungsweite noch 71% des Anfangswertes, nach 60 min 68%. Der Einfluss des Abklingverhaltens ist in den ersten 15 min nach Ausfall der Beleuchtung am größten.

***Fazit:***

***Bis hin zu einem Schwächungskoeffizienten von 2,0 $m^{-1}$ liegen die Erkennungsweiten nachleuchtender Sicherheitszeichen über 2 m. Wenn nachleuchtende Sicherheitszeichen in kontinuierliche Leitmarkierungen integriert sind, können die erzielten Erkennungsweiten bis zu mittleren Sichttrübungen als ausreichend angesehen werden.***

***Hohe Sichttrübungen stellen Grenzbereiche dar. Gegenwärtig sind jedoch bereits leistungsstärkere nachleuchtende Pigmente auf dem Markt, die bezüglich der erzielten Leuchtdichten, der Anregungsdauer und der erforderlichen Bestrahlungsstärke optimiert wurden.***

### 4.1.8 Wahrnehmung der Sicherheitsfarbe

Die Sicherheitsfarbe kann am besten bei hinterleuchteten Sicherheitszeichen gesehen werden. Jedoch wird die relevante Information zur Fluchtrichtung (Pfeil erkannt) vor der Sicherheitsfarbe erkannt. Dieser Effekt nimmt mit dem Anstieg des Schwächungskoeffizienten zu (Abbildung 57).

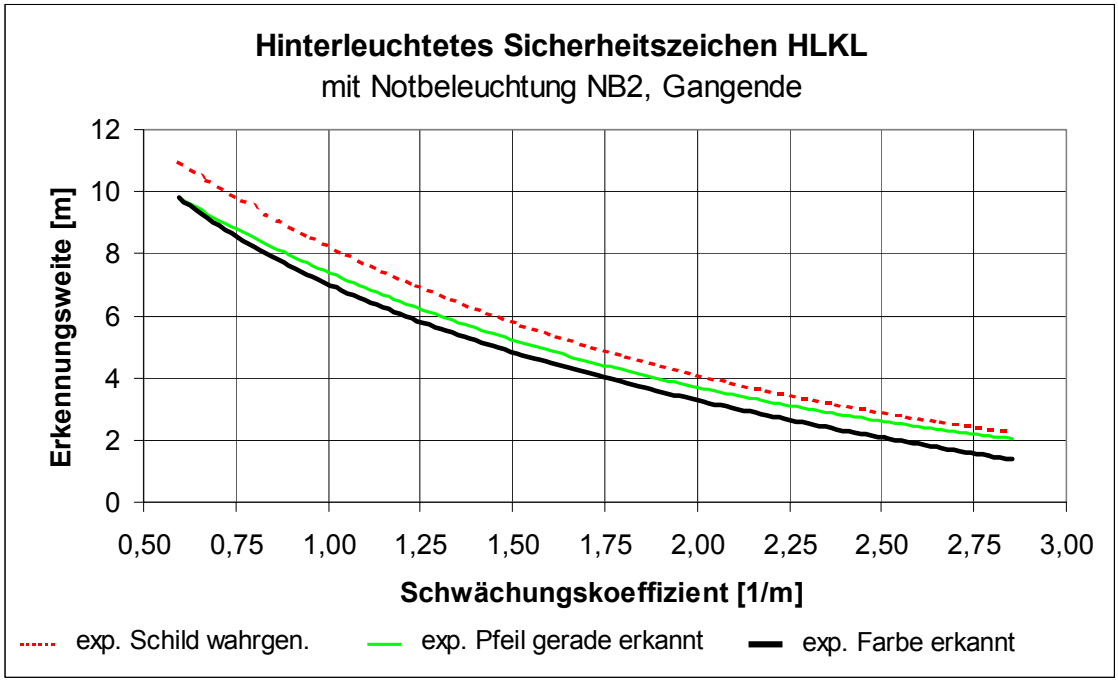



***Abbildung 57: Erkennbarkeit der Farbe am Beispiel des hinterleuchteten Sicherheitszeichens HLKL***

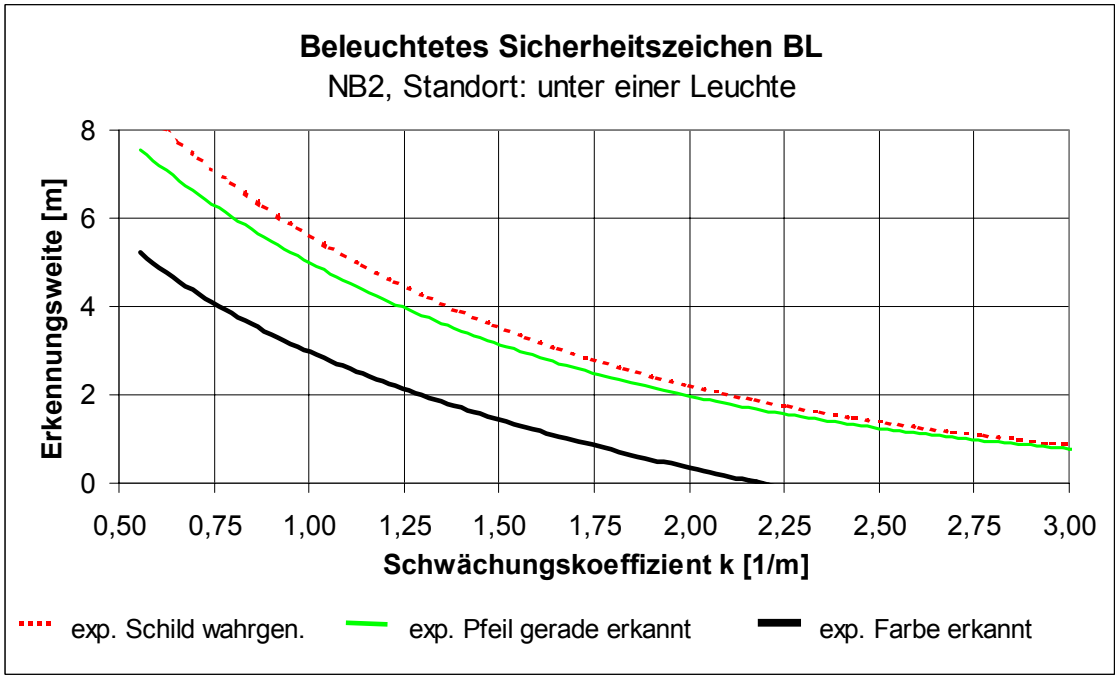



***Abbildung 58: Erkennbarkeit der Farbe am Beispiel des beleuchteten Sicherheitszeichens BL***

Bei beleuchteten Sicherheitszeichen hängt die Erkennung der Sicherheitsfarbe stark vom Montageort ab und konnte von einigen Probanden nicht angegeben werden. Die Erkennbarkeit der Farbinformation ist deutlich schlechter als bei hinterleuchteten Sicherheitszeichen (Abbildung 58).

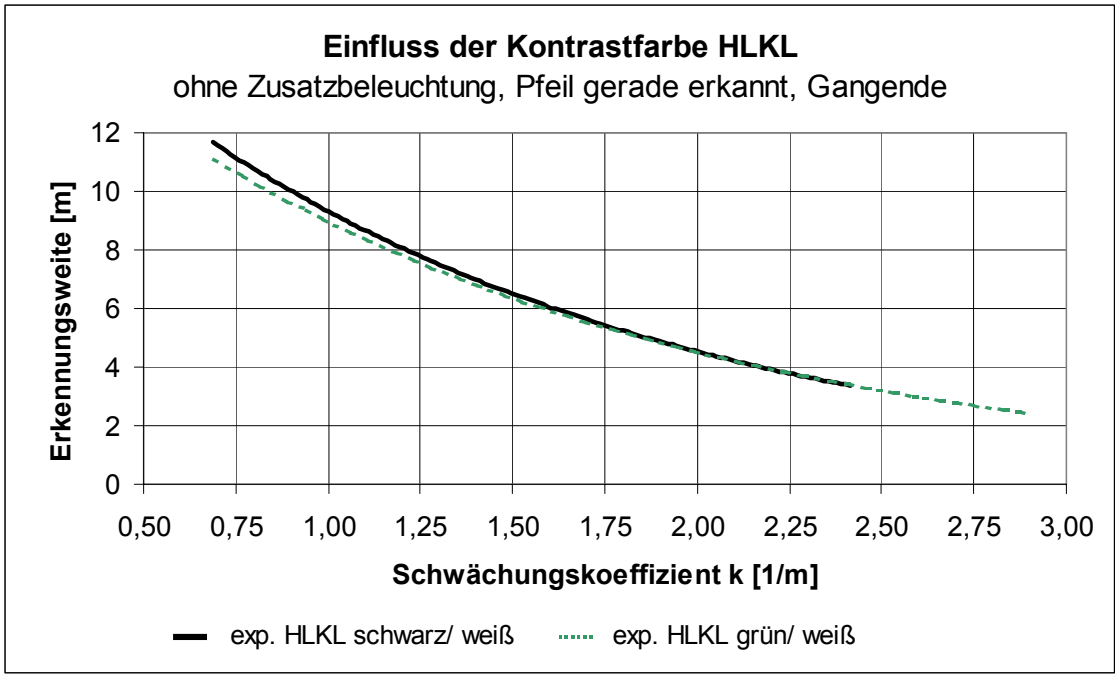



***Abbildung 59:*** ***Einfluss der Kontrastfarbe auf die Erkennbarkeit des Richtungspfeils, Vergleich HLKL grün/weiß mit HLKL schwarz/weiß***

Die Sicherheitsfarbe spielt für die Erkennbarkeit der relevanten Fluchtrichtung nicht die entscheidende Rolle. Bei Untersuchungen zwischen einem grün / weiß und einem schwarz / weiß dargebotenen hinterleuchteten Sicherheitszeichen zeigten sich keine Unterschiede in den erzielten Erkennungsweiten (Abbildung 59).

***Fazit:***

***Die Wahrnehmung der Sicherheitsfarbe ist bei Sichttrübung aufgrund der Streulichtüberlagerung herabgesetzt. Das sich überlagernde Streulicht bewirkt eine Veränderung der Sicherheitsfarbe. Der Farbort der Sicherheitsfarbe verschiebt sich in Richtung Unbunt.***

***Die Farbinformation wird in der Regel nach der relevanten Fluchtrichtung erkannt. Bei hinterleuchteten Sicherheitszeichen ist die Farbwahrnehmung deutlich besser als bei beleuchteten Sicherheitszeichen. Die Erkennbarkeit der Sicherheitsfarbe spielt bei Sichttrübung eine untergeordnete Rolle.***

### 4.1.9 Einfluss dynamischer Eigenschaften

Zum Test, ob dynamische Eigenschaften die Erkennungsweite von Sicherheitszeichen erhöhen können, wurde eine separate Ansteuerung der Signal- und Kontrastfarbe für das hinterleuchtete Sicherheitszeichen HLKL LED entworfenen.

Das Blinken der Sicherheitsfarbe (grün) blieb wirkungslos. Es zeigte sich, dass nur bei der Situation ohne Zusatzbeleuchtung das Blinken der Kontrastfarbe (weiß) etwa 3 m vor dem Schild wahrgenommen werden konnte und der blinkende Pfeil geringfügig eher erkannt wurde als bei statischen Verhältnissen (Abbildung 60) [26].

Auch Simulationen von Lauflichtern am Monitor brachten keine Unterschiede zur statischen Darbietung der Sicherheitszeichen [26].

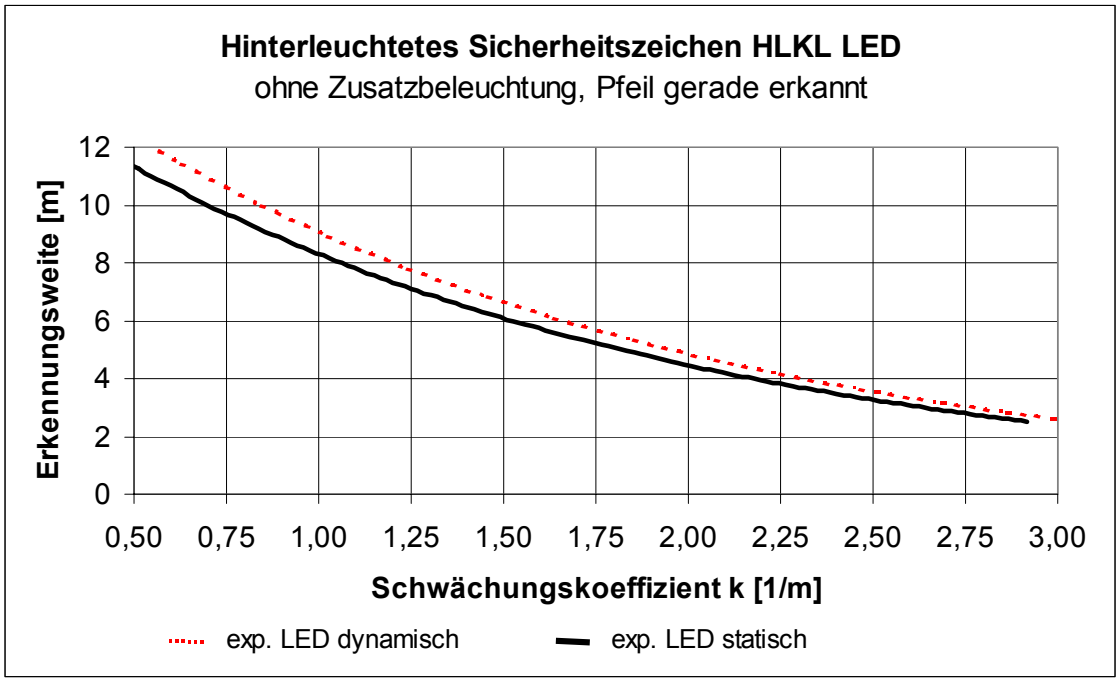



***Abbildung 60:*** ***Einfluss der dynamischen Ansteuerung auf die Erkennbarkeit des Richtungspfeils HLKL LED, Blinkfrequenz der Kontrastfarbe: 3 HZ, ohne Zusatzbeleuchtung, Kriterium: Pfeil gerade erkannt*** [26]

***Fazit:***

***Die Dynamisierung der Sicherheitszeichen durch Blinken von Signal- oder Kontrastfarbe brachte kaum Vorteile für die Erkennbarkeit des Sicherheitszeichen.***

[26] Hoffmann, M.; Seydel U.: Visuelle Gestaltung unter erschwerten Bedingungen. Medienprojekt. TU Ilmenau, 2002

## 4.2 Bestimmung der Erkennungsweite von Personen

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind im *Anhang C - Personenerkennung* detailliert aufgeführt. Nähere Angaben zu den Diagrammen sind im *Anhang D - Diagrammübersicht* enthalten.

### 4.2.1 Einfluss der Sichttrübung

Brandrauch verringert die Erkennungsweiten von Personen und Hindernissen deutlich. Ein Beispiel für die Sehverhältnisse zeigt die Abbildung 61. Mit zunehmender Sichttrübung nimmt die Distanz, aus der Personen und Hindernisse erkannt werden können, exponentiell ab (Abbildung 62).

Bereits bei einem kleinen Schwächungskoeffizienten ($k = 0{,}7\ m^{-1}$) liegen die Erkennungsweiten nur noch zwischen 3 m und 7,5 m. Eine vorrausschauende Orientierung ist damit kaum noch möglich. Bei starker Sichttrübung ($k = 2{,}3\ m^{-1}$) liegt die Erkennbarkeitsentfernung zum Teil bei 1 m und darunter.

***Abbildung 61: Beispiel für die Erkennbarkeit von Personen bei Sichttrübung im Rettungsgang***

***Fazit:***

***Brandrauch verringert die Erkennbarkeit von Personen und Hindernissen deutlich. Die Erkennungsweite sinkt mit dem Anstieg des Schwächungskoeffizienten exponentiell.***

***Hindernisse im Fluchtbereich werden erst unmittelbar vor dem Auftreffen erkannt und erzwingen eine Blickorientierung der fliehenden Person auf das unmittelbare Umfeld und in den Bodenbereich.***

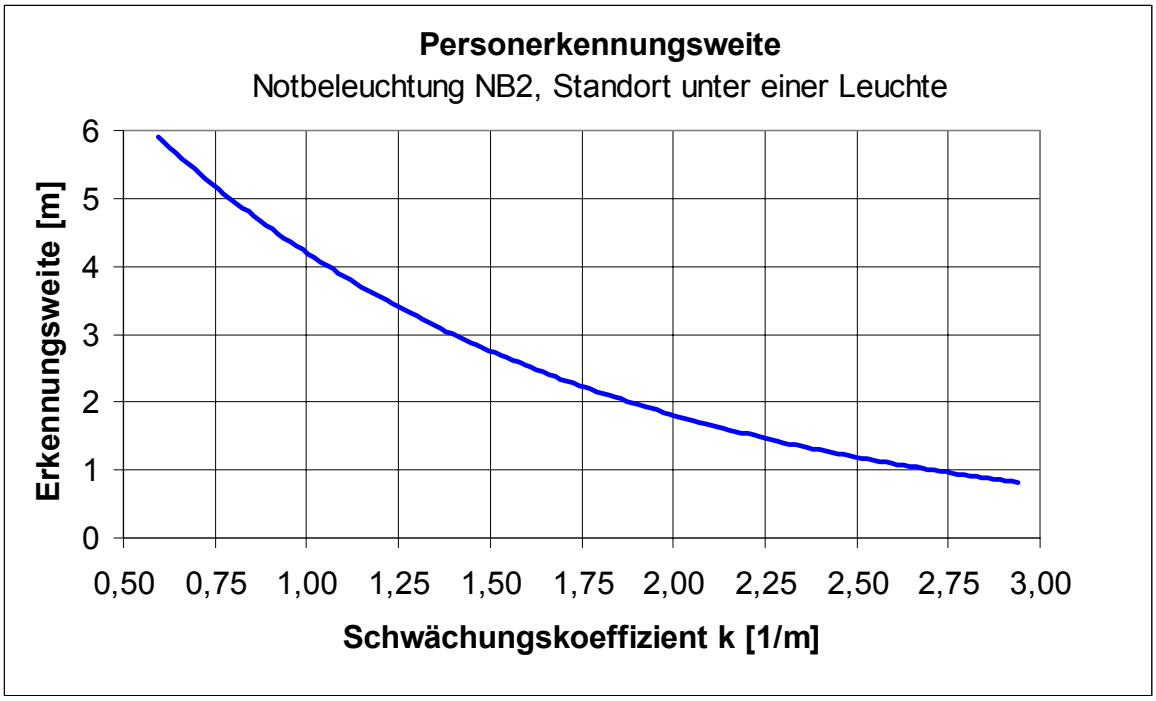



***Abbildung 62*** ***Exponentieller Trend der Erkennungsweite einer Person bei Notbeleuchtung in Abhängigkeit vom Schwächungskoeffizienten, Standort: unter einer Leuchte, Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,91$***

### 4.2.2 Einfluss der Beleuchtung

In der Untersuchung zeigte sich, dass hohe Beleuchtungsniveaus nicht zwangsläufig Vorteile für die Erkennung von Personen und Hindernissen bringen. An bestimmten Standorten hat die Notbeleuchtung gegenüber den Sehbedingungen bei Allgemeinbeleuchtung bei geringeren und mittleren Schwächungskoeffizienten für die Erkennung Vorteile.

Personen und Hindernisse können ohne Zusatzbeleuchtung mit nachleuchtenden Leitmarkierungen bei geringer Sichttrübung erst aus geringeren Distanzen als bei Not- oder Allgemeinbeleuchtung erkannt werden. (Tabelle T15, Abbildung 63). Höhere Fluchtzeiten und das Übersehen von Gefahrenquellen sind mögliche Folgen.

Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Beleuchtungssituationen nehmen mit steigendem Schwächungskoeffizienten ab.

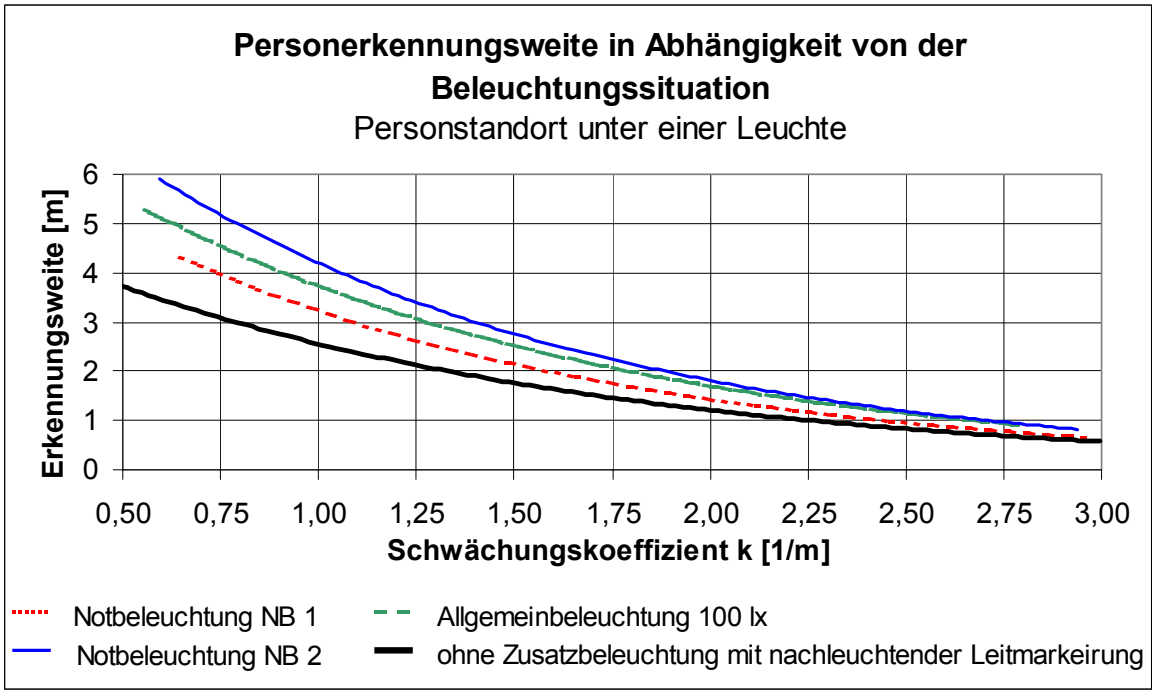



***Abbildung 63*** ***Erkennungsweiten von Personen in Abhängigkeit vom Schwächungskoeffizienten und der Beleuchtungssituation***

***Fazit:***

***Hohe Beleuchtungsniveaus besitzen aufgrund des hohen Streulichteintrags eher Nachteile gegenüber einer Notbeleuchtung. Die geringsten Erkennungsweiten werden mit einem nachleuchtenden Sicherheitsleitsystem erzielt.***

***Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Sicherheitsleitkonzepten werden mit zunehmendem Schwächungskoeffizienten geringer.***

### 4.2.3 Einfluss des Standortes

Die Personenerkennung ist bei Allgemeinbeleuchtung (100 lx) bei einem Standort der Person unter einer Leuchte oder zwischen den Leuchten annähernd gleich. Da das Streulicht im gesamten Gangbereich auf etwa gleichem Niveau wirkt, ist die Personenerkennung standortunabhängig.

Bei Notbeleuchtung existieren im Bereich der Notleuchten hingegen Areale mit hohem Streulichteintrag. In den Bereichen zwischen den Leuchten ist die Streubeeinträchtigung deutlich geringer. In den Untersuchungen zur Erkennungsweite bei Notbeleuchtung zeigte sich eine Ortsabhängigkeit. Diese ist um so

deutlicher, je größer die Unterschiede zwischen den hellen und dunklen Bereichen sind.

Personen, die sich aus Sicht des Beobachters vor einer Leuchte befanden, waren besser zu erkennen als Personen, die zwischen zwei Leuchten oder direkt unter einer Leuchte standen. Am schlechtesten konnten Personen hinter einer Leuchte in einem unbeleuchteten Areal erkannt werden (Abbildung 64). Die Unterschiede sind um so geringer je größer der Schwächungskoeffizient und damit die Sichttrübung ist.

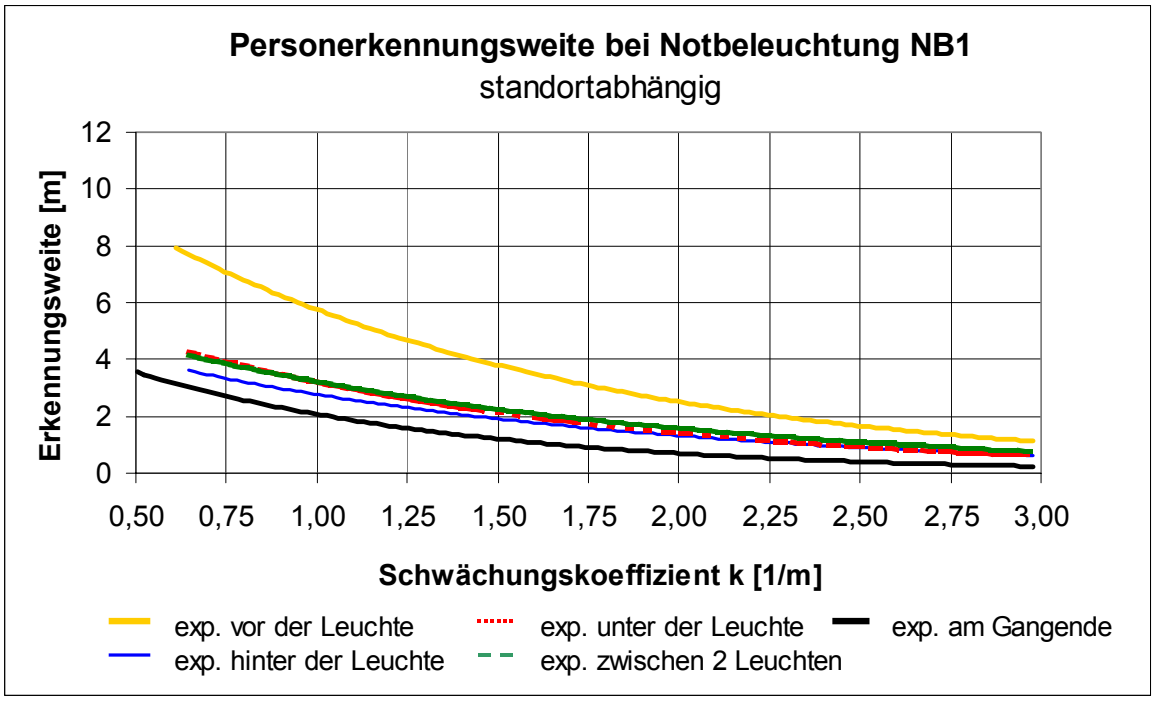



***Abbildung 64:*** ***Erkennungsweiten von Personen in Abhängigkeit vom Schwächungskoeffizienten und vom Standort***

Bei eindeutiger Fluchtrichtung kann dieser Effekt genutzt werden, um problematische Bereiche besser hervorzuheben.

In der Tabelle T15 sind bei verschiedenen Schwächungskoeffizienten die Erkennungsweiten für unterschiedliche Standorte der Person und Beleuchtungssituationen zusammengefasst.

| *Sicht-trübung* | *Erkennungsweite von Personen* | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **Standort der Person** | | | | | |
| | *vor einer Leuchte* | *unter einer Leuchte* | *hinter einer Leuchte* | *zwischen 2 Leuchten* | *nachl. Leit-markung* | *100 lx* |
| *gering* $k = 0{,}7\ m^{-1}$ | 5,0 m – 10,0 m | 4,5 m – 7,0 m | 3,0m – 5,5 m | 4,5 m – 6,0 m | 3,5 m | 4,5 m – 6,0 m |
| *mittel* $k = 1{,}4\ m^{-1}$ | 3,0 m – 4,0 m | 2,0 m – 2,5 m | 1,5 m – 2,0 m | 2,5m – 3m | 1,5 m | 2,5 m – 3,0 m |
| *hoch* $k = 2{,}3\ m^{-1}$ | 1,5 m - 2,5 m | 1,0 m – 1,5 m | 1 m | 1 m | 1,0 m | 1,5 m |
| *Beleuchtg.* | *Notbeleuchtung* | | | | *ohne* | *Allg.* |

***Tabelle T15:*** ***Erkennungsweiten von Personen in Abhängigkeit vom Standort, dem Schwächungskoeffizienten und der Beleuchtungssituation***

***Fazit:***

***Die Erkennbarkeit von Personen und Hindernissen ist bei Allgemeinbeleuchtung unabhängig und bei Notbeleuchtung abhängig vom Standort im Rettungsgang. Die beste Erkennung ist bei einem Standort vor einer Leuchte gegeben.***

***Indem unmittelbar hinter dem kritischen Bereich eine Aufhellung geschaffen wird, verbessern sich die Kontrastverhältnisse und damit die Sehbedingungen im Gefahrenbereich. Das bedeutet auch, dass ein zu großes und gleichmäßiges Beleuchtungsniveau vermieden werden sollte. Eine Absenkung des Beleuchtungsniveaus der Beleuchtungsanlage oder gezieltes Ausschalten bestimmter Leuchten im Rettungswegbereich kann die Sehbedingungen verbessern.***

## 4.3 Direktvergleich und Befragung

Die Ergebnisse der Auswertung der einzelnen Items der Fragebögen sind in Tabelle T16 und in den Diagrammen im *Anhang E - Fragebogenauswertung* zusammengefasst.

| **System** | | **Lichtspeicherndes Sicherheitsleitsystem** | **Elektrisch betriebenes Sicherheitsleitsystem** |
|---|---|---|---|
| **Systemkomponenten** | | Sicherheitszeichen und kontinuierliche Leitmarkierungen | Hinterleucht. Sicherheitszeichen und Wegebeleuchtung |
| **Item** | **k** | **System 1** | **System 2** |
| **1. Bewältigung des Rettungsweges** | gering | **+ +** | **+** |
| | mittel | **0** | **0** |
| | hoch | **0** | **-** |
| **2. Orientierung im Rettungsgang** | gering | **+ +** | **0** |
| | mittel | **+** | **0** |
| | hoch | **0** | **- -** |
| **3. Erkennbarkeit des Rettungsweges** | gering | **+ +** | **+** |
| | mittel | **+** | **0** |
| | hoch | **0** | **-** |
| **4. Personen und Hinderniserkennung** | gering | **+ +** | **++** |
| | mittel | **0** | **0** |
| | hoch | **-** | **-** |
| **5. Erkennbarkeit der Rettungswegkennzeichen** | gering | **+ +** | **+** |
| | mittel | **+** | **0** |
| | hoch | **0** | **-** |
| **6. Abstand der Rettungswegkennzeichen** | gering | **0** | **0** |
| | mittel | **0** | **-** |
| | hoch | **0** | **- -** |
| **7. Helligkeit der Fluchtwegbeleuchtung** | gering | **0** | **0** |
| | mittel | **0** | **0** |
| | hoch | **-** | **0** |
| **8. Sicherheitsgefühl** | gering | **+ +** | **0** |
| | mittel | **0** | **0** |
| | hoch | **0** | **- -** |
| **9. geschätzte Laufgeschwindigkeit** | gering | **+** | **+** |
| | mittel | **0** | **0** |
| | hoch | **-** | **-** |
| **10. mittlere Laufgeschwindigkeit, gemessen** | gering | **=** | |
| | mittel | **=** | |
| | hoch | **=** | |
| **11. Direktvergleich** | gering | **>>** | |
| | mittel | **>>** | |
| | hoch | **>>** | |

***Tabelle T16:*** ***Zusammenfassung der Bewertung durch 42 Probanden***

| | | | |
|---|---|---|---|
| ***++*** | ***sehr positive Bewertung*** | ***--*** | ***sehr negative Bewertung*** |
| ***+*** | ***positive Bewertung*** | ***-*** | ***negative Bewertung*** |
| ***0*** | ***neutrale Bewertung*** | | |
| ***=*** | ***gleichwertig*** | ***>>*** | ***deutlich besser / schlechter*** |

### 4.3.1 Gesamteinschätzung der Fluchtsituation

Das nachleuchtende Sicherheitsleitsystem (System 1; Abbildung 65) wird im Vergleich zum System Notbeleuchtung mit nicht bodennah hinterleuchteten Sicherheitszeichen (System 2) positiver bewertet.

***Abbildung 65: Nachleuchtendes Sicherheitsleitsystem mit kontinuierlicher Leitmarkierung***

Bereits bei geringer Sichttrübung ist der Unterschied höchst signifikant, bei großer Sichttrübung sehr signifikant. Die Abbildung 66 zeigt diesen Zusammenhang. Dargestellt sind in den Diagrammen die minimale und maximale Bewertung sowie der Median und die 25. und 75. Perzentile. Diese Werte ergaben sich aus der Bewertung aller 42 Probanden.

Die Ursachen für diese Einschätzung liegen im Orientierungsvermögen der Probanden im Rettungsgang (Abbildung 67). **Das nachleuchtende Leitsystem** wird mit höchster Signifikanz **für alle Sichttrübungen besser bewertet**.

Ein **kontinuierliches Leitsystem** bietet gerade bei schwierigen Sehbedingungen **Vorteile** gegenüber nicht kontinuierlichen Leitsystemen. Punktuell montierte Sicherheitszeichen verursachen Irritationen. Da aufgrund der geringen Erkennungsweiten der Sicherheitszeichen keine vorausschauende Orientierung mehr möglich ist, sind Suchaktionen oder das Übersehen von Sicherheitszeichen die Folge.

Bei schlechter Sicht erfolgt die Orientierung beim Laufen eher im Bodenbereich. Hier

müssen die Orientierungshinweise angeordnet sein. Über Kopf montierte Hinweisschilder erfordern von der fliehenden Person zusätzliche Blickbewegungen. Dies behindert eine zügige Evakuierung.

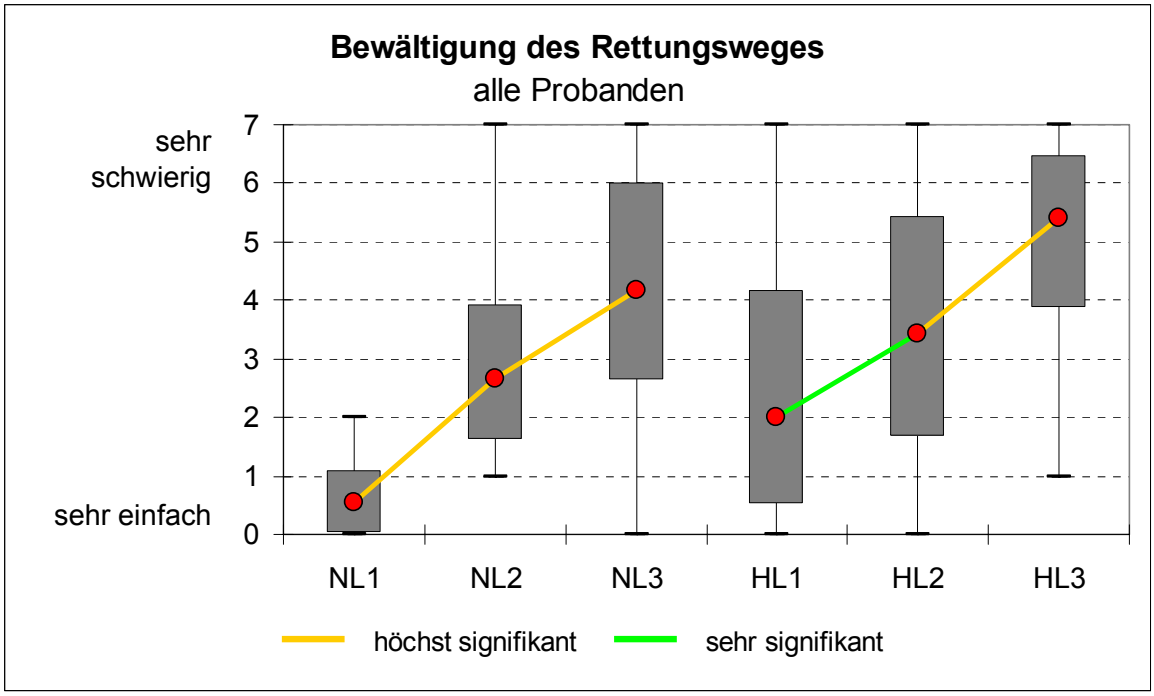



***Abbildung 66: Ergebnis der Befragung zur Bewertung der Fluchtsituation***

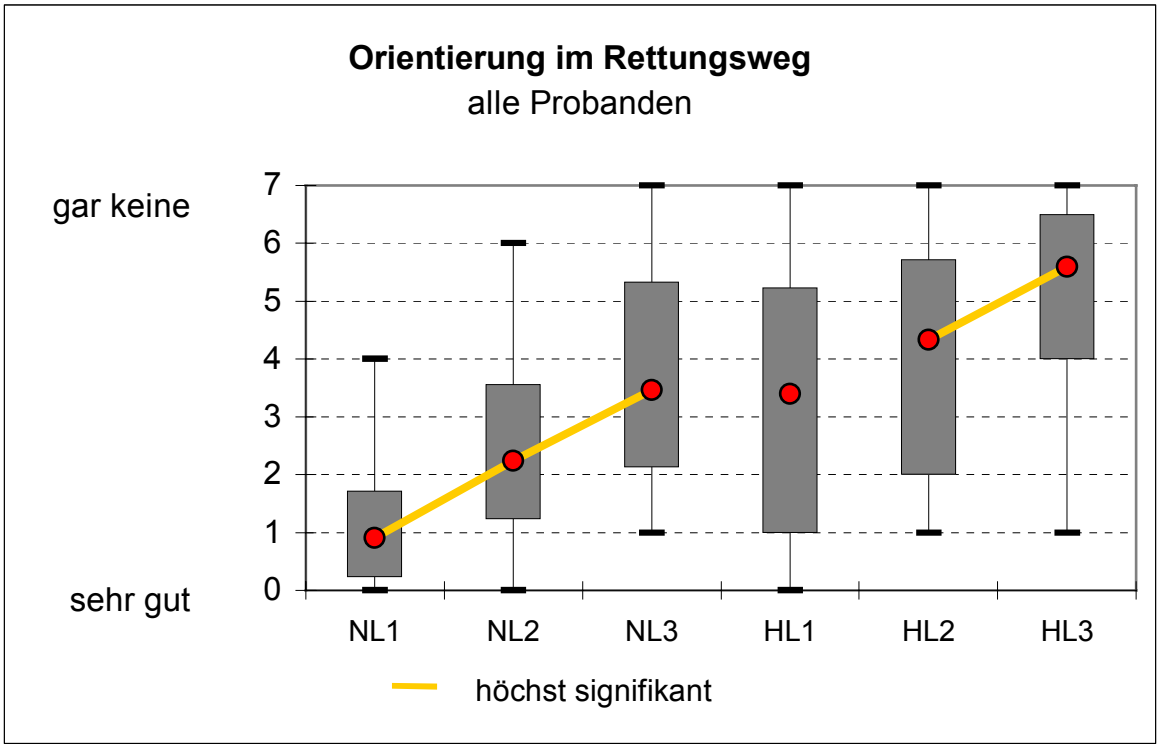



***Abbildung 67: Ergebnis der Befragung zur Bewertung des Orientierungsvermögens***

### 4.3.2 Orientierungsvermögen im Rettungsweg

**Leitmarkierungen unterstützen die Erkennbarkeit von räumlichen Dimensionen.**

Die **beidseitige Ausführung** der Leitmarkierungen in Gängen mit einer **Breite unter 2,5 m** erwies sich bei schwierigen Sehverhältnissen als sehr **sinnvoll**. Die Wände und der Bodenbereich bleiben selbst bei widrigen Sehbedingungen erahnbar und erleichtern damit die Orientierung im Rettungsweg. **Wiederkehrende Orientierungshilfen** in Form von Richtungspfeilen bestätigen immer wieder die Richtigkeit der Fluchtrichtung und vermitteln so Sicherheit.

Auffällig war bei der Untersuchung jedoch auch, dass die in die Leitstreifen **eingebrachten Richtungspfeile der Größe (70 x 70) zu klein** und damit zu wenig auffällig sind. Bei der Annäherung an die Zeichen kann nur die scheinbare Fläche gesehen werden. Eine Auflösung des Richtungspfeils als relevante Information erfolgte mehrheitlich nicht (Abbildung 68). Besser sichtbar waren bodennah integrierte Sicherheitszeichen der Größe (200 x 400).

***Abbildung 68:*** ***Nachleuchtendes Sicherheitszeichen im Vergleich zum in die Leitmarkierung integrierten Richtungspfeil***

Die **Erkennbarkeit von Personen und Hindernissen** verschlechtert sich mit zunehmendem Schwächungskoeffizienten.

Während das nachleuchtende Sicherheitsleitsystem aufgrund der schwachen Lichtemission bei größerer Sichttrübung den Rettungswegbereich nicht mehr aufzuhellen vermag und damit Personen und Hindernisse fast eher ertastet als erkannt werden, stellt sich die Situation bei Notbeleuchtung aufgrund des Streulichts ähnlich dar. Personen und Hindernisse werden kaum erkannt und zum Teil übersehen. Dies war für beide Systeme ähnlich und wurde bei großer Sichttrübung negativ bewertet (Abbildung 69).

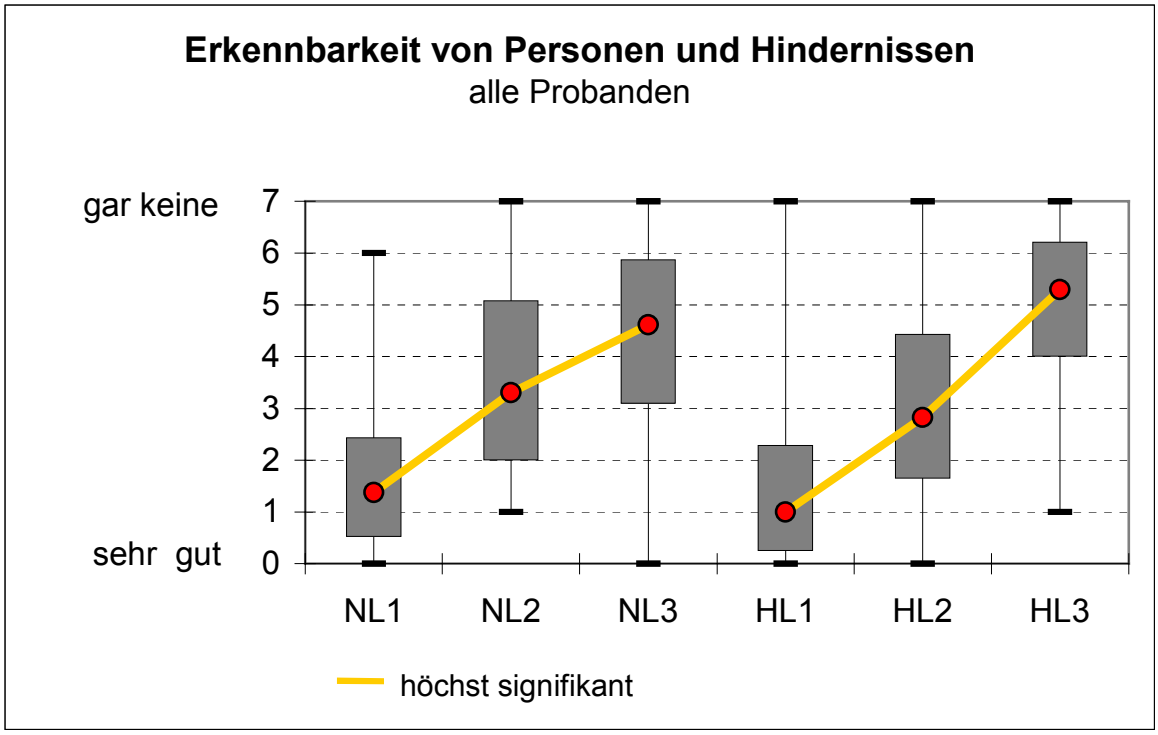



***Abbildung 69: Ergebnis der Befragung zur Erkennbarkeit von Personen und Hindernissen***

Die Erkennbarkeit der Sicherheitszeichen wurde für das nachleuchtende Sicherheitsleitsystem aufgrund der in kurzen Distanzen wiederkehrenden Orientierungspunkte bis hin zu mittleren Sichttrübungen positiv bewertet. Bei hohen Sichttrübungen bekam dieses System eine durchschnittliche Bewertung und erreicht damit die Grenzen der Nutzbarkeit. Das Sicherheitsleitsystem 2 wird durchweg höchst signifikant schlechter eingeschätzt. Die große Streubreite zwischen der 25. und 75. Perzentile bei geringer Sichttrübung zeigt deutlich, dass einige Probanden bereits bei diesen Sehbedingungen Orientierungsprobleme hatten. Noch deutlicher wird die Einschätzung für mittlere und hohe Sichttrübungen. Die Sicherheitszeichen konnten wegen der geringen Erkennungsweiten kaum erkannt werden.

Aufgrund dieser Tatsachen wird beim elektrisch betriebenen System der **Abstand zwischen den Sicherheitszeichen als deutlich zu groß eingeschätzt. Bei dem lichtspeichernden System wird der Abstand zwischen den Sicherheitszeichen mehrheitlich als genau richtig angegeben.** Die Probanden, die den Abstand als etwas zu groß einschätzten, sehen in der Einbindung größerer Schilder in die Leitstreifen einen Gewinn.

Die **Helligkeit im Rettungsweg** wurde von den Probanden **bei Notbeleuchtung** als **genau richtig** bewertet, selbst dann, wenn damit nicht immer eine Sichtverbesserung verbunden war. Das **lichtspeichernde System** wurde ab einer mittleren Sichttrübung als **zu dunkel** eingeschätzt.

Die Aussagen zur **Orientierungsproblematik** werden auch mit Hilfe der erfassten Fälle, in denen bei der Auffindung der Fluchtrichtung nach Verlassen des Probandenraumes Probleme auftraten oder der Rettungsausgang überlaufen wurde, bestätigt. Die Abbildung 70 zeigt, dass **Probleme nur bei dem nichtkontinuierlichen System** auftraten und das bereits bei einer geringen Sichttrübung. Die Abnahme der Fehlerhäufigkeit bei höherer Sichttrübung wird durch den Lerneffekt verursacht. Der Rettungsweg wurde nur mit dem System verändert, blieb jedoch für das gleiche System unverändert.

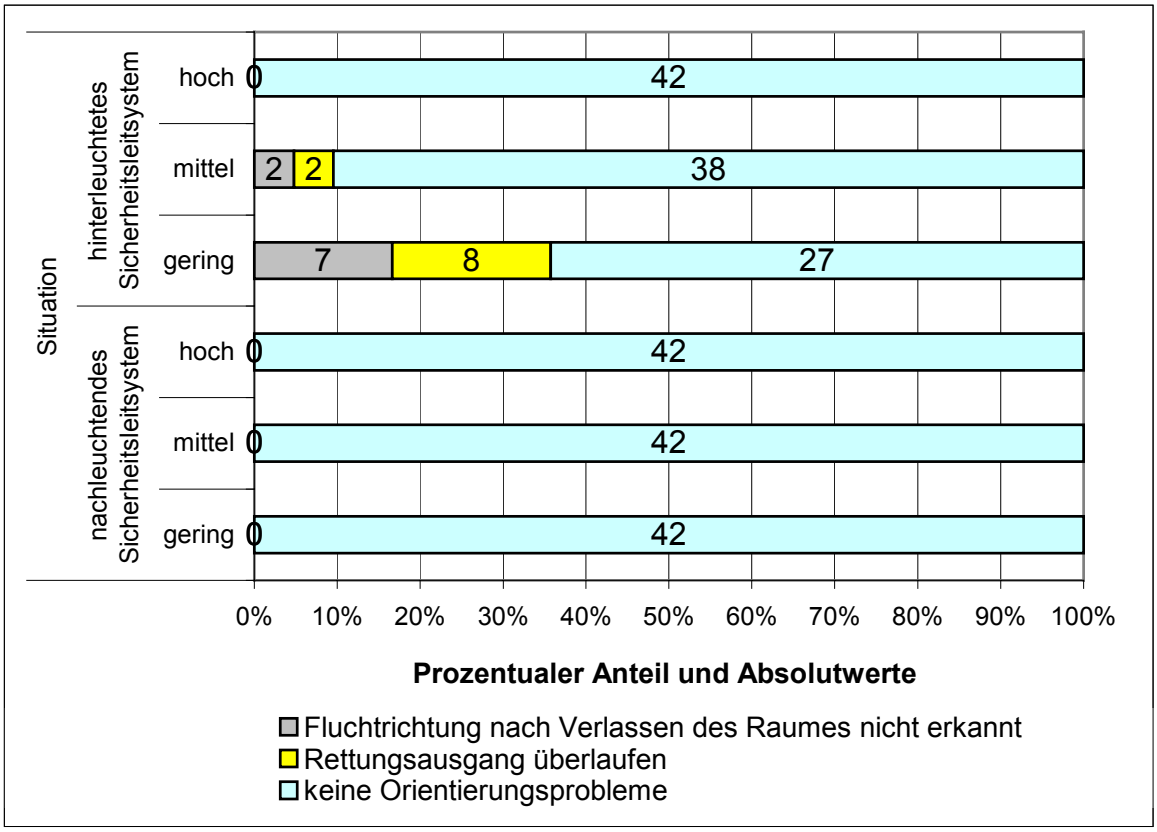



***Abbildung 70: Orientierungsprobleme im Rettungsweg***

**Kollisionen mit Hindernissen** traten **eher beim lichtspeichernden System** auf. Hier dürfte die geringe Umgebungshelligkeit ursächlich sein (Abbildung 71). Bei großer Sichttrübung unterscheiden sich beide Sicherheitsleitsysteme nicht.

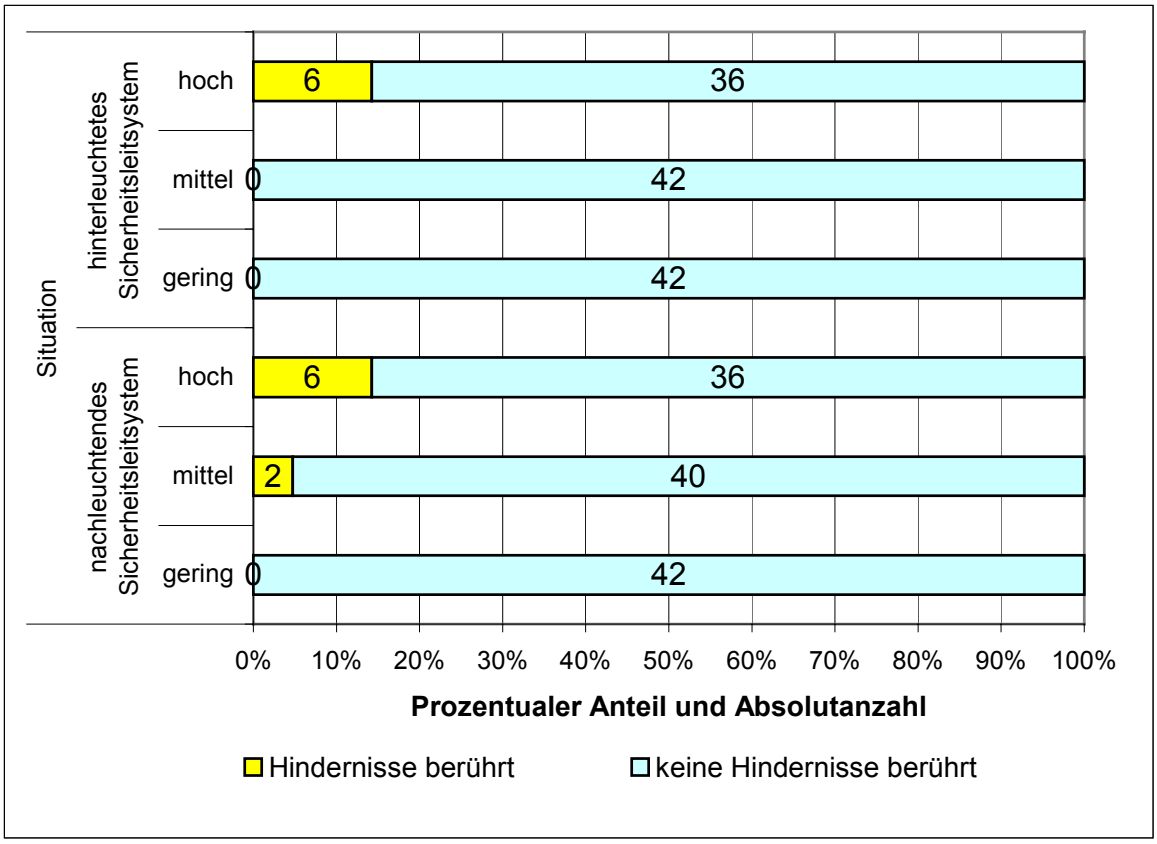



***Abbildung 71: Häufigkeit der Kollision mit Hindernissen im Rettungsgang***

### 4.3.3 Sicherheitsgefühl

Die Abbildung 72 zeigt, dass bei geringer Sichttrübung das **elektrisch betriebene System** hinsichtlich des Sicherheitsgefühls deutlich **negativer bewertet** wurde als das lichtspeichernde kontinuierliche System. Der Unterschied ist höchst signifikant. Im Kontext mit der Orientierungsproblematik bestätigt sich der Zusammenhang, dass sich die Probleme mit ansteigender Sichttrübung vergrößern und damit das Sicherheitsgefühl verloren geht. **Das lichtspeichernde Sicherheitsleitsystem vermittelt** trotz der geringeren Helligkeit in der Umgebung und den Problemen bei der Erkennung von Personen und Hindernissen durch die kontinuierliche Führung **ein größeres Sicherheitsgefühl**. Besonders Personen ohne Ortskenntnisse sind darauf angewiesen.

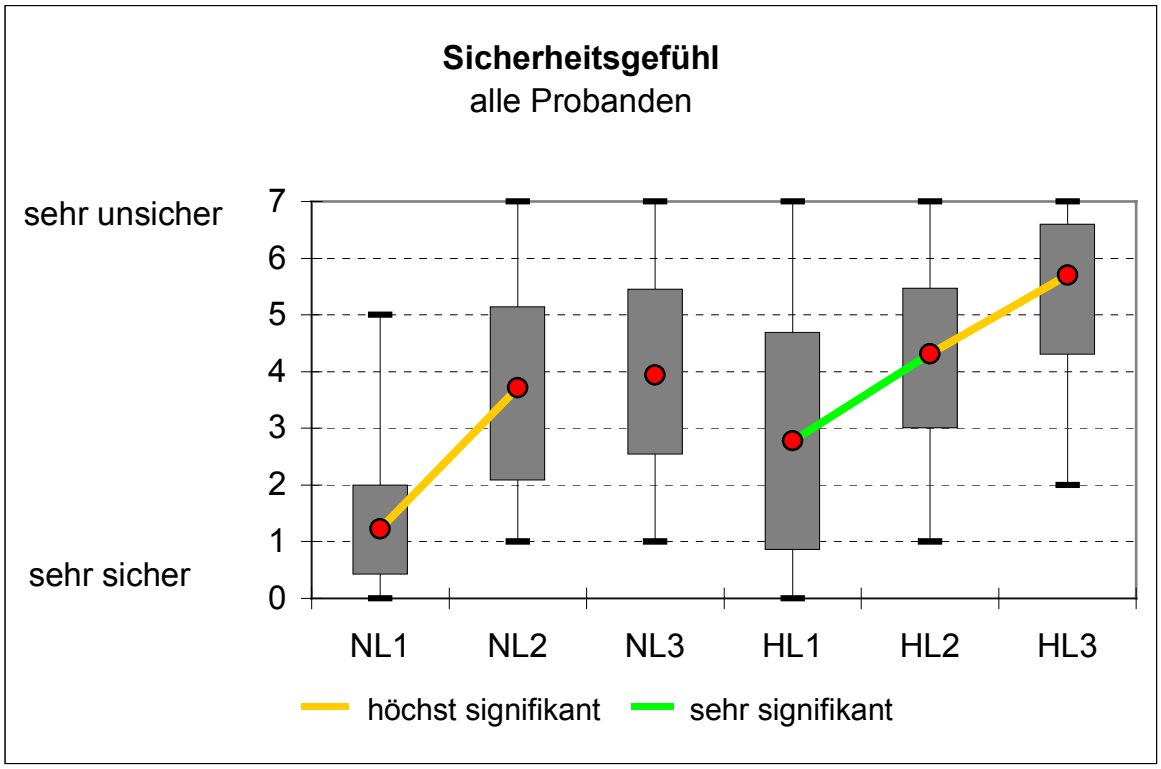



***Abbildung 72: Ergebnis der Befragung zur Bewertung des Sicherheitsgefühls***

Die Einschätzungen der **Laufgeschwindigkeit** im Rettungsweg weisen eine höchst signifikante **Abhängigkeit zur Sichttrübung** auf. Die Einschätzungen der Probanden sind für eine geringe und mittlere Sichttrübung für beide Systeme nahezu identisch. Bei großer Sichttrübung haben die Probanden im Mittel das Gefühl, schneller mit dem lichtspeichernden kontinuierlichen System den Rettungsweg bewältigen zu können. Die Einschätzungen zur Laufgeschwindigkeit decken sich mit den tatsächlichen Fluchtgeschwindigkeiten. Es zeigt sich ebenso der Zusammenhang zur Sichttrübung. Je größer die Sichttrübung ist, um so langsamer durchliefen die Probanden den Rettungsgang. Bei großer Sichttrübung waren die Probanden beim Sicherheitsleitsystem mit kontinuierlicher Leitfunktion höchst signifikant schneller.

### 4.3.4 Direktvergleich

Der Direktvergleich beider Systeme, bei dem die beiden Sicherheitsleitsysteme unmittelbar gegenüber gestellt wurden, zeigte durch die Probanden eine deutliche **Bevorzugung des kontinuierlichen lichtspeichernden Systems** gegenüber dem nicht kontinuierlichen elektrisch betriebenen System (Abbildung 73). Damit werden die Teilaussagen des Fragebogens zur Fluchtsituation bestätigt.

In Tabelle T17 sind die Vor- und Nachteile beider Sicherheitsleitsysteme, wie sie sich aus den Untersuchungen ergaben, zusammengefasst.

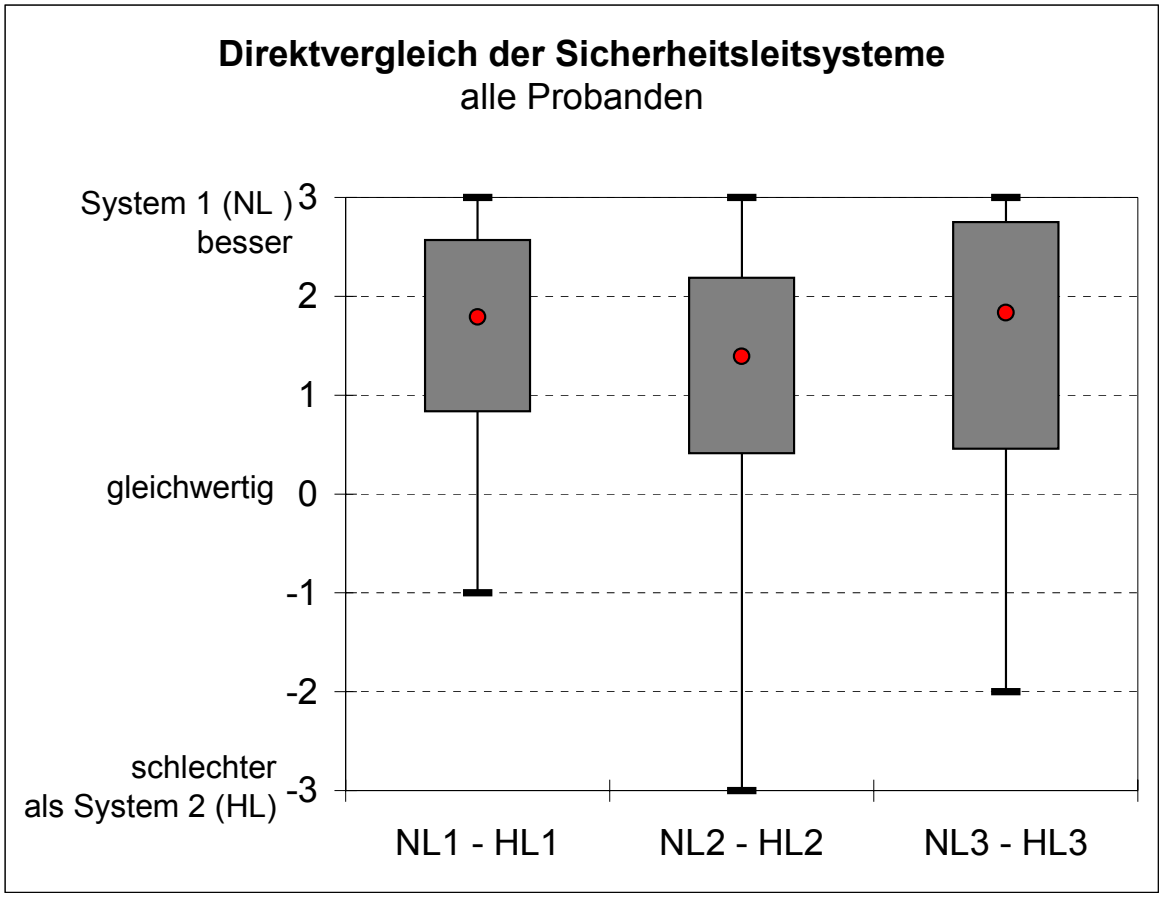



***Abbildung 73: Ergebnis der Befragung – Direktvergleich beider Systeme***

| System | Lichtspeicherndes Sicherheitsleitsystem<br>(Sicherheitskennzeichen und kontinuierliche Leitmarkierungen) | Elektrisch betriebenes Sicherheitsleitsystem<br>(hinterleuchtete Sicherheitskennzeichen und Wegebeleuchtung) |
|---|---|---|
| Vorteile | • kontinuierliche Leitfunktion<br>• geringer Abstand zwischen den Sicherheitskennzeichen<br>• bodennahe Informationen<br>• Vermittlung räumlicher Dimensionen<br>• kein Streulicht<br>• Netzunabhängigkeit | • größere Umgebungshelligkeit<br>• höhere absolute Erkennungsweiten der Sicherheitskennzeichen<br>• höhere Leuchtdichten<br>• statische lichttechnische Parameter<br>• Möglichkeit der dynamischen Ansteuerung |
| Nachteile | • geringe Umgebungshelligkeit<br>• Probleme bei der Erkennung von Personen und Hindernissen<br>• Abklingverhalten<br>• geringe Leuchtdichten | • fehlende kontinuierliche Leitfunktion<br>• Streulicht durch Zusatzbeleuchtung<br>• Probleme bei der Erkennung von Personen und Hindernissen<br>• zu große Distanz zwischen den Sicherheitskennzeichen<br>• fehlende bodennahe Informationen<br>• fehlender Raumeindruck<br>• erfordert Netz- oder Batteriebetrieb<br>• Wartungsaufwand |

***Tabelle T17: Vor- und Nachteile der Sicherheitsleitsysteme***

***Fazit:***

***Für eine sichere Evakuierung aus gefährdeten Bereichen sind beim Eindringen von Brandrauch in die Rettungswege kontinuierliche Leitsysteme unerlässlich. Eine bodennahe Montage ist sinnvoll. Besonders in Bereichen, die für Ortsunkundige zugänglich sind, sind solche Maßnahmen notwendig.***

***Lichtspeichernde Systeme besitzen aufgrund der Leitmarkierungen trotz geringer Umgebungshelligkeit Vorteile gegenüber nicht kontinuierlichen Systemen.***

# 5 Schlussfolgerungen und Zusammenfassung

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass Brandrauch die Erkennbarkeit von Sicherheitszeichen in Rettungswegen drastisch verschlechtert.

Obwohl hinterleuchtete Sicherheitszeichen im Vergleich zu nachleuchtenden Sicherheitszeichen absolut größere Erkennungsweiten erzielen, weist das elektrisch betriebene Sicherheitsleitsystem, bei dem hinterleuchtete Sicherheitszeichen entsprechend der Erkennungsweitendefinition gemäß BGR 216 montiert und mit Wegeleuchten auf Notbeleuchtungsniveau kombiniert werden, Probleme auf.

Bereits bei kleinen Schwächungskoeffizienten ($k = 0{,}7\ m^{-1}$) sinkt die Erkennungsweite auf 50% der Erkennbarkeitsentfernung gemäß BGR 216. Zusätzliche Beleuchtung im Rettungsgang mindert die Erkennbarkeitsentfernung darüber hinaus. Die Folge ist, dass fliehende Personen Wegstrecken ohne jegliche Orientierung zurück legen müssen. Dadurch werden Suchaktionen, Verunsicherungen, längere Fluchtzeiten oder das Übersehen der Sicherheitszeichen verursacht.

Kontinuierliche Leitmarkierungen haben deutlich Vorteile. Im Direktvergleich zwischen einem elektrischen Sicherheitsleitsystem und einem nachleuchtenden Sicherheitsleitsystem wurde das kontinuierliche nachleuchtende System ohne Zusatzbeleuchtung deutlich von den Probanden favorisiert.

***Fazit:***

***Nachleuchtende Sicherheitsleitsysteme in ihrem Konzept der Kombination von Sicherheitszeichen nicht bodennah montiert, wesentlich in rauchfreier Umgebung, mit Leitmarkierungen bodennah montiert, in die Sicherheitszeichen in kurzen Abständen integriert werden, sind für Brandsituationen einsetzbar, wenn bestimmte Rahmenbedingungen bei der Installation beachtet werden. Befindet sich zusätzlich Licht im Rettungsgang (Beleuchtung, Fensterbereiche) wird ihre Wirksamkeit gemindert.***

***Die Integration von sehr kleinen und feinstrukturierten Sicherheitszeichen in die Leitmarkierung ist in brandgefährdeten Bereichen nicht sinnvoll. Vielmehr sind große Sicherheitszeichen (200 x 400) einzusetzen. Unterbrechungen der Leitmarkierungen in Türbereichen sind durch Fortführen im Bodenbereich zu kennzeichnen. Unmarkierte Bereiche führen zu Irritationen.***

***Das bestehende Konzept elektrisch betriebener Sicherheitsleitsysteme weist in der derzeitigen Ausführung in verrauchten Bereichen Probleme auf. Es muss durch eine kontinuierliche Führung und bodennahe Sicherheitszeichen ergänzt werden.***

***Hinterleuchtete Sicherheitszeichen sind beleuchteten Sicherheitszeichen aufgrund ihrer besseren Erkennbarkeit in rauchgefährdeten Bereichen vor zuziehen, es sei denn, die beleuchteten Sicherheitszeichen sind mit einer gesonderten Beleuchtung, die das Sicherheitszeichen separat beleuchtet, versehen.***

***Da zusätzliche Beleuchtung die Sehbedingungen bei Brandrauch verschlechtert, ist es sinnvoll, das Beleuchtungsniveau im Bereich der betroffenen Rettungswegbereiche abzusenken.***

# 6 Thesen

***Aus den allgemeinen Betrachtungen folgen:***

- Rauchsituationen wirken sehr komplex.
- Bei Schwelbränden tritt im Vergleich zu Verbrennungen mit offener Flamme eine größere Lichtstreuung auf.
- Schwelbrände mit sehr hellem Brandrauch beeinflussen das Sehen aufgrund der starken Lichtstreuung stärker als Verbrennungen mit offener Flammenbildung und dunklem Rauch.
- Partikelgrößen von 1 µm - 5 µm sind typisch für Schwelbrände.
- Mit zunehmender Rauchdichte verringert sich die spektrale Transmission besonders in den langwelligeren Bereichen bei Schwelbränden.
- Die Streuung von Schwelbränden variiert in Abhängigkeit von der Wellenlänge. Im Bereich von 525 nm bis 550 nm ist die Streuung am geringsten. Sie nimmt bei kürzeren und längeren Wellenlängen zu.
- Schwächungskoeffizienten bis zu $k = 2{,}6\ m^{-1}$ sind für die Untersuchungen relevant. 70% der fliehenden Personen würden bei dieser Rauchdichte im Fluchtbereich umkehren. Aufgrund der Giftigkeit des Brandrauches sind die Überlebenschancen bei größeren Schwächungskoeffizienten sehr gering.
- Brandrauch beeinflusst die lichttechnischen Eigenschaften von Sehzeichen stark und verursacht durch Transmissionsverluste, Farbverschiebungen und Kontrastverflachung infolge Streulichtüberlagerung Sehverluste.
- Die Reizung der Augen mindert deutlich die Sehschärfe und senkt damit die Erkennungsweiten. Bei geringeren Kontrasten wirkt sich dies stärker aus als bei hohen Kontrasten.

***Aus den theoretischen Überlegungen folgen:***

- Hohe Rauchdichten wirken sich auf die Erkennung oder Identifikation von Zeichendetails nachteiliger aus als auf die Sichtbarkeit oder Detektion des Zeichens als Ganzes. Dieser Effekt nimmt mit wachsender Rauchdichte zu. Fein strukturierte Sicherheitszeichen sind daher bei Rauch unzweckmäßig.

- Das günstigste Beleuchtungsniveau in einem mit Rauch gefüllten Raum hängt von den Leuchtdichten der Sicherheitszeichen ab. Bei Sicherheitszeichen mit relativ niedrigen Zeichenleuchtdichten sind niedrigere Beleuchtungsniveaus günstiger. Entsprechend sind bei höheren Zeichenleuchtdichten höhere Beleuchtungsniveaus von Vorteil.

- Günstig sind im Allgemeinen geringe Hintergrundleuchtdichten und hohe Zeichenleuchtdichten. Zu hohe Zeichenleuchtdichten sind ungünstig, sie können Blendungs- und Streueffekte verursachen.

- Die Erzielung ausreichender Sichtweiten wird bei großen Rauchdichten entscheidend von der Ausdehnung der Zeichen bestimmt. Mindestwerte hängen von der Rauchdichte, der Zeichenleuchtdichte und der erforderlichen Sichtweite ab.

***Aus den praktischen Versuchen folgen:***

- Bereits bei geringer Rauchdichte nimmt die Erkennungsweite von Sicherheitszeichen gegenüber der optisch klaren Umgebung drastisch ab und sinkt exponentiell mit dem Anstieg des Schwächungskoeffizienten. Bei hinterleuchteten Sicherheitszeichen sinkt die Erkennungsweite auf 11 m bei geringer Sichttrübung. Das entspricht 50% der Erkennungsweite, die für das Sicherheitszeichen nach BGR 216 festgelegt wurde.
- Hinterleuchtete Sicherheitszeichen erzielen die größten Erkennungsweiten. Nachleuchtende Sicherheitszeichen können weniger gut erkannt werden. Die Systemunterschiede sind um so geringer je größer der Schwächungskoeffizient ist.

- Bei großen Schwächungskoeffizienten sinkt die Erkennungsweite von Sicherheitszeichen auf etwa 2 m. Orientierungspunkte sind in dieser Entfernung erforderlich, um eine kontinuierliche Orientierung zu ermöglichen.

- Der wirkungsvolle Einsatz nachleuchtender Materialien ist an Randbedingungen, wie die Beleuchtungssituation im Umfeld, gekoppelt.

- Die Zunahme der Umgebungshelligkeit bei Sichttrübung führt zur Abnahme der Erkennungsweiten gegenüber den Sehbedingungen ohne Zusatzbeleuchtung im Rettungsgang.

- Die Streulichtwirkung sollte im Gefahrenfalle minimiert werden. Eine Absenkung des Beleuchtungsniveaus erscheint sinnvoll.

- Die Erkennbarkeit hinterleuchteter Sicherheitszeichen ist bei Notbeleuchtung unabhängig vom Montageort gegenüber der Wegeleuchte.

- Beleuchtete Sicherheitszeichen sind bei Notbeleuchtung im geringen Abstand zur Lichtquelle am besten erkennbar.

- Bei separater Beleuchtung weisen beleuchtete Sicherheitszeichen bei doppelter Größe ähnliche Erkennungsweiten wie hinterleuchtete Rettungszeichen auf.

- Größere Sicherheitszeichen erzielen nur dann eine größere Erkennungsweite, wenn die Kontrastverhältnisse auf der Zeichenfläche zwischen Sicherheits- und Kontrastfarbe möglichst groß sind und gering schwanken. Höhere Anforderungen an die Gleichmäßigkeit sind für Sicherheitszeichen, die in Bereichen mit erhöhter Brandgefährdung zum Einsatz kommen, zu stellen.

- Die geforderte mittlere Leuchtdichte von 200 cd/m² ist ein sinnvoller Wert für hinterleuchtete Sicherheitszeichen, die in brandgefährdeten Bereichen zum Einsatz kommen.

- Bis hin zu einem Schwächungskoeffizienten von k = 2,0 $m^{-1}$ liegen die Erkennungsweiten nachleuchtender Sicherheitszeichen über 2 m. Wenn nachleuchtende Sicherheitszeichen in kontinuierliche Leitmarkierungen integriert sind, können die erzielten Erkennungsweiten bis zu mittleren Sichttrübungen als ausreichend angesehen werden.

- Hohe Sichttrübungen stellen für nachleuchtende Sicherheitszeichen Grenzbereiche dar. Es ist auf den Einsatz leistungsstarker Materialien und optimale Anregungs- und Montagebedingungen zu achten.

- Die Wahrnehmung der Sicherheitsfarbe ist bei Sichttrübung aufgrund der Streulichtüberlagerung herabgesetzt. Das sich überlagernde Streulicht bewirkt eine Veränderung der Sicherheitsfarbe. Der Farbort der Sicherheitsfarbe verschiebt sich in Richtung Unbunt.

- Die Farbinformation wird in der Regel nach der relevanten Fluchtrichtung erkannt.

- Bei hinterleuchteten Sicherheitszeichen ist die Farbwahrnehmung deutlich besser als bei beleuchteten Sicherheitszeichen.

- Die Erkennbarkeit der Sicherheitsfarbe spielt bei Sichttrübung eine untergeordnete Rolle.

- Die Dynamisierung der Sicherheitszeichen durch Blinken von Signal- oder Kontrastfarbe brachte kaum Vorteile für die Erkennbarkeit der Sicherheitszeichen.

- Brandrauch verringert die Erkennbarkeit von Personen und Hindernissen deutlich. Die Erkennungsweite sinkt beim Anstieg des Schwächungskoeffizienten exponentiell.

- Hindernisse im Fluchtbereich werden erst unmittelbar vor dem Auftreffen erkannt und erzwingen eine Blickorientierung der fliehenden Person auf das unmittelbare Umfeld und in den Bodenbereich.

- Orientierungspunkte und Sicherheitszeichen müssen auch bodennah montiert sein.

- Hohe Beleuchtungsniveaus besitzen aufgrund des hohen Streulichteintrags eher Nachteile gegenüber einer Notbeleuchtung. Die geringsten Erkennungsweiten werden mit einem nachleuchtenden Sicherheitsleitsystem erzielt. Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Sicherheitsleitkonzepten werden mit zunehmender Sichttrübung geringer.

- Die Erkennbarkeit von Personen und Hindernissen ist bei Allgemeinbeleuchtung unabhängig von ihrem Standort.

- Bei Notbeleuchtung ist die Erkennbarkeit von Personen und Hindernissen abhängig vom Standort im Rettungsgang. Die beste Erkennung ist bei einem Standort vor einer Leuchte gegeben.

- Indem unmittelbar hinter dem kritischen Bereich eine Aufhellung geschaffen wird, verbessern sich die Kontrastverhältnisse und damit die Sehbedingungen im Gefahrenbereich. Das bedeutet auch, dass ein zu großes und gleichmäßiges Beleuchtungsniveau vermieden werden sollte. Eine Absenkung des Beleuchtungsniveaus der Beleuchtungsanlage oder gezieltes Ausschalten bestimmter Leuchten im Fluchtwegbereich kann die Sehbedingungen im Rettungsweg verbessern.

- Für eine sichere Evakuierung aus gefährdeten Bereichen sind beim Eindringen von Brandrauch in die Rettungswege kontinuierliche Leitsysteme unerlässlich. Eine bodennahe Montage ist sinnvoll. Besonders in Bereichen, die für Ortsunkundige zugänglich sind, sind solche Maßnahmen notwendig.

- Lichtspeichernde Systeme besitzen aufgrund der Leitmarkierungen trotz geringer Umgebungshelligkeit Vorteile gegenüber nicht kontinuierlichen elektrischen Systemen in der derzeitigen Ausführung.

***Fazit:***

***Nachleuchtende Sicherheitsleitsysteme in ihrem Konzept der Kombination von Sicherheitszeichen nicht bodennah montiert, mit Leitmarkierungen bodennah montiert, in die Sicherheitszeichen in kurzen Abständen integriert werden, sind für Brandsituationen einsetzbar, wenn bestimmte Rahmenbedingungen bei der Installation beachtet werden. Befindet sich zusätzlich Licht im Rettungsgang (Beleuchtung, Fensterbereiche) wird ihre Wirksamkeit gemindert.***

***Das bestehende Konzept elektrisch betriebener Sicherheitsleitsysteme muss durch eine kontinuierliche Führung und bodennahe Sicherheitszeichen ergänzt werden. Hinterleuchtete Sicherheitszeichen sind beleuchteten Sicherheitszeichen aufgrund ihrer besseren Erkennbarkeit vorzuziehen.***

# Literaturverzeichnis


| | |
|---|---|
| Baer: *Beleuchtungstechnik - Grundlagen.* Verlag Technik Berlin, 2. Auflage, 1996 | 11; 29; 37 |
| Bankston, C.P. et all: *Aspects of the mechanisms of smoke generation by burning materials.* Combustion and Flame. No. 41, 1981 | 31 |
| BGR 216 Optische Sicherheitsleitsysteme, HVBG, 2001 | 1 |
| Bieske, K.; Rohleder St.: *Untersuchung des Einflusses von Reizung der Augen auf die Sehschärfe.* TU Ilmenau, FH Jena, 2002 | 37 - 39 |
| Bodmann, H.W.: Gerthsen, P., *Strahlungstransport in stark streuenden Medien als Diffusionsvorgang.* OPTICA ACTA, Vol.22, No.3, 1975 | 7 |
| Boyce, P. R.; Cibse, M.: *Movement under emergency lighting: effect of illuminance.* Zts. Lighting Research & Technology, Vol. 17 No. 2, 1985 | 1 |
| Bühl, A.; Zöfel P.: *SpSS Version 10.0.* Addison-Wesley, 7. Auflage, München, 2000 | 60 |
| DIN EN 1838 *Notbeleuchtung*, 1999 | 1, 56 |
| DIN 67510 Teil 1 *Nachleuchtende Pigmente und Produkte*, 2002 | 44 |
| Ehreneiser, W.; Kokoschka, S.; Weis, B.: *Untersuchung der Sichtbarkeit von Sicherheitszeichen für Rettungswege.* Zts. Licht 45. Jhg., Nr. 3, 1993, Sonderdruck | 1; 62 |
| Gall, D. ea: *Einzelplatzbeleuchtung und Allgemeinbeleuchtung am Arbeitsplatz.* Schriftreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz Fb 753, Wirtschaftsverlag NM Bremerhaven, 1996 | 59 |
| Hagebölling, D.: *Taschenbuch Betrieblicher Brandschutz.* Vulkan-Verlag Essen, 1999 | 28 |
| Heimsath, W.; Herzog, K.; Noth, J.P.: *Anwendung von Reflexstoffen zur Verkehrsicherheit.* Verkehrsblatt-Verlag Best. Nr. 3092 | 53 |
| Herstellerangaben Martin professional , Karlsfeld | 48 |
| Hoffmann, M.; Seydel U.: *Visuelle Gestaltung unter erschwerten Bedingungen.* Medienprojekt. TU Ilmenau, 2002 | 48 - 49; 74 |
| Jensen, G.: *Evacuating in Smoke.* IGP AS - Studie, Trondheim (Norwegen), 1993 | 29 |

Jin, T.: *Decrease of smoke density, Part 1, decrease of smoldering smoke with time.* Report of Fire Research Institut of Japan serial No. 40, 1975 — 30; 31; 32

Jin, T.: *Visibility through Fire Smoke, Part 2, Visibility of monochromatic signs through fire smoke.* Report of Fire Research Institute of Japan Serial No. 33, 1971 — 21, 28; 30 32

Kokoschka, S.: *Zur Berechnung von Schwellenkontrasten für die Detektion einfacher Sehobjekte.* Zts. Licht, Nr. 4, 1988, S. 305-308 — 14

Langer, R.: *Neue Berufsgenossenschafliche Regel (BGR 216) regelt den Einsatz von optischen Sicherheitsleitsystemen.* Zts. Licht 54. Jhg. Nr. 1-2, 2002, S. 74 — 40

Lühe, A.; Strauß, St.: *Spektrale Raucheigenschaften.* Projektarbeit, TU Ilmenau, 2002 — 32 - 35

Mulholland, G.W.: *How well are we measuring smoke?.* Zts. Fire and Materials Vol. 6 No. 2, 1962 — 31

Rüschenschmidt, H.; Reidt: *Licht, Gesundheit, Arbeitsschutz.* Verlag Technik und Information. 4. Auflage, 2002 — 40

Produktinformation Ever Glow HI® 300 / Permalight — 44

Produktinformation Honeywell LUMILUX® Grün SN-F2 9 / 99 — 44

Vandahl, C.: *Zur Festlegung von Gütemerkmalen der Einzelplatzbeleuchtung.* Dissertation TU Ilmenau,1999 — 59

Völker, St.: *Eignung von Methoden zur Ermittlung eines notwendigen Beleuchtungsniveaus.* Dissertation TU Ilmenau,1999 — 59

Weis, B.: *Notbeleuchtung.* Zts. Licht 38. Jhg. Nr. 6, 1987, Sonderdruck — 1; 62

Weis, B.; Terstiege, H.; Willing, A.: *Notbeleuchtung kontra langnachleuchtende Farbe.* Zts. Licht 46. Jhg. Nr. 1,1994, Sonderdruck — 1; 62

# Anhang A

## Fragebogen 1

*Proband : X*

## Angaben zur Person

**1.1 Wie alt sind Sie?**

*alter:*

---------- Jahre

**1.2 Geschlecht**

*gesch:*

O weiblich O männlich

**1.3 Tragen Sie eine Brille bzw. Kontaktlinsen?**

*sehhilfe:*

O ja O nein

wenn ja, sind Sie O kurzsichtig

O weitsichtig

O Gleitsichtbrille

**1.4 Sind Sie farbfehlsichtig?**

*farbseh:*

O ja O nein

**1.5 Wie schätzen Sie Ihr Sehen bei Dunkelheit ein?**

*dunkelseh:*

sehr gut OOO|OOO|OOO|OOO|OOO|OOO|OOO|OOO gar nicht

*0 1 2 3 4 5 6 7*

**1.6 Wie empfindlich sind Sie gegen Blendung?**

*blendemp:*

sehr empfindlich OOO|OOO|OOO|OOO|OOO|OOO|OOO|OOO unempfindlich

*7 6 5 4 3 2 1 0*

*lkkennt:*
*Lichttechnische Kenntnisse*
*0: keine*
*1: vorhanden*

*erfahrg:*
*Teilnahme an bisherigen Untersuchungen*
*0: 0 x bisher im Rettungsgang*
*1: 1 x bisher im Rettungsgang*
2: *häufiger im Rettungsgang*

Datum:_____ Probandenkennzahl: _____

# Anhang A

## Fragebogen 2 - 1

*Proband : X*

*Nachleuchtendes Sicherheitsleitsystem, bei Dunkelheit und geringer Sichttrübung*

## Bewertung der Fluchtsituationen

**2.1 Wie konnten Sie den Rettungsweg bewältigen?**

*nl1brw:*

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| sehr einfach | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | sehr schwierig |
| | *0* | *1* | *2* | *3* | *4* | *5* | *6* | *7* | |

**2.2 Wie war Ihre Orientierung im Fluchtweg?**

*nl1orw:*

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| gar nicht | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | sehr gut |
| | *7* | *6* | *5* | *4* | *3* | *2* | *1* | *0* | |

**2.3 Wie konnten Sie den Fluchtweg erkennen?**

*nl1rwe:*

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| sehr gut | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | gar nicht |
| | *0* | *1* | *2* | *3* | *4* | *5* | *6* | *7* | |

**2.4 Wie wurden von Ihnen Personen und Hindernisse wahrgenommen?**

*nl1phe:*

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| gar nicht | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | sehr gut |
| | *7* | *6* | *5* | *4* | *3* | *2* | *1* | *0* | |

**2.5 Wie war die Erkennung der Rettungswegkennzeichen?**

*nl1rwke:*

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| sehr gut | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | gar nicht |
| | *0* | *1* | *2* | *3* | *4* | *5* | *6* | *7* | |

**2.6 Wie war der Abstand zwischen den Rettungswegkennzeichen?**

*nl1arwk:*

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| zu gering | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | zu groß |
| | *0* | *1* | *2* | *3* | *4* | *5* | *6* | *7* | |

**2.7 Wie bewerten Sie die Helligkeit der Fluchtwegbeleuchtung?**

*nl1hell:*

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| zu hell | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | zu dunkel |
| | *0* | *1* | *2* | *3* | *4* | *5* | *6* | *7* | |

**2.8 Fühlten Sie sich auf dem Fluchtweg sicher?**

*nl1sich:*

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| sehr unsicher | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | sehr sicher |
| | *7* | *6* | *5* | *4* | *3* | *2* | *1* | *0* | |

**2.9 Wie schnell konnten Sie den Rettungsweg zurücklegen?**

*nl1gesch:*

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| sehr langsam | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | sehr schnell |
| | *7* | *6* | *5* | *4* | *3* | *2* | *1* | *0* | |

*nl1od:*
*Schwächungskoeffizient [$m^{-1}$]*

*nl1lg:*
*Laufgeschwindigkeit [s]*

# Anhang A

## Fragebogen 2 - 2

*Proband : X*

*Hinterleuchtetes Sicherheitsleitsystem, bei Notbeleuchtung und geringer Sichttrübung*

## Bewertung der Fluchtsituationen

**2.1 Wie konnten Sie den Rettungsweg bewältigen?**

*hl1brw:*

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| sehr einfach | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | sehr schwierig |
| | *0* | *1* | *2* | *3* | *4* | *5* | *6* | *7* | |

**2.2 Wie war Ihre Orientierung im Fluchtweg?**

*hl1orw:*

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| gar nicht | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | sehr gut |
| | *7* | *6* | *5* | *4* | *3* | *2* | *1* | *0* | |

**2.3 Wie konnten Sie den Fluchtweg erkennen?**

*hl1rwe:*

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| sehr gut | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | gar nicht |
| | *0* | *1* | *2* | *3* | *4* | *5* | *6* | *7* | |

**2.4 Wie wurden von Ihnen Personen und Hindernisse wahrgenommen?**

*hl1phe:*

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| gar nicht | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | sehr gut |
| | *7* | *6* | *5* | *4* | *3* | *2* | *1* | *0* | |

**2.5 Wie war die Erkennung der Rettungswegkennzeichen?**

*hl1rwke:*

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| sehr gut | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | gar nicht |
| | *0* | *1* | *2* | *3* | *4* | *5* | *6* | *7* | |

**2.6 Wie war der Abstand zwischen den Rettungswegkennzeichen?**

*hl1arwk:*

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| zu gering | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | zu groß |
| | *0* | *1* | *2* | *3* | *4* | *5* | *6* | *7* | |

**2.7 Wie bewerten Sie die Helligkeit der Fluchtwegbeleuchtung?**

*hl1hell:*

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| zu hell | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | zu dunkel |
| | *0* | *1* | *2* | *3* | *4* | *5* | *6* | *7* | |

**2.8 Fühlten Sie sich auf dem Fluchtweg sicher?**

*hl1sich:*

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| sehr unsicher | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | sehr sicher |
| | *7* | *6* | *5* | *4* | *3* | *2* | *1* | *0* | |

**2.9 Wie schnell konnten Sie den Rettungsweg zurücklegen?**

*hl1gesch:*

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| sehr langsam | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | sehr schnell |
| | *7* | *6* | *5* | *4* | *3* | *2* | *1* | *0* | |

*hl1od:*
*Schwächungskoeffizient [$m^{-1}$]*

*hl1lg:*
*Laufgeschwindigkeit [s]*

# Anhang A

## Fragebogen 3 – 1

*Proband : X*

## Vergleich der Fluchtsituationen

*Systemvergleich bei geringer Sichttrübung*

**3.1 Wie bewerten Sie das Rettungswegsystem 1 (bei Dunkelheit, nachleuchtendes Material, mit Randstreifen) im Vergleich zum Rettungswegsystem 2 (Notleuchten und Rettungswegleuchte)?**

**Das Rettungswegsystem 1 (bei Dunkelheit, nachleuchtendes Material, mit Randstreifen) ist:**

*nlhl1:*

| sehr viel besser | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | sehr viel schlechter |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | *-3* | *-2* | *-1* | *0* | *+1* | *+2* | *+3* | |

↑ gleichwertig

**Nachteile/ Vorteile**

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

# Anhang A

## Fragebogen 2 - 3

*Proband : X*

*Nachleuchtendes Sicherheitsleitsystem, bei Dunkelheit und mittlerer Sichttrübung*

## Bewertung der Fluchtsituationen

**2.1 Wie konnten Sie den Rettungsweg bewältigen?**

*nl2brw:*

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| sehr einfach | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | sehr schwierig |
| | *0* | *1* | *2* | *3* | *4* | *5* | *6* | *7* | |

**2.2 Wie war Ihre Orientierung im Fluchtweg?**

*nl2orw:*

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| gar nicht | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | sehr gut |
| | *7* | *6* | *5* | *4* | *3* | *2* | *1* | *0* | |

**2.3 Wie konnten Sie den Fluchtweg erkennen?**

*nl2rwe:*

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| sehr gut | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | gar nicht |
| | *0* | *1* | *2* | *3* | *4* | *5* | *6* | *7* | |

**2.4 Wie wurden von Ihnen Personen und Hindernisse wahrgenommen?**

*nl2phe:*

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| gar nicht | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | sehr gut |
| | *7* | *6* | *5* | *4* | *3* | *2* | *1* | *0* | |

**2.5 Wie war die Erkennung der Rettungswegkennzeichen?**

*nl2rwke:*

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| sehr gut | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | gar nicht |
| | *0* | *1* | *2* | *3* | *4* | *5* | *6* | *7* | |

**2.6 Wie war der Abstand zwischen den Rettungswegkennzeichen?**

*nl2arwk:*

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| zu gering | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | zu groß |
| | *0* | *1* | *2* | *3* | *4* | *5* | *6* | *7* | |

**2.7 Wie bewerten Sie die Helligkeit der Fluchtwegbeleuchtung?**

*nl2hell:*

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| zu hell | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | zu dunkel |
| | *0* | *1* | *2* | *3* | *4* | *5* | *6* | *7* | |

**2.8 Fühlten Sie sich auf dem Fluchtweg sicher?**

*nl2sich:*

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| sehr unsicher | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | sehr sicher |
| | *7* | *6* | *5* | *4* | *3* | *2* | *1* | *0* | |

**2.9 Wie schnell konnten Sie den Rettungsweg zurücklegen?**

*nl2gesch:*

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| sehr langsam | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | sehr schnell |
| | *7* | *6* | *5* | *4* | *3* | *2* | *1* | *0* | |

*nl2od:*
*Schwächungskoeffizient [$m^{-1}$]*

*nl2lg:*
*Laufgeschwindigkeit [s]*

# Anhang A

## Fragebogen 2 - 4

*Proband : X*

*Hinterleuchtetes Sicherheitsleitsystem, bei Notbeleuchtung und mittlerer Sichttrübung*

## Bewertung der Fluchtsituationen

**2.1 Wie konnten Sie den Rettungsweg bewältigen?**

*hl2brw:*

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| sehr einfach | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | sehr schwierig |
| | *0* | *1* | *2* | *3* | *4* | *5* | *6* | *7* | |

**2.2 Wie war Ihre Orientierung im Fluchtweg?**

*hl2orw:*

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| gar nicht | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | sehr gut |
| | *7* | *6* | *5* | *4* | *3* | *2* | *1* | *0* | |

**2.3 Wie konnten Sie den Fluchtweg erkennen?**

*hl2rwe:*

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| sehr gut | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | gar nicht |
| | *0* | *1* | *2* | *3* | *4* | *5* | *6* | *7* | |

**2.4 Wie wurden von Ihnen Personen und Hindernisse wahrgenommen?**

*hl2phe:*

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| gar nicht | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | sehr gut |
| | *7* | *6* | *5* | *4* | *3* | *2* | *1* | *0* | |

**2.5 Wie war die Erkennung der Rettungswegkennzeichen?**

*hl2rwke:*

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| sehr gut | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | gar nicht |
| | *0* | *1* | *2* | *3* | *4* | *5* | *6* | *7* | |

**2.6 Wie war der Abstand zwischen den Rettungswegkennzeichen?**

*hl2arwk:*

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| zu gering | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | zu groß |
| | *0* | *1* | *2* | *3* | *4* | *5* | *6* | *7* | |

**2.7 Wie bewerten Sie die Helligkeit der Fluchtwegbeleuchtung?**

*hl2hell:*

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| zu hell | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | zu dunkel |
| | *0* | *1* | *2* | *3* | *4* | *5* | *6* | *7* | |

**2.8 Fühlten Sie sich auf dem Fluchtweg sicher?**

*hl2sich:*

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| sehr unsicher | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | sehr sicher |
| | *7* | *6* | *5* | *4* | *3* | *2* | *1* | *0* | |

**2.9 Wie schnell konnten Sie den Rettungsweg zurücklegen?**

*hl2gesch:*

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| sehr langsam | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | sehr schnell |
| | *7* | *6* | *5* | *4* | *3* | *2* | *1* | *0* | |

*hl2od:*
*Schwächungskoeffizient [$m^{-1}$]*

*hl2lg:*
*Laufgeschwindigkeit [s]*

# Anhang A

## Fragebogen 3 – 2

*Proband : X*

## Vergleich der Fluchtsituationen

*Systemvergleich bei mittlerer Sichttrübung*

**3.2 Wie bewerten Sie das Rettungswegsystem 1 (bei Dunkelheit, nachleuchtendes Material, mit Randstreifen) im Vergleich zum Rettungswegsystem 2 (Notleuchten und Rettungswegleuchte)?**

**Das Rettungswegsystem 1 (bei Dunkelheit, nachleuchtendes Material, mit Randstreifen) ist:**

*nlhl 2:*

| sehr viel besser | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | sehr viel schlechter |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | *-3* | *-2* | *-1* | *0* | *+1* | *+2* | *+3* | |

↑
gleichwertig

**Nachteile/ Vorteile**

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

# Anhang A

## Fragebogen 2 - 5

*Proband : X*

*Nachleuchtendes Sicherheitsleitsystem, bei Dunkelheit und hoher Sichttrübung*

## Bewertung der Fluchtsituationen

**2.1 Wie konnten Sie den Rettungsweg bewältigen?**

*nl3brw:*

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| sehr einfach | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | sehr schwierig |
| | *0* | *1* | *2* | *3* | *4* | *5* | *6* | *7* | |

**2.2 Wie war Ihre Orientierung im Fluchtweg?**

*nl3orw:*

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| gar nicht | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | sehr gut |
| | *7* | *6* | *5* | *4* | *3* | *2* | *1* | *0* | |

**2.3 Wie konnten Sie den Fluchtweg erkennen?**

*nl3rwe:*

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| sehr gut | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | gar nicht |
| | *0* | *1* | *2* | *3* | *4* | *5* | *6* | *7* | |

**2.4 Wie wurden von Ihnen Personen und Hindernisse wahrgenommen?**

*nl3phe:*

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| gar nicht | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | sehr gut |
| | *7* | *6* | *5* | *4* | *3* | *2* | *1* | *0* | |

**2.5 Wie war die Erkennung der Rettungswegkennzeichen?**

*nl3rwke:*

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| sehr gut | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | gar nicht |
| | *0* | *1* | *2* | *3* | *4* | *5* | *6* | *7* | |

**2.6 Wie war der Abstand zwischen den Rettungswegkennzeichen?**

*nl3arwk:*

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| zu gering | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | zu groß |
| | *0* | *1* | *2* | *3* | *4* | *5* | *6* | *7* | |

**2.7 Wie bewerten Sie die Helligkeit der Fluchtwegbeleuchtung?**

*nl3hell:*

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| zu hell | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | zu dunkel |
| | *0* | *1* | *2* | *3* | *4* | *5* | *6* | *7* | |

**2.8 Fühlten Sie sich auf dem Fluchtweg sicher?**

*nl3sich:*

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| sehr unsicher | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | sehr sicher |
| | *7* | *6* | *5* | *4* | *3* | *2* | *1* | *0* | |

**2.9 Wie schnell konnten Sie den Rettungsweg zurücklegen?**

*nl3gesch:*

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| sehr langsam | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | sehr schnell |
| | *7* | *6* | *5* | *4* | *3* | *2* | *1* | *0* | |

*nl3od:*
*Schwächungskoeffizient [$m^{-1}$]*

*nl3lg:*
*Laufgeschwindigkeit [s]*

# Anhang A

## Fragebogen 2 - 6

*Proband : X*

*Hinterleuchtetes Sicherheitsleitsystem, bei Notbeleuchtung und hoher Sichttrübung*

## Bewertung der Fluchtsituationen

**2.1 Wie konnten Sie den Rettungsweg bewältigen?**

*hl3brw:*

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| sehr einfach | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | sehr schwierig |
| | *0* | *1* | *2* | *3* | *4* | *5* | *6* | *7* | |

**2.2 Wie war Ihre Orientierung im Fluchtweg?**

*hl3orw:*

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| gar nicht | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | sehr gut |
| | *7* | *6* | *5* | *4* | *3* | *2* | *1* | *0* | |

**2.3 Wie konnten Sie den Fluchtweg erkennen?**

*hl3rwe:*

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| sehr gut | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | gar nicht |
| | *0* | *1* | *2* | *3* | *4* | *5* | *6* | *7* | |

**2.4 Wie wurden von Ihnen Personen und Hindernisse wahrgenommen?**

*hl3phe:*

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| gar nicht | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | sehr gut |
| | *7* | *6* | *5* | *4* | *3* | *2* | *1* | *0* | |

**2.5 Wie war die Erkennung der Rettungswegkennzeichen?**

*hl3rwke:*

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| sehr gut | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | gar nicht |
| | *0* | *1* | *2* | *3* | *4* | *5* | *6* | *7* | |

**2.6 Wie war der Abstand zwischen den Rettungswegkennzeichen?**

*hl3arwk:*

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| zu gering | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | zu groß |
| | *0* | *1* | *2* | *3* | *4* | *5* | *6* | *7* | |

**2.7 Wie bewerten Sie die Helligkeit der Fluchtwegbeleuchtung?**

*hl3hell:*

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| zu hell | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | zu dunkel |
| | *0* | *1* | *2* | *3* | *4* | *5* | *6* | *7* | |

**2.8 Fühlten Sie sich auf dem Fluchtweg sicher?**

*hl3sich:*

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| sehr unsicher | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | sehr sicher |
| | *7* | *6* | *5* | *4* | *3* | *2* | *1* | *0* | |

**2.9 Wie schnell konnten Sie den Rettungsweg zurücklegen?**

*hl3gesch:*

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| sehr langsam | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | sehr schnell |
| | *7* | *6* | *5* | *4* | *3* | *2* | *1* | *0* | |

*hl3od:*
*Schwächungskoeffizient [$m^{-1}$]*

*hl3lg:*
*Laufgeschwindigkeit [s]*

# Anhang A

## Fragebogen 3 – 3

*Proband : X*

## Vergleich der Fluchtsituationen

*Systemvergleich bei mittlerer Sichttrübung*

**3.3 Wie bewerten Sie das Rettungswegsystem 1 (bei Dunkelheit, nachleuchtendes Material, mit Randstreifen) im Vergleich zum Rettungswegsystem 2 (Notleuchten und Rettungswegleuchte)?**

**Das Rettungswegsystem 1 (bei Dunkelheit, nachleuchtendes Material, mit Randstreifen) ist:**

*nlhl 3:*

sehr viel besser OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO sehr viel schlechter
*-3 -2 -1 0 +1 +2 +3*

↑
gleichwertig

**Nachteile/ Vorteile**

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

# Anhang B

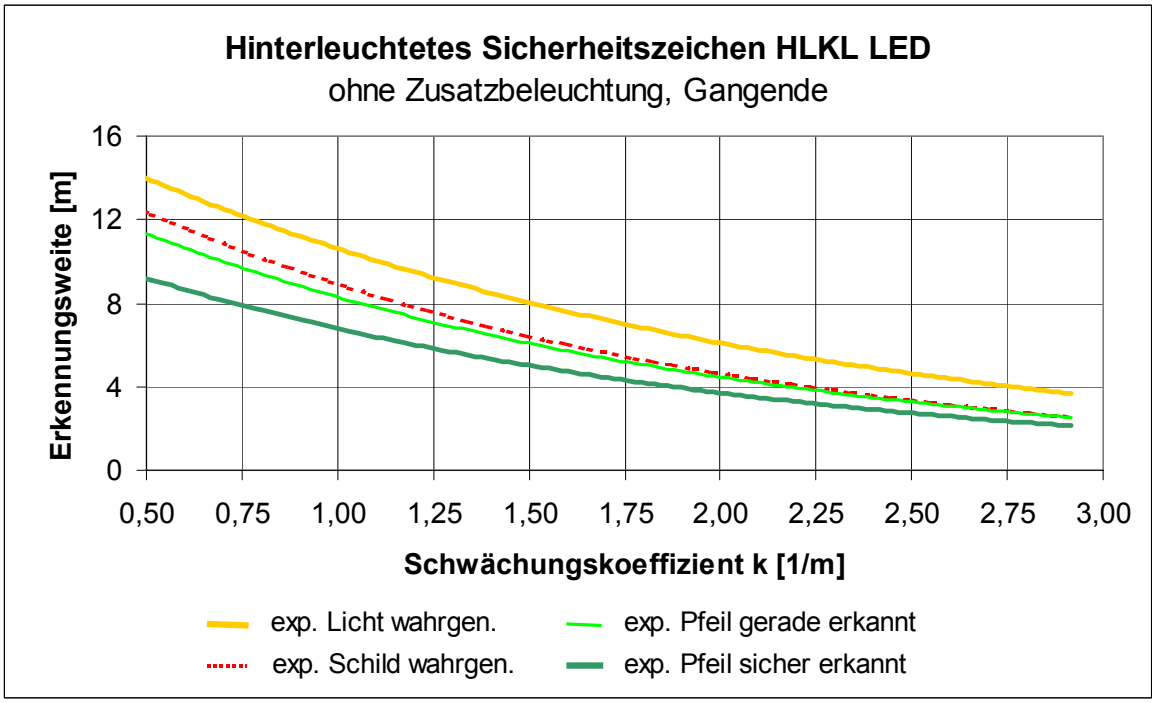



***Diagramm 1:*** ***Erkennungsweiten des hinterleuchteten Sicherheitszeichens HLKL LED in Abhängigkeit vom Schwächungskoeffizienten und von verschiedenen Wahrnehmungskriterien, Bedingungen: ohne Zusatzbeleuchtung, Montageort am Gangende***

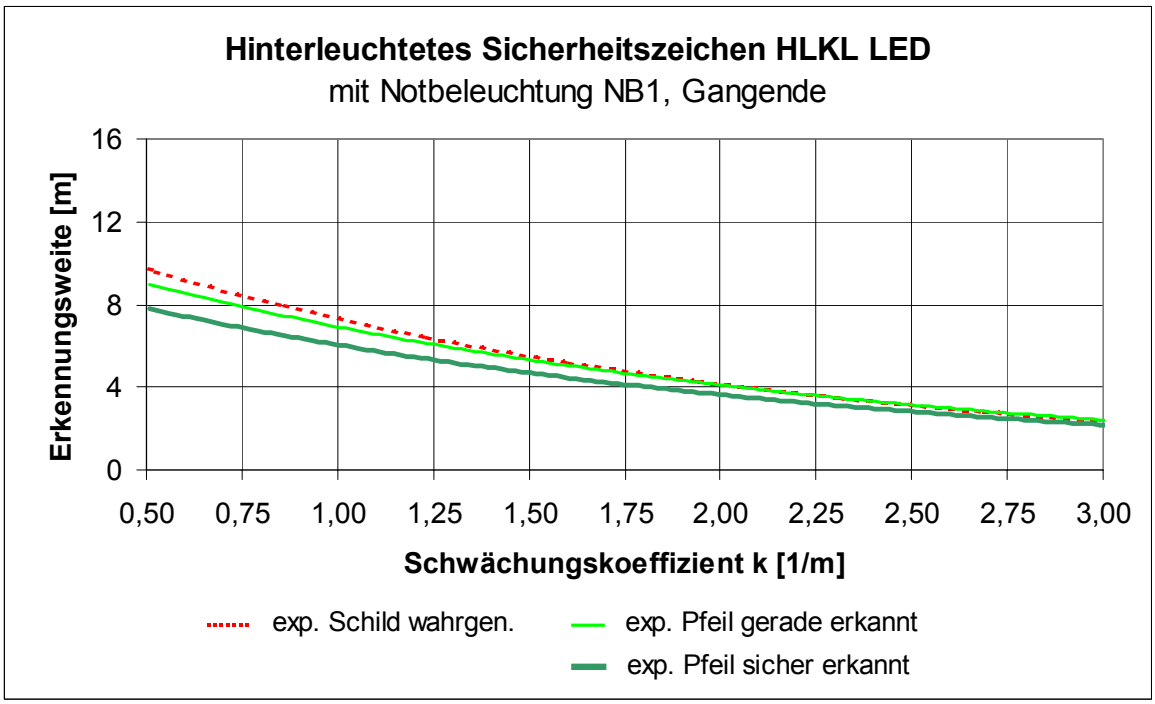



***Diagramm 2:*** ***Erkennungsweiten des hinterleuchteten Sicherheitszeichens HLKL LED in Abhängigkeit vom Schwächungskoeffizienten und von verschiedenen Wahrnehmungskriterien, Bedingungen: Notbeleuchtung NB1, Montageort am Gangende***

# Anhang B

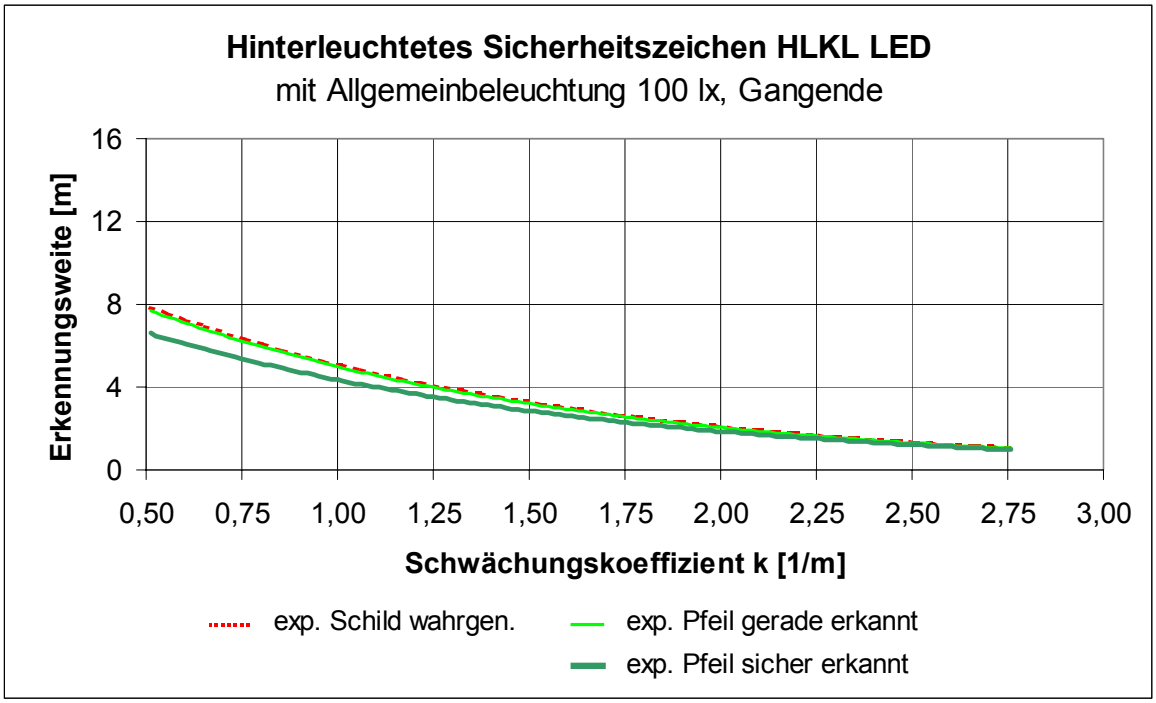



***Diagramm 3:*** ***Erkennungsweiten des hinterleuchteten Sicherheitszeichens HLKL LED in Abhängigkeit vom Schwächungskoeffizienten und von verschiedenen Wahrnehmungskriterien, Bedingungen: Allgemeinbeleuchtung 100 lx, Montageort am Gangende***

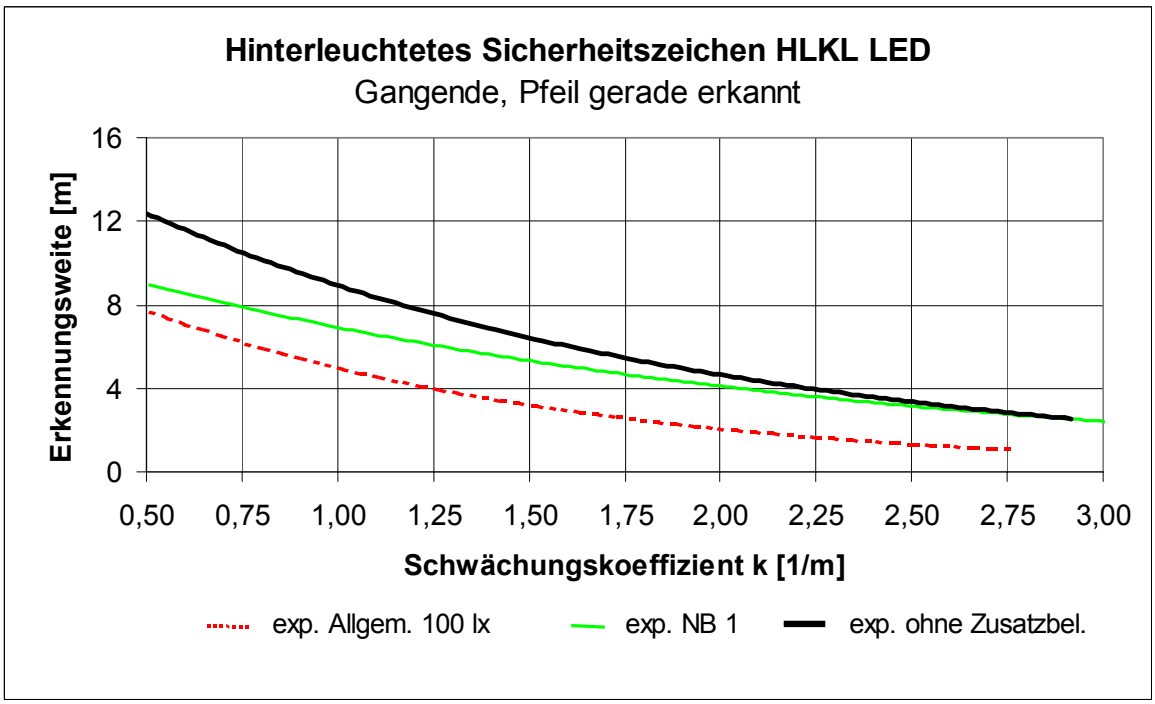



***Diagramm 4:*** ***Erkennungsweiten des hinterleuchteten Sicherheitszeichens HLKL LED in Abhängigkeit vom Schwächungskoeffizienten und der Beleuchtungssituation, Bedingungen: Montageort am Gangende, Kriterium. Pfeil gerade erkannt***

# Anhang B

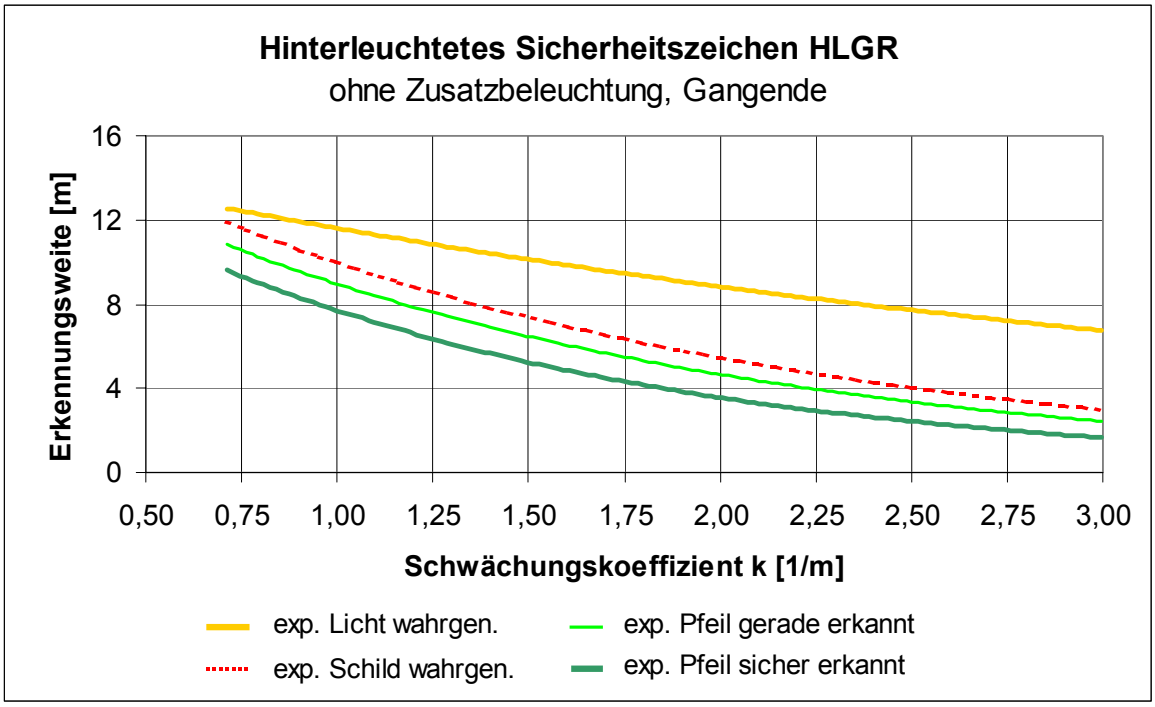



***Diagramm 5:*** ***Erkennungsweiten des hinterleuchteten Sicherheitszeichens HLGR in Abhängigkeit vom Schwächungskoeffizienten und von verschiedenen Wahrnehmungskriterien, Bedingungen: ohne Zusatzbeleuchtung, Montageort am Gangende***

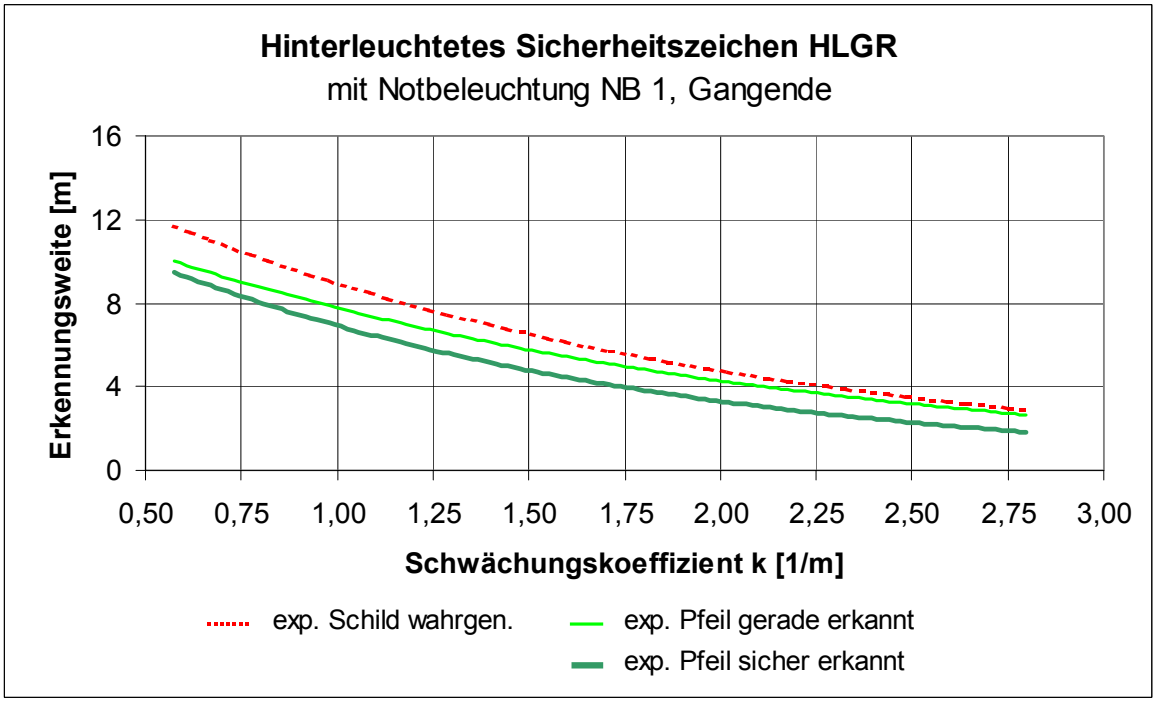



***Diagramm 6:*** ***Erkennungsweiten des hinterleuchteten Sicherheitszeichens HLGR in Abhängigkeit vom Schwächungskoeffizienten und von verschiedenen Wahrnehmungskriterien, Bedingungen: Notbeleuchtung NB1, Montageort am Gangende***

# Anhang B

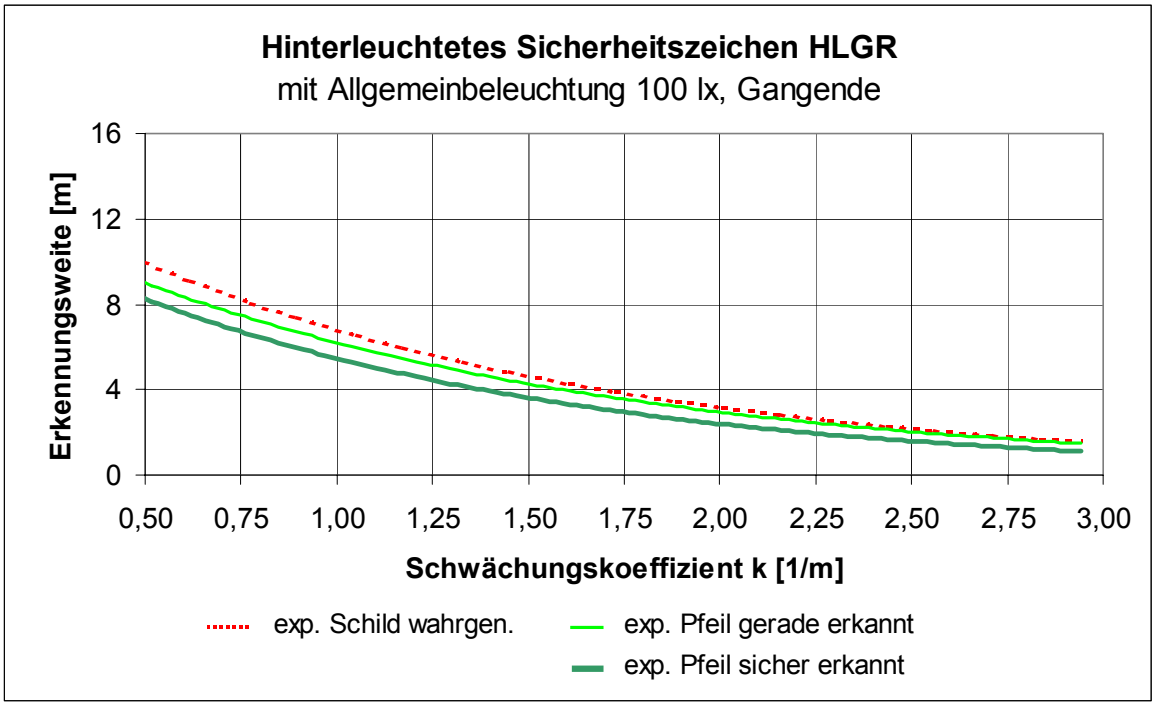



***Diagramm 7:*** ***Erkennungsweiten des hinterleuchteten Sicherheitszeichens HLGR in Abhängigkeit vom Schwächungskoeffizienten und von verschiedenen Wahrnehmungskriterien, Bedingungen: Allgemeinbeleuchtung 100 lx, Montageort am Gangende***

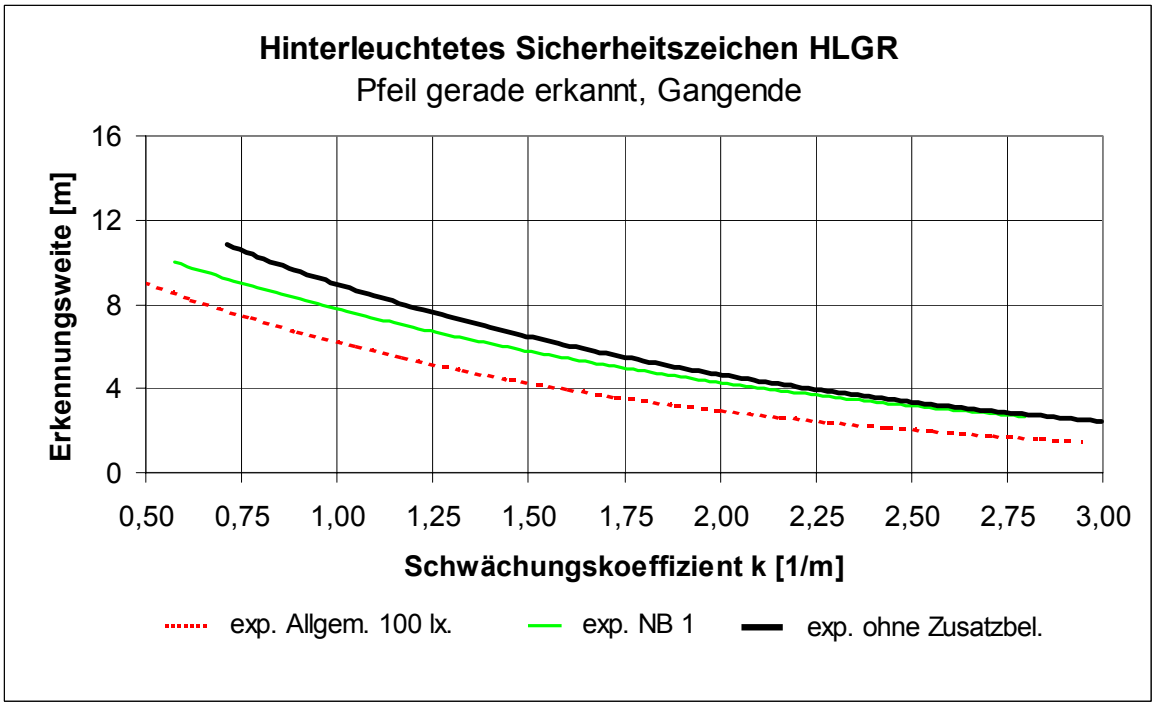



***Diagramm 8:*** ***Erkennungsweiten des hinterleuchteten Sicherheitszeichens HLGR in Abhängigkeit vom Schwächungskoeffizienten und der Beleuchtungssituation, Bedingungen: Montageort am Gangende, Kriterium: Pfeil gerade erkannt***

# Anhang B

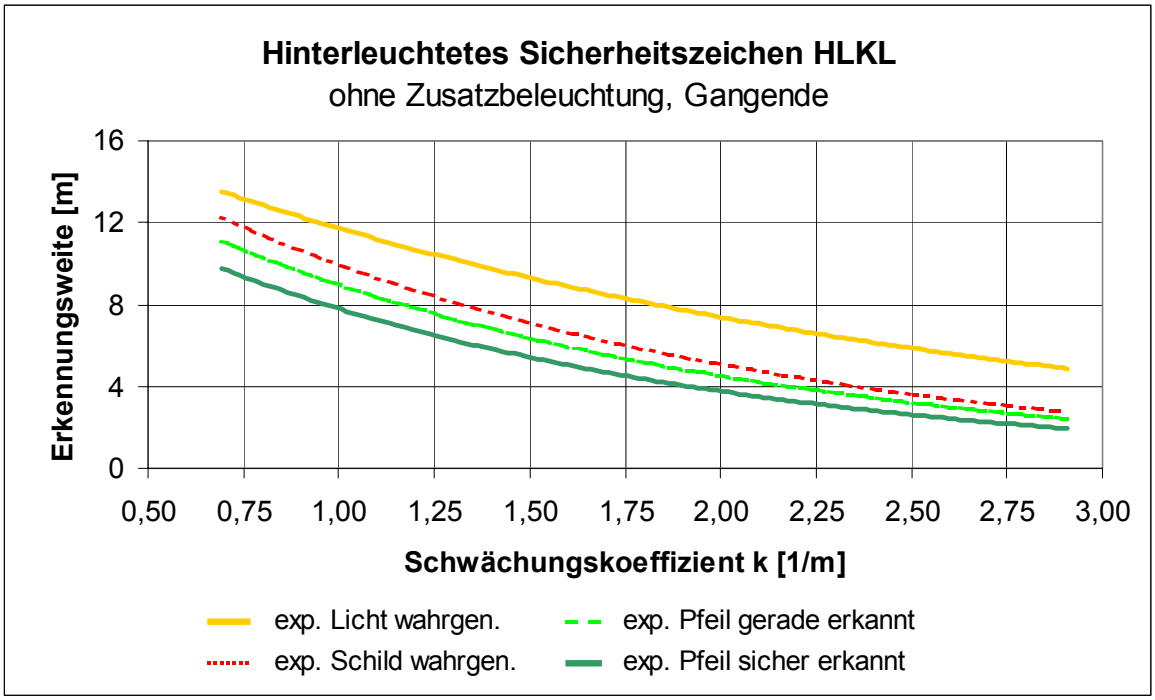



***Diagramm 9:*** ***Erkennungsweiten des hinterleuchteten Sicherheitszeichens HLKL in Abhängigkeit vom Schwächungskoeffizienten und von verschiedenen Wahrnehmungskriterien, Bedingungen: ohne Zusatzbeleuchtung, Montageort am Gangende***

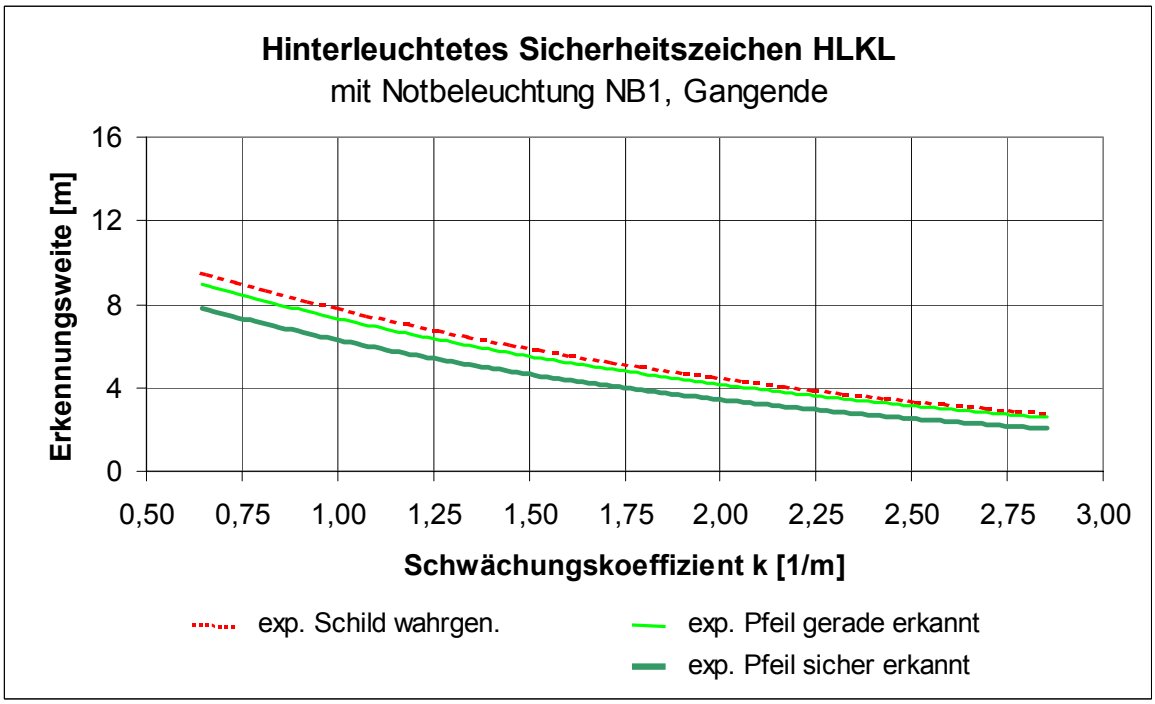



***Diagramm 10:*** ***Erkennungsweiten des hinterleuchteten Sicherheitszeichens HLKL in Abhängigkeit vom Schwächungskoeffizienten und von verschiedenen Wahrnehmungskriterien, Bedingungen: Notbeleuchtung NB1, Montageort am Gangende***

# Anhang B

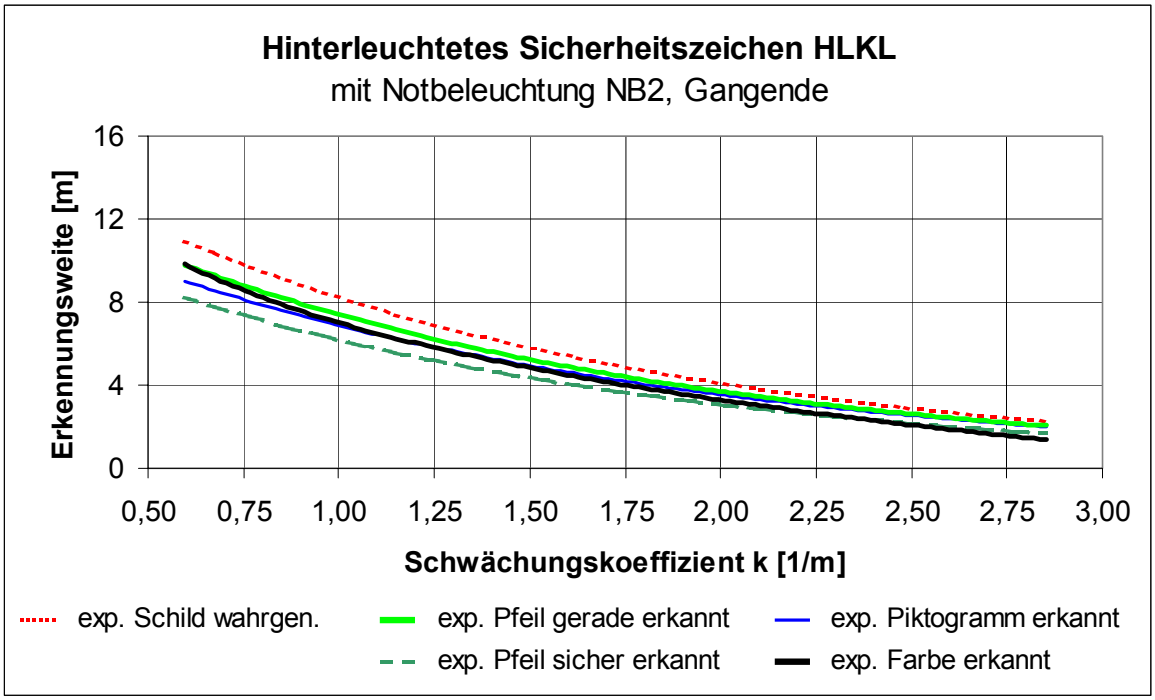



***Diagramm 11:*** ***Erkennungsweiten des hinterleuchteten Sicherheitszeichens HLKL in Abhängigkeit vom Schwächungskoeffizienten und von verschiedenen Wahrnehmungskriterien, Bedingungen:, Notbeleuchtung NB2, Montageort am Gangende***

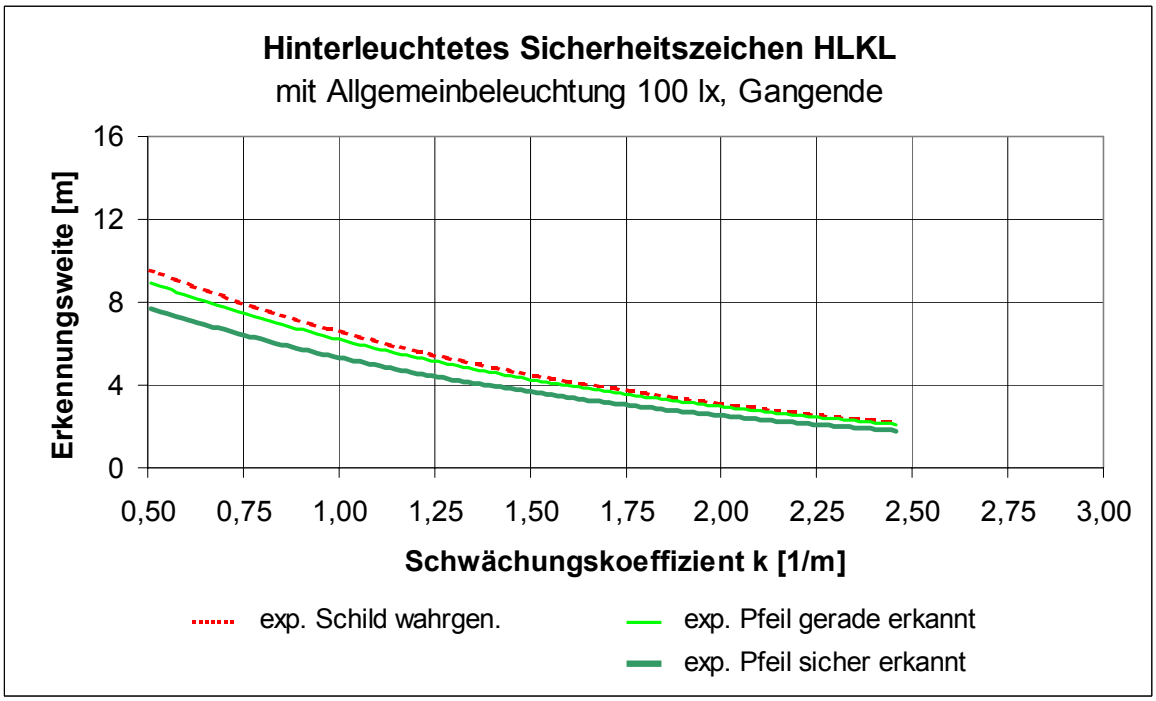



***Diagramm 12:*** ***Erkennungsweiten des hinterleuchteten Sicherheitszeichens HLKL in Abhängigkeit vom Schwächungskoeffizienten und von verschiedenen Wahrnehmungskriterien, Bedingungen:, Allgemeinbeleuchtung 100 lx, Montageort am Gangende***

# Anhang B

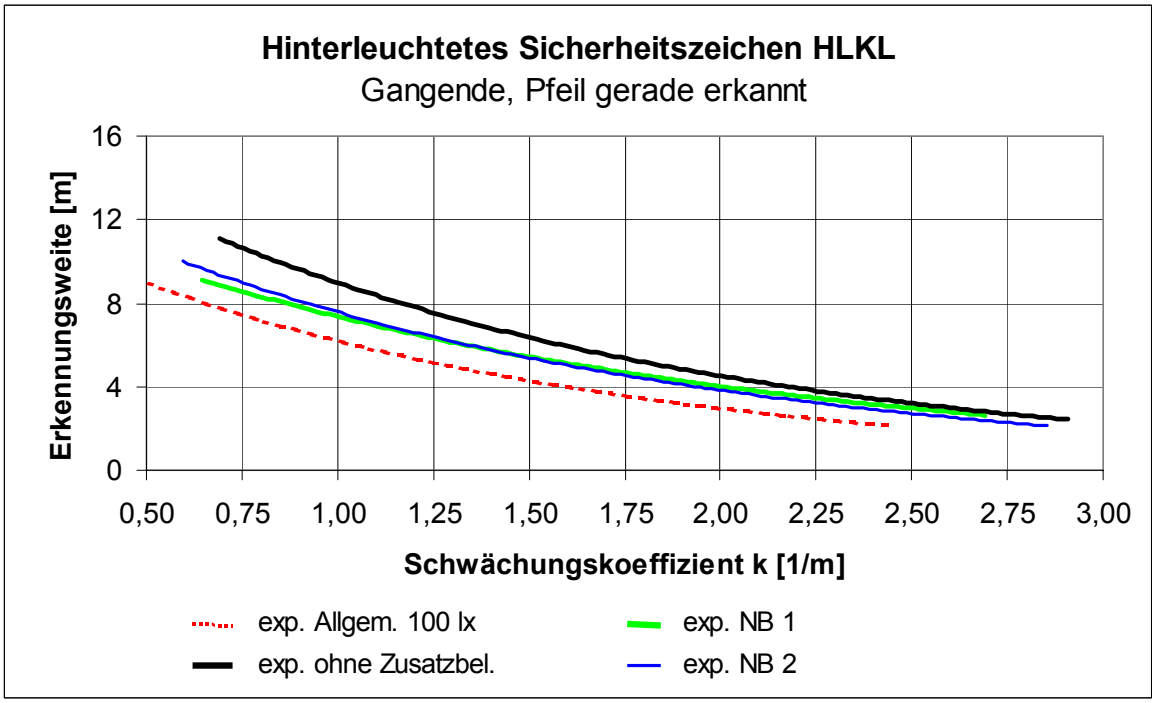



***Diagramm 13:*** ***Erkennungsweiten des hinterleuchteten Sicherheitszeichens HLKL in Abhängigkeit vom Schwächungskoeffizienten und der Beleuchtungssituation, Bedingungen: Montageort am Gangende, Kriterium. Pfeil gerade erkannt***

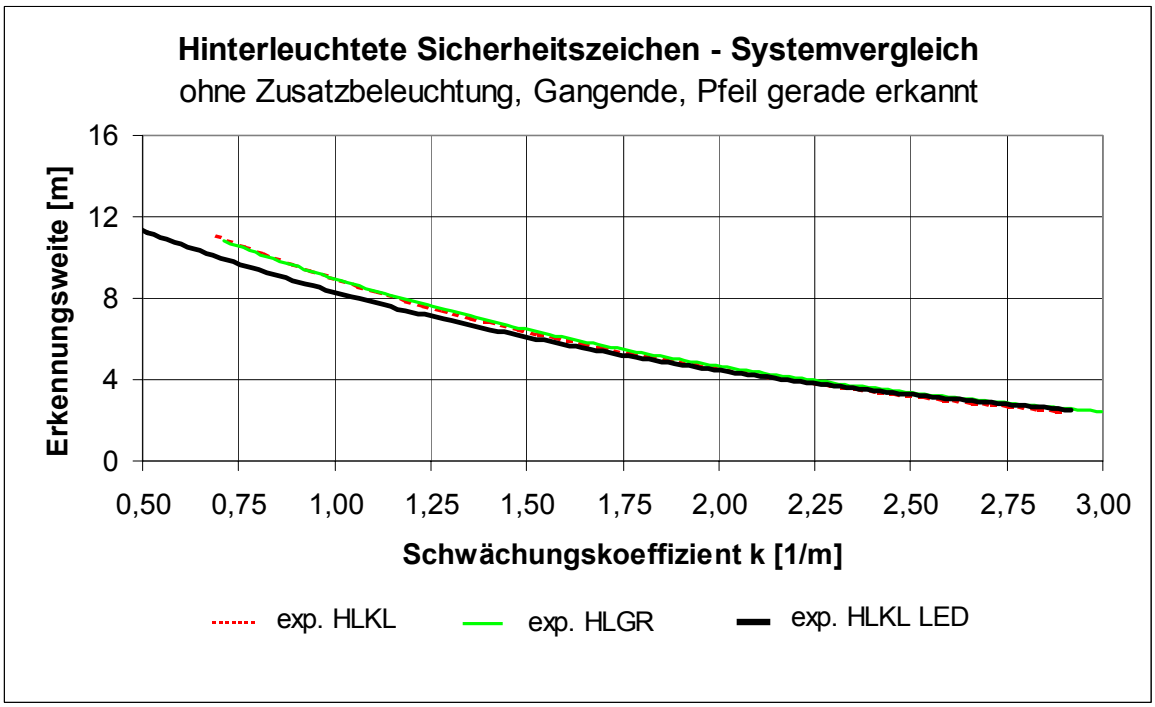



***Diagramm 14:*** ***Erkennungsweiten hinterleuchteter Sicherheitszeichen in Abhängigkeit von der Art der Ausführung und vom Schwächungskoeffizienten, Bedingungen: ohne Zusatzbeleuchtung, Montageort am Gangende, Kriterium: Pfeil gerade erkannt***

# Anhang B

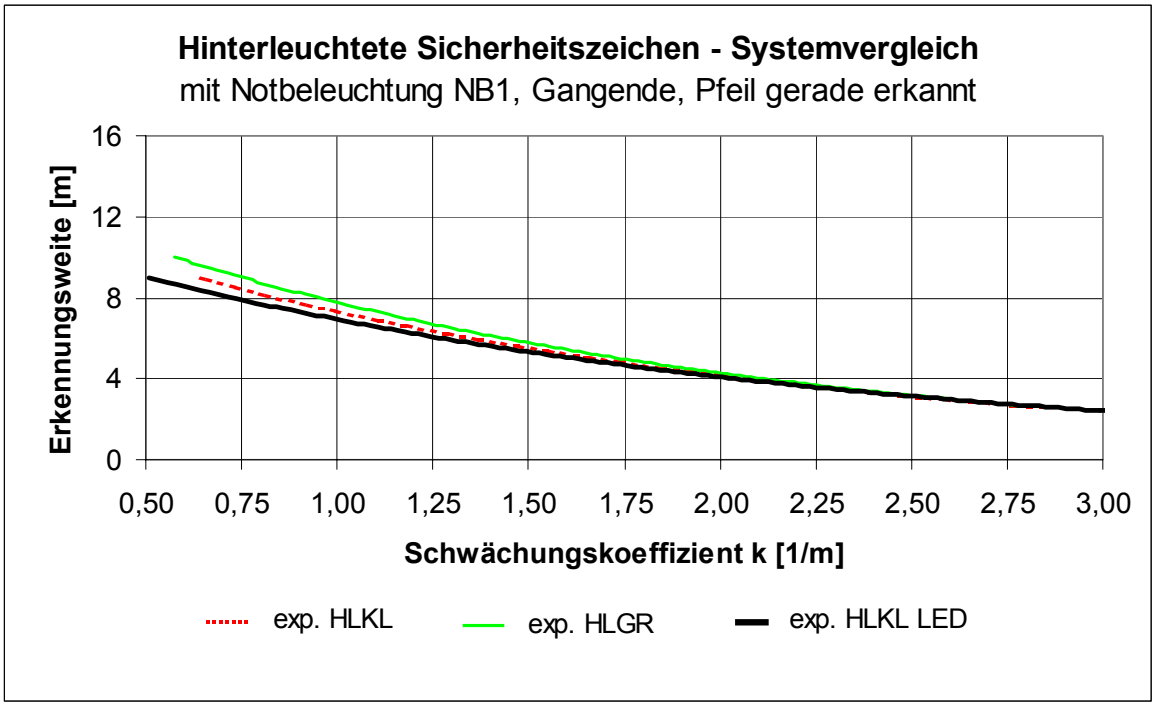



***Diagramm 15:*** ***Erkennungsweiten hinterleuchteter Sicherheitszeichen in Abhängigkeit von der Art der Ausführung und vom Schwächungskoeffizienten,***
***Bedingungen: Notbeleuchtung NB1, Montageort am Gangende, Kriterium: Pfeil gerade erkannt***

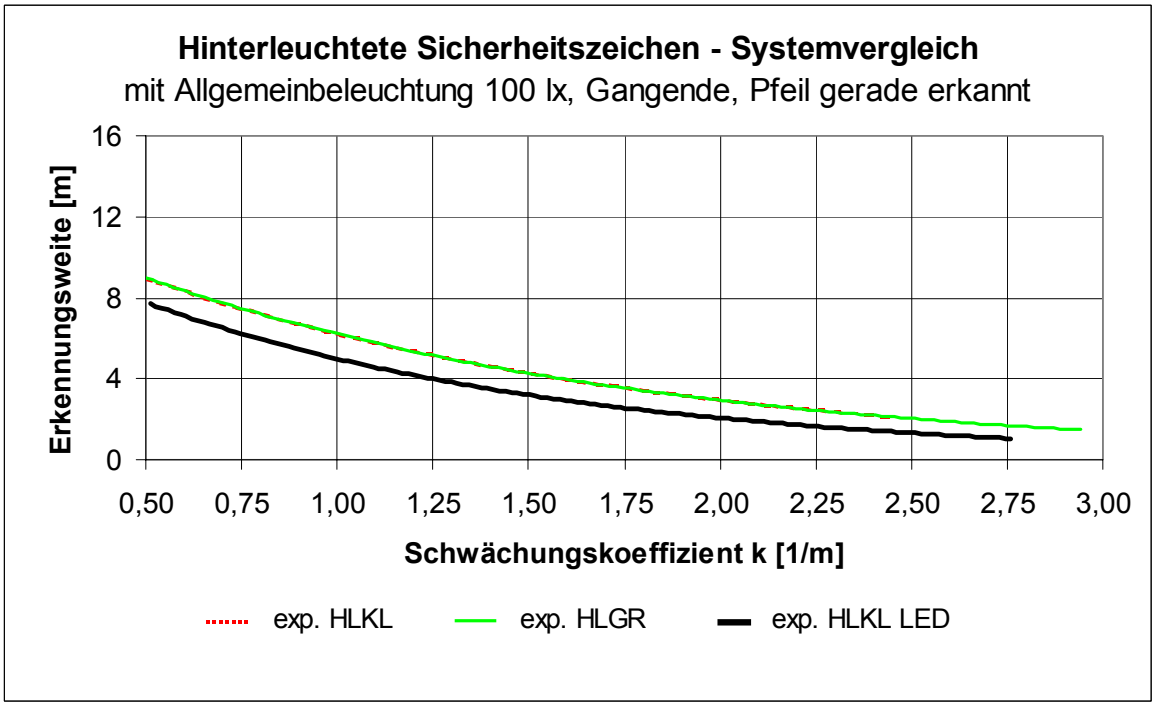



***Diagramm 16:*** ***Erkennungsweiten hinterleuchteter Sicherheitszeichen in Abhängigkeit von der Art der Ausführung und vom Schwächungskoeffizienten,***
***Bedingungen: Allgemeinbeleuchtung 100 lx, Montageort am Gangende, Kriterium: Pfeil gerade erkannt***

# Anhang B

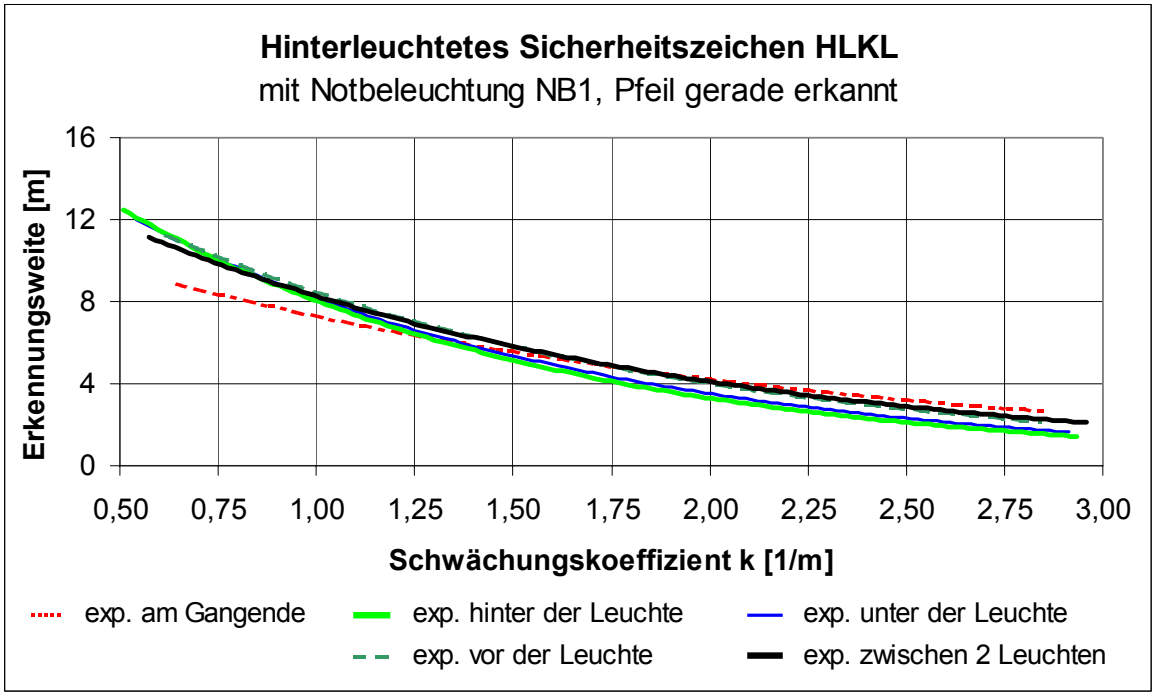



***Diagramm 17:*** ***Erkennungsweiten des hinterleuchteten Sicherheitszeichens HLKL in Abhängigkeit vom Schwächungskoeffizienten und dem Montageort, Bedingungen: Notbeleuchtung NB1, Kriterium: Pfeil erkannt***

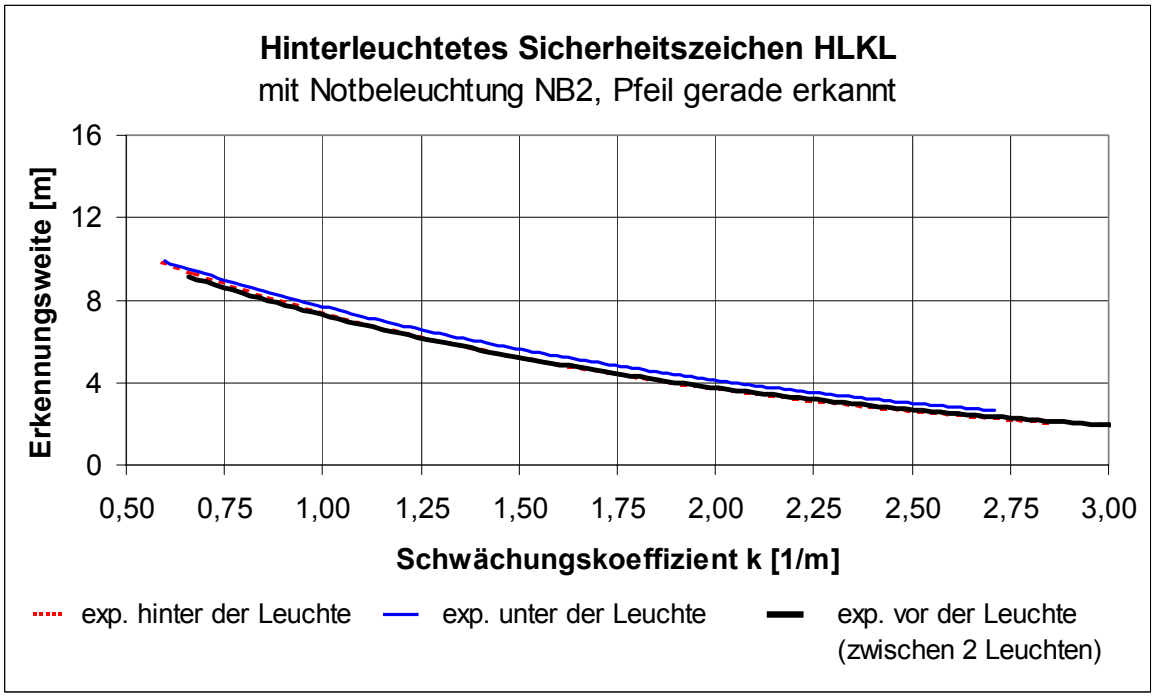



***Diagramm 18:*** ***Erkennungsweiten des hinterleuchteten Sicherheitszeichens HLKL in Abhängigkeit vom Schwächungskoeffizienten und dem Montageort, Bedingungen: Notbeleuchtung NB2, Kriterium: Pfeil erkannt***

# Anhang B

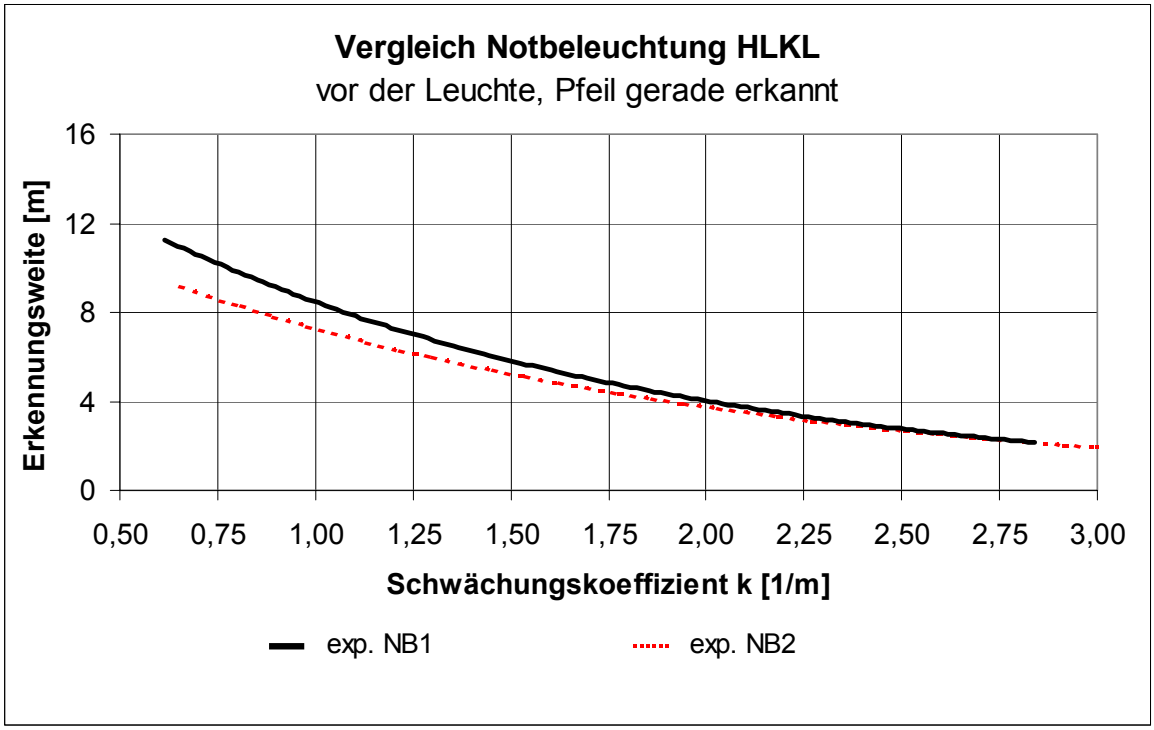



*Diagramm 19: Erkennungsweiten des hinterleuchteten Sicherheitszeichens HLKL in Abhängigkeit vom Schwächungskoeffizienten und der Art der Notbeleuchtung, Bedingungen: Montageort vor der Leuchte, Kriterium: Pfeil erkannt*

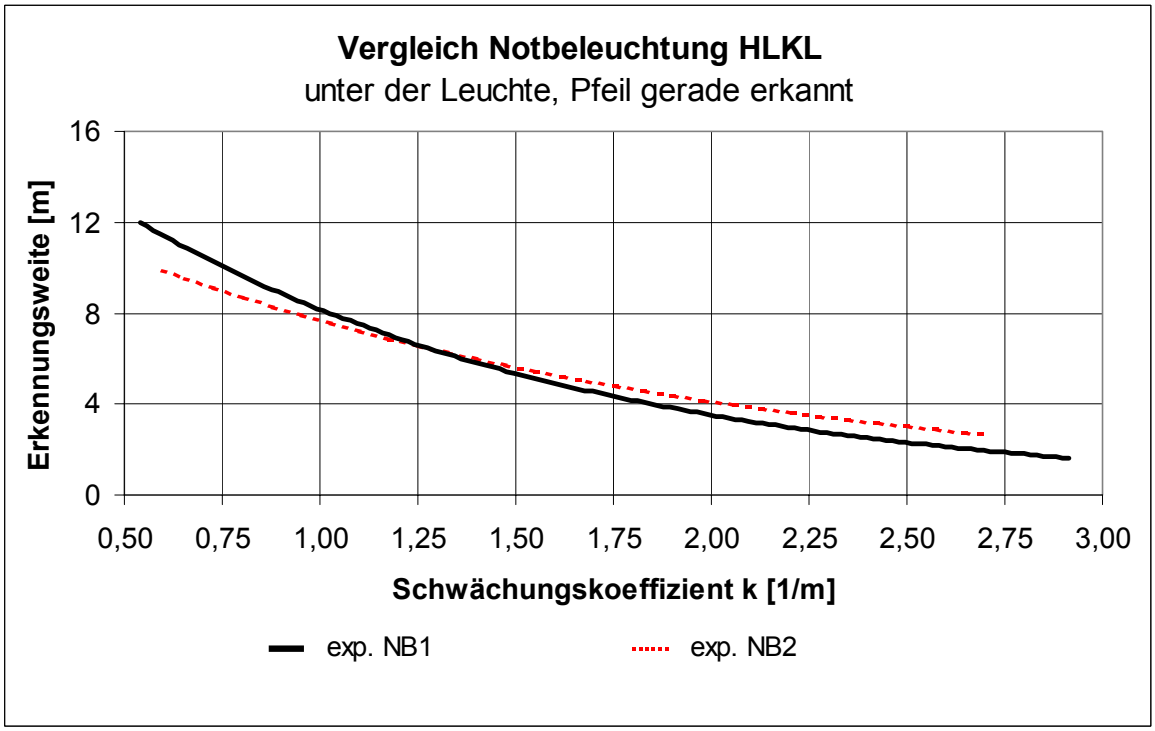



*Diagramm 20: Erkennungsweiten des hinterleuchteten Sicherheitszeichens HLKL in Abhängigkeit vom Schwächungskoeffizienten und der Art der Notbeleuchtung, Bedingungen: Montageort unter der Leuchte, Kriterium: Pfeil erkannt*

# Anhang B

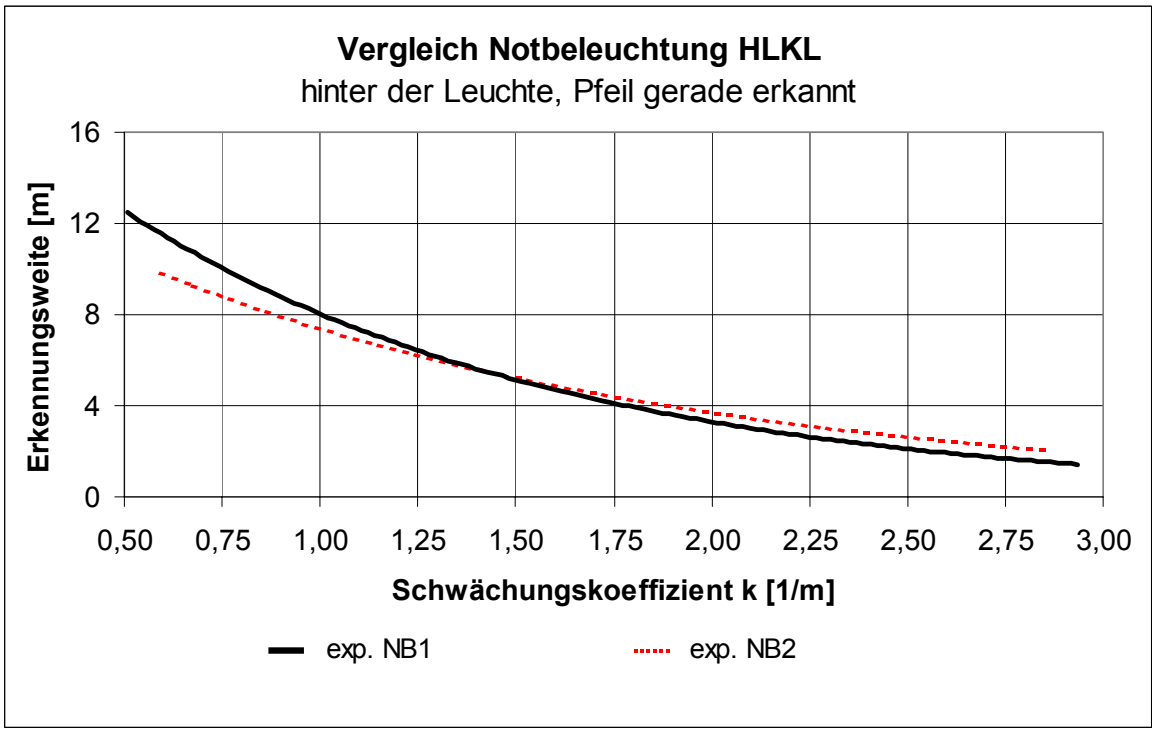



***Diagramm 21:*** ***Erkennungsweiten des hinterleuchteten Sicherheitszeichens HLKL in Abhängigkeit vom Schwächungskoeffizienten und der Art der Notbeleuchtung, Bedingungen: Montageort hinter der Leuchte, Kriterium: Pfeil erkannt***

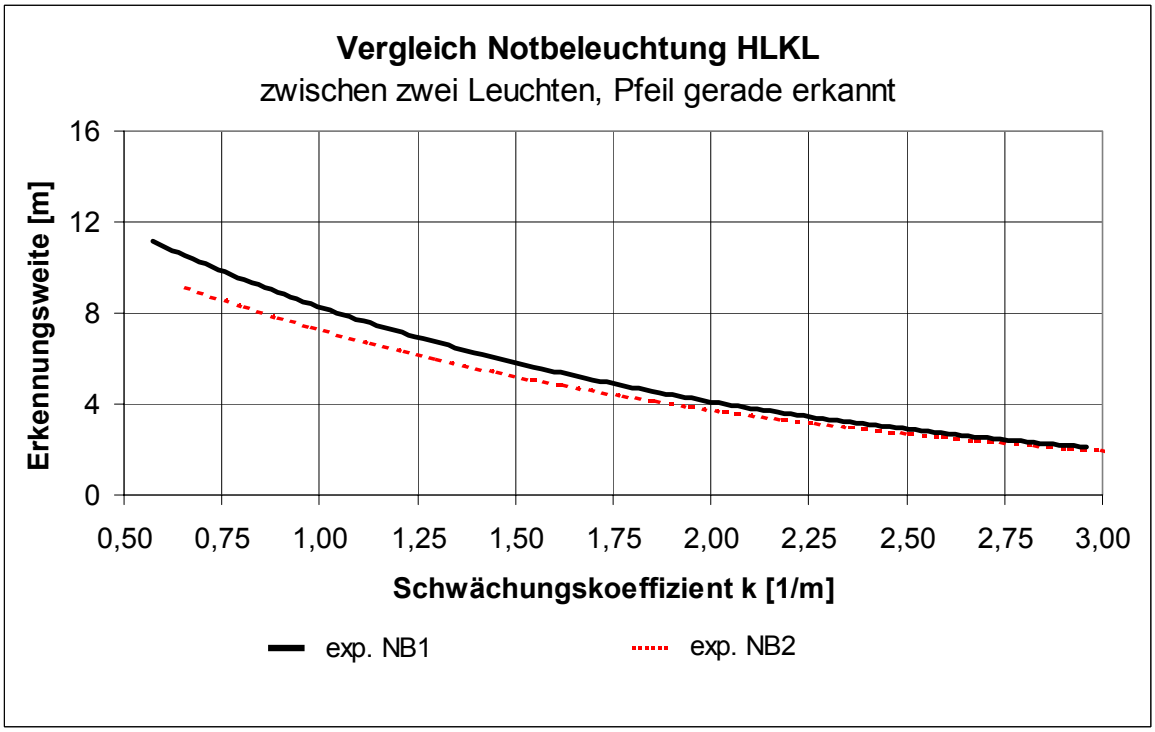



***Diagramm 22:*** ***Erkennungsweiten des hinterleuchteten Sicherheitszeichens HLKL in Abhängigkeit vom Schwächungskoeffizienten und der Art der Notbeleuchtung, Bedingungen: Montageort zwischen zwei Leuchten, Kriterium: Pfeil erkannt***

# Anhang B

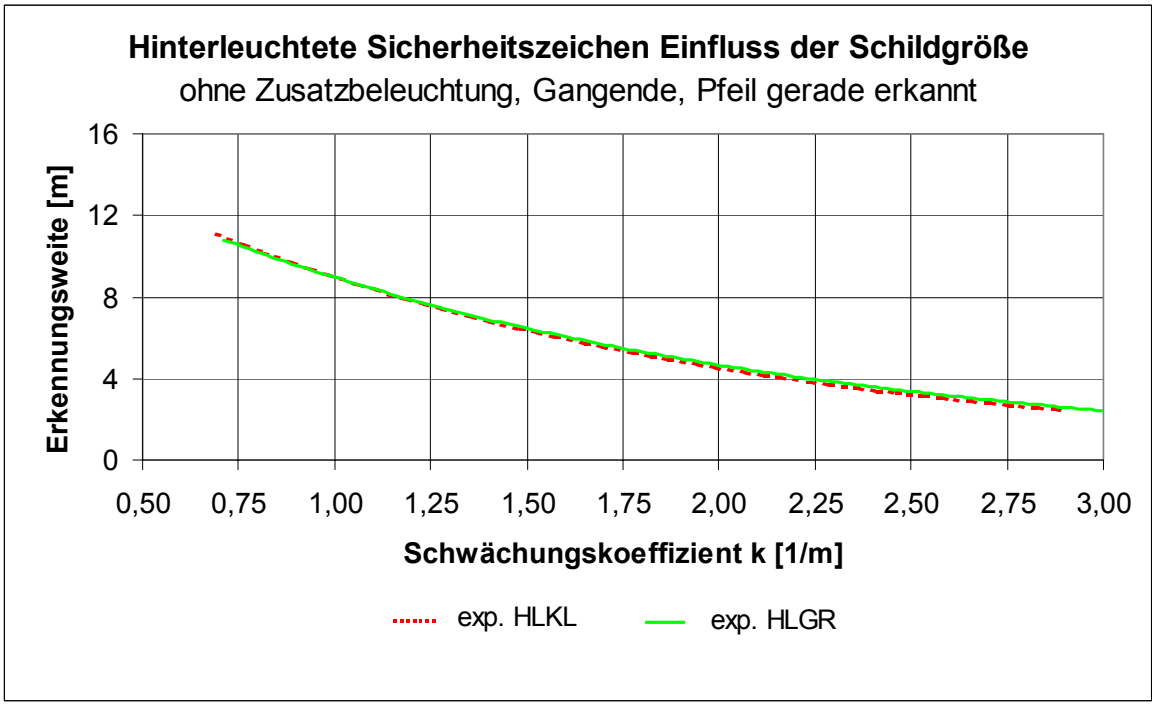



***Diagramm 23:*** ***Erkennungsweiten hinterleuchteter Sicherheitszeichen in Abhängigkeit von der Schildgröße und vom Schwächungskoeffizienten, HLKL : HLGR = 1 : 1,25***
***Bedingungen: ohne Zusatzbeleuchtung, Montageort am Gangende, Kriterium: Pfeil gerade erkannt***

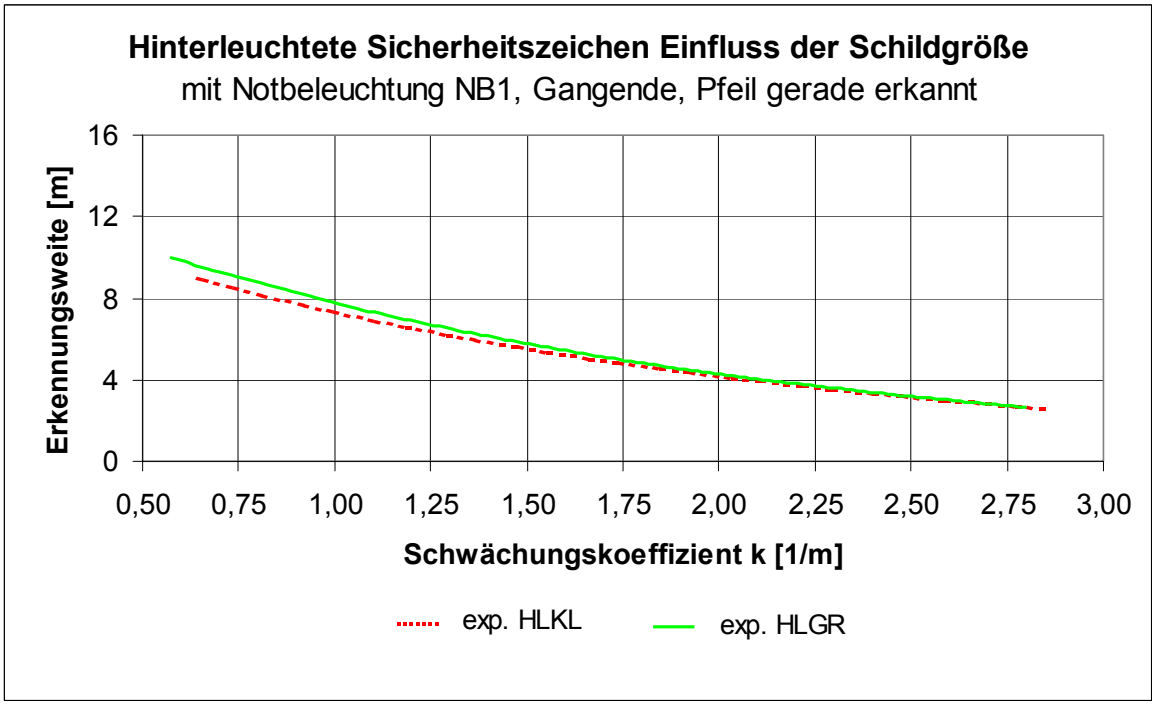



***Diagramm 24:*** ***Erkennungsweiten hinterleuchteter Sicherheitszeichen in Abhängigkeit von der Schildgröße und vom Schwächungskoeffizienten, HLKL : HLGR = 1 : 1,25***
***Bedingungen: Notbeleuchtung NB1, Montageort am Gangende, Kriterium: Pfeil gerade erkannt***

# Anhang B

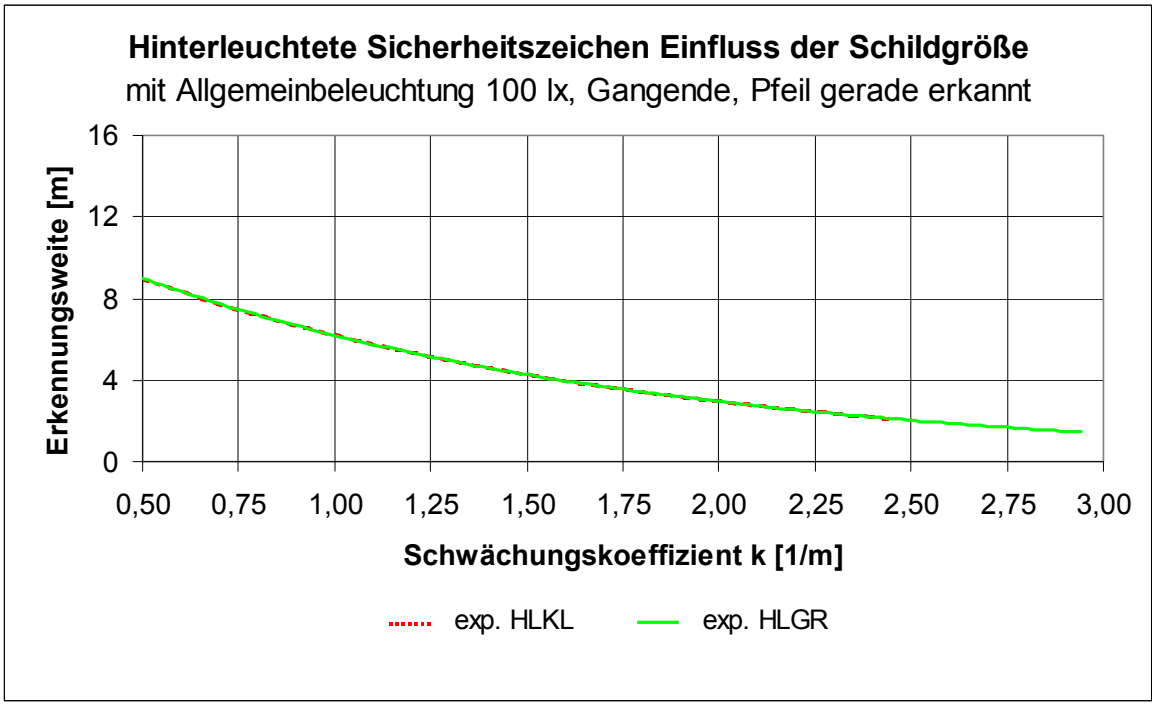



***Diagramm 25:*** ***Erkennungsweiten hinterleuchteter Sicherheitszeichen in Abhängigkeit von der Schildgröße und vom Schwächungskoeffizienten, HLKL : HLGR = 1 : 1,25***
***Bedingungen: Allgemeinbeleuchtung 100 lx, Montageort am Gangende, Kriterium: Pfeil gerade erkannt***

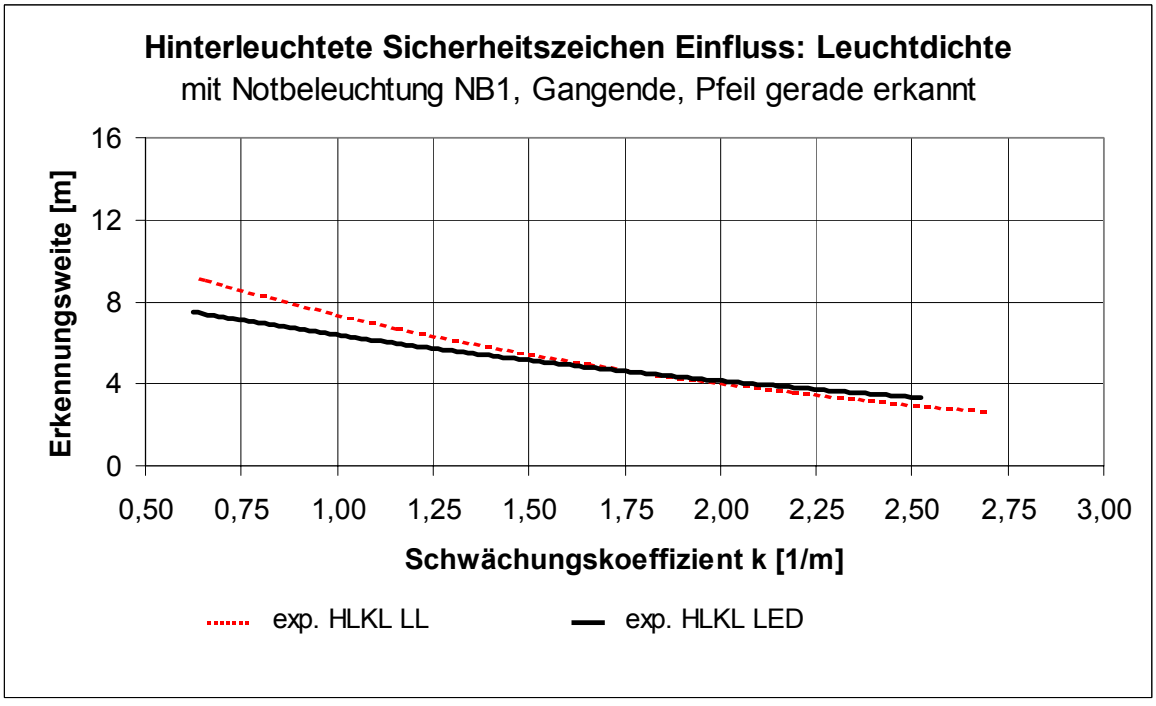



***Diagramm 26:*** ***Erkennungsweiten hinterleuchteter Sicherheitszeichen in Abhängigkeit der mittleren Leuchtdichte und vom Schwächungskoeffizienten,***
***HLKL LL ($L_{Schild\ mittel}$ = 290 cd/m²); HLKL LED ($L_{Schild\ mittel}$ = 65 cd/m²)***
***Bedingungen: ohne Zusatzbeleuchtung, Montageort am Gangende, Kriterium: Pfeil gerade erkannt***

# Anhang B

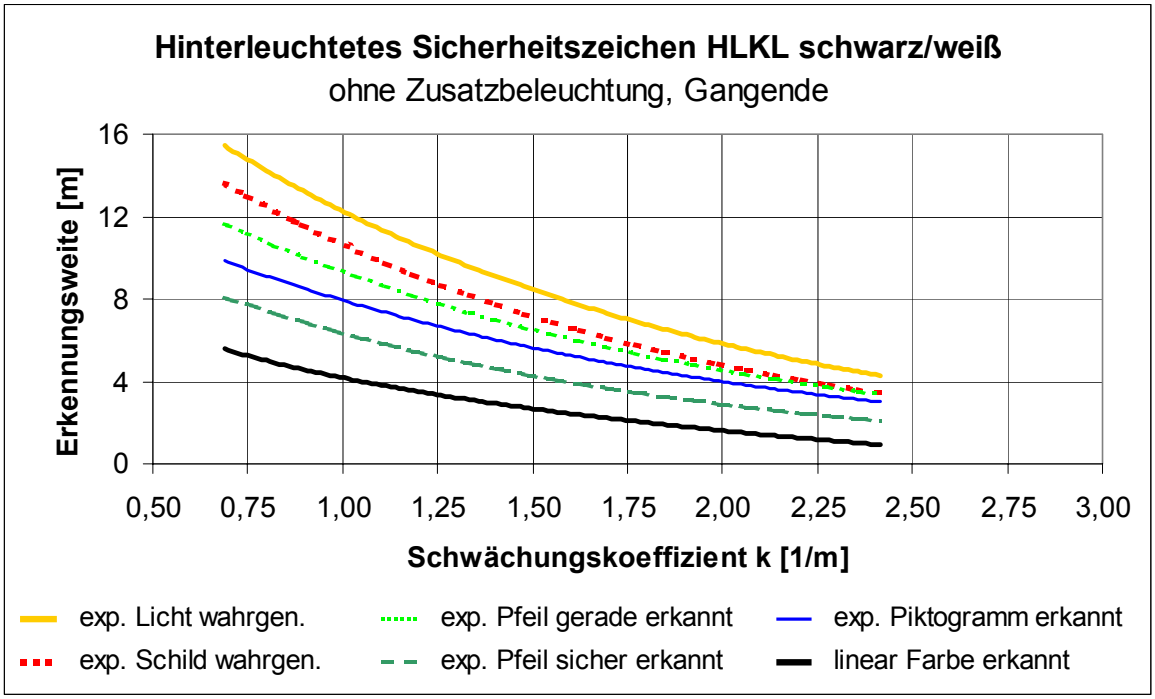



***Diagramm 27:*** ***Erkennungsweiten des hinterleuchteten Sicherheitszeichens HLKL schwarz/ weiß in Abhängigkeit vom Schwächungskoeffizienten und von verschiedenen Wahrnehmungskriterien, Bedingungen: ohne Zusatzbeleuchtung, Montageort am Gangende***

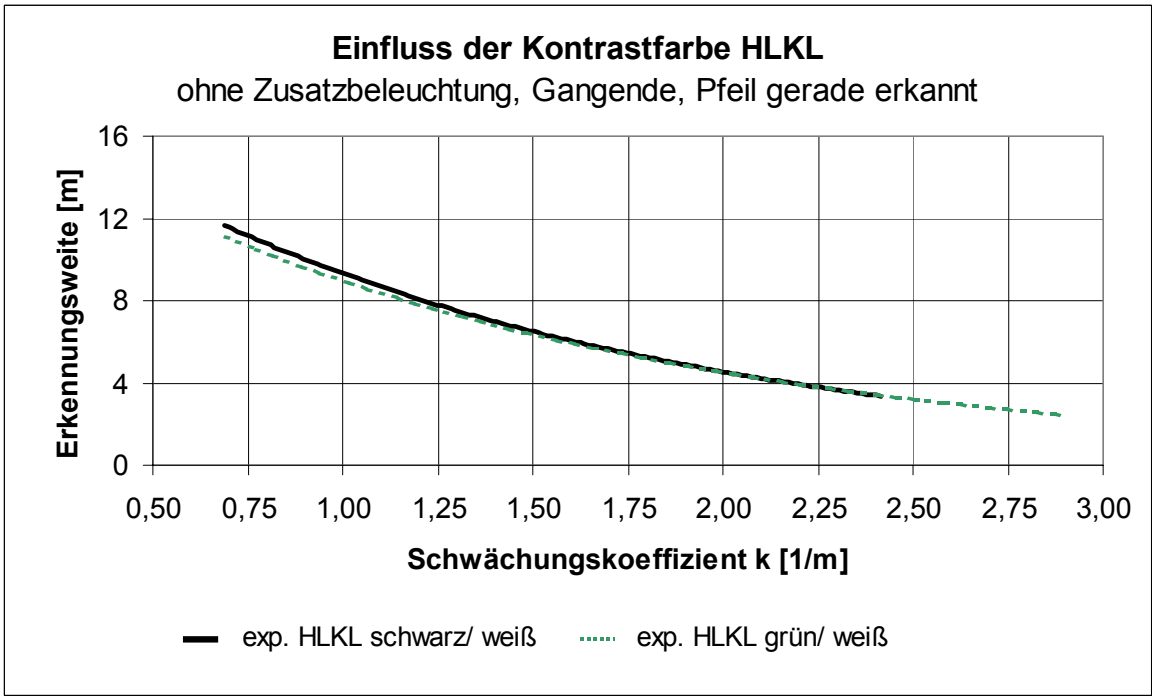



***Diagramm 28:*** ***Erkennungsweite des hinterleuchteten Sicherheitszeichen HLKL in Abhängigkeit vom Schwächungskoeffizienten und der Kontrastfarbe,***
***Bedingungen: ohne Zusatzbeleuchtung, Montageort am Gangende, Kriterium: Pfeil gerade erkannt***

# Anhang B

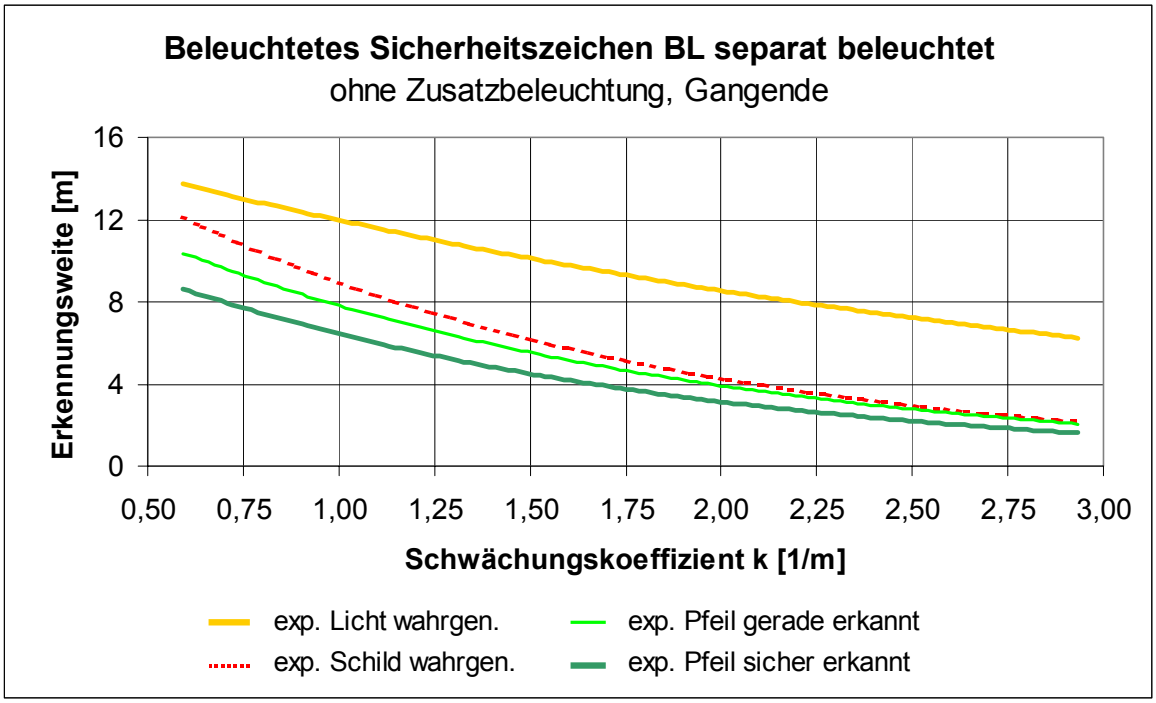



***Diagramm 29:*** ***Erkennungsweiten des separat beleuchteten Sicherheitszeichens BL in Abhängigkeit vom Schwächungskoeffizienten und von verschiedenen Wahrnehmungskriterien, Bedingungen: ohne Zusatzbeleuchtung, Montageort am Gangende***

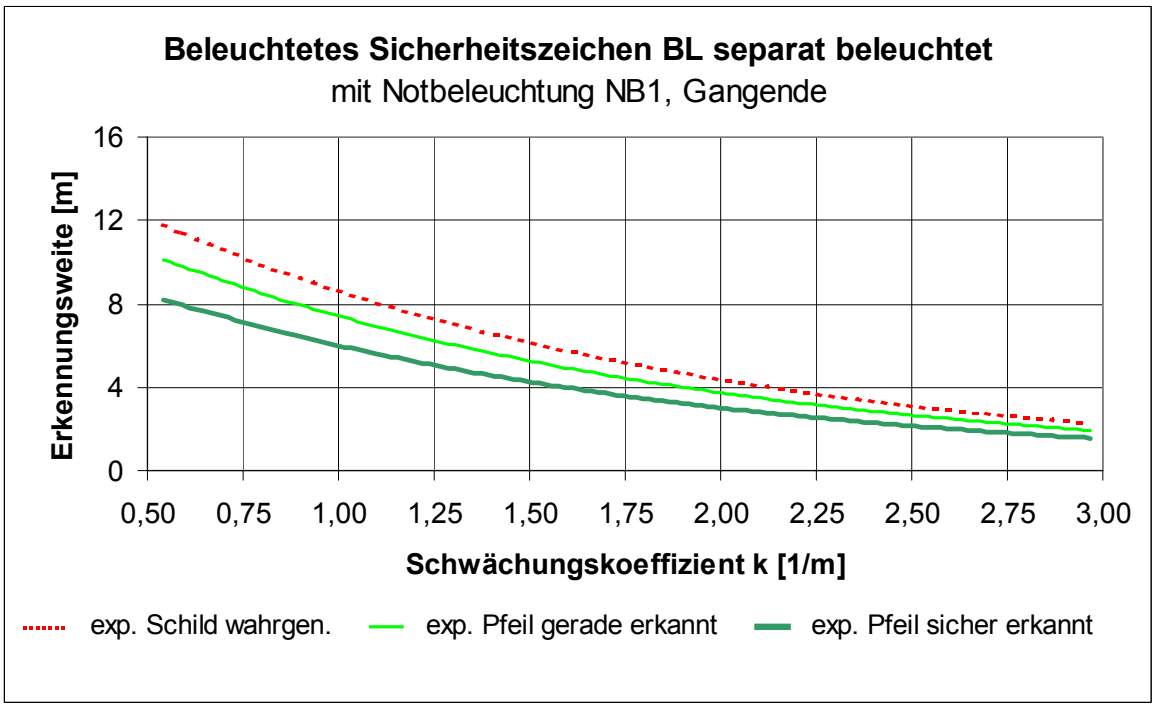



***Diagramm 30:*** ***Erkennungsweiten des beleuchteten Sicherheitszeichens BL in Abhängigkeit vom Schwächungskoeffizienten und von verschiedenen Wahrnehmungskriterien, Bedingungen: Notbeleuchtung NB1, Montageort am Gangende***

# Anhang B

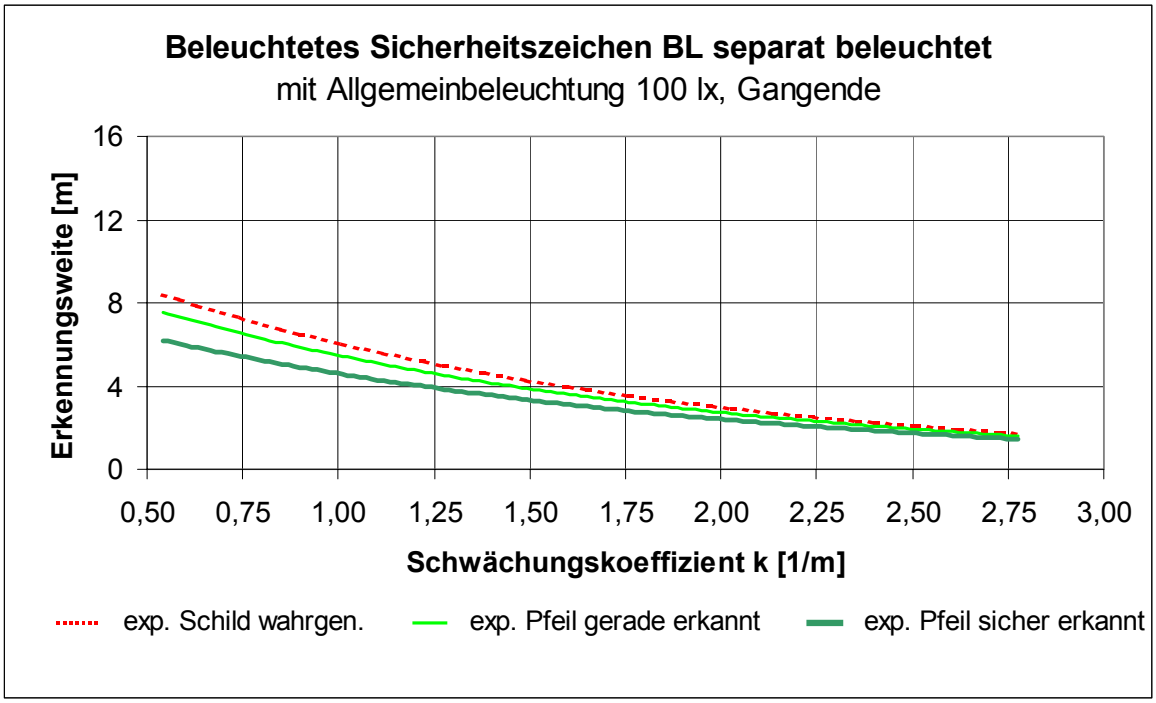



***Diagramm 31:*** ***Erkennungsweiten des beleuchteten Sicherheitszeichens BL in Abhängigkeit vom Schwächungskoeffizienten und von verschiedenen Wahrnehmungskriterien, Bedingungen: Allgemeinbeleuchtung 100 lx, Montageort am Gangende***

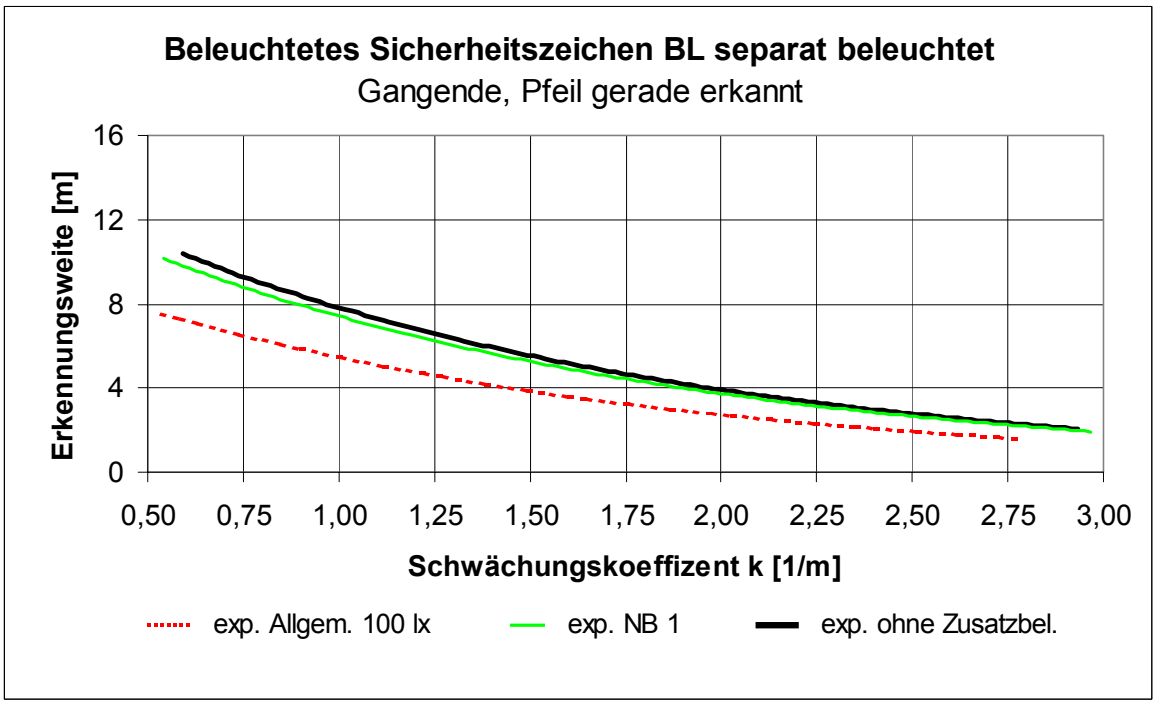



***Diagramm 32:*** ***Erkennungsweiten des beleuchteten Sicherheitszeichens BL in Abhängigkeit vom Schwächungskoeffizienten und der Beleuchtungssituation, Bedingungen: Montageort am Gangende, Kriterium: Pfeil gerade erkannt***

# Anhang B

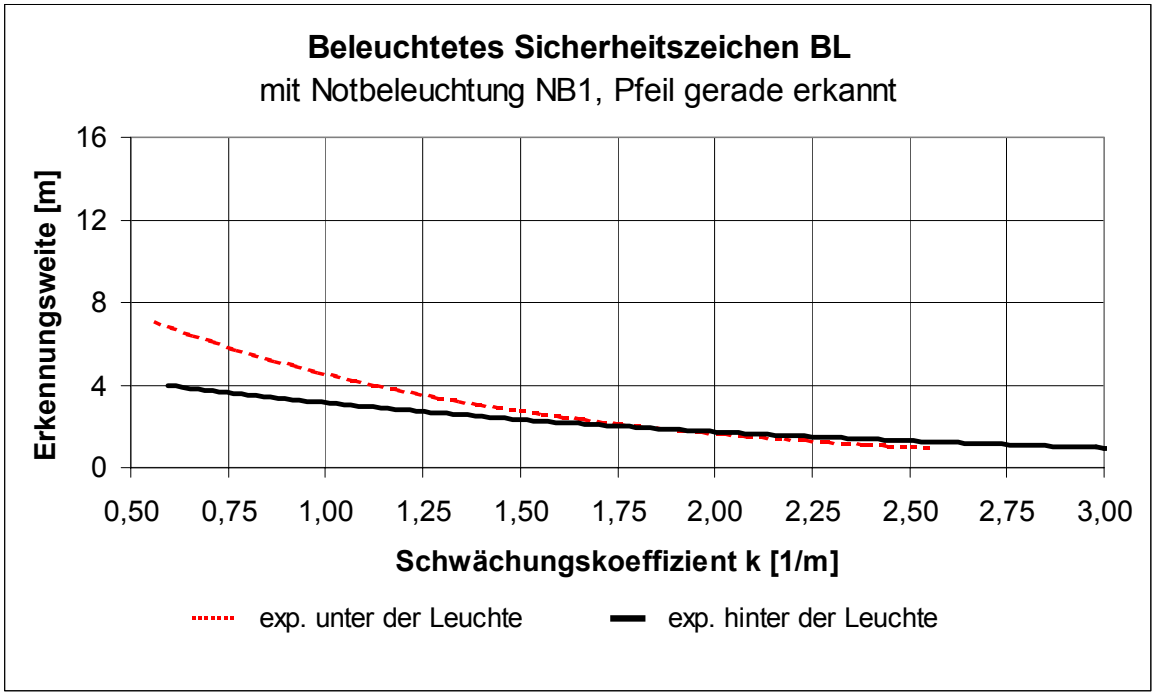



***Diagramm 33:*** ***Erkennungsweiten des beleuchteten Sicherheitszeichens BL in Abhängigkeit vom Schwächungskoeffizienten und dem Montageort, Bedingungen: Notbeleuchtung NB1, Kriterium: Pfeil erkannt***

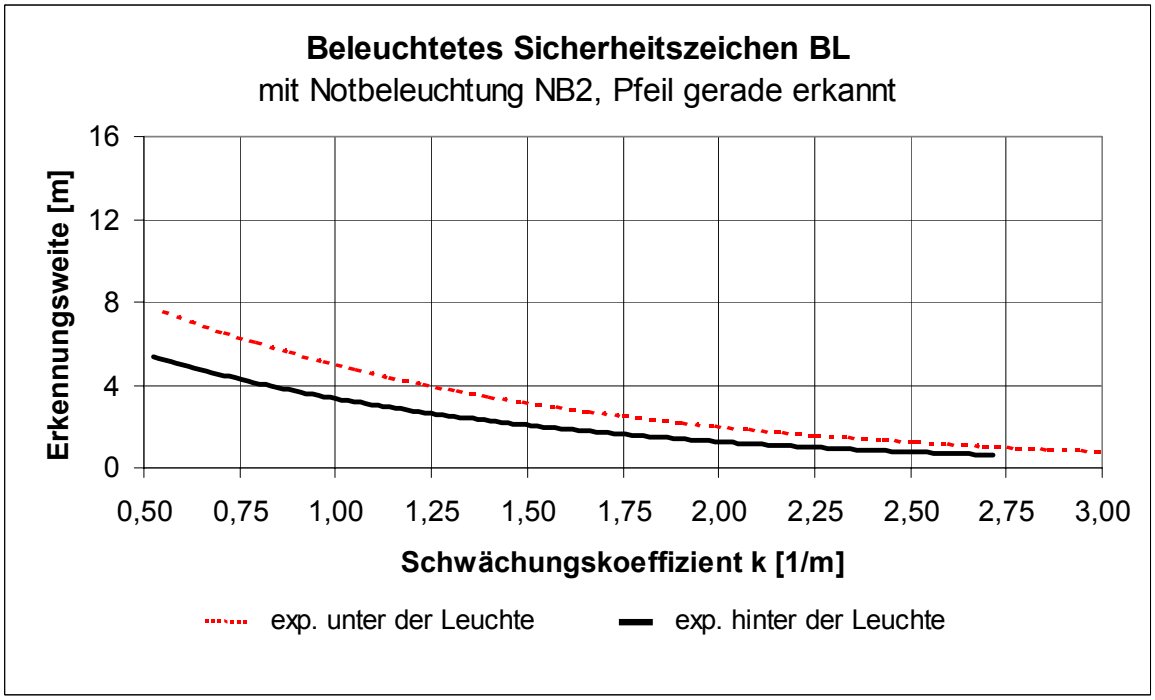



***Diagramm 34:*** ***Erkennungsweiten des beleuchteten Sicherheitszeichens BL in Abhängigkeit vom Schwächungskoeffizienten und dem Montageort, Bedingungen: Notbeleuchtung NB2, Kriterium: Pfeil erkannt***

# Anhang B

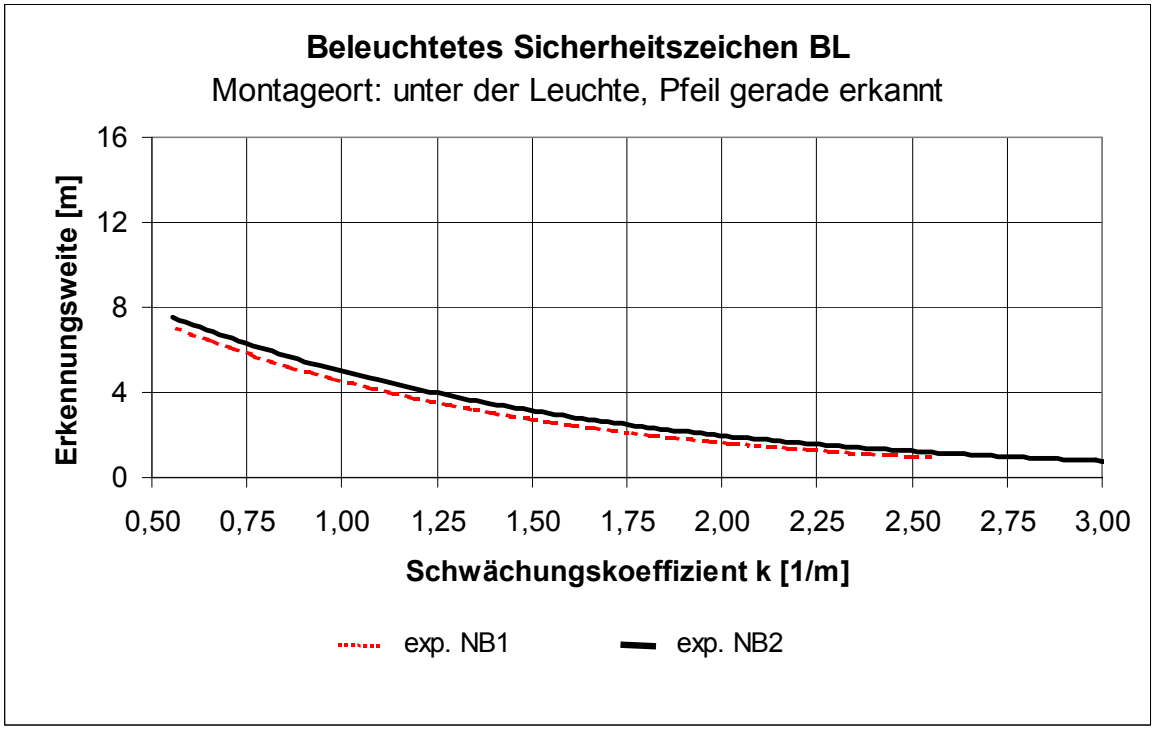



*Diagramm 35: Erkennungsweiten des beleuchteten Sicherheitszeichens BL in Abhängigkeit vom Schwächungskoeffizienten und der Art der Notbeleuchtung, Bedingungen: Montageort unter der Leuchte, Kriterium: Pfeil erkannt*

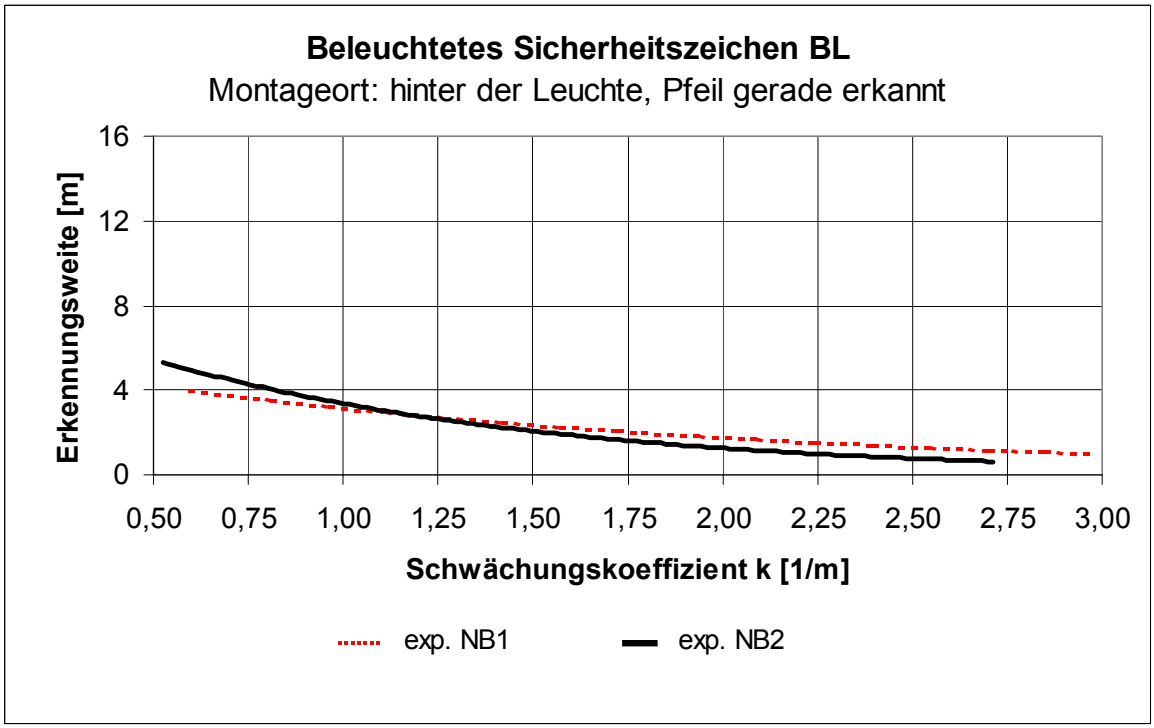



*Diagramm 36: Erkennungsweiten des beleuchteten Sicherheitszeichens BL in Abhängigkeit vom Schwächungskoeffizienten und der Art der Notbeleuchtung, Bedingungen: Montageort hinter der Leuchte, Kriterium: Pfeil erkannt*

# Anhang B

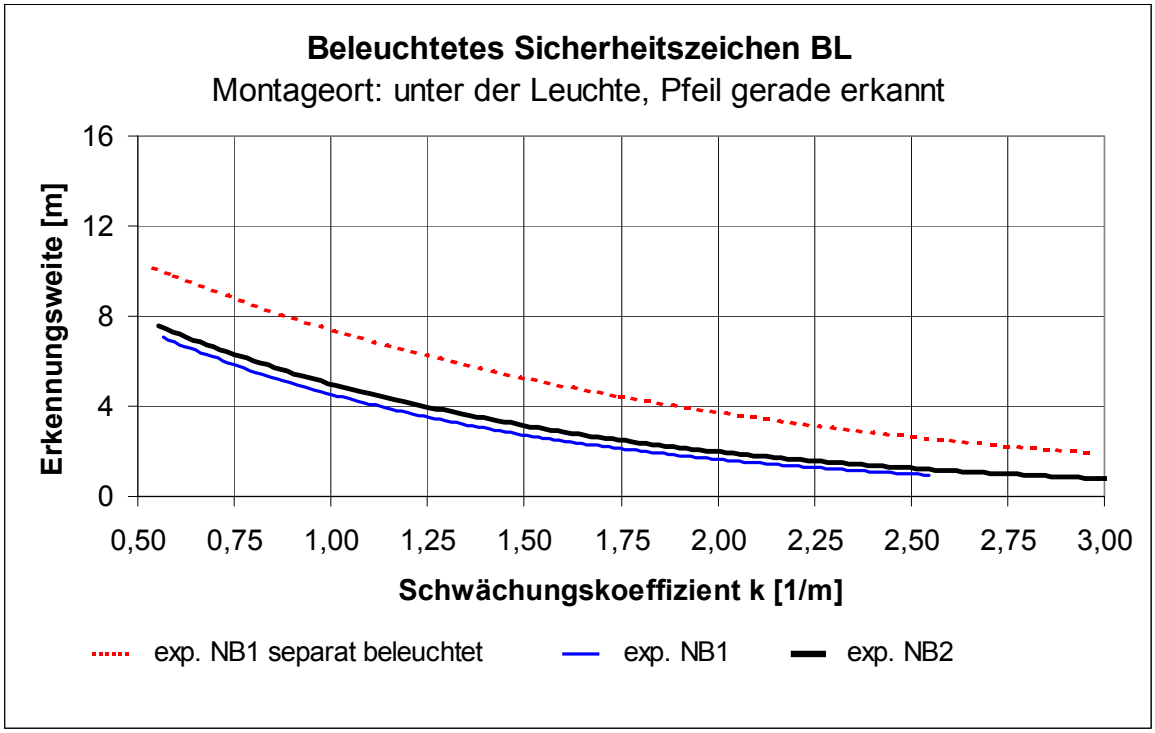



***Diagramm 37:*** ***Erkennungsweiten des beleuchteten Sicherheitszeichens BL in Abhängigkeit vom Schwächungskoeffizienten und der Art der Notbeleuchtung, Bedingungen: Montageort unter der Leuchte, Kriterium: Pfeil erkannt***

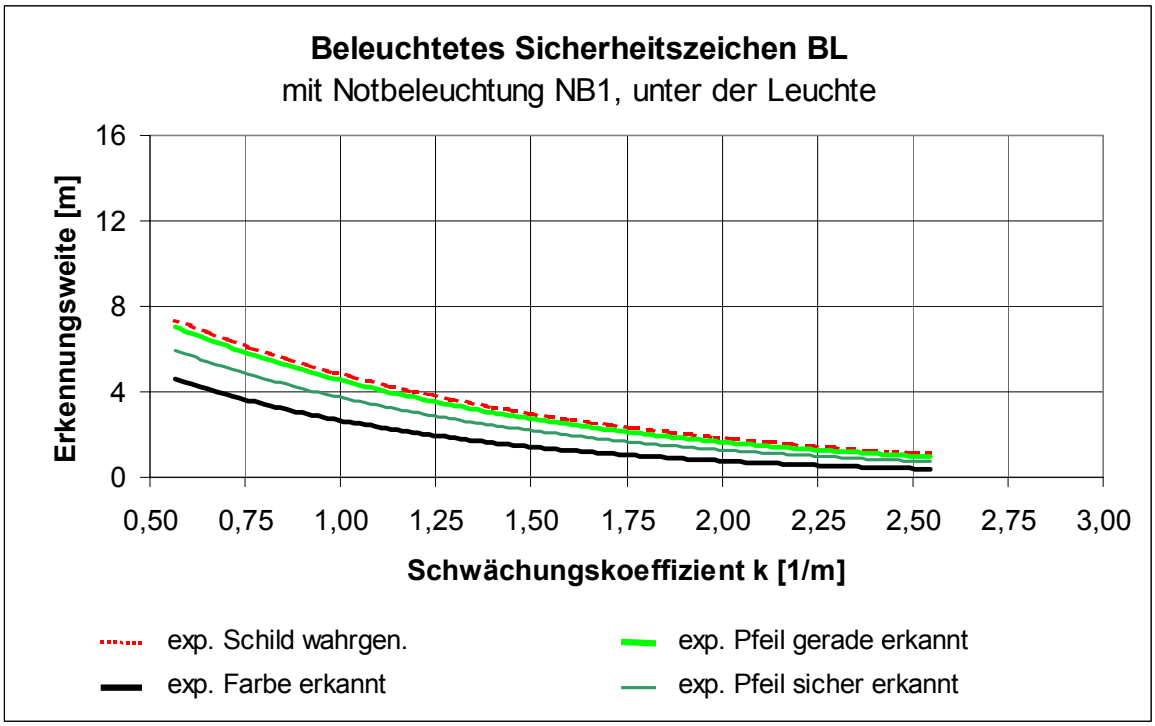



***Diagramm 38:*** ***Erkennungsweiten des beleuchteten Sicherheitszeichens BL in Abhängigkeit vom Schwächungskoeffizienten und von den Wahrnehmungskriterien, Bedingungen: Notbeleuchtung NB1, Montageort unter der Leuchte, Kriterium: Pfeil erkannt***

# Anhang B

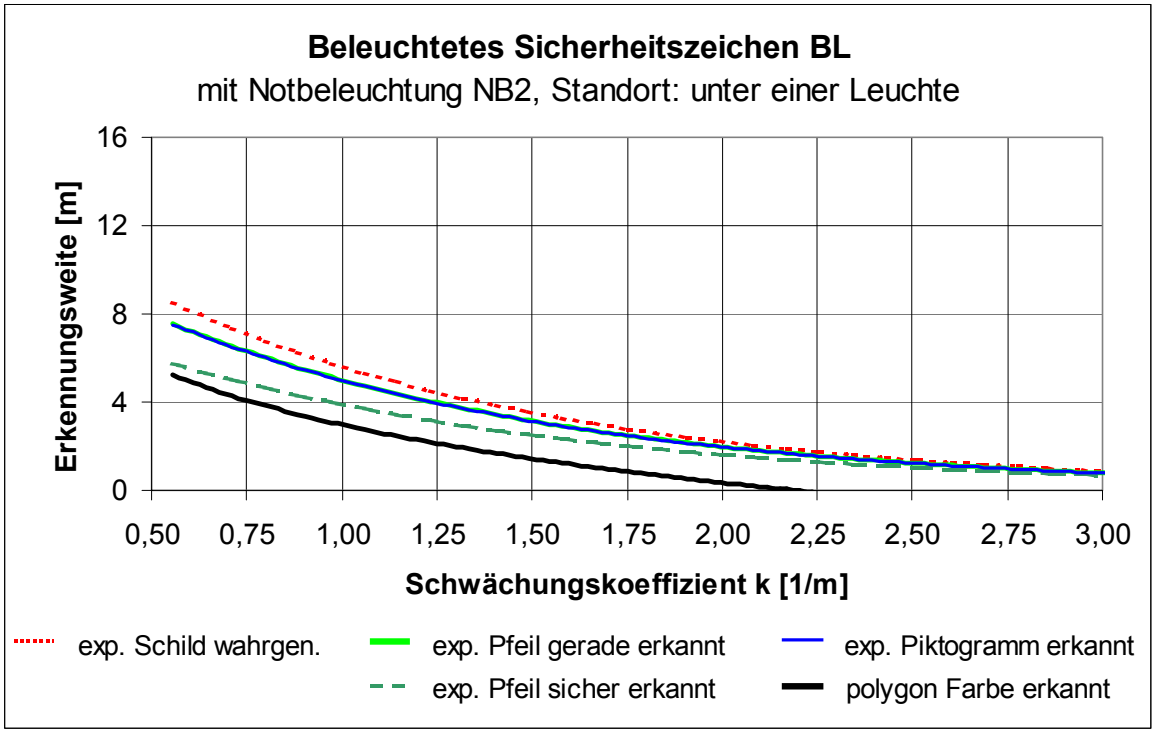



***Diagramm 39:*** ***Erkennungsweiten des beleuchteten Sicherheitszeichens BL in Abhängigkeit vom Schwächungskoeffizienten und von den Wahrnehmungskriterien, Bedingungen: Notbeleuchtung NB2, Montageort unter der Leuchte, Kriterium: Pfeil erkannt***

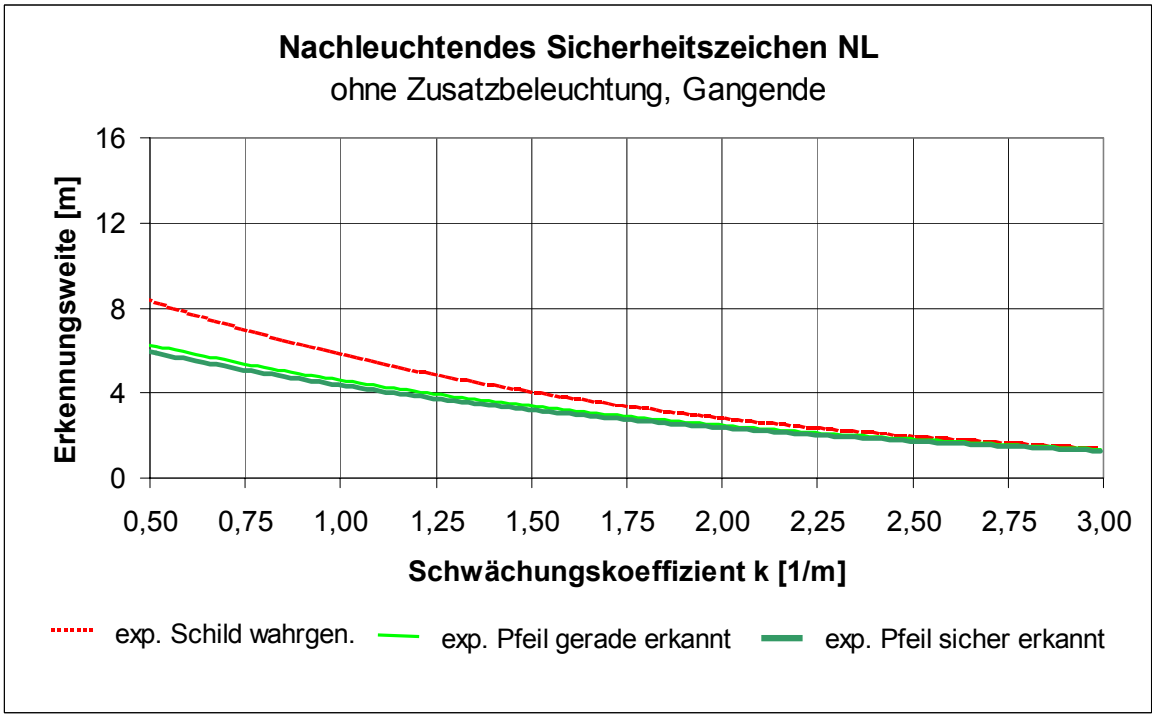



***Diagramm 40:*** ***Erkennungsweiten des nachleuchteten Sicherheitszeichens NL in Abhängigkeit vom Schwächungskoeffizienten und von den Wahrnehmungskriterien, Bedingungen: ohne Zusatzbeleuchtung, Montageort am Gangende***

# Anhang B

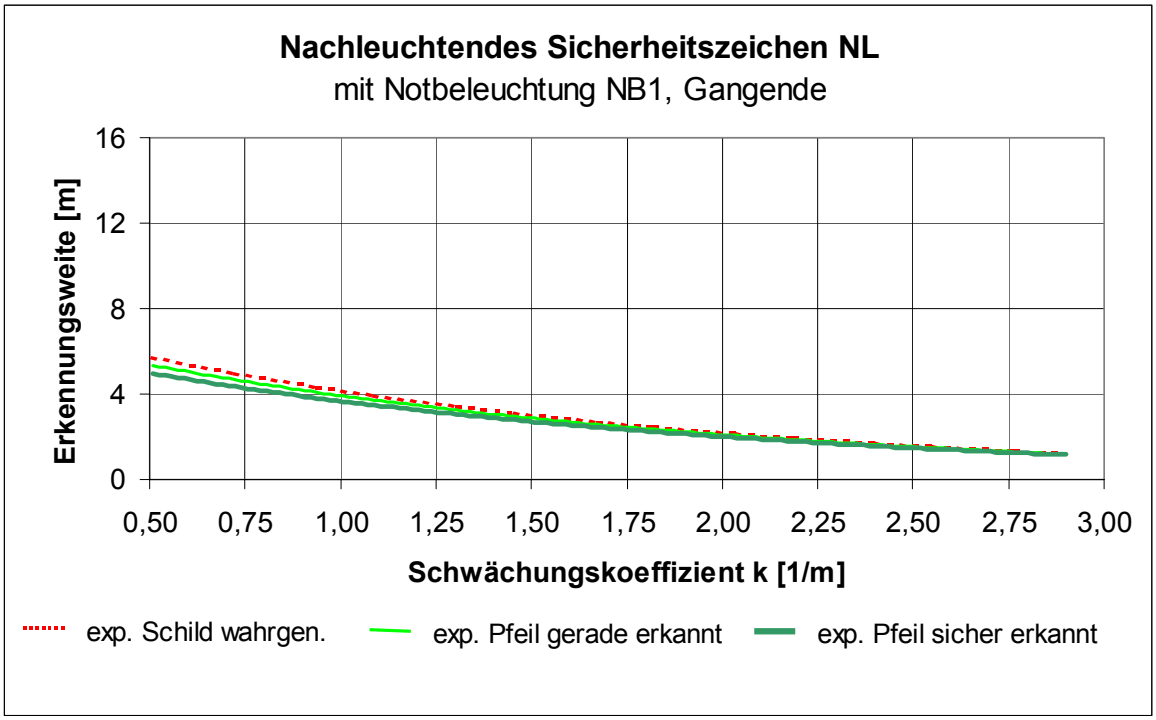



***Diagramm 41:*** ***Erkennungsweiten des nachleuchteten Sicherheitszeichens NL in Abhängigkeit vom Schwächungskoeffizienten und von den Wahrnehmungskriterien, Bedingungen: Notbeleuchtung NB1, Montageort am Gangende***

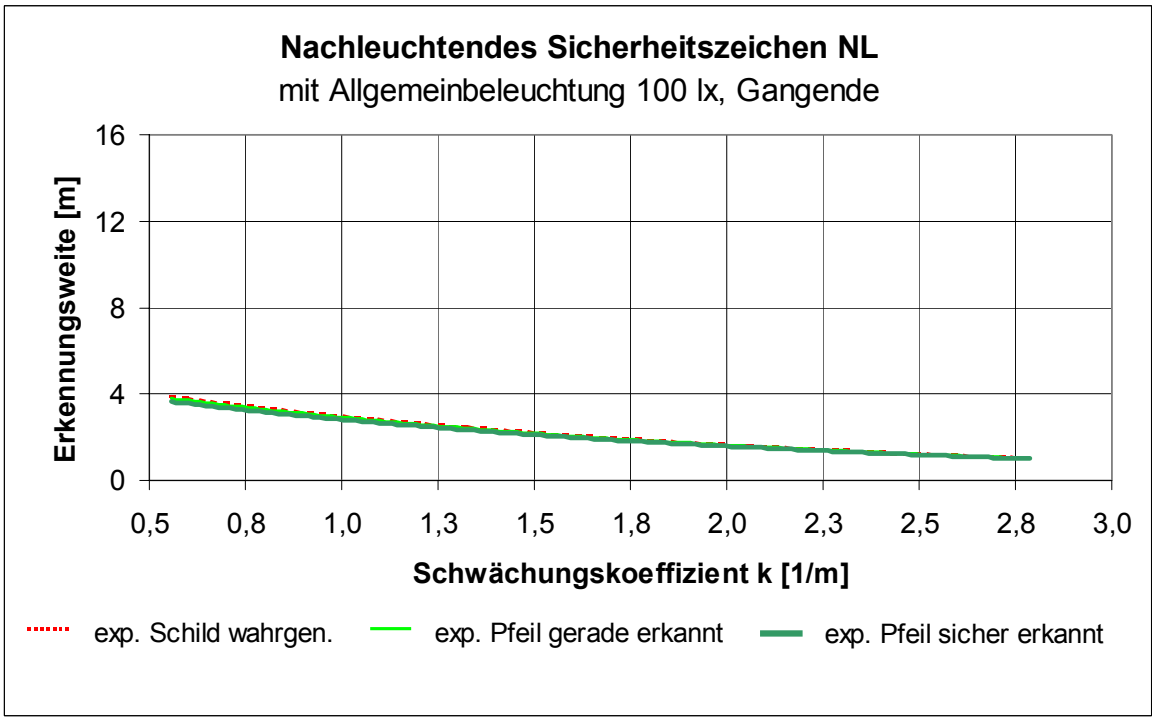



***Diagramm 42:*** ***Erkennungsweiten des nachleuchteten Sicherheitszeichens NL in Abhängigkeit vom Schwächungskoeffizienten und von den Wahrnehmungskriterien, Bedingungen: Allgemeinbeleuchtung 100 lx, Montageort am Gangende***

# Anhang B

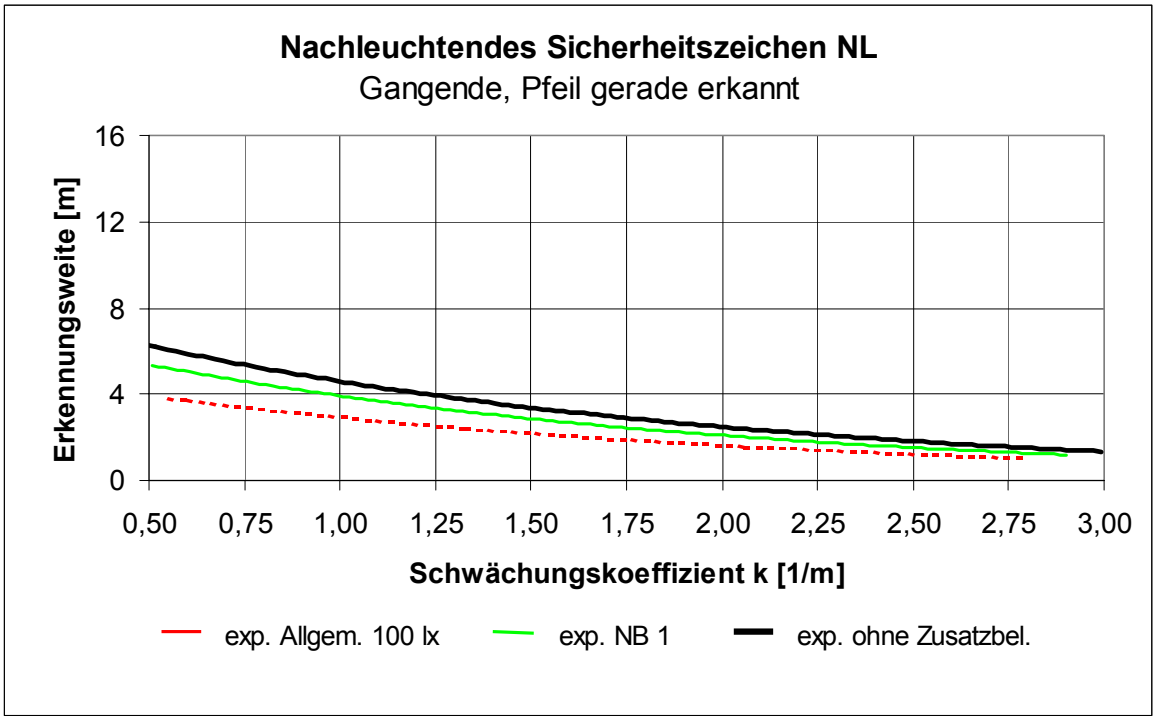



***Diagramm 43:*** ***Erkennungsweiten des nachleuchteten Sicherheitszeichens NL in Abhängigkeit vom Schwächungskoeffizienten und der Beleuchtungssituation, Bedingungen: Montageort am Gangende, Kriterium: Pfeil gerade erkannt***

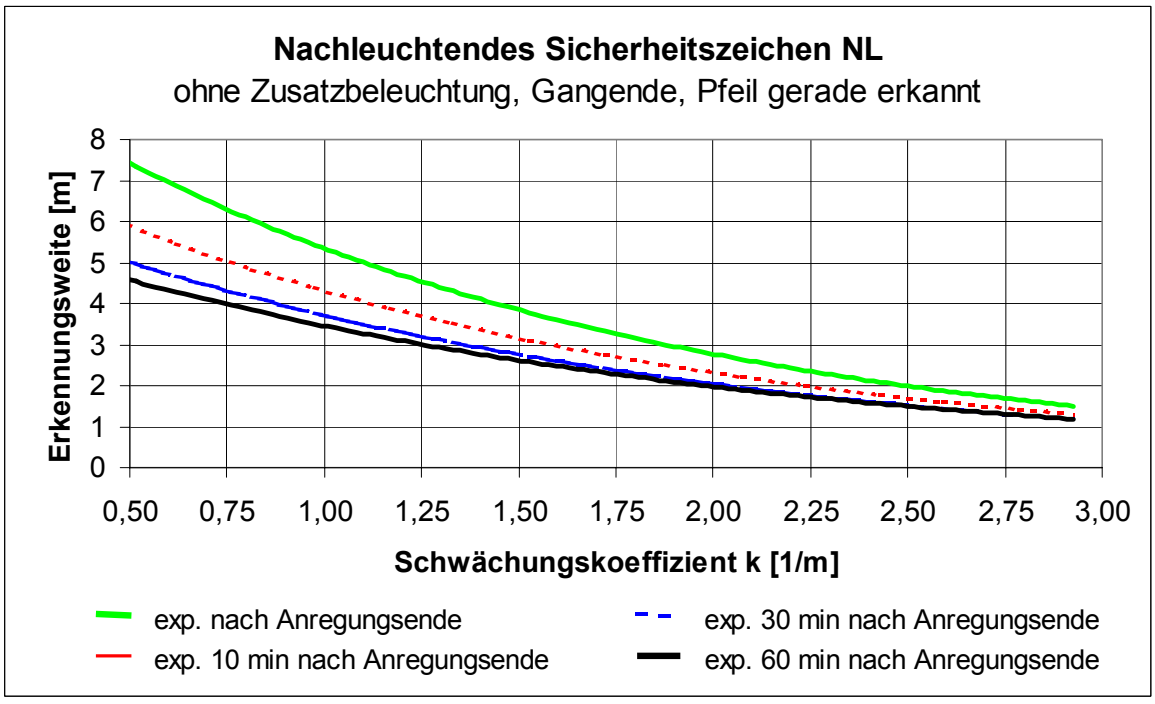



***Diagramm 44:*** ***Erkennungsweiten des nachleuchteten Sicherheitszeichens NL in Abhängigkeit vom Schwächungskoeffizienten und der Abklingdauer, Bedingungen: ohne Zusatzbeleuchtung, Montageort am Gangende, Kriterium: Pfeil gerade erkannt***

# Anhang B

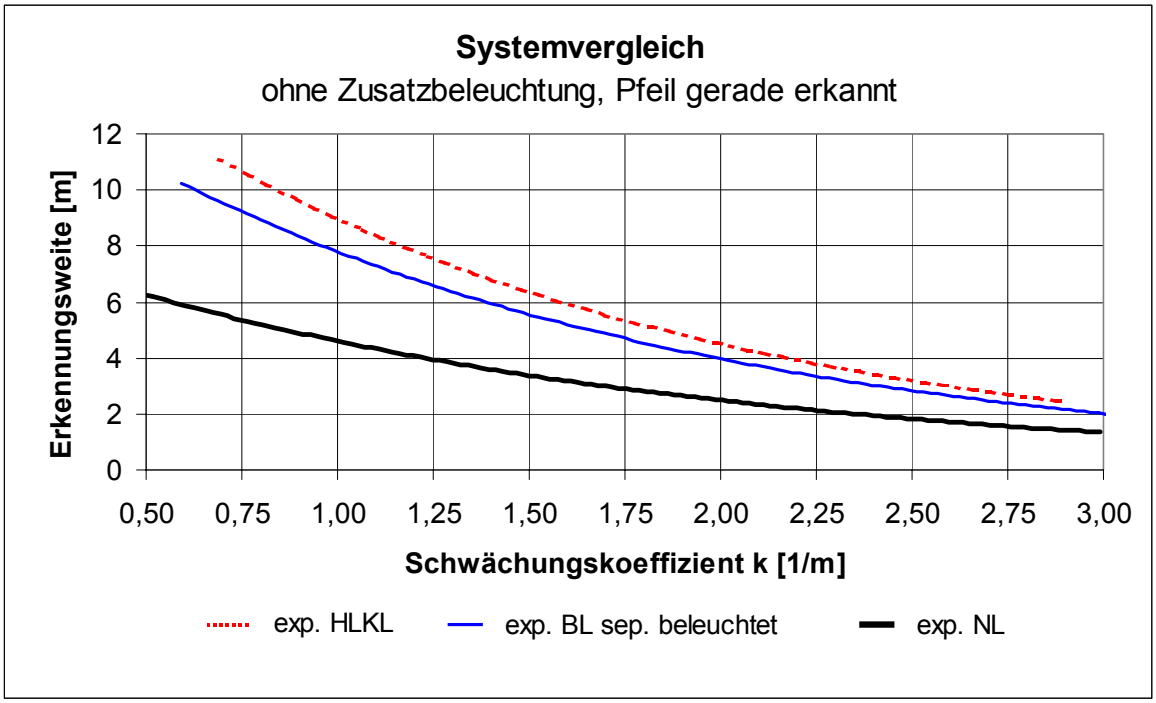



***Diagramm 45:*** ***Erkennungsweiten von verschiedenen Sicherheitszeichen in Abhängigkeit von der Art der Ausführung und vom Schwächungskoeffizienten, Bedingungen: ohne Zusatzbeleuchtung, Montageort am Gangende, Kriterium: Pfeil gerade erkannt***

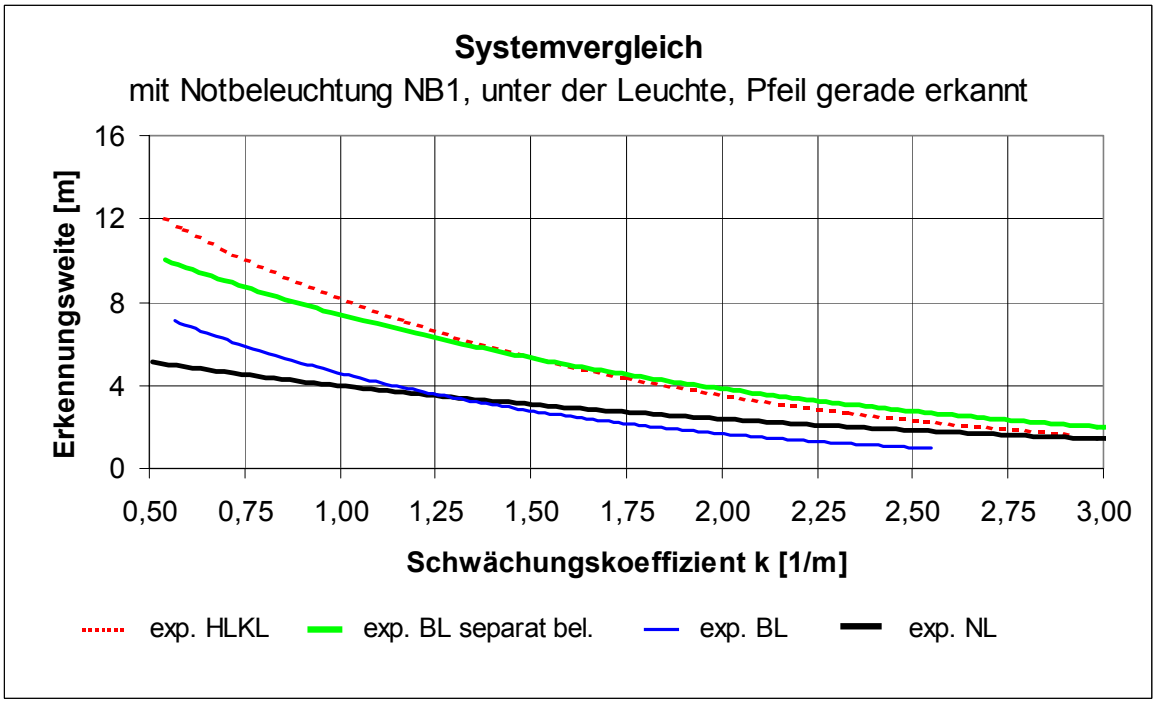



***Diagramm 46:*** ***Erkennungsweiten von verschiedenen Sicherheitszeichen in Abhängigkeit von der Art der Ausführung und vom Schwächungskoeffizienten, Bedingungen: Notbeleuchtung NB1, Montageort am Gangende, Kriterium: Pfeil gerade erkannt***

# Anhang B

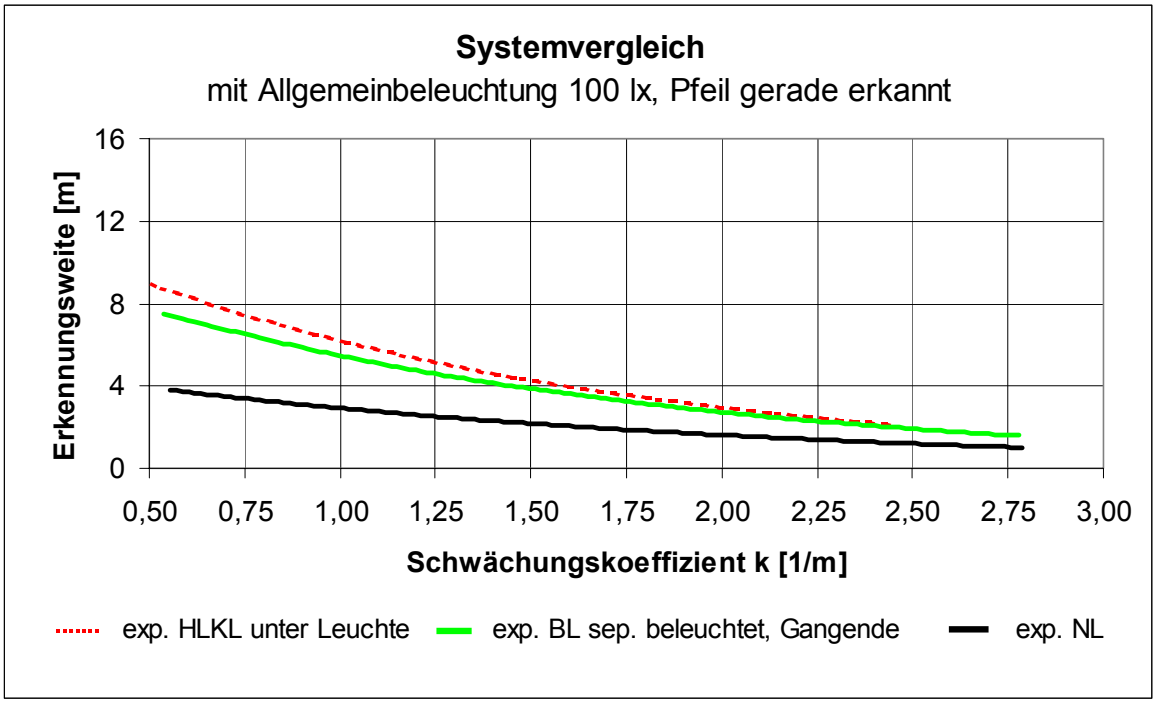



***Diagramm 47:*** ***Erkennungsweiten von verschiedenen Sicherheitszeichen in Abhängigkeit von der Art der Ausführung und vom Schwächungskoeffizienten,***
***Bedingungen: Allgemeinbeleuchtung, Montageort am Gangende, Kriterium: Pfeil gerade erkannt***

# Anhang C

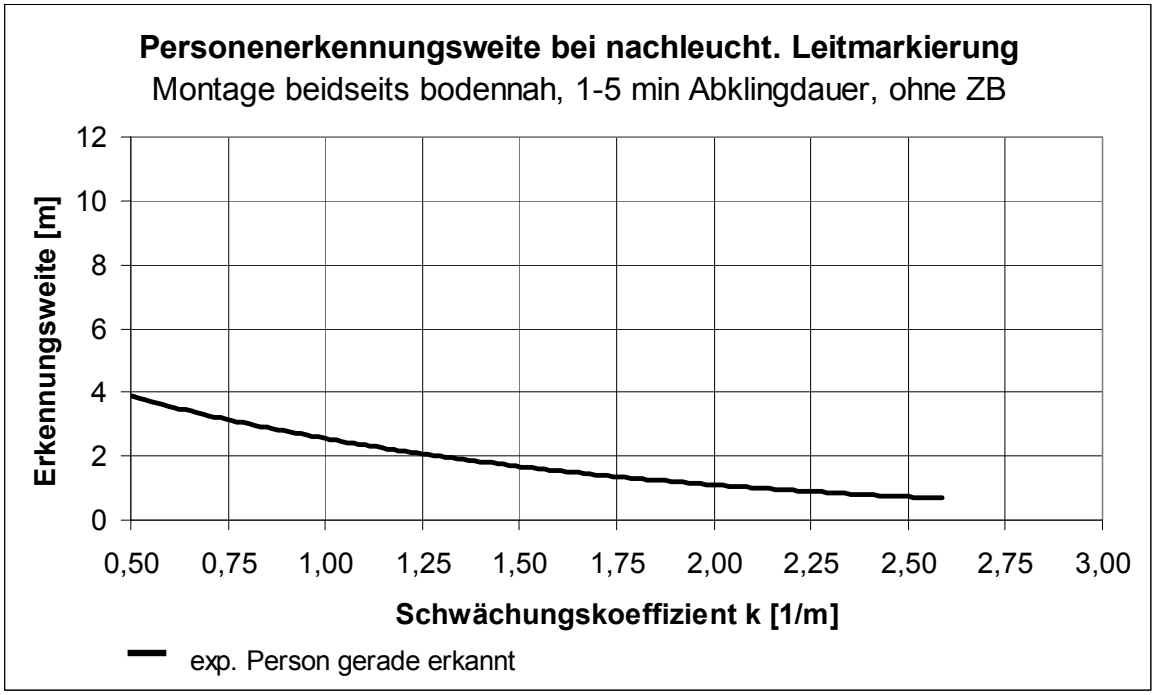



***Diagramm 48:*** ***Erkennungsweiten von Personen bei nachleuchtender Leitmarkierung in Abhängigkeit vom Schwächungskoeffizienten,***
***Bedingungen: ohne Zusatzbeleuchtung, Montageort der Leitstreifen beidseits, bodennah,***
***Kriterium: Person gerade erkannt***

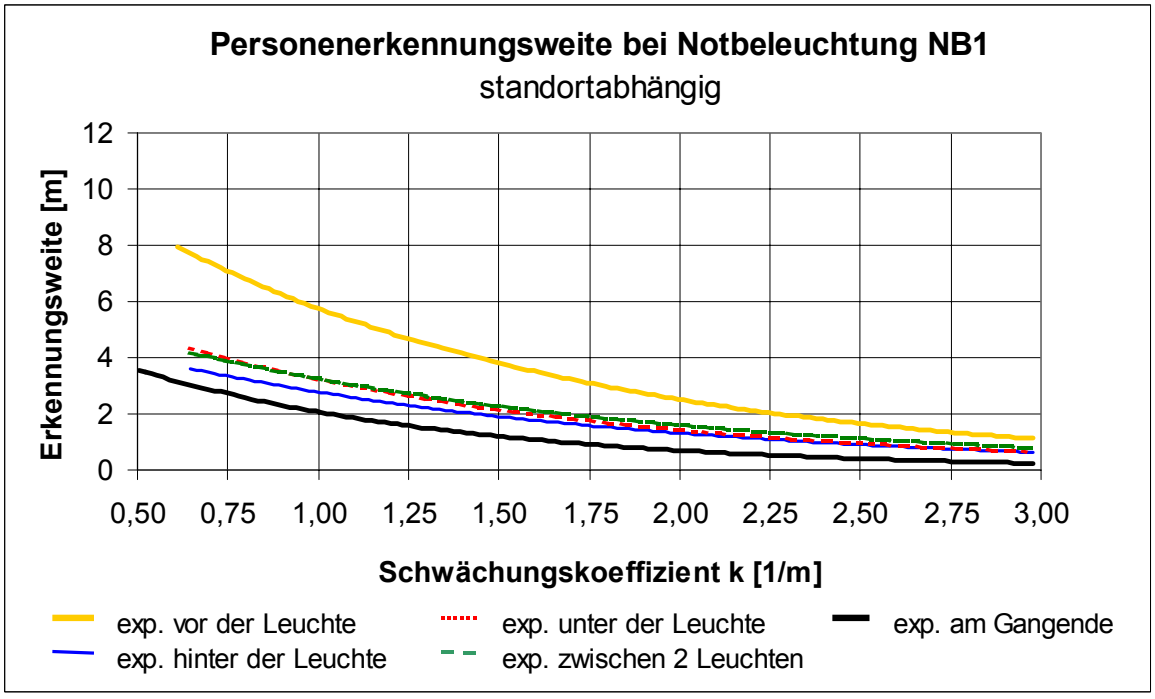



***Diagramm 49:*** ***Erkennungsweiten von Personen bei Notbeleuchtung NB1 in Abhängigkeit vom Schwächungskoeffizienten und vom Personenstandort,***
***Kriterium: Person gerade erkannt***

# Anhang C

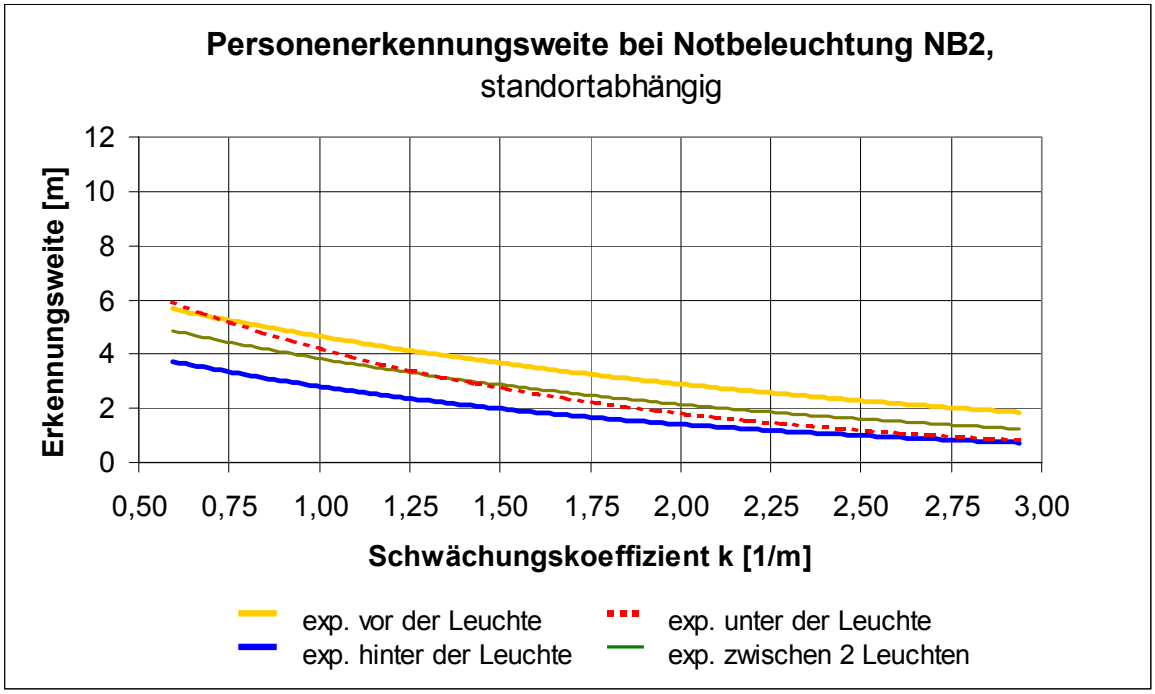



***Diagramm 50:*** ***Erkennungsweiten von Personen bei Notbeleuchtung NB2 in Abhängigkeit vom Schwächungskoeffizienten und vom Personenstandort, Kriterium: Person gerade erkannt***

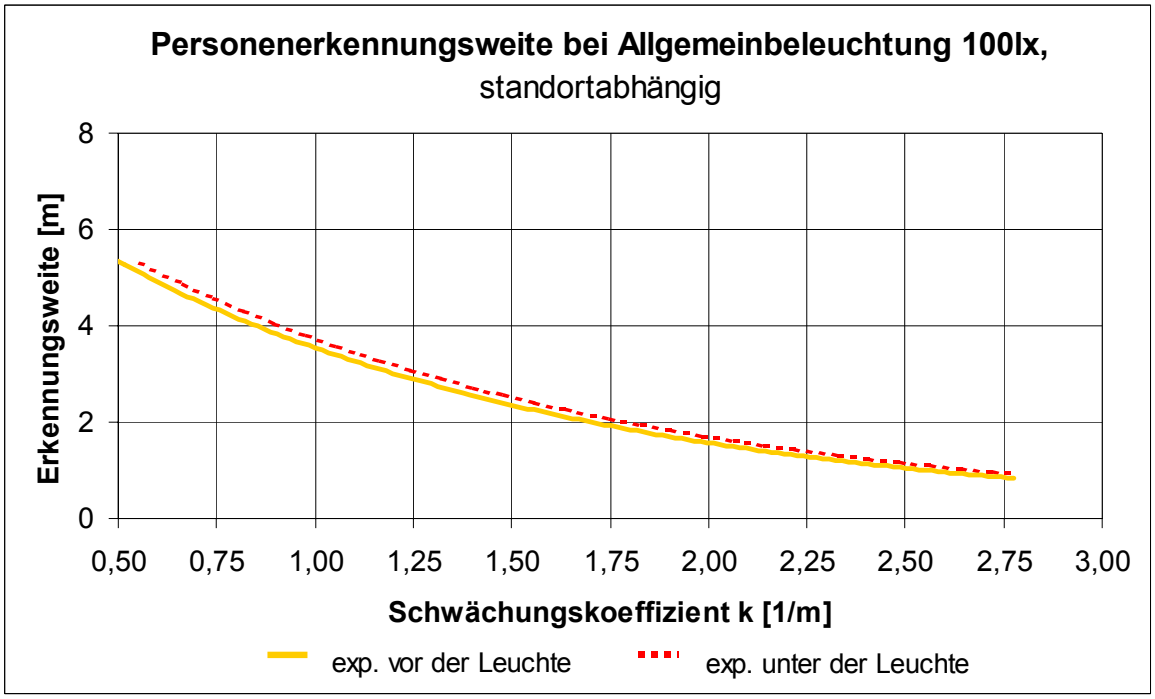



***Diagramm 51:*** ***Erkennungsweiten von Personen bei Allgemeinbeleuchtung 100 lx in Abhängigkeit vom Schwächungskoeffizienten und vom Personenstandort, Kriterium: Person gerade erkannt***

# Anhang C

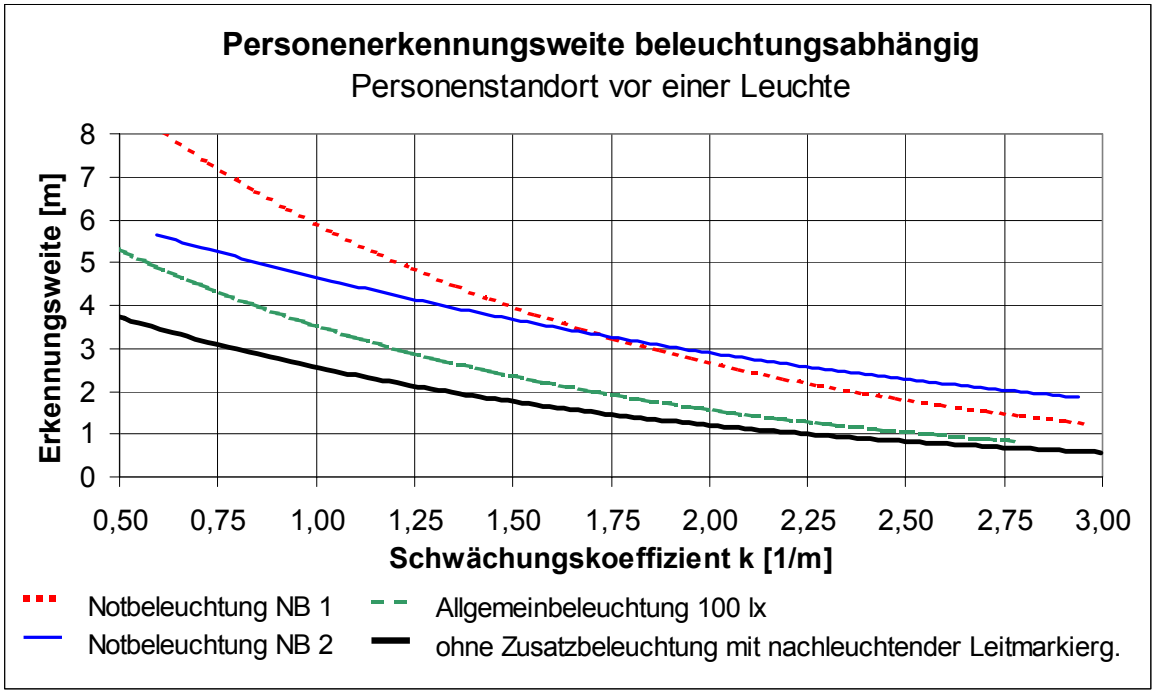



***Diagramm 52:*** ***Erkennungsweiten von Personen in Abhängigkeit vom Schwächungskoeffizienten und von der Beleuchtungssituation,***
***Personenstandort: vor der Leuchte, Kriterium: Person gerade erkannt***

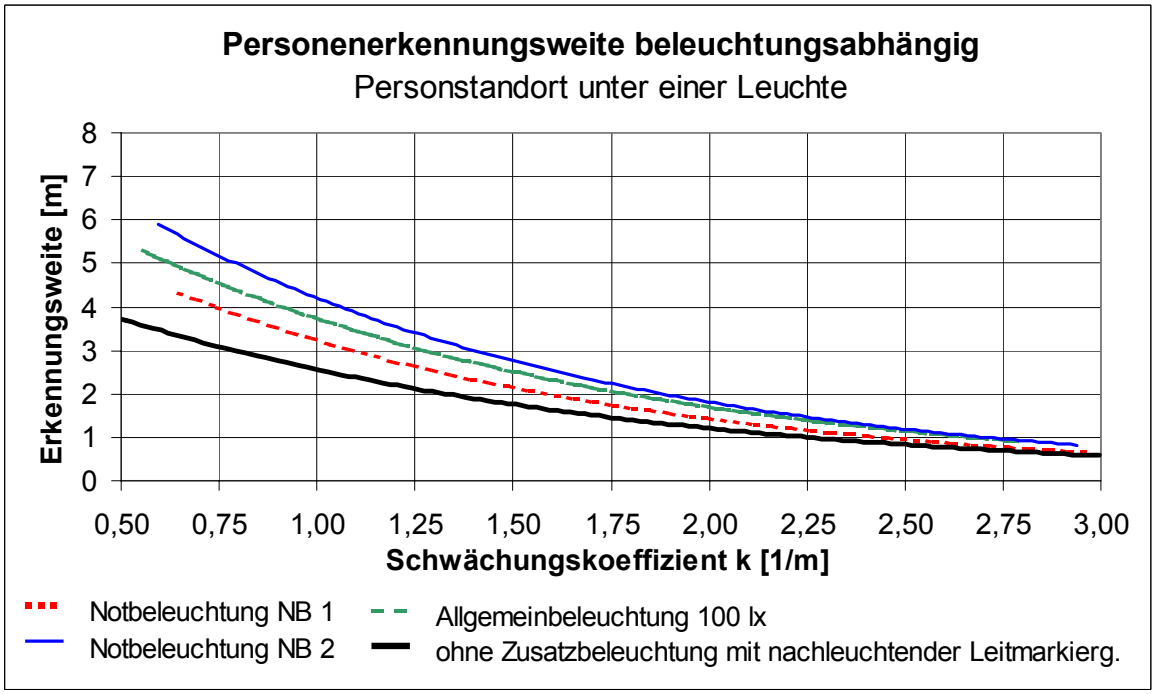



***Diagramm 53:*** ***Erkennungsweiten von Personen in Abhängigkeit vom Schwächungskoeffizienten und von der Beleuchtungssituation,***
***Personenstandort: unter der Leuchte, Kriterium: Person gerade erkannt***

# Anhang C

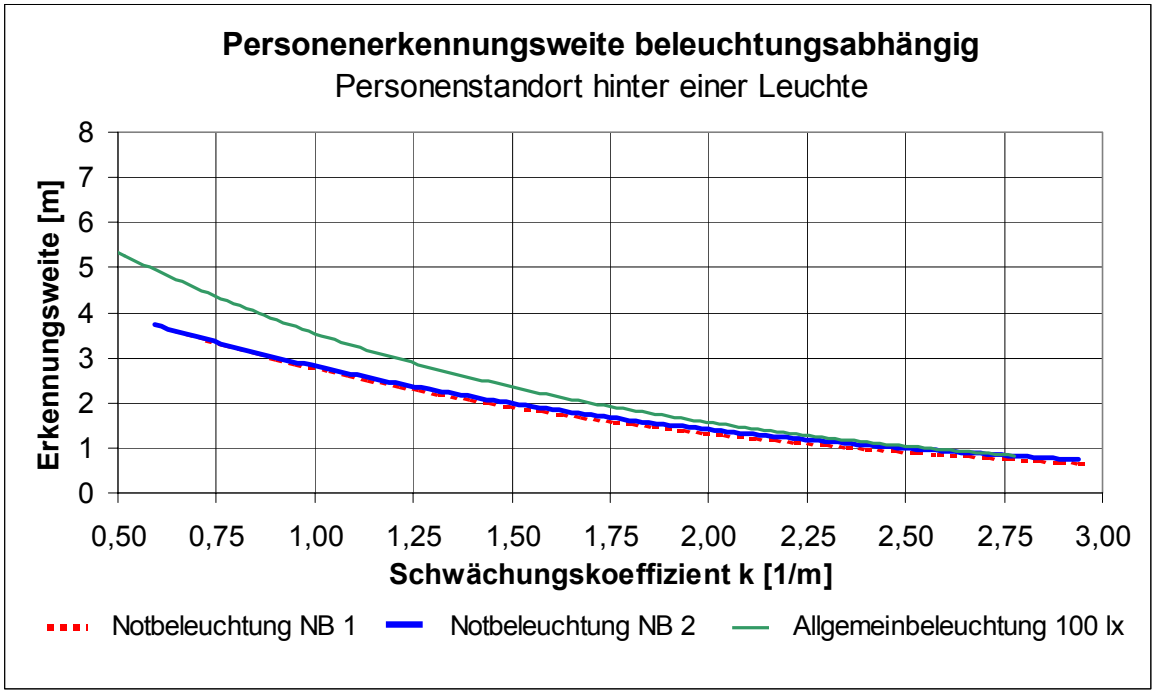



***Diagramm 54:*** ***Erkennungsweiten von Personen in Abhängigkeit vom Schwächungskoeffizienten und von der Beleuchtungssituation,***
***Personenstandort hinter der Leuchte, Kriterium: Person gerade erkannt***

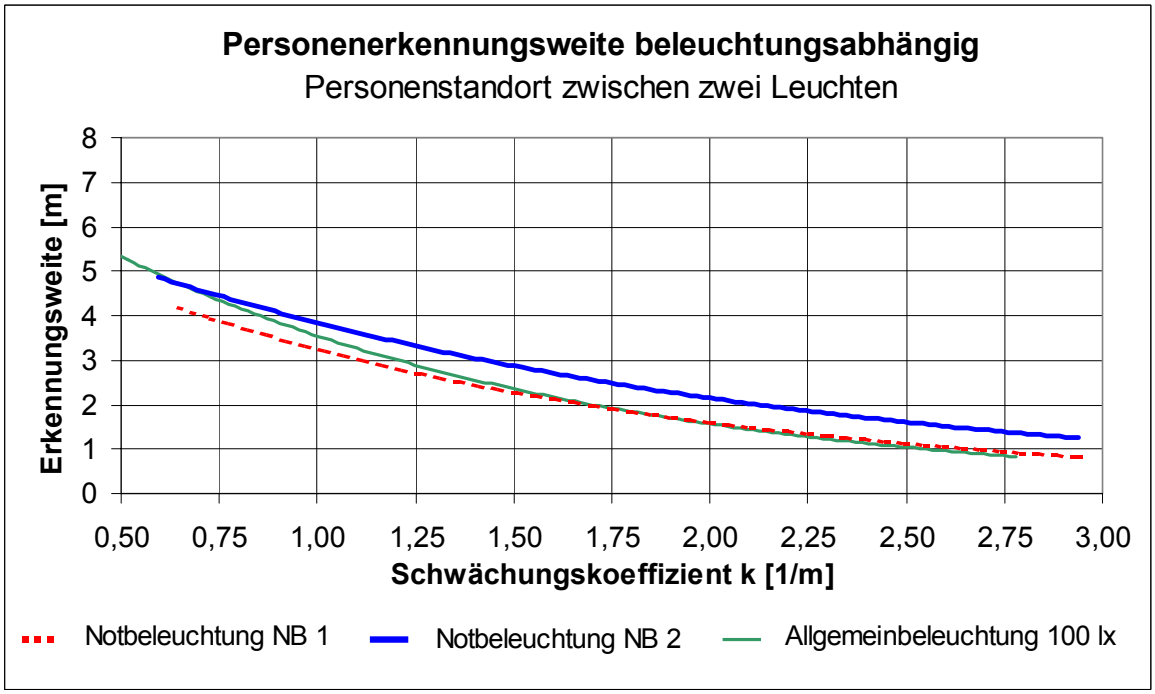



***Diagramm 55:*** ***Erkennungsweiten von Personen in Abhängigkeit vom Schwächungskoeffizienten und von der Beleuchtungssituation,***
***Personenstandort: hinter der Leuchte, Kriterium: Person gerade erkannt***

# Anhang D

**Diagramm 1**

| Kurvenzug | exp. Licht wahrgen. | exp. Schild wahrgen. | exp. Pfeil gerade erkannt | exp. Pfeil sicher erkannt |
|---|---|---|---|---|
| Bestimmtheitsmaß $R^2$ | 0,87 | 0,90 | 0,89 | 0,83 |
| Datensätze | 48 | 48 | 48 | 48 |
| Probanden | 26 | 26 | 26 | 26 |

**Diagramm 2**

| Kurvenzug | exp. Schild wahrgen. | exp. Pfeil gerade erkannt | exp. Pfeil sicher erkannt |
|---|---|---|---|
| Bestimmtheitsmaß $R^2$ | 0,86 | 0,90 | 0,81 |
| Datensätze | 76 | 76 | 76 |
| Probanden | 27 | 27 | 27 |

**Diagramm 3**

| Kurvenzug | exp. Schild wahrgen. | exp. Pfeil gerade erkannt | exp. Pfeil sicher erkannt |
|---|---|---|---|
| Bestimmtheitsmaß $R^2$ | 0,79 | 0,80 | 0,78 |
| Datensätze | 45 | 45 | 45 |
| Probanden | 27 | 27 | 27 |

**Diagramm 4**

| Kurvenzug | exp. Allgem. 100 lx | exp. NB1 | exp. ohne Zusatzbel. |
|---|---|---|---|
| Bestimmtheitsmaß $R^2$ | 0,80 | 0,90 | 0,89 |
| Datensätze | 45 | 76 | 48 |
| Probanden | 27 | 27 | 26 |

**Diagramm 5**

| Kurvenzug | exp. Licht wahrgen. | exp. Schild wahrgen. | exp. Pfeil gerade erkannt | exp. Pfeil sicher erkannt |
|---|---|---|---|---|
| Bestimmtheitsmaß $R^2$ | 0,54 | 0,88 | 0,90 | 0,86 |
| Datensätze | 47 | 47 | 47 | 47 |
| Probanden | 27 | 27 | 27 | 27 |

**Diagramm 6**

| Kurvenzug | exp. Schild wahrgen. | exp. Pfeil gerade erkannt | exp. Pfeil sicher erkannt |
|---|---|---|---|
| Bestimmtheitsmaß $R^2$ | 0,88 | 0,89 | 0,89 |
| Datensätze | 44 | 44 | 44 |
| Probanden | 30 | 30 | 30 |

**Diagramm 7**

| Kurvenzug | exp. Schild wahrgen. | exp. Pfeil gerade erkannt | exp. Pfeil sicher erkannt |
|---|---|---|---|
| Bestimmtheitsmaß $R^2$ | 0,89 | 0,87 | 0,86 |
| Datensätze | 64 | 64 | 64 |
| Probanden | 28 | 28 | 28 |

**Diagramm 8**

| Kurvenzug | exp. Allgem. 100 lx | exp. NB1 | exp. ohne Zusatzbel. |
|---|---|---|---|
| Bestimmtheitsmaß $R^2$ | 0,87 | 0,89 | 0,90 |
| Datensätze | 64 | 44 | 47 |
| Probanden | 28 | 30 | 27 |

# Anhang D

**Diagramm 9**

| Kurvenzug | exp. Licht wahrgen. | exp. Schild wahrgen. | exp. Pfeil gerade erkannt | exp. Pfeil sicher erkannt |
|---|---|---|---|---|
| Bestimmtheitsmaß $R^2$ | 0,77 | 0,90 | 0,92 | 0,86 |
| Datensätze | 54 | 54 | 54 | 54 |
| Probanden | 33 | 33 | 33 | 33 |

**Diagramm 10**

| Kurvenzug | exp. Schild wahrgen. | exp. Pfeil gerade erkannt | exp. Pfeil sicher erkannt |
|---|---|---|---|
| Bestimmtheitsmaß $R^2$ | 0,90 | 0,89 | 0,80 |
| Datensätze | 85 | 85 | 85 |
| Probanden | 35 | 35 | 35 |

**Diagramm 11**

| Kurvenzug | exp. Schild wahrgen. | exp. Pfeil gerade erkannt | exp. Pfeil sicher erkannt | exp. Piktogramm erkannt | exp. Farbe erkannt |
|---|---|---|---|---|---|
| Bestimmtheitsmaß $R^2$ | 0,89 | 0,90 | 0,85 | 0,89 | 0,93 |
| Datensätze | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 |
| Probanden | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 |

**Diagramm 12**

| Kurvenzug | exp. Schild wahrgen. | exp. Pfeil gerade erkannt | exp. Pfeil sicher erkannt |
|---|---|---|---|
| Bestimmtheitsmaß $R^2$ | 0,89 | 0,91 | 0,85 |
| Datensätze | 51 | 51 | 51 |
| Probanden | 30 | 30 | 30 |

**Diagramm 13**

| Kurvenzug | exp. Allgem. 100 lx | exp. NB1 | exp. NB2 | exp. ohne Zusatzbel. |
|---|---|---|---|---|
| Bestimmtheitsmaß $R^2$ | 0,91 | 0,89 | 0,92 | 0,92 |
| Datensätze | 51 | 85 | 25 | 54 |
| Probanden | 30 | 35 | 13 | 33 |

**Diagramm 14**

| Kurvenzug | exp. HLKL | exp. HLGR | exp. HLKL LED |
|---|---|---|---|
| Bestimmtheitsmaß $R^2$ | 0,92 | 0,90 | 0,89 |
| Datensätze | 54 | 47 | 48 |
| Probanden | 33 | 27 | 26 |

**Diagramm 15**

| Kurvenzug | exp. HLKL | exp. HLGR | exp. HLKL LED |
|---|---|---|---|
| Bestimmtheitsmaß $R^2$ | 0,89 | 0,89 | 0,90 |
| Datensätze | 85 | 44 | 76 |
| Probanden | 35 | 30 | 27 |

**Diagramm 16**

| Kurvenzug | exp. HLKL | exp. HLGR | exp. HLKL LED |
|---|---|---|---|
| Bestimmtheitsmaß $R^2$ | 0,91 | 0,87 | 0,80 |
| Datensätze | 51 | 64 | 45 |
| Probanden | 30 | 28 | 27 |

# Anhang D

**Diagramm 17**

| Kurvenzug | am Gangende | hinter der Leuchte | unter der Leuchte | vor der Leuchte | zwischen 2 Leuchten |
|---|---|---|---|---|---|
| Bestimmtheitsmaß $R^2$ | 0,90 | 0,92 | 0,93 | 0,89 | 0,88 |
| Datensätze | 85 | 41 | 38 | 36 | 36 |
| Probanden | 35 | 18 | 21 | 19 | 19 |

**Diagramm 18**

| Kurvenzug | hinter der Leuchte | unter der Leuchte | vor der Leuchte (zwischen 2 Leuchten) |
|---|---|---|---|
| Bestimmtheitsmaß $R^2$ | 0,90 | 0,94 | 0,91 |
| Datensätze | 25 | 30 | 31 |
| Probanden | 13 | 12 | 9 |

**Diagramm 19**

| Kurvenzug | exp. NB1 | exp. NB2 |
|---|---|---|
| Bestimmtheitsmaß $R^2$ | 0,89 | 0,91 |
| Datensätze | 36 | 31 |
| Probanden | 19 | 9 |

**Diagramm 20**

| Kurvenzug | exp. NB1 | exp. NB2 |
|---|---|---|
| Bestimmtheitsmaß $R^2$ | 0,93 | 0,94 |
| Datensätze | 38 | 30 |
| Probanden | 21 | 12 |

**Diagramm 21**

| Kurvenzug | exp. NB1 | exp. NB2 |
|---|---|---|
| Bestimmtheitsmaß $R^2$ | 0,92 | 0,91 |
| Datensätze | 41 | 31 |
| Probanden | 18 | 9 |

**Diagramm 22**

| Kurvenzug | exp. NB1 | exp. NB2 |
|---|---|---|
| Bestimmtheitsmaß $R^2$ | 0,88 | 0,91 |
| Datensätze | 36 | 31 |
| Probanden | 19 | 9 |

**Diagramm 23**

| Kurvenzug | exp. HLKL | exp. HLGR |
|---|---|---|
| Bestimmtheitsmaß $R^2$ | 0,92 | 0,90 |
| Datensätze | 54 | 47 |
| Probanden | 33 | 27 |

**Diagramm 24**

| Kurvenzug | exp. HLKL | exp. HLGR |
|---|---|---|
| Bestimmtheitsmaß $R^2$ | 0,89 | 0,89 |
| Datensätze | 85 | 44 |
| Probanden | 35 | 30 |

# Anhang D

**Diagramm 25**

| Kurvenzug | exp. HLKL | exp. HLGR |
|---|---|---|
| **Bestimmtheitsmaß R²** | 0,91 | 0,87 |
| **Datensätze** | 51 | 64 |
| **Probanden** | 30 | 28 |

**Diagramm 26**

| Kurvenzug | exp. HLKL LL | exp. HLKL LED |
|---|---|---|
| **Bestimmtheitsmaß R²** | 0,89 | 0,90 |
| **Datensätze** | 85 | 76 |
| **Probanden** | 35 | 27 |

**Diagramm 27**

| Kurvenzug | exp. Licht wahrgen. | exp. Schild wahrgen. | exp. Pfeil gerade erkannt | exp. Pfeil sicher erkannt | exp. Piktogramm erkannt | linear Farbe erkannt |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Bestimmtheitsmaß R²** | 0,63 | 0,93 | 0,93 | 0,82 | 0,83 | 0,30 |
| **Datensätze** | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 |
| **Probanden** | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 |

**Diagramm 28**

| Kurvenzug | exp. HLKL schwarz/ weiß | exp. HLKL grün/ weiß |
|---|---|---|
| Bestimmtheitsmaß R² | 0,93 | 0,92 |
| Datensätze | 25 | 54 |
| Probanden | 9 | 23 |

**Diagramm 29**

| Kurvenzug | exp. Licht wahrgen. | exp. Schild wahrgen. | exp. Pfeil gerade erkannt | exp. Pfeil sicher erkannt |
|---|---|---|---|---|
| **Bestimmtheitsmaß R²** | 0,76 | 0,86 | 0,88 | 0,87 |
| **Datensätze** | 47 | 47 | 47 | 47 |
| **Probanden** | 28 | 28 | 28 | 28 |

**Diagramm 30**

| Kurvenzug | exp. Schild wahrgen. | exp. Pfeil gerade erkannt | exp. Pfeil sicher erkannt |
|---|---|---|---|
| **Bestimmtheitsmaß R²** | 0,91 | 0,92 | 0,88 |
| **Datensätze** | 43 | 43 | 43 |
| **Probanden** | 22 | 22 | 22 |

**Diagramm 31**

| Kurvenzug | exp. Schild wahrgen. | exp. Pfeil gerade erkannt | exp. Pfeil sicher erkannt |
|---|---|---|---|
| **Bestimmtheitsmaß R²** | 0,91 | 0,92 | 0,88 |
| **Datensätze** | 43 | 43 | 43 |
| **Probanden** | 22 | 22 | 22 |

**Diagramm 32**

| Kurvenzug | exp. Allgem. 100 lx | exp. NB1 | exp. ohne Zusatzbel. |
|---|---|---|---|
| **Bestimmtheitsmaß R²** | 0,92 | 0,92 | 0,88 |
| **Datensätze** | 43 | 43 | 47 |
| **Probanden** | 22 | 22 | 28 |

# Anhang D

**Diagramm 33**

| Kurvenzug | exp. unter der Leuchte | exp. hinter der Leuchte |
|---|---|---|
| Bestimmtheitsmaß R² | 0,87 | 0,70 |
| Datensätze | 39 | 33 |
| Probanden | 17 | 12 |

**Diagramm 34**

| Kurvenzug | exp. unter der Leuchte | exp. hinter der Leuchte |
|---|---|---|
| Bestimmtheitsmaß R² | 0,91 | 0,85 |
| Datensätze | 30 | 30 |
| Probanden | 14 | 13 |

**Diagramm 35**

| Kurvenzug | exp. NB1 | exp. NB2 |
|---|---|---|
| Bestimmtheitsmaß R² | 0,87 | 0,91 |
| Datensätze | 39 | 30 |
| Probanden | 17 | 14 |

**Diagramm 36**

| Kurvenzug | exp. NB1 | exp. NB2 |
|---|---|---|
| Bestimmtheitsmaß R² | 0,70 | 0,85 |
| Datensätze | 33 | 30 |
| Probanden | 12 | 13 |

**Diagramm 37**

| Kurvenzug | exp. NB1 separat beleuchtet | exp. NB1 | exp. NB2 |
|---|---|---|---|
| Bestimmtheitsmaß R² | 0,92 | 0,70 | 0,85 |
| Datensätze | 37 | 33 | 30 |
| Probanden | 21 | 12 | 13 |

**Diagramm 38**

| Kurvenzug | exp. Schild wahrgen. | exp. Pfeil gerade erkannt | exp. Pfeil sicher erkannt | exp. Farbe erkannt |
|---|---|---|---|---|
| Bestimmtheitsmaß R² | 0,91 | 0,92 | 0,88 | 0,79 |
| Datensätze | 43 | 43 | 43 | 43 |
| Probanden | 22 | 22 | 22 | 22 |

**Diagramm 39**

| Kurvenzug | exp. Schild wahrgen. | exp. Pfeil gerade erkannt | exp. Pfeil sicher erkannt | exp. Piktogramm erkannt | polygon Farbe erkannt |
|---|---|---|---|---|---|
| Bestimmtheitsmaß R² | 0,90 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,82 |
| Datensätze | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 |
| Probanden | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 |

**Diagramm 40**

| Kurvenzug | exp. Schild wahrgen. | exp. Pfeil gerade erkannt | exp. Pfeil sicher erkannt |
|---|---|---|---|
| Bestimmtheitsmaß R² | 0,82 | 0,70 | 0,72 |
| Datensätze | 152 | 152 | 152 |
| Probanden | 32 | 32 | 32 |

# Anhang D

**Diagramm 41**

| Kurvenzug | exp. Schild wahrgen. | exp. Pfeil gerade erkannt | exp. Pfeil sicher erkannt |
|---|---|---|---|
| Bestimmtheitsmaß $R^2$ | 0,84 | 0,84 | 0,71 |
| Datensätze | 34 | 34 | 34 |
| Probanden | 21 | 21 | 21 |

**Diagramm 42**

| Kurvenzug | exp. Schild wahrgen. | exp. Pfeil gerade erkannt | exp. Pfeil sicher erkannt |
|---|---|---|---|
| Bestimmtheitsmaß $R^2$ | 0,82 | 0,81 | 0,80 |
| Datensätze | 38 | 38 | 38 |
| Probanden | 21 | 21 | 21 |

**Diagramm 43**

| Kurvenzug | exp. Allgem. 100 lx | exp. NB1 | exp. ohne Zusatzbel. |
|---|---|---|---|
| Bestimmtheitsmaß $R^2$ | 0,81 | 0,84 | 0,70 |
| Datensätze | 38 | 34 | 152 |
| Probanden | 21 | 21 | 32 |

**Diagramm 44**

| Kurvenzug | exp. nach Anregungsende | exp. nach 10 min | exp. nach 30 min | exp. nach 60 min |
|---|---|---|---|---|
| Bestimmtheitsmaß $R^2$ | 0,84 | 0,90 | 0,88 | 0,87 |
| Datensätze | 65 | 65 | 65 | 65 |
| Probanden | 5 | 5 | 5 | 5 |

**Diagramm 45**

| Kurvenzug | exp. HLKL | exp. BL sep. bel. | exp. NL |
|---|---|---|---|
| Bestimmtheitsmaß $R^2$ | 0,92 | 0,88 | 0,70 |
| Datensätze | 54 | 47 | 152 |
| Probanden | 33 | 28 | 32 |

**Diagramm 46**

| Kurvenzug | exp. HLKL | exp. BL sep. bel. | exp. BL | exp. NL |
|---|---|---|---|---|
| Bestimmtheitsmaß $R^2$ | 0,93 | 0,92 | 0,87 | 0,84 |
| Datensätze | 38 | 39 | 37 | 34 |
| Probanden | 21 | 17 | 21 | 21 |

**Diagramm 47**

| Kurvenzug | exp. HLKL | exp. BL sep. bel. | exp. NL |
|---|---|---|---|
| Bestimmtheitsmaß $R^2$ | 0,91 | 0,92 | 0,84 |
| Datensätze | 51 | 43 | 38 |
| Probanden | 30 | 22 | 21 |

**Diagramm 48**

| Kurvenzug | exp. Person gerade erkannt |
|---|---|
| Bestimmtheitsmaß $R^2$ | 0,76 |
| Datensätze | 41 |
| Probanden | 17 |

# Anhang D

**Diagramm 49**

| Kurvenzug | vor der Leuchte | unter der Leuchte | hinter der Leuchte | zwischen 2 Leuchten | am Gangende |
|---|---|---|---|---|---|
| **Bestimmtheitsmaß R²** | 0,92 | 0,81 | 0,85 | 0,84 | 0,85 |
| **Datensätze** | 61 | 47 | 53 | 49 | 32 |
| **Probanden** | 31 | 29 | 32 | 22 | 19 |

**Diagramm 50**

| Kurvenzug | vor der Leuchte | unter der Leuchte | hinter der Leuchte | zwischen 2 Leuchten |
|---|---|---|---|---|
| **Bestimmtheitsmaß R²** | 0,94 | 0,91 | 0,78 | 0,87 |
| **Datensätze** | 29 | 29 | 29 | 39 |
| **Probanden** | 12 | 12 | 12 | 12 |

**Diagramm 51**

| Kurvenzug | vor der Leuchte | unter der Leuchte |
|---|---|---|
| **Bestimmtheitsmaß R²** | 0,81 | 0,88 |
| **Datensätze** | 55 | 59 |
| **Probanden** | 24 | 23 |

**Diagramm 52**

| Kurvenzug | NB1 | NB2 | 100 lx | NL |
|---|---|---|---|---|
| **Bestimmtheitsmaß R²** | 0,92 | 0,94 | 0,81 | 0,76 |
| **Datensätze** | 61 | 29 | 55 | 41 |
| **Probanden** | 31 | 12 | 24 | 17 |

**Diagramm 53**

| Kurvenzug | NB1 | NB2 | 100 lx | NL |
|---|---|---|---|---|
| **Bestimmtheitsmaß R²** | 0,81 | 0,91 | 0,88 | 0,76 |
| **Datensätze** | 47 | 29 | 59 | 41 |
| **Probanden** | 29 | 12 | 23 | 17 |

**Diagramm 54**

| Kurvenzug | NB1 | NB2 | 100 lx |
|---|---|---|---|
| **Bestimmtheitsmaß R²** | 0,85 | 0,78 | 0,81 |
| **Datensätze** | 53 | 29 | 55 |
| **Probanden** | 32 | 12 | 24 |

**Diagramm 55**

| Kurvenzug | NB1 | NB2 | 100 lx |
|---|---|---|---|
| **Bestimmtheitsmaß R²** | 0,84 | 0,87 | 0,81 |
| **Datensätze** | 49 | 39 | 55 |
| **Probanden** | 22 | 12 | 24 |

# Anhang E

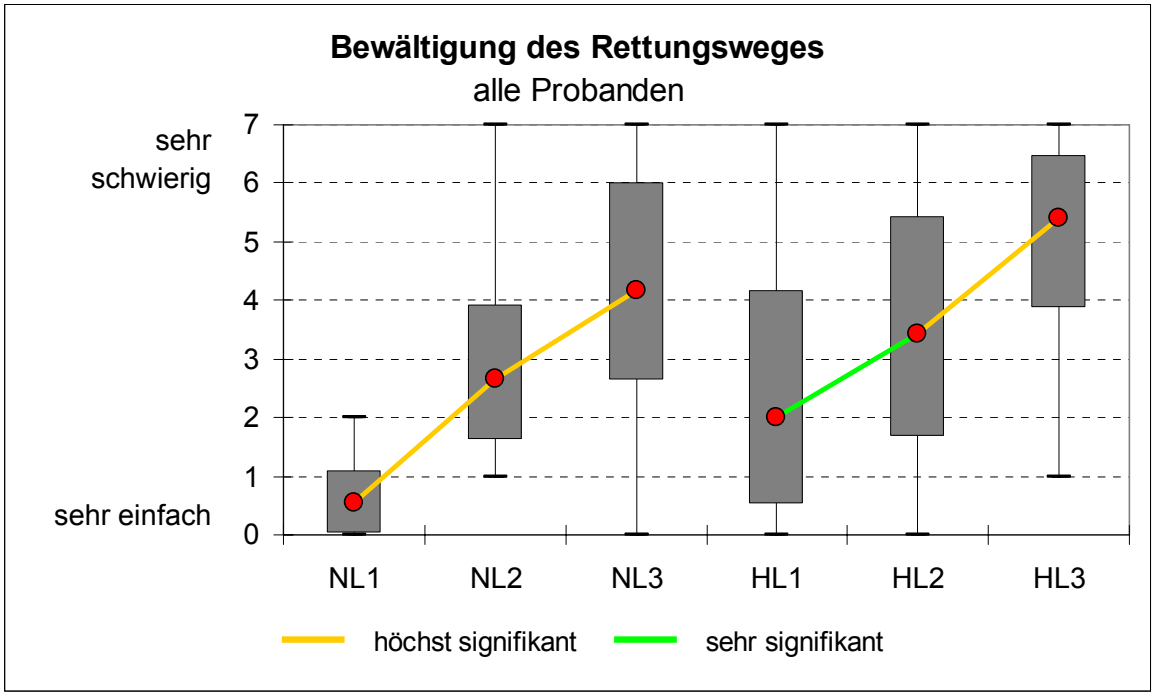



***Diagramm 56:*** ***Bewertung zur Bewältigung des Rettungsweges in Abhängigkeit von der Sichttrübung und dem Sicherheitsleitsystem, Befragung von 42 Probanden***

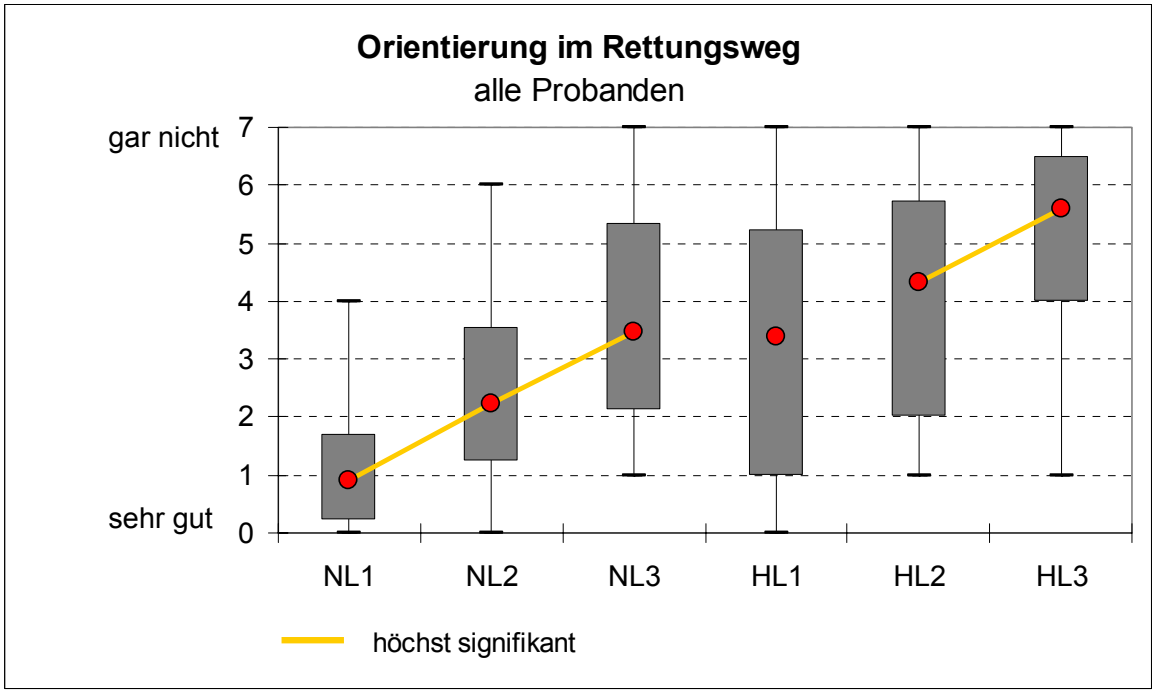



***Diagramm 57:*** ***Bewertung zur Orientierung im Rettungsweg in Abhängigkeit von der Sichttrübung und dem Sicherheitsleitsystem, Befragung von 42 Probanden***

# Anhang E

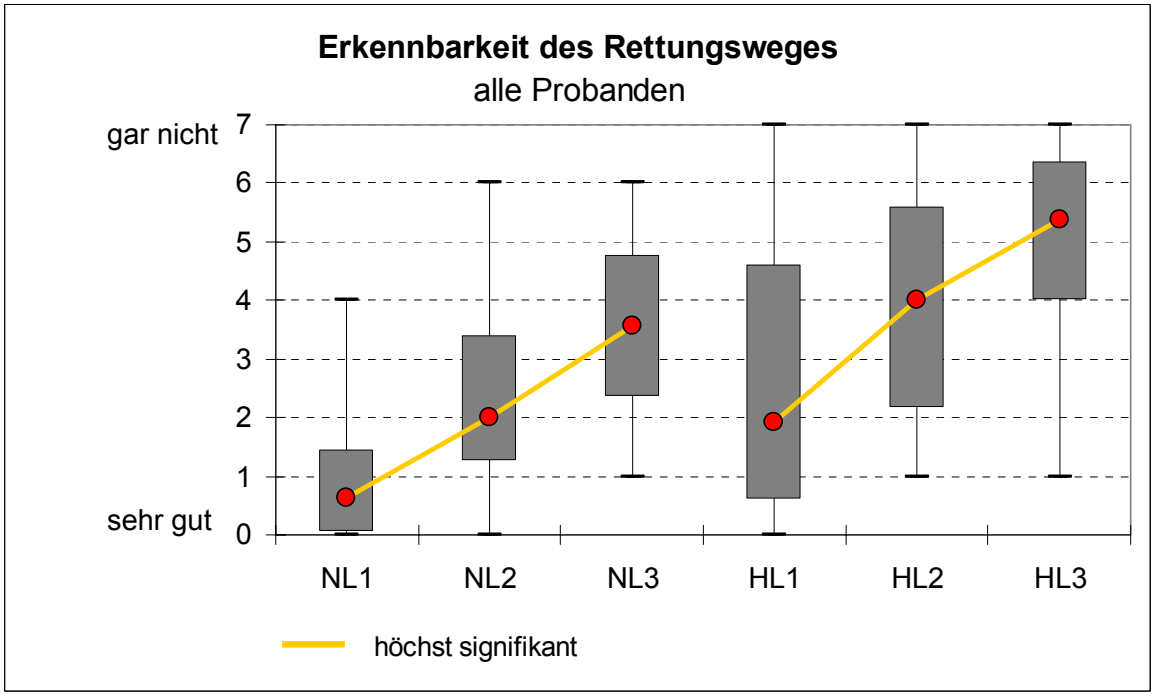



***Diagramm 58:*** ***Bewertung zur Erkennbarkeit des Rettungsweges in Abhängigkeit von der Sichttrübung und dem Sicherheitsleitsystem, Befragung von 42 Probanden***

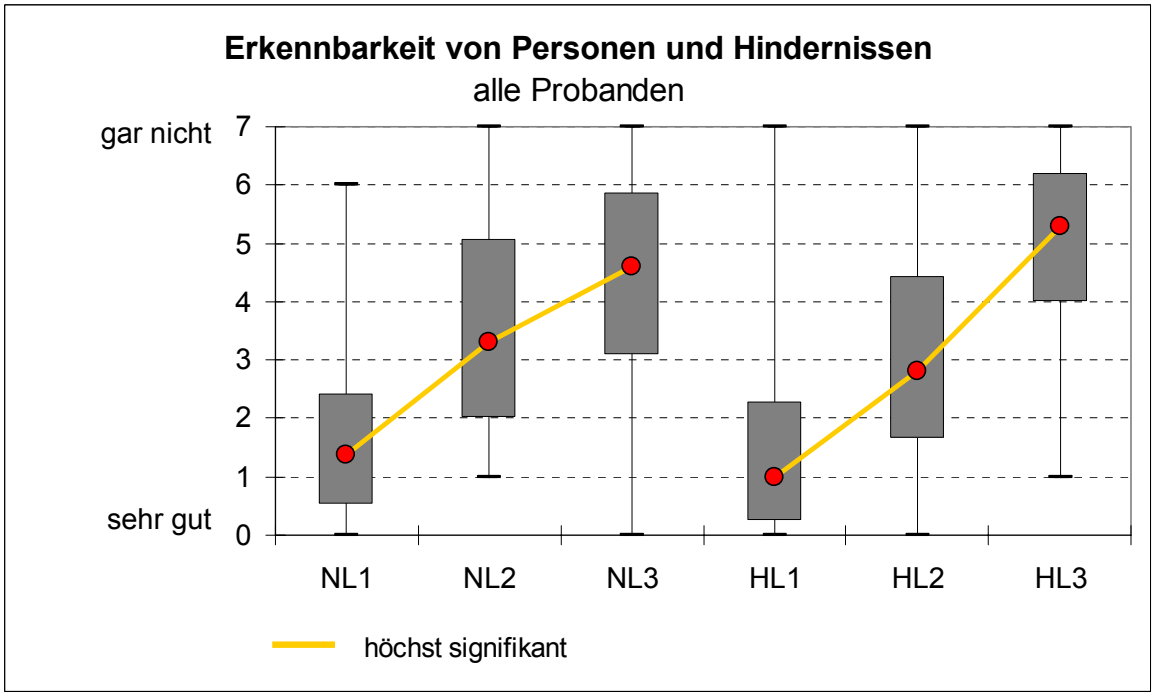



***Diagramm 59:*** ***Bewertung zur Erkennbarkeit von Personen und Hindernissen im Rettungsweg in Abhängigkeit von der Sichttrübung und dem Sicherheitsleitsystem, Befragung von 42 Probanden***

# Anhang E

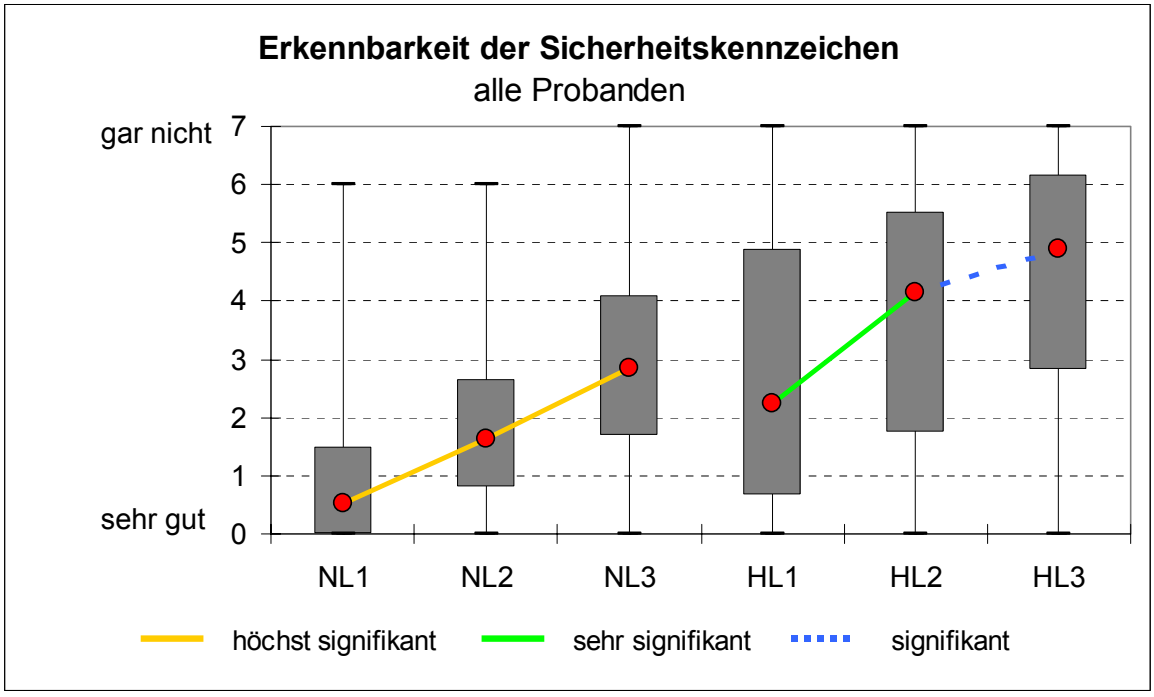



***Diagramm 60:*** ***Bewertung zur Erkennbarkeit der Sicherheitskennzeichen in Abhängigkeit von der Sichttrübung und dem Sicherheitsleitsystem, Befragung von 42 Probanden***

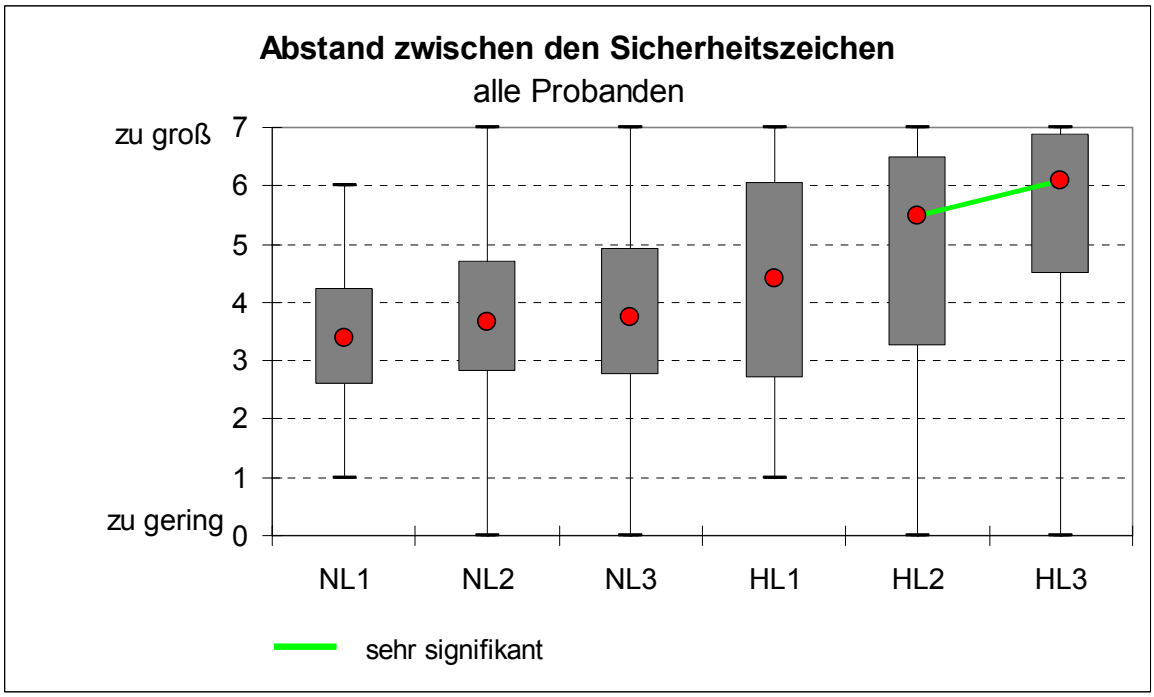



***Diagramm 61:*** ***Bewertung zum Abstand zwischen den Sicherheitszeichen im Rettungsweg in Abhängigkeit von der Sichttrübung und dem Sicherheitsleitsystem, Befragung von 42 Probanden***

# Anhang E

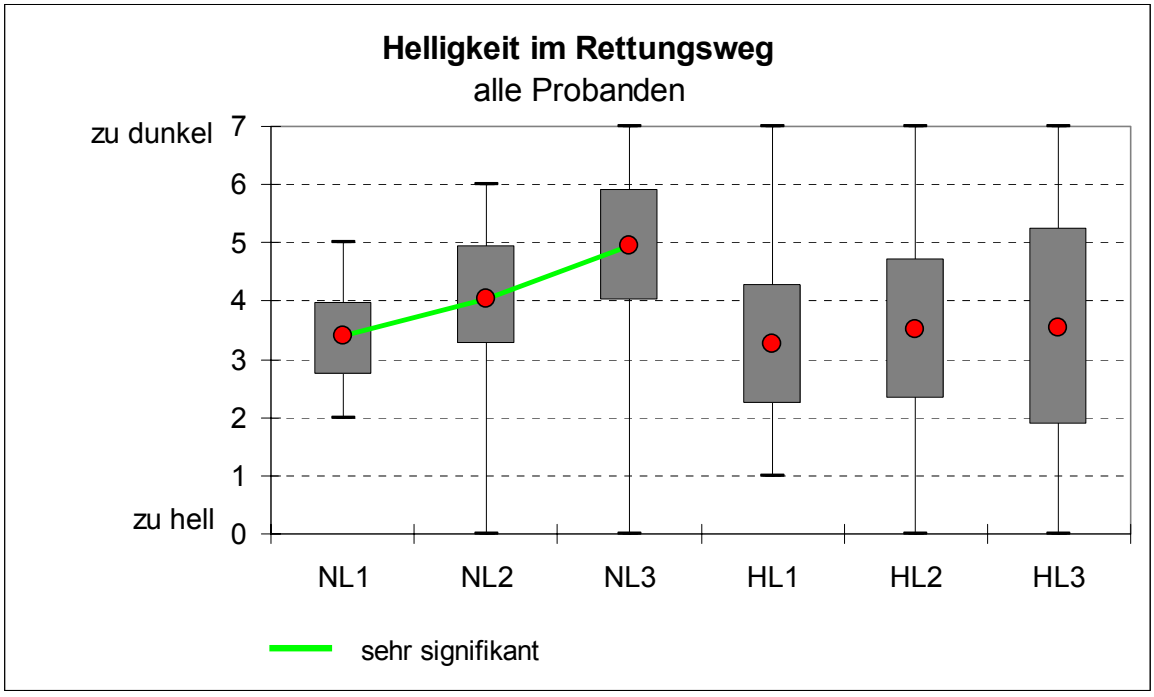



***Diagramm 62:*** ***Bewertung zur Helligkeit im Rettungsweg in Abhängigkeit von der Sichttrübung und dem Sicherheitsleitsystem, Befragung von 42 Probanden***

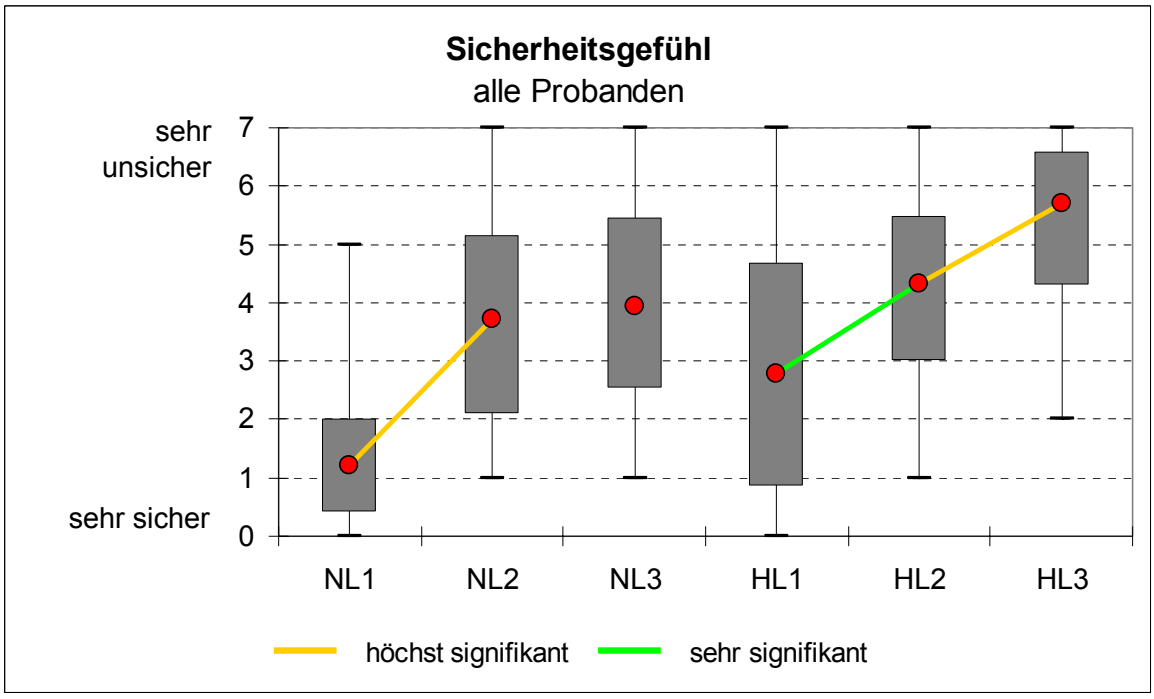



***Diagramm 63:*** ***Bewertung zum Sicherheitsgefühl im Rettungsweg in Abhängigkeit von der Sichttrübung und dem Sicherheitsleitsystem, Befragung von 42 Probanden***

# Anhang E

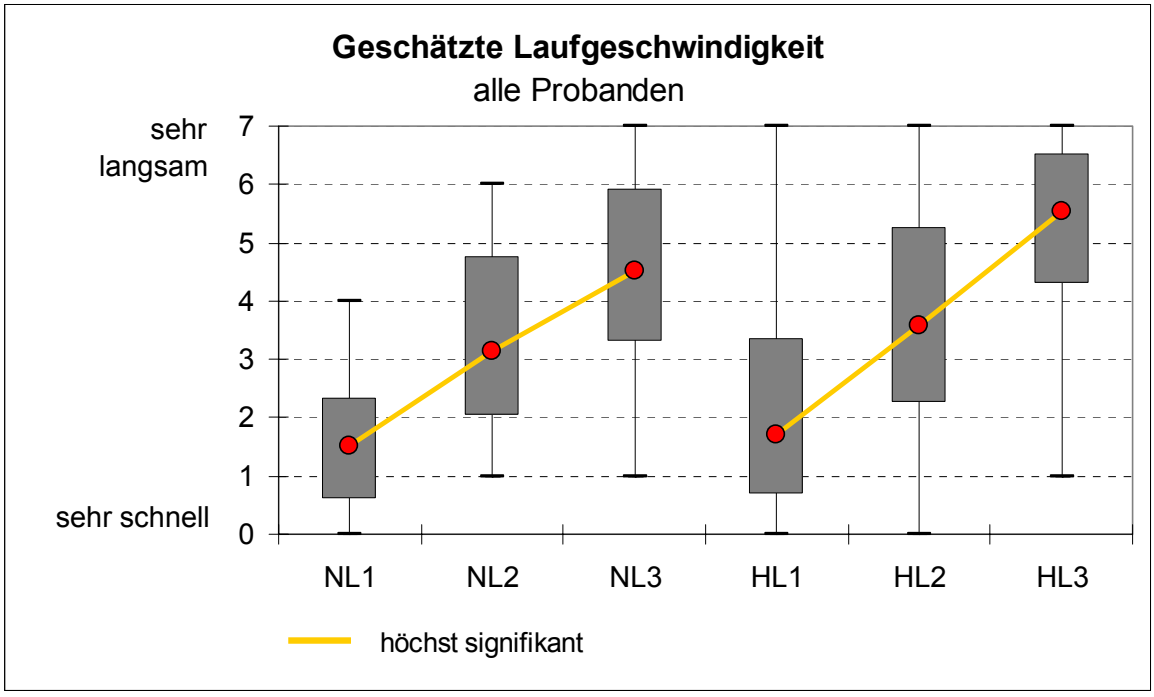



*Diagramm 64: Bewertung zur geschätzten Laufgeschwindigkeit im Rettungsweg in Abhängigkeit von der Sichttrübung und dem Sicherheitsleitsystem, Befragung von 42 Probanden*

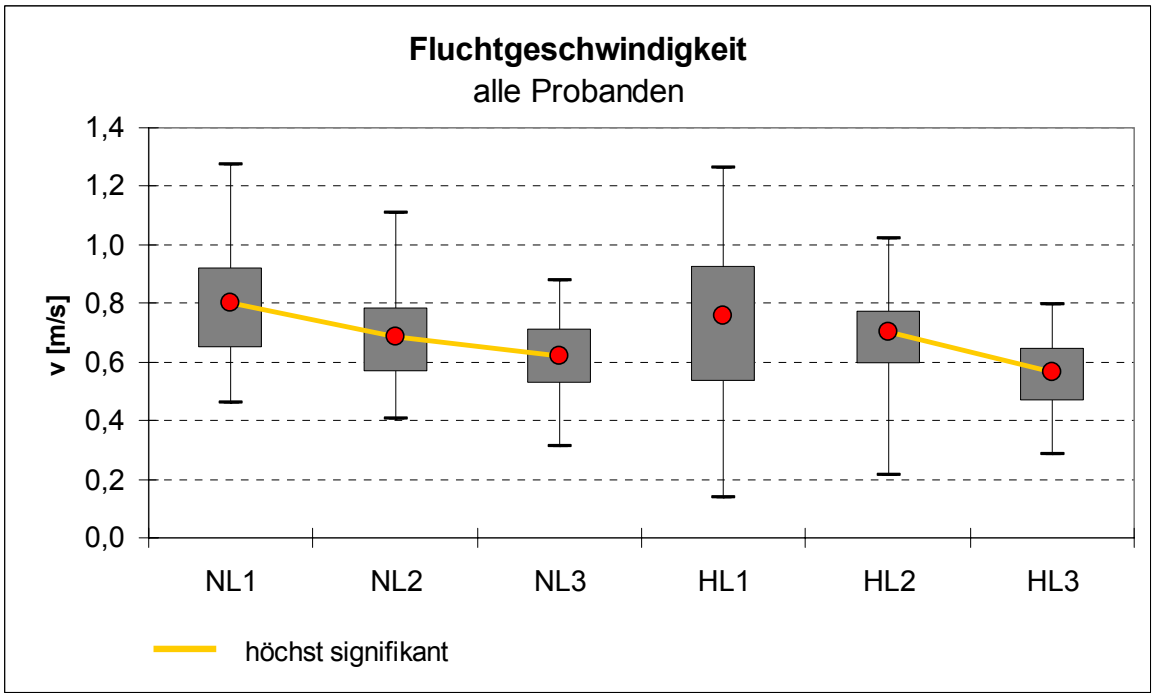



*Diagramm 65: Tatsächliche Laufgeschwindigkeit im Rettungsweg in Abhängigkeit von der Sichttrübung und dem Sicherheitsleitsystem, Untersuchung an 42 Probanden*

# Anhang E

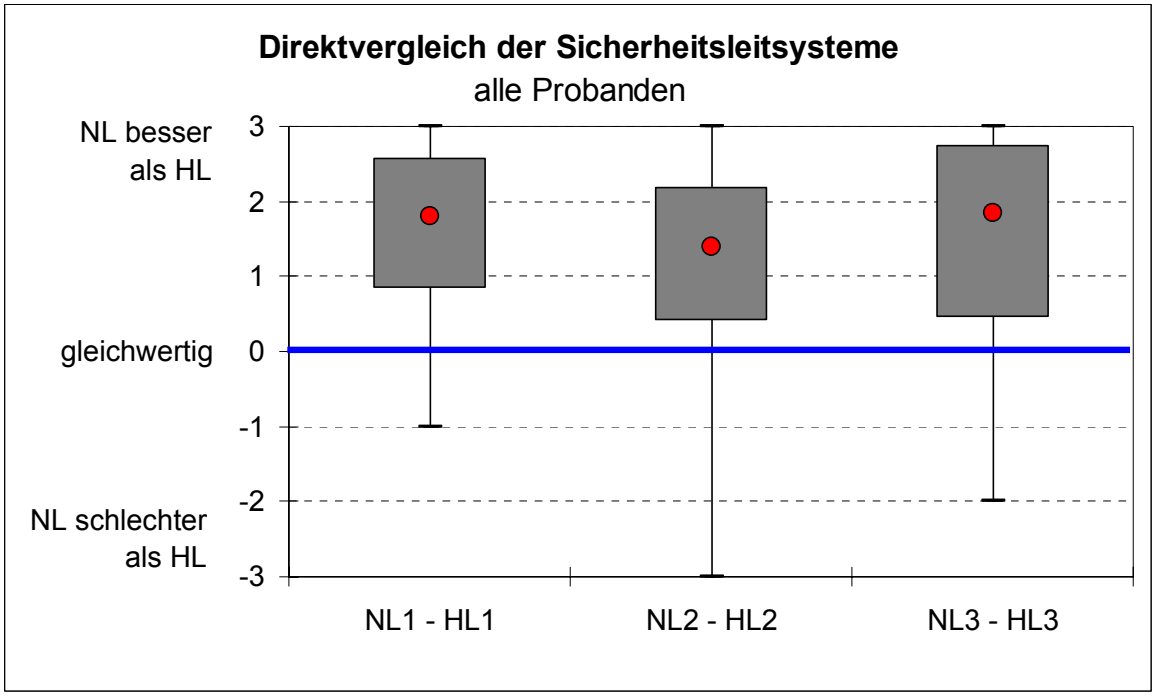



***Diagramm 66:*** ***Direkter Vergleich der Sicherheitsleitsysteme in Abhängigkeit von der Sichttrübung und dem Sicherheitsleitsystem, Befragung von 42 Probanden***

***Legende zu den Diagrammen 56 bis 66:***

| | |
|---|---|
| orange Verbindungslinie: | höchst signifikant verschieden |
| grüne Verbindungslinie: | sehr signifikant verschieden |
| blaue Verbindungslinie (gestrichelt): | signifikant verschieden |
| ohne Verbindungslinie: | nicht signifikant verschieden |
| roter Kreis: | Median |
| graue Box: | 25. und 75. Perzentile |
| schwarze Linie: | Minimum bzw. Maximum |

NL: nachleuchtendes Sicherheitsleitsystem ohne Zusatzbeleuchtung
HL: hinterleuchtete Sicherheitszeichen für Rettungswege und Notbeleuchtung
1 geringe Sichttrübung
2 mittlere Sichttrübung
3 hohe Sichttrübung

# Anhang E

| Frage Kennung / Situation | 1 BRW | 2 ORW | 3 RWE | 4 PHE | 5 RWKE | 6 AREK | 7 HELL | 8 SICH | 9 GESCH | v weggleich |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NL1 vs. NL2** | **0,000 ***** | **0,000 ***** | **0,000 ***** | **0,000 ***** | **0,000 ***** | 0,246 n.s. | **0,002 **** | **0,000 ***** | **0,000 ***** | **0,001 ***** |
| **NL1 vs. NL3** | **0,000 ***** | **0,000 ***** | **0,000 ***** | **0,000 ***** | **0,000 ***** | 0,156 n.s. | **0,000 ***** | **0,000 ***** | **0,000 ***** | **0,000 ***** |
| **NL2 vs. NL3** | **0,000 ***** | **0,000 ***** | **0,000 ***** | **0,001 ***** | **0,000 ***** | 0,897 n.s. | **0,009 **** | 0,127 n.s. | **0,000 ***** | **0,000 ***** |
| **HL1 vs. HL2** | **0,005 **** | 0,080 n.s. | **0,000 ***** | **0,000 ***** | **0,004 **** | 0,160 n.s. | 0,539 n.s. | **0,002 **** | **0,000 ***** | 0,204 n.s. |
| **HL1 vs. HL3** | **0,000 ***** | **0,000 ***** | **0,000 ***** | **0,000 ***** | **0,000 ***** | **0,001 ***** | 0,487 n.s. | **0,000 ***** | **0,000 ***** | **0,000 ***** |
| **HL2 vs. HL3** | **0,000 ***** | **0,001 ***** | **0,000 ***** | **0,000 ***** | **0,012 *** | **0,008 **** | 0,922 n.s. | **0,000 ***** | **0,000 ***** | **0,000 ***** |
| **NL1 vs. HL1** | **0,000 ***** | **0,000 ***** | **0,000 ***** | 0,592 n.s. | **0,000 ***** | **0,025 *** | 0,643 n.s. | **0,000 ***** | 0,057 n.s. | 0,241 n.s. |
| **NL2 vs. HL2** | 0,059 n.s. | **0,001 ***** | **0,000 ***** | 0,094 n.s. | **0,000 ***** | **0,004 **** | 0,052 n.s. | 0,134 n.s. | 0,184 n.s. | 0,176 n.s. |
| **NL3 vs. HL3** | **0,007 **** | **0,000 ***** | **0,000 ***** | 0,101 n.s. | **0,000 ***** | **0,000 ***** | **0,004 **** | **0,000 ***** | **0,001 ***** | **0,000 ***** |

* signifikant (p <= 0.05) *** höchst signifikant (p <= 0.001)
** sehr signifikant (p <= 0.01) n.s. nicht signifikant (p > 0.05)

***Tabelle 18: Ergebnisse der Paarvergleiche nach Wilcoxon für die Befragung zum Direktvergleich zweier Sicherheitsleitsysteme***

| Frage | Kennung | positiv | Bewertung | | | | | | | | negativ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **1** | **BRW** | NL1 | **< 0,000 ***** | *HL1* | <= 0,163 n.s. | NL2 | <= 0,059 n.s. | *HL2* | <= 0,066 n.s. | NL3 | **< 0,007 **** | *HL3* |
| **2** | **ORW** | NL1 | **< 0,000 ***** | NL2 | <= 0,182 n.s. | *HL1* | <= 0,08 n.s. | *HL2* | <= 0,466 n.s. | NL3 | **< 0,000 ***** | *HL3* |
| **3** | **RWE** | NL1 | **< 0,000 ***** | *HL1* | <= 0,811 n.s. | NL2 | **< 0,000 ***** | NL3 | <= 0,260 n.s. | *HL2* | **< 0,000 ***** | *HL3* |
| **4** | **PHE** | HL1 | <= 0,592 n.s. | NL1 | **< 0,000 ***** | *HL2* | <= 0,094 n.s. | NL2 | **< 0,001 ***** | NL3 | <= 0,101 n.s. | *HL3* |
| **5** | **RWKE** | NL1 | **< 0,000 ***** | NL2 | <= 0,077 n.s. | *HL1* | <= 0,647 n.s. | NL3 | <= 0,109 n.s. | *HL2* | **< 0,012 *** | *HL3* |
| **6** | **ARWK** | NL1 | <= 0,246 n.s. | NL2 | <= 0,897 n.s. | NL3 | <= 0,202 n.s. | *HL1* | <= 0,160 n.s. | *HL2* | **< 0,008 **** | *HL3* |
| **7** | **HELL** | *HL1* | <= 0,643 n.s. | NL1 | <= 0,907 n.s. | *HL2* | <= 0,922 n.s. | *HL3* | <= 0,160 n.s. | NL2 | **< 0,009 **** | NL3 |
| **8** | **SICH** | NL1 | **< 0,000 ***** | *HL1* | <= 0,066 n.s. | NL2 | <= 0,134 n.s. | *HL2* | <= 0,547 n.s. | NL3 | **< 0,000 ***** | *HL3* |
| **9** | **GESCH** | NL1 | <= 0,057 n.s. | *HL1* | **< 0,001 ***** | NL2 | <= 0,184 n.s. | *HL2* | **< 0,012 *** | NL3 | **< 0,001 ***** | *HL3* |
| | **V** | NL1 | <= 0,241 n.s. | *HL1* | <= 0,555 n.s. | NL2 | <= 0,176 n.s. | *HL2* | **< 0,025 *** | NL3 | **< 0,000 ***** | *HL3* |

* signifikant (p <= 0.05) *** höchst signifikant (p <= 0.001)
** sehr signifikant (p <= 0.01) n.s. nicht signifikant (p > 0.05)

***Tabelle 19: Ergebnisse der Paarvergleiche nach Wilcoxon und der Rangfolge nach Friedman für die Befragung zum Direktvergleich zweier Sicherheitsleitsysteme***