

Anforderungen an die Brand-Notbeleuchtung im Tunnel bei Rauch

Norbert Kaboth, Klaus Eberbach, Dirk Heuzeroth

Einführung

Die Kennzeichnung und die Beleuchtung von Fluchtwegen ist ein wichtiger Aspekt des Sicherheitskonzeptes für den Brandfall in Tunneln. Die Brand-Notbeleuchtung soll sicherstellen, dass alle durch einen Brand gefährdeten Verkehrsteilnehmer in der kurzen Zeitdauer, die zur Selbstrettung zur Verfügung steht, den Tunnel verlassen können.

Die Erfahrungen mit Brandkatastrophen in Straßentunneln haben gezeigt, dass insbesondere die schnelle und umfassende Rauchausbreitung, die durch eine für den Brandfall ungeeignete Zwangsbelüftung noch forciert werden kann, die Sicht im Tunnel erheblich beeinträchtigt. Daher war im Rahmen eines Forschungsprojektes /1/ zu prüfen, ob und inwieweit die Komponenten der Brand-Notbeleuchtung geeignet sind, die ihnen gestellte Aufgabe der Fluchtleitfunktion bei dichtem Rauch lösen zu können. Aus den hierbei gewonnenen Erkenntnissen sollten Anforderungen an die Ausführung der Brand-Notbeleuchtung abgeleitet werden.

Da experimentelle Befunde zur Sicht bei Rauch im Tunnel, die quantitativ verwertbare Aussagen liefern könnten, nach wie vor fehlen, wurde auf theoretische Modelle zum Strahlungstransport und zur Sichtbarkeit in trüben Medien, die am Lichttechnischen Institut der Universität Karlsruhe entwickelt worden sind /2, 3, 4/, zurückgegriffen. Im Rahmen eines anderen Forschungsprojektes an der TU Ilmenau /4/ konnte gute Übereinstimmung der Versuchsergebnisse, die in einem verrauchten Innenraum experimentell ermittelt wurden, mit den theoretisch gewonnenen Modellergebnissen nachgewiesen werden.

Die theoretischen Modelle wurden zunächst an die lichttechnischen Gegebenheiten in Tunneln angepasst und dann auf unterschiedliche Rauchsituationen angewendet /1/. Dabei wurden sowohl die Lichtabsorption als auch die Lichtstreuung sowie die Sichtbeeinträchtigung aufgrund der Augenreizung durch Rauch berücksichtigt /5/.

Die Untersuchungen lieferten praktisch umsetzbare Erkenntnisse zur Auslegung der Brand-Notbeleuchtung, wie die Sichtweite von Rettungszeichen-Leuchten und Orientierungsleuchten bei Rauch unterschiedlicher Dichte und Konsistenz.

Zur Gewährleistung der Funktion von Rettungszeichen-Leuchten und Orientierungsleuchten müssen darüber hinaus sowohl im normalen Betrieb als auch im Brandfall besondere Anforderungen in Bezug auf ihre mechanische und elektrische Bauart sowie auf die Stromversorgung, die Überwachung und die Aktivierung erfüllt sein.

Lichtschwächung bei Rauch

Das Licht wird beim Durchdringen einer Rauchsicht durch Absorption und Streuung an den Rauchpartikeln nach dem Gesetz von Bouguer-Lambert exponentiell mit zunehmender Dichte und Dicke der zu durchdringenden Rauchsicht geschwächt. Während das absorbierte Licht für den weiteren Strahlungstransport verloren ist, nimmt ein Teil des gestreuten Lichts in Form einer Überlagerungskomponente weiterhin am Strahlungstransport teil.

Die Rauchdichte wird lichttechnisch durch den Licht-Schwächungskoeffizienten k gekennzeichnet, der dem in der Meteorologie gebräuchlichen Extinktionskoeffizienten entspricht (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1

Rauchdichte	Optische Dichte D_{τ} (d = 1m)	Transmission τ (d = 1m)	Lichtschwächung k / m^{-1}
sehr gering	0,11	78%	0,25
gering	0,22	61%	0,5
mittel	0,43	37%	1
stark	0,87	14%	2
sehr stark	1,74	2 %	4

Die Rauchkonsistenz, die lichttechnisch als Rauchfarbe in Erscheinung tritt, wird durch den Absorptions- bzw. den Streuanteil des Licht-Schwächungskoeffizienten beschrieben (siehe Tabelle 2).

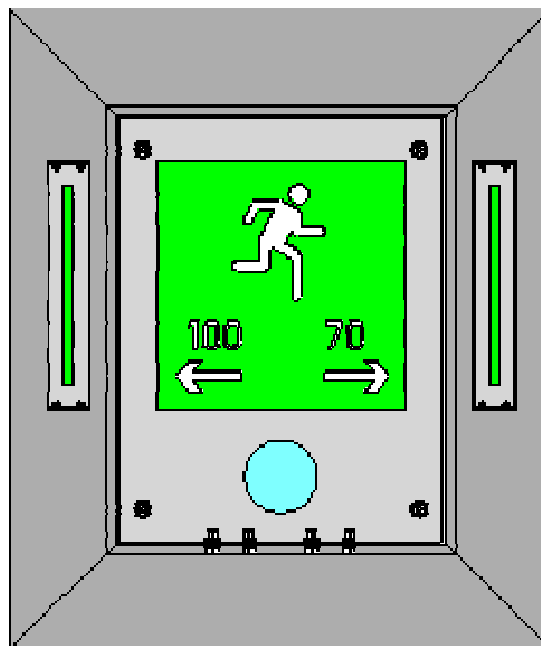
Tabelle 2

Rauchkonsistenz	Farbe	Absorptions- anteil	Streuanteil
Schwelbrände	weiß	20 %	80 %
	grau	50 %	50 %
Kraftstoffbrände	schwarz	80 %	20 %
Licht-Schwächungskoeffizient k / m^{-1}		k_a/k	k_s/k

Komponenten der Brand-Notbeleuchtung

Bei **Rettungszeichen-Leuchten**, die den Fluchtweg kennzeichnen, besteht die Sehaufgabe vor allem in der Identifikation des Rettungszeichens, das Richtung und Entfernung zum nächst gelegenen Notausgang angibt (siehe Bild 1).

Bild 1



Die Vorgaben für die Gestaltung und Anordnung von Rettungszeichen-Leuchten in Tunneln bestimmen weitgehend die für die Sicht bei Rauch maßgebenden lichttechnischen Parameter:

L_z	= 200 cd/m ²	mittlere Leuchtdichte der RZ-Leuchte
A_0	= 30 cm * 30 cm = 0,09 m ²	Lichtaustrittsfläche der RZ-Leuchte
I_ϵ	= $L_z * A_0 * \text{COS}(\epsilon)$	Lichtstärke der RZ-Leuchte in Blickrichtung
I_{0°	= 18 cd	Lichtstärke bei frontaler Blickrichtung ($\epsilon=0^\circ$)
I_{60°	= 9 cd	Lichtstärke bei diagonaler Blickrichtung ($\epsilon=60^\circ$)

Bei **Orientierungsleuchten**, die das Auffinden des Fluchtweges und die optische Führung auf dem Fluchtweg bei Rauch im Tunnel sicherstellen sollen, besteht die Sehaufgabe hingegen vor allem in der Detektion der nächsten Leuchte auf dem Weg zum Notausgang (siehe Bild 2).

Bild 2



Da für die Gestaltung und Anordnung von Orientierungsleuchten weniger einschränkende Regelungen vorgegeben sind, kann hier das Augenmerk voll auf die Maximierung der für die Sicht bei Rauch maßgebenden lichttechnischen Parameter gelegt werden.

Mit dem in der RABT 2003 empfohlenen Gestaltungsvorschlag können folgende Lichtstärken erreicht werden:

$$I_{0^\circ} = 175 \text{ cd}$$
$$I_{87^\circ} = 88 \text{ cd}$$

Lichtstärke bei frontaler Blickrichtung ($\epsilon=0^\circ$)
Lichtstärke bei seitlicher Blickrichtung ($\epsilon=87^\circ$)

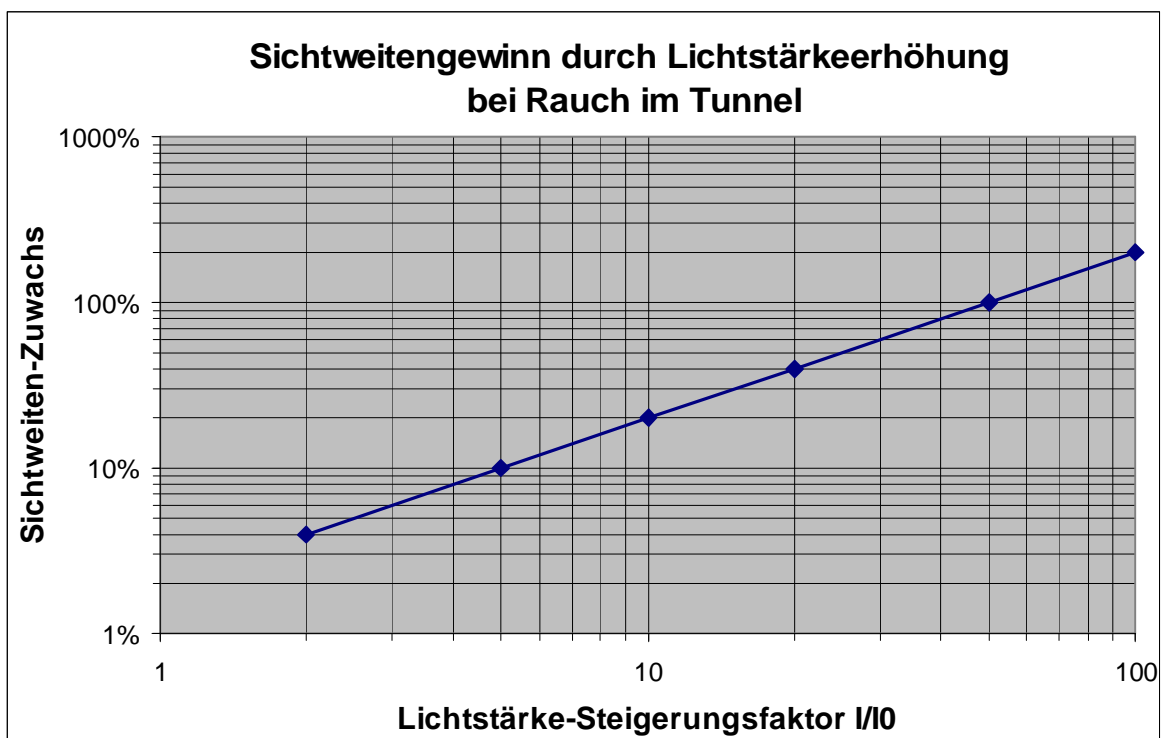
Sichtweite bei Rauch

Als Sichtweite soll hier die Beobachtungsentfernung gelten, bei der ein jeweils vorgegebenes Sehobjekt gerade im Rauch wahrgenommen werden kann. Während bei der Orientierungsleuchte schon die Wahrnehmung ihres Lichtscheins die Sichtweite bestimmt, muss bei der Rettungszeichen-Leuchte darüber hinaus die Beobachtungsentfernung soweit verkürzt werden, bis der Informationsinhalt des Rettungszeichens erkannt werden kann. Im Folgenden wird der erste Fall durch die Detektions-Sichtweite und der zweite Fall durch die Identifikations-Sichtweite beschrieben.

Von allen lichttechnischen Parametern der untersuchten Komponenten der Brand-Notbeleuchtung hat sich die Lichtstärke in Blickrichtung als maßgebende Kenngröße für die Rauchdurchdringung erwiesen. Ganz allgemein gilt, dass bei Rauch im Tunnel die Verdoppelung der Lichtstärke einen Zuwachs an Sichtweite von 4% und die Verzehnfachung der Lichtstärke einen Zuwachs an Sichtweite von 20% erwarten lässt. Der Sichtweitengewinn mit lichttechnischen Mitteln ist damit recht bescheiden und erfordert einen extrem hohen Aufwand.

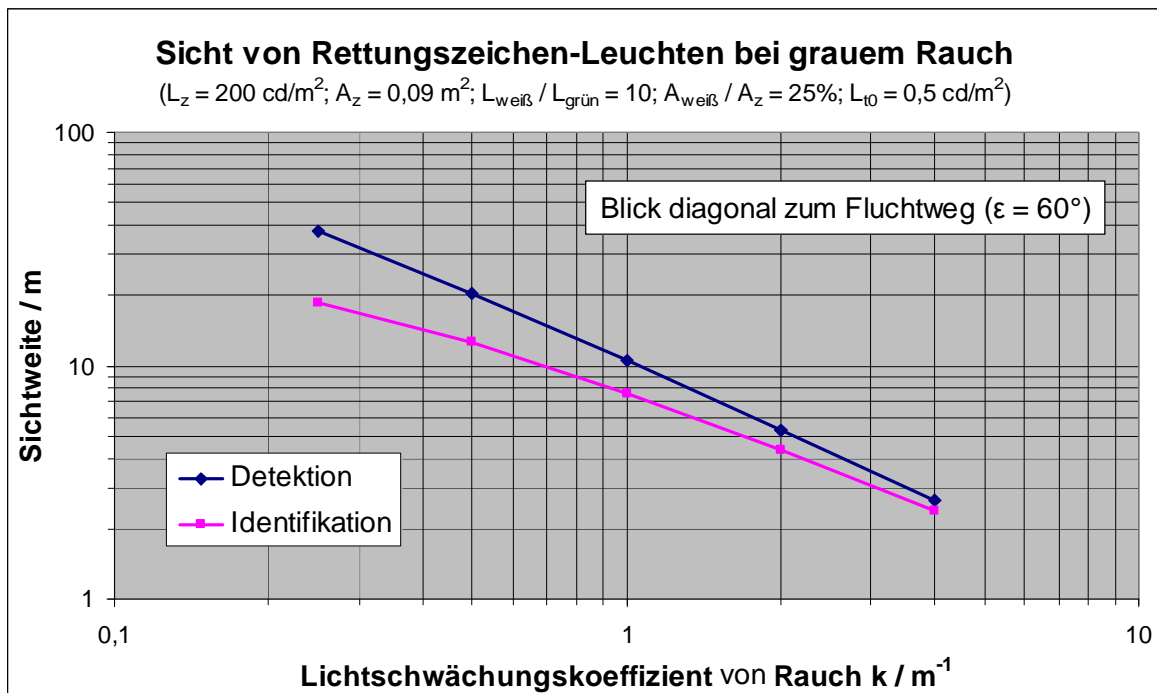
Mit dem Diagramm 1 kann der mäßige Sichtweitengewinn bei Lichtstärkesteigerungen leicht und in guter Näherung abgeschätzt werden.

Diagramm 1



Das Diagramm 1 kann sowohl auf die Detektion als auch auf die Identifikation von Sehobjekten bei Rauch angewandt werden. Es gilt weitgehend unabhängig von der jeweiligen Rauchdichte im Bereich von $k = 0,25 \dots 4 \text{ m}^{-1}$ und der jeweiligen Rauchsensitivität.

Diagramm 2



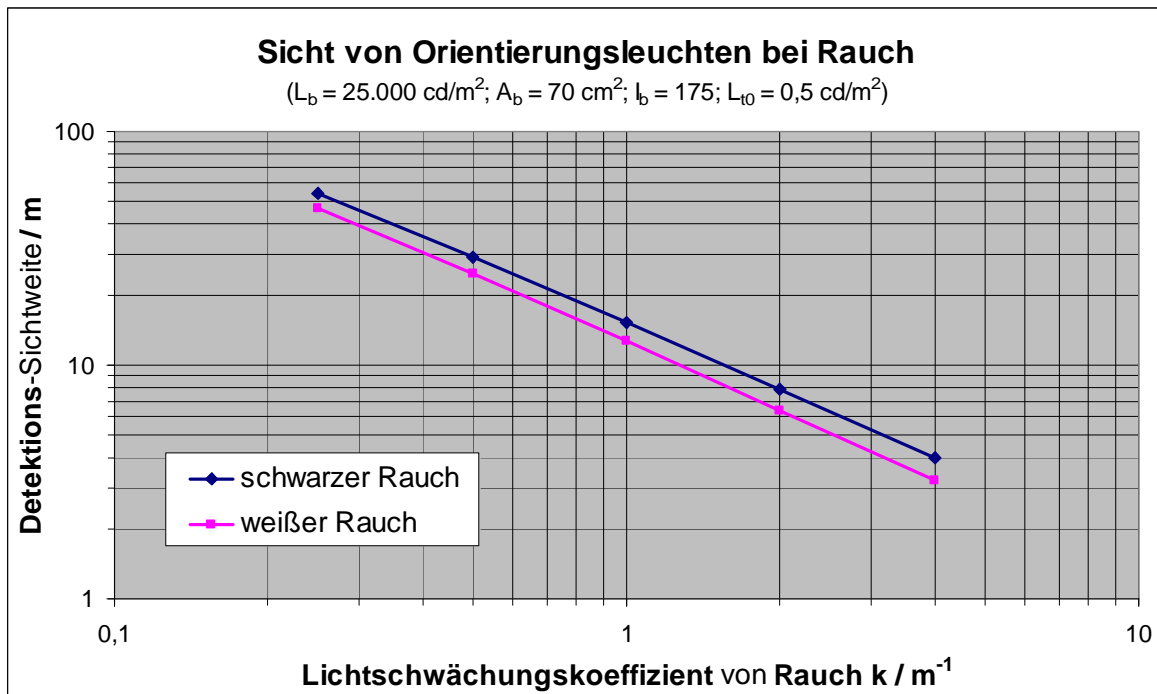
Sowohl die Detektions-Sichtweite als auch die Identifikations-Sichtweite von Sehobjekten sinken mit zunehmender Rauchdichte exponentiell jedoch unterschiedlich stark (siehe Diagramm 2).

Insbesondere bei geringeren Rauchdichten ($k < 0,5 \text{ m}^{-1}$) liegt die Identifikations-Sichtweite von Rettungszeichen-Leuchten deutlich unter der Detektions-Sichtweite.

Bei mittleren Dichten ($k \approx 1 \text{ m}^{-1}$) von grauem Rauch wird für Rettungszeichen-Leuchten ($I_\varepsilon = 9 \text{ cd}$) eine Detektions-Sichtweite von 11 m und eine Identifikations-Sichtweite von 7,5 m ausgewiesen.

Bei sehr starker Rauchdichte ($k \approx 4 \text{ m}^{-1}$) liegen sowohl die Detektions- als auch die Identifikations-Sichtweite von Rettungszeichen-Leuchten nur noch im Nahbereich zwischen 2 und 3 m.

Diagramm 3



Die Detektions-Sichtweite der Orientierungsleuchte ($I_\varepsilon = 175 \text{ cd}$) sinkt wie bei der Rettungszeichen-Leuchte ($I_\varepsilon = 9 \text{ cd}$) mit zunehmender Rauchdichte exponentiell stark ab wenn auch auf etwa 40% höheren Werten (siehe Diagramm 3).

Die Detektions-Sichtweite der Orientierungsleuchte liegt bei stark streuendem und damit weiß erscheinendem Rauch ($k_s/k = 80\%$) mittlerer Dichte ($k \approx 1 \text{ m}^{-1}$) um 17% unter derjenigen bei stark absorbierendem und damit schwarz erscheinendem Rauch ($k_a/k = 80\%$).

Für Orientierungsleuchten ($I_\varepsilon = 175 \text{ cd}$) wird bei mittleren Dichten ($k \approx 1 \text{ m}^{-1}$) von weißem Rauch eine Detektions-Sichtweite von knapp 13 m und von schwarzem Rauch eine Detektions-Sichtweite von 15 m ausgewiesen.

Die hier ermittelten Sichtweiten können zur Festlegung von Mindestabständen bei der Anordnung der Komponenten der Brand-Notbeleuchtung dienen, wenn ihre Wahrnehmbarkeit wenigstens bei mittlerer Rauchdichte sichergestellt sein soll.

Bei sehr starker Rauchdichte werden die Sichtweiten so kurz, dass der Aufwand zur Sichtweiten-Verbesserung mittels Lichtstärke-Steigerung der Orientierungsleuchten kaum mehr vertretbar ist. Für diesen Fall bieten sich lichterketten-artige Alternativen zur Fluchtwegleitung an, die bei Lichtpunktabständen $\leq 50 \text{ cm}$ schon mit Lichtstärken von 1,4 cd auskommen.

Wenn man als Alternative zu den Orientierungsleuchten LED-Markierungssysteme am Fahrbahnrand, wie sie zur optischen Führung in Tunneln beim normalen Betrieb zum Einsatz kommen, auch im Brandfall einsetzen will, dann sind an deren Lichtstärkeverteilung zusätzliche Anforderungen zu stellen.

Diagramm 4

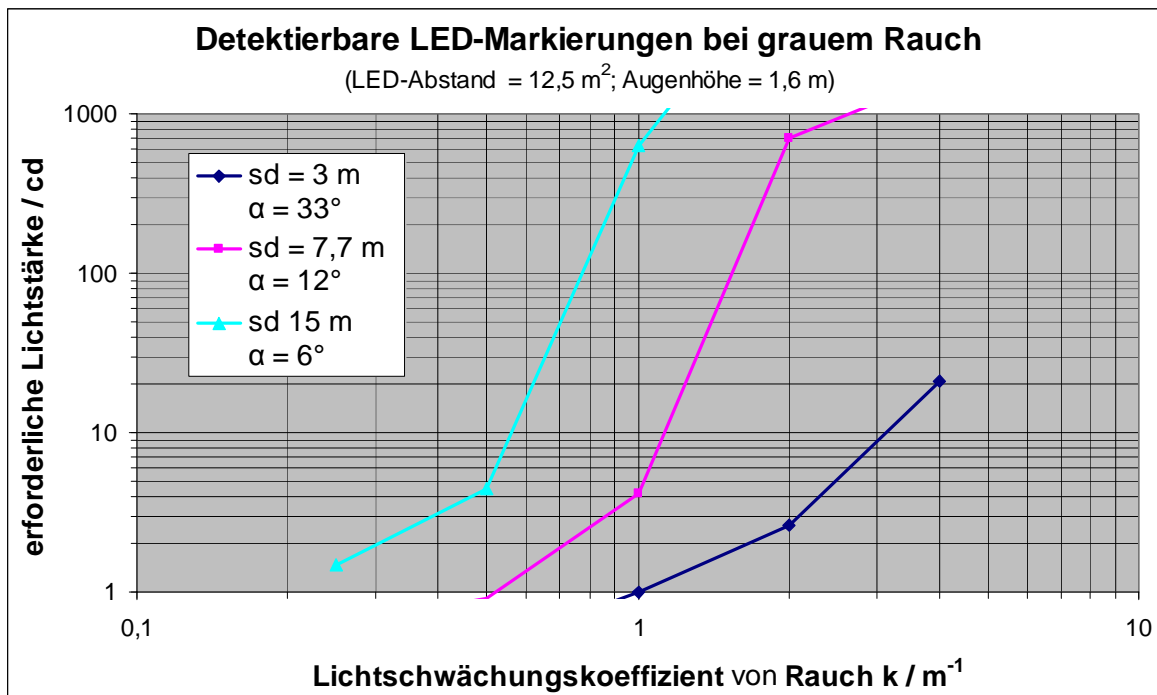


Diagramm 4 weist die erforderlichen Lichtstärkewerte aus, die beispielsweise bei drei verschiedenen Beobachtungsabständen s_d und Erhebungswinkeln α erreicht werden müssen, damit ein Beobachter die LED bei verschiedenen Rauchdichten gerade wahrnehmen kann.

Unter flachen Abstrahlungswinkeln und bei größeren Beobachtungsentfernungen müssen Markierungssysteme mit einem LED-Abstand von $12,5 \text{ m}$ erhebliche Lichtstärken erzeugen, damit ihre Wirksamkeit bei starken Rauchdichten sichergestellt ist.

Quellen

- /1/ Eberbach, Klaus, Ingenieurberatung für Lichttechnik
Kaboth, Norbert, Stredich + Partner Beratende Ingenieure
Schroll, B., Smits, J., Jäger, D., Siteco Beleuchtungstechnik
Ausgestaltung von Brand-Notbeleuchtung und Leitsystemen zur Fluchtweg-
Kennzeichnung in Straßentunneln – Anforderungen an die Ausführung
Forschungs- und Entwicklungsprojekt FE 03.350/2001/FRB im Auftrag
des Bundesverkehrsministeriums bzw. der Bundesanstalt für Straßenwesen
- /2/ Bodmann, H.W., Gerthsen, P.
Strahlungstransport in stark streuenden Medien als Diffusionsvorgang
OPTICA ACTA 22/3, 1975, 221-234
- /3/ Kokoschka, S.
Zur Berechnung von Schwellenkontrasten
für die Detektion einfacher Sehobjekte
LICHT 4/1988, 305-308
- /4/ Bieske, K. und Gall, D., Fachgebiet Lichttechnik der TU Ilmenau
Kokoschka, S., Lichttechnisches Institut der Universität Karlsruhe
Evaluierung von Sicherheitsleitsystemen in Rauchsituationen
Forschungsbericht, TU Ilmenau / LTI Karlsruhe, 2003
im Auftrag des Hauptverbandes der gewerblichen Berufsgenossenschaften
- /5/ Eberbach, K.
Zur Sicht bei Rauch im Tunnel
LICHT'2004 in Dortmund
16. Gemeinschaftstagung der Lichttechnischen Gesellschaften
Deutschlands, Österreichs, der Niederlande und der Schweiz
Tagungs-CD