

Ausgestaltung von Brand-Notbeleuchtung und Leitsystemen zur Fluchtwegkennzeichnung in Straßentunneln – Anforderungen an die Ausführung

FA 3.350

Forschungsstelle: Ingenieurberatung für Lichttechnik, Karlsbad / STREDICH + PARTNER GbR, Beratende Ingenieure, Mülheim / SITECO Beleuchtungstechnik GmbH, Traunreut

Bearbeiter: Eberbach, K. / Kaboth, N. / Schroll, B. / Smits, J.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn

Abschluss: März 2006

1 Aufgabenstellung

Die Kennzeichnung und die Beleuchtung von Fluchtwegen ist ein wichtiger Aspekt des Sicherheitskonzepts 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.

In der Brand-Notbeleuchtung im Tunnel werden drei lichttechnische Komponenten eingesetzt:

- **Rettungszeichen-Leuchten**
zur Kennzeichnung des Fluchtwegs,
- **Orientierungsleuchten**
zur Auffindung des Fluchtwegs bei starkem Rauch und
- **Sicherheitsleuchten**
zur Ausleuchtung des Fluchtwegs.

Ziel des vorliegenden Forschungsprojekts ist es zu klären, 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.

2 Untersuchungsmethodik

Da experimentelle Befunde zur Sicht bei Rauch im Tunnel, die quantitativ verwertbare Aussagen liefern könnten, weitgehend fehlen, wurde hier auf theoretische Modelle zum Strahlungstransport und zur Sichtbarkeit in trüben Medien, die am Lichttechnischen Institut der Universität Karlsruhe entwickelt worden sind, zurückgegriffen. Im Rahmen eines anderen bereits abgeschlossenen Forschungsprojekts konnten gute Übereinstimmungen der Versuchsergebnisse, die in einem verrauchten Innenraum experimentell ermittelt wurden, mit den theoretisch gewonnenen Modellergebnissen nachgewiesen werden.

Die Modellvorstellungen wurden zunächst an die Gegebenheiten von Tunneln angepasst. Dann wurde die Sicht bei den unterschiedlichsten Rauchsituationen analysiert, da weder die Rauchdichte noch die Rauchkonsistenz bei Bränden im Tunnel vorhersehbar sind.

Das Licht wird beim Durchdringen einer Rauchsicht durch Absorption und Streuung an den Rauchpartikeln 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 Lichtschwächung bei Rauch, der optisch als trübes Medium zu betrachten ist, erfolgt nach dem Gesetz von Bouguer Lambert exponentiell abfallend mit zunehmender Dichte und Dicke der zu durchdringenden Rauchsicht.

Die Rauchdichte wird lichttechnisch durch den Lichtschwächungskoeffizienten k gekennzeichnet, der dem in der Meteorologie gebräuchlichen Extinktionskoeffizienten entspricht. Die Rauchkonsistenz, die lichttechnisch als Rauchfarbe in Erscheinung tritt, wird durch den Absorptionsanteil k_a/k bzw. den Streuanteil k_s/k des Lichtschwächungskoeffizienten beschrieben.

Rauchdichte	Optische Dichte $D_T (d = 1 \text{ m})$	Transmission $T (d = 1 \text{ m})$	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

Rauchkonsistenz	Farberscheinung weiß	Farberscheinung grau	Farberscheinung schwarz
k_a/k	20 %	50 %	80 %
k_s/k	80 %	50 %	20 %

Die Sicht bei Rauch im Tunnel wird anschaulich durch die Sichtweite beschrieben. Sie entspricht der Beobachtungsentfernung, bei der ein jeweils vorgegebenes Sehobjekt gerade im Rauch wahrgenommen werden kann. Das ist dann der Fall, wenn der Kontrast, unter dem das Sehobjekt gegen seinen Hintergrund erscheint, gerade den Wert der erforderlichen Kontrastschwelle annimmt.

Unter rauchfreien Bedingungen wird die Kontrastschwelle maßgebend vom Sehwinkel, unter dem ein Sehobjekt erscheint, und von der Leuchtdichte, auf die das Auge adaptiert ist, bestimmt. Mit zunehmender Rauchdichte werden die Augen so gereizt, dass zur Wahrnehmung von Sehobjekten höhere Kontrastschwellen erforderlich sind.

Bei der Sichtweite wird zwischen einer Detektions- und einer Identifikations-Sichtweite unterschieden je nachdem, ob die Wahrnehmbarkeit (Detektion) oder die Detailerkennbarkeit (Identifikation) gefordert ist. Der Identifikations-Sichtweite liegt nur 1/10 des Seh winkels der Detektions-Sichtweite zugrunde.

Der Kontrastverlust, den der Anfangskontrast C_0 , der am Sehobjektort bzw. bei Rauchfreiheit vorhanden ist, beim Blick durch

den Rauch erleidet, wird durch den Kontrastverminderungsfaktor gekennzeichnet. Dieser Faktor beschreibt maßgebend den Einfluss der Dichte und des Streulichtanteils des Rauches auf die Sichtweite.

3 Ergebnisse und Folgerungen

Schon ab mäßigen Rauchdichten wird die mittlere Umfeld-Leuchtdichte, auf die ein Beobachter bei Rauch im Tunnel adaptiert, ausschließlich von der Streu-Leuchtdichte des Rauches bestimmt. Die Streu-Leuchtdichte von weißem Rauch entspricht etwa der mittleren Tunnelröhren-Leuchtdichte im rauchfreien Zustand. Bei grauem Rauch geht die Streu-Leuchtdichte auf 1/3 und bei schwarzem Rauch auf 1/10 der Tunnelröhren-Leuchtdichte im rauchfreien Zustand zurück.

Sowohl die Detektions-Sichtweite als auch die Identifikations-Sichtweite von Sehobjekten sinken mit zunehmender Rauchdichte exponentiell jedoch unterschiedlich stark.

Die Detektions-Sichtweite von Rettungszeichen- und Orientierungsleuchten ist in weißem Rauch bei sehr geringer Dichte um 17 %, bei mittlerer Dichte um 25 % und bei sehr starker Dichte um 29 % kürzer als in schwarzem Rauch.

Im Rahmen des hier untersuchten Variationsbereichs hat sich die Lichtstärke der Komponenten der Brand-Notbeleuchtung in Blickrichtung als maßgebende lichttechnische Kenngröße für die Rauchdurchdringung erwiesen. Mit einer 10-fachen Lichtstärke-Steigerung kann ein Sichtweiten-Gewinn von 20 % erreicht werden. Dieses Ergebnis zeigt nachdrücklich die Grenzen zur Verbesserung der Sichtweite bei Rauch auf, die mit lichttechnischen Mitteln zu erzielen ist.

Die Detektions-Sichtweite von Rettungszeichen-Leuchten, die in Blickrichtung eine Lichtstärke von etwa 9 cd aufweisen, geht von Werten über 30 m bei sehr geringer Rauchdichte auf Werte unter 3 m bei sehr starker Rauchdichte zurück.

Die Identifikations-Sichtweite von Rettungszeichen-Leuchten liegt insbesondere bei geringer Rauchdichte deutlich unter der Detektions-Sichtweite. Die Identifikations-Sichtweite von Rettungszeichen-Leuchten geht von Werten über 14 m bei sehr geringer Rauchdichte auf Werte unter 3 m bei sehr starker Rauchdichte zurück.

Die Identifikations-Sichtweite von Rettungszeichen-Leuchten ist in weißem Rauch bei sehr geringer Dichte um 43 % länger, bei mittlerer Dichte um 10 % und bei sehr starker Dichte um 22 % hingegen kürzer als in schwarzem Rauch.

Die Detektions-Sichtweite von Orientierungsleuchten, die unter der Blickrichtung eine Lichtstärke von etwa 88 cd aufweisen, geht von Werten über 40 m bei sehr geringer Rauchdichte auf Werte unter 4 m bei sehr starker Rauchdichte zurück.

Bei mittlerer Rauchdichte wird für Rettungszeichen-Leuchten, deren Lichtstärke in Blickrichtung 9 cd beträgt, eine Detektions-Sichtweite von mindestens 9 m ausgewiesen. Bei entsprechender Verrauchung wird für Orientierungsleuchten, deren Lichtstärke in Blickrichtung 88 cd beträgt, eine Detektions-Sichtweite von mindestens 12,5 m ausgewiesen. Die hier ermittelten Sichtweiten können zur Festlegung von Mindestabständen bei der Anordnung der Komponenten der Brand-Notbeleuchtung dienen, wenn ihre Wahrnehmbarkeit auch bei mittlerer Rauchdichte sichergestellt sein soll.

Neben den lichttechnischen Anforderungen an die Komponenten der Brand-Notbeleuchtung, welche die Sichtbarkeit bei mittlerer Rauchdichte sicherstellen sollen, sind noch normative Vorgaben bei der Gestaltung von Rettungszeichen-Leuchten zu beachten. Des Weiteren wurden lichttechnischen

Kenngrößen der Rettungszeichen-Leuchten und Orientierungsleuchten aus den Vorgaben der Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT) 2003 abgeleitet.

Bei sehr starker Rauchdichte sind die Sichtweiten so kurz, dass der Aufwand, der zur Sichtweiten-Verbesserung der Orientierungsleuchten mittels Lichtstärke-Steigerung erforderlich wäre, nicht mehr vertretbar ist. Für diesen Fall bieten sich lichterkettenartige Alternativen zur Fluchtwegleitung an, die bei Lichtpunktabständen unter 50 cm schon mit Lichtstärken von 1,4 cd auskommen.

Für den Fall, dass LED-Markierungssysteme zur Fluchtleitung bei Rauch im Tunnel genutzt werden sollen, wurden Anforderungen an die LED-Lichtstärken bei den dann wirksamen Ausstrahlungswinkeln ermittelt und der Einfluss dargestellt, der durch den Abstand der Markierungen gegeben ist.

Eine bei Rauch zu gewährleistende Sichtbarkeit der Rettungszeichen-Leuchten und der Orientierungsleuchten begrenzt die Maximalabstände dieser Komponenten der Brand-Notbeleuchtung. Die wirtschaftlichen Konsequenzen wurden für verschiedene Anordnungsvarianten untersucht. Gegenüber einer Anordnung der Rettungszeichen-Leuchten, jeweils in Kombination mit Orientierungsleuchten mit einem Abstand von maximal 25 m, wie die RABT 2003 bisher vorgeben, würden bei einer auch noch für mittlere Rauchdichten geeigneten Anordnung, bei der zwischen die Leuchtenkombinationen zusätzlich jeweils eine Orientierungsleuchte zu positionieren ist, Mehrkosten unter 40 % entstehen.

Hinweise zur Ausführung und Anordnung von Komponenten der Brand-Notbeleuchtung sollen dem Anwender die praktische Umsetzung der lichttechnischen Anforderungen erleichtern, welche deren Sichtbarkeit bei mittleren Rauchdichten sicherstellen.

Zur Gewährleistung der Funktion von Rettungszeichen-Leuchten und Orientierungsleuchten sowohl für den Normalbetrieb als auch für den Brandfall müssen besondere Anforderungen in Bezug auf ihre mechanische und elektrische Bauart sowie auf die Stromversorgung, die Überwachung und die Aktivierung erfüllt sein. Diese betriebstechnischen Anforderungen werden dargestellt.

Der Originalbericht enthält zwei Anhänge. Im Anhang A3 wird das theoretische Verfahren detailliert vorgestellt, mit dem die Sichtverhältnisse bei Rauch im Tunnel sowohl systematisch als auch tunnelspezifisch untersucht werden können. Beim Anhang A4 handelt es sich um Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen, die den Einfluss der Anordnung von Rettungszeichen- und Orientierungsleuchten auf die Investitions- und Betriebskosten zum Thema haben. Wegen des Umfangs der Anhänge wurde in der vorliegenden Veröffentlichung auf ihre Wiedergabe verzichtet. Sie liegen bei der Bundesanstalt für Straßenwesen vor und sind dort einsehbar. Verweise auf diese Anhänge im Berichtstext wurden beibehalten.