

Überprüfung der Erkennbarkeit von Fahrbahnmarkierungen auf aufgehellten Deckschichten

**Forschungsberichte der Bundesanstalt für Straßenwesen
Bereich Straßenverkehrstechnik**

Überprüfung der Erkennbarkeit von Fahrbahnmarkierungen auf aufgehellten Deckschichten

Dipl.-Phys. H. H. Meseberg

Bundesanstalt für Straßenwesen
Bergisch Gladbach, Dezember 1985

Herausgeber:

Bundesanstalt für Straßenwesen

Bereich Straßenverkehrstechnik

Brüderstraße 53

D-5060 Bergisch Gladbach 1

Telefon: (022 04) 430

Telex: 8878483 bas d

Druck: Druck- + Verlagshaus Wienand, Köln

Kurzfassung

Überprüfung der Erkennbarkeit von Fahrbahnmarkierungen auf aufgehellten Deckschichten

Ziel des Forschungsauftrages war es zu untersuchen, inwieweit auf aufgehellten bituminösen Deckschichten wegen des zu erwartenden geringeren Kontrastes die Erkennbarkeit einer Markierung beeinträchtigt wird. Bei der Durchführung des Forschungsauftrages erwies es sich als vorteilhaft, in die Untersuchung zum Vergleich herkömmliche dunkle bituminöse Deckschichten und Zementbetondecken einzubeziehen.

Am Tage ergaben sich im allgemeinen auf allen drei Deckenarten Erkennbarkeitsweiten von mehr als 75 m. Nur auf neuen, sehr hellen Zementbetondecken kommt es gelegentlich zu Erkennbarkeitsweiten von weniger als 50m. 75 m können erreicht werden, wenn die Markierung im Neuzustand einen Leuchtdichtefaktor von mindestens 0,60 aufweist.

Bei Nacht wurde nur der Fall des Fahrens bei Kfz-eigener Beleuchtung untersucht, da die Bedingungen des nächtlichen Fahrens bei ortsfester Straßenbeleuchtung im wesentlichen den Bedingungen bei Tag gleichen. Es werden Kurvenscharen für die Erkennbarkeitsweite bei Fahren mit Kfz-eigener Beleuchtung bei trockener, feuchter und nasser Fahrbahn hergeleitet. Nachts ist bei trockener Fahrbahn die Erkennbarkeit auf Zementbeton am geringsten, bei feuchter und nasser Fahrbahn auf aufgehellten bituminösen Deckschichten. Die Unterschiede sind jedoch meist nicht groß.

Die Aufhellung von bituminösen Deckschichten führt kaum zu Einbußen der Erkennbarkeit darauf verlegter Markierungen. Für einen Markierungsstreifen der Abmessung 0,15 m x 6 m ergeben sich im Bereich des Leuchtdichtekoeffizienten der Markierung $R_L = 50 - 200 \text{ mcd/m}^2 \cdot \text{l x}$ bei trockener und feuchter Fahrbahn Erkennbarkeitsweiten von 50 - 100 m. Für die lichttechnisch besten der zur Zeit in der Erprobung befindlichen profilierten Markierungen ergeben sich für einen Markierungsstreifen der gleichen Abmessung bei nasser Fahrbahn etwa 50 - 85 m Erkennbarkeitsweite.

Abstract

Study on the visibility of road markings on light-colored wearing courses

The intent of this research was to examine if light-colored bituminous wearing courses would affect the visibility of road markings due to a decline in contrasts. At the same time it was also advantageous to examine the effects of the normal dark bituminous wearing courses and cement pavements.

During the day visibility was found to be more than 75 m on all three types of pavement. Only on new, extremely light-colored cement concrete pavements is the visibility distance less than 50 m. A visibility distance of 75 m could be obtained when the markings, freshly applied, have a luminance factor of at least 0,60.

At night, only the case of illumination caused by car headlights was studied. The conditions faced driving at night with the aid of street lighting are essentially the same as those faced in daytime. A family of curves was plotted for the visibility distances with only the influence of car headlights in dry, humid and wet road conditions. At night on a cement concrete surface is the surface distance inferior. Likewise, on humid and wet roadways, with light-colored bituminous wearing courses, is the visibility inferior. However, the difference in all cases is not large.

The coloring from bituminous wearing courses shows little loss of visibility on applied markings. For a road marking stripe measuring 0,15 m x 6 m with a coefficient of retroreflected luminance of the marking $R_L = 50$ to 200 mcd/m².lx, the visibility distance is from 50 to 100 m on dry or humid roadways. As studied the best profiled markings at this time have a visibility distance on wet roads of 50 to 85 m. This is for a road marking stripe of the same size as stated earlier, and on wet road surfaces.

Résumé

Vérification de la visibilité de marquages de chaussée sur couches de roulement éclaircies

Le but du mandat de recherche a été d'étudier l'atteinte de la visibilité du marquage due au contraste moins bon sur revêtements bitumineux éclaircies. Pour cela, il s'est avéré avantageux de comparer aussi les traditionnelles chaussées de béton de ciment et couches de roulement hydrocarbonées sombres.

De jour, les distances de visibilité ont été en général supérieures à 75m sur les trois types de revêtements. Ce n'est que sur les nouvelles chaussées de béton de ciment très claires que les distances de visibilité ont été de temps en temps inférieures à 50m. Il a été possible d'atteindre une distance de visibilité de 75m pourvu que le marquage présente le jour de l'application un facteur de luminance minimal de 0,60.

De nuit, seulement la conduite en présence de projecteurs du véhicule a été étudiée, comme la conduite automobile de nuit avec éclairage public est voisine de celle de jour. Pour la distance de visibilité pendant la conduite seulement en présence de projecteurs du véhicule, des familles de courbes ont été déterminées sur chaussée sèche, peu et très humide.

De nuit, la distance de visibilité a été la plus faible sur chaussées de béton de ciment sèches; en ce qui concerne les chaussées peu et très humides, elle a été minimale sur couches de roulement hydrocarbonées éclaircies. Généralement, les différences n'ont pourtant pas été grandes.

L'éclaircissement des revêtements bitumineux n'a porté qu'à la distance de visibilité des marquages routiers appliqués là-dessus. Pour une bande de marquage des dimensions 0,15m x 6m, les distances de visibilité ont été de 50 à 100m dans la fourchette du coefficient de luminance rétro-réfléchi du marquage $R_L = 50$ à $200 \text{ mcd/m}^2 \cdot 1x$ sur chaussée sèche et humide. Par temps de pluie, une bande de marquage de 0,15m x 6m des marquages profilés actuellement en expérimentation qui sont les meilleurs au point de vue photométrique a exigé des distances de visibilité d'environ 50 - 85m.

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	1
2	Die Funktion von Fahrbahnmarkierungen	7
3	Problemstellung	9
4	Der Kontrast Fahrbahnmarkierung - Fahrbahnober- fläche	10
	4.1 Helligkeitskontrast	10
	4.2 Farbkontrast	17
5	Ermittlung der Erkennbarkeitsweite bei Tag und .. Nacht nach Allen u.a.	19
	5.1 Meßbedingungen	20
	5.1.1 Verwendete Meßgeräte	20
	5.1.2 Auswahl der Meßflächen	24
	5.2 Ermittlung der Erkennbarkeitsweiten aus den.. von Allen u.a. angegebenen Kurven	27
	5.2.1 Erkennbarkeitsweite bei Tag	27
	5.2.2 Erkennbarkeitsweite bei Nacht	33
6	Erkennbarkeitsweite bei Nacht nach eigenen	
	Berechnungen	36
	6.1 Geometrische Bedingungen	36
	6.2 Ermittlung des Helligkeitskontrastes	37
	6.2.1 Messung der Leuchtdichte	40
	6.2.2 Messung des Leuchtdichtekoeffizienten.. bei Retroreflexion	45
	6.2.3 Vergleich der beiden Methoden zur	
	Ermittlung des Helligkeitskontrastes ..	45
	6.2.4 Die standardisierte Fahrbahnleucht- ... dichte	49
	6.3 Die Bestimmung der Erkennbarkeitsweite	54

7	Diskussion der Ergebnisse	59
	7.1 Ausgewählte Kurven	59
	7.2 Diskussion der Erkennbarkeitsweiten-Diagramme	65
	7.3 Anwendung der Ergebnisse	67
	7.3.1 Erkennbarkeitsweiten für Fahrbahnmarkierungen im deutschen Straßennetz	67
	7.3.2 Erkennbarkeitsweiten für die Mindestwerte der Nachtsichtbarkeit gemäß den .. Prüfbestimmungen für Markierungsstoffe .	70
	7.3.3 Die Erkennbarkeitsweite von profiierten Markierungen bei Nässe	74
	7.4 Vergleich der ermittelten Erkennbarkeitsweiten mit den Ergebnissen anderer Autoren ...	77
	7.5 Abschätzung der Genauigkeit des angewandten Verfahrens	83
	Literatur	87
	Zusammenstellung der im Text verwendeten Formelzeichen	91
	Anhänge	

1 Zusammenfassung

Fahrbahnmarkierungen stellen eines der wichtigsten Elemente in der optischen Führung und Signalisierung auf Straßen dar. Sie erleichtern dem Kraftfahrer die Fortbewegung im Straßenverkehr und tragen zu einem sichereren und flüssigeren Verkehrsablauf bei. Indem sie einen Beitrag zur Verringerung der Unfallzahl und -schwere leisten, kommt ihnen ein hoher volkswirtschaftlicher Nutzen zu.

Die Fahrbahnmarkierungen sollen ihre verschiedenen Funktionen unter möglichst allen Witterungs- und Sichtbedingungen erfüllen: Am Tage, bei Nacht, bei feuchter Fahrbahnoberfläche und unsichtigem Wetter. Deshalb müssen an die Sichtbarkeit von Fahrbahnmarkierungen hohe Anforderungen gestellt werden.

Seit vielen Jahren werden in der Bundesrepublik Deutschland bituminöse Deckschichten durch Zusatz von meist künstlichen Zuschlagstoffen aufgehellt. Dadurch wird eine Erhöhung des Helligkeitsniveaus der Fahrbahndecke erreicht, was bei Nacht, v.a. bei Nässe, zu besseren Sichtbedingungen und zu erhöhter Sicherheit führt. Bei ortsfester Straßenbeleuchtung können Investitions- und Energiekosten eingespart werden. Aufgehellte bituminöse Deckschichten besitzen zudem eine höhere Standfestigkeit als nicht aufgehellte Deckschichten. Es stellt sich die Frage, ob auf diesen Decken wegen des zu erwartenden schlechteren Kontrastes zwischen Markierung und Fahrbahndecke die Erkennbarkeit der Markierung beeinträchtigt wird. Diese Frage sollte in vorliegender Arbeit zunächst beantwortet werden. Bei der Durchführung des Forschungsauftrages zeigte sich, daß die Untersuchung ohne größeren Mehraufwand auf Zementbetondecken und auf herkömmliche dunkle bituminöse Deckschichten ausgedehnt werden konnte. Deshalb kann in diesem Bericht ein Überblick über die Erkennbarkeit von Markierungen auf allen Deckenarten vorgelegt werden.

Die Erkennbarkeitsweite am Tage wurde nach von Allen u.a. [6] angegebenen Diagrammen ermittelt, die die Abhängigkeit der Erkennbarkeitsweite von Markierungen vom Helligkeitskontrast

zwischen Markierung und Fahrbahn zeigen. In allen untersuchten Fällen ergeben sich Erkennbarkeitsweiten von weitaus mehr als 75 m. Nur auf sehr hellen, neuen Zementbetondecken kann es bei bestimmten Sonnenständen in Einzelfällen zu Erkennbarkeitsweiten von weniger als 50 m kommen. Wenn solche Fälle vermieden werden sollen, muß die Markierung im Neuzustand einen Leuchtdichtefaktor (Maß für die Helligkeit der Markierung bei Tag) von mindestens 0,60 aufweisen.

Bei Nacht ist danach zu unterscheiden, ob zusätzlich zur Kfz-eigenen Beleuchtung eine ortsfeste Straßenbeleuchtung vorhanden ist oder nicht. Der Fall der ortsfesten Beleuchtung braucht hier nicht behandelt zu werden, da er sich bezüglich der Erkennbarkeit von Fahrbahnmarkierungen kaum vom Fahren bei Tageslicht unterscheidet.

Die Erkennbarkeit beim nächtlichen Fahren nur mit Kfz-eigener Beleuchtung wurde wie folgt ermittelt: Auf trockenen und feuchten Fahrbahnmarkierungen wurde die Leuchtdichte in Abhängigkeit von der Entfernung im Bereich 10 bis 125 m im Fahr- und Fernlicht eines Pkw bestimmt. Gleichzeitig wurde der Leuchtdichtekoeffizient bei Retroreflexion R_L (Maß der Helligkeit der Markierung bei Nacht, bisherige Bezeichnung spezifische Leuchtdichte q') der Markierung und Fahrbahn gemessen. Bei allen Meßstrecken ergab sich eine gleichartige Leuchtdichteverteilung. Die Höhe der Leuchtdichte hängt nur von R_L ab. Daraus folgt, daß der Helligkeitskontrast unabhängig von der Entfernung und nur eine Funktion von R_L der Markierung und der Fahrbahn ist. So läßt sich die Ermittlung des Helligkeitskontrastes bei Nacht auf die relativ einfache Messung von R_L zurückführen.

Für die Markierungsstreifen mit den gebräuchlichsten Abmessungen wird der "äquivalente Durchmesser" bzw. die visuelle Winkelgröße bestimmt. Der äquivalente Durchmesser gibt an, unter welchem Winkel ein Markierungsstreifen bestimmter Abmessungen in Abhängigkeit von der Entfernung gesehen wird. Aus Untersuchungen von Blackwell [26] ist der Schwellenkontrast bekannt, bei dem ein Sehobjekt in Abhängigkeit von der visuellen Winkelgröße gerade erkennbar wird. Auf der Basis dieses funktionellen Zusammenhangs läßt sich mittels der visuellen Winkelgröße des

Markierungsstreifens sowie des Helligkeitskontrastes bzw. des Leuchtdichtekoeffizienten von Markierung und Fahrbahndecke die Erkennbarkeitsweite S von Markierungen für verschiedene Umgebungsbedingungen herleiten.

Es werden Kurvenscharen für S in Abhängigkeit von der Höhe des Leuchtdichtekoeffizienten von Markierung und Fahrbahndecke, des Helligkeitskontrastes, der Abmessungen des Markierungsstreifens bei Fahr- und Fernlicht sowie für ideale und erschwerte Sichtbedingungen ermittelt. Unter erschwerten Sichtbedingungen ist der Einfluß von Umgebungsbedingungen zu verstehen, die die Wahrnehmung von Markierungen beeinträchtigen (z.B. verschmutzte Scheinwerfer oder Windschutzscheiben, matte Reflektoren der Scheinwerfer, Betrieb bei zu niedriger Lampenspannung, getrübbte Atmosphäre). Erschwerte Sichtbedingungen werden nach einem Vorschlag von Allen u.a. [6] dadurch definiert, daß eine Vierfachung des zur Erkennung notwendigen Schwellenkontrastes vorausgesetzt wird.

Es können jedoch nicht alle Bedingungen, die die Sichtbarkeit verringern können, gleichzeitig erfaßt werden. Im normalen Fahrbetrieb kommt es fast immer zu Einschränkungen der Sichtweiten durch mindestens eine der genannten Umgebungsbedingungen. Deshalb sind die hier definierten erschwerten Sichtbedingungen eher als Normalzustand anzusehen als die idealen Sichtbedingungen.

Nach den vorliegenden Messungen geht der Leuchtdichtekoeffizient von Markierungen im feuchten Zustand auf ca. 50 % des Wertes bei trockener Fahrbahn zurück, der Leuchtdichtekoeffizient bei Fahrbahndecken geht sogar auf 25 % zurück. Unter feucht wird hier der Zustand verstanden, bei dem auf der Oberfläche kein stehendes Wasser mehr vorhanden ist, diese aber deutlich feucht ist. Dieser Zustand tritt 5 bis 30 min nach Aufhören von Regen ein. Durch die Darstellung der Erkennbarkeitsweite in Abhängigkeit vom Leuchtdichtekoeffizienten der Markierung und der Fahrbahn ist somit auch die Möglichkeit gegeben, die Erkennbarkeitsweite bei feuchter Fahrbahn zu ermitteln.

In der folgenden Tabelle sind die Erkennbarkeitsweiten S eines Markierungsstreifens der Abmessungen 0,15 m x 6 m (Mittelmarkierung auf Autobahnen) bei Fahrlicht (ohne ortsfeste Beleuchtung) unter erschwerten Sichtbedingungen für die drei Deckenarten dargestellt. Der Bereich des Leuchtdichtekoeffizienten der Markierung beträgt $R_L = 50$ bis $200 \text{ mcd/m}^2 \cdot \text{lx}$.

	Erkennbarkeitsweite S (in m)	
	trockene Fahrbahn	feuchte
Zementbeton	30 - 90	65 - 90
aufgehellte bituminöse Deckschicht	55 - 95	55 - 95
nicht aufgehellte bituminöse Deckschicht	60 - 100	65 - 100

Bei Veränderung eines einzelnen Parameters, der die Erkennbarkeit beeinflusst, lassen sich folgende ungefähr konstante Zu- oder Abschläge angeben:

Beim Übergang von

- erschwerten zu idealen Sichtbedingungen + 32 m
- Fahrlicht zu Fernlicht + 25 m
- Abmessung 0,15 m x 6 m zu 0,30 m x 6 m + 16 m
- Abmessung 0,15 m x 6 m zu 0,12 m x 4 m - 12 m

Bei gleichzeitiger Veränderung mehrerer Parameter sind die einzelnen Zu- oder Abschläge zu addieren.

Es zeigt sich, daß bei trockener Fahrbahn die Erkennbarkeitsweite einer Markierung auf Zementbetondecken am geringsten ist und daher einen kritischeren Fall darstellt als auf aufgehellten

bituminösen Deckschichten. Bei feuchten Fahrbahnen ist S allerdings auf aufgehellten bituminösen Deckschichten am geringsten, der Unterschied zu den anderen Deckenarten ist jedoch nicht groß.

Im Bereich $R_L = 50$ bis $200 \text{ mcd/m}^2 \cdot \text{lx}$ gehen die Erkennbarkeitsweiten auf feuchter Fahrbahn zurück, je nach Deckenart um ca. 10 bis 20 m. Will man eine Erkennbarkeitsentfernung von 75 m erreichen, benötigt man Leuchtdichtekoeffizienten der Markierung von mindestens $100 \text{ mcd/m}^2 \cdot \text{lx}$ bei trockener und $150 \text{ mcd/m}^2 \cdot \text{lx}$ bei feuchter Fahrbahn.

Bei Regen bzw. stehendem Wasser auf der Fahrbahn sind herkömmliche Markierungen im allgemeinen nicht sichtbar, da die Wirkung der Retroreflexion durch die spiegelnde Wasserschicht auf der Markierung dann nicht mehr zur Geltung kommen kann. Für die lichttechnisch besten der derzeit in der Erprobung befindlichen profilierten Markierungen [13], bei denen wegen der zur Anleuchtungs- und Beobachtungsrichtung senkrecht stehenden Teilflächen der Markierung die Retroreflexion wenigstens z.T. wirksam bleibt, ergeben sich bei Nässe Erkennbarkeitsweiten von 50 bis 85 m.

Alle hier dargestellten Ergebnisse gelten für einen Markierungstreifen der Abmessungen $0,15 \text{ m} \times 6 \text{ m}$. Die Erkennbarkeitsweite einer durchgehenden Markierung ist aus wahrnehmungspsychologischen Gründen etwas höher zu veranschlagen.

Abschließend werden die Ergebnisse anderer Autoren mit den Resultaten der vorliegenden Arbeit verglichen und die Gründe für Abweichungen sowie die Genauigkeit des benutzten Verfahrens diskutiert.

Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Aufhellung von bituminösen Deckschichten führt sowohl bei Tag als auch bei Nacht kaum zu Einbußen der Erkennbarkeit einer darauf applizierten Markierung. Im allgemeinen ist die Erkennbarkeit auf Zementbetondecken am geringsten.

- Will man am Tage auch in den wenigen Ausnahmefällen auf neuen Zementbetondecken, bei denen die Erkennbarkeitsweite unter 75 m liegt, diese auf mindestens 75 m anheben, sollte der Leuchtdichtefaktor β im Neuzustand auf Zementbetondecken den Wert 0,60 nicht unterschreiten.
- Für die Erkennbarkeitsweite von 75 m bei Nacht würde im Gebrauchszustand bei trockener Fahrbahn ein Mindestwert des Leuchtdichtekoeffizienten von $100 \text{ mcd/m}^2 \cdot \text{lx}$ benötigt.
- Ist die spezifische Leuchtdichte der Markierung sehr niedrig, so wird die ohnehin eingeschränkte Sichtbarkeit dieser Markierung auf einer hellen Fahrbahnoberfläche weiter verschlechtert.
- Will man hohe Erkennbarkeitsweiten bei Nacht erzielen, kommt es darauf an, Markierungen mit möglichst hoher spezifischer Leuchtdichte einzusetzen. Dann hat auch die Verwendung eines hellen Fahrbahnbelages kaum einen Einfluß auf die Erkennbarkeit der Markierung.

2 Die Funktion von Fahrbahnmarkierungen

Fahrbahnmarkierungen stellen eines der wichtigsten Elemente in der optischen Führung und Signalisierung auf Straßen dar. Sie erleichtern dem Kraftfahrer die Fortbewegung im Straßenverkehr und tragen zu einem sichereren, flüssigeren Verkehrsablauf bei. Eine Vielzahl von Untersuchungen, die im Literaturverzeichnis nur auszugsweise aufgeführt sind ([1] bis [8]), hat bestätigt, daß durch die Verwendung von Fahrbahnmarkierungen bei niedrigen Kosten die Unfallhäufigkeit und -schwere erheblich verringert werden kann. Sie weisen daher einen hohen volkswirtschaftlichen Nutzen auf.

Die Hauptaufgaben von Fahrbahnmarkierungen sind

- den Kraftfahrer zu unterstützen, die optimale seitliche Position auf der Straße zu finden
- Informationen über den weiteren Verlauf auf der Straße und der Position anderer Verkehrsteilnehmer auf dem vor dem Kraftfahrer liegenden Straßenstück zu vermitteln (optische Führung)
- die Aufteilung der Verkehrsflächen zu verdeutlichen
- als Verkehrszeichen ein bestimmtes Verhalten im Straßenverkehr vorzuschreiben.

Diese verschiedenartigen Funktionen müssen von den Fahrbahnmarkierungen unter möglichst allen Witterungs- und Sichtbedingungen erfüllt werden: Am Tage, bei Nacht, bei feuchter Fahrbahnoberfläche und Regen sowie bei unsichtigem Wetter. Daraus folgt, daß an die visuelle Erkennbarkeit von Fahrbahnmarkierungen hohe Anforderungen gestellt werden. Trotz der ständigen Weiterentwicklung und Verbesserung der Qualität der Fahrbahnmarkierungen ist z.Zt. deren Erkennbarkeit vor allem nachts bei Regen noch nicht als ausreichend anzusehen, doch werden seit einiger Zeit in verschiedenen Ländern Anstrengungen unternommen, um auch bei diesen besonders unfallträchtigen Verkehrsbedingungen die Erkennbarkeit von

Wahrbahnmarkierungen zu verbessern. Entsprechende Untersuchungen sind aus den Niederlanden [9], [10], Frankreich [11], [12] und der Bundesrepublik Deutschland [13] bekannt.

3 Problemstellung

Unter den im Titel dieses Berichts genannten "aufgehellten Deckschichten" sollen im folgenden verstanden werden

- Fahrbahndecken aus Zementbeton
- bituminöse Deckschichten, die durch Zusatz von natürlichen oder künstlichen Zuschlagstoffen aufgehellt worden sind.

Bei der Durchführung des Forschungsauftrages zeigte sich, daß die Untersuchungen auf nicht aufgehellte bituminöse Deckschichten sowie auf feuchte Fahrbahndecken ausgedehnt werden konnten, ohne daß der Meßaufwand erheblich erhöht werden mußte. Deshalb wurden alle Berechnungen der Erkennbarkeitsweite für den ganzen Helligkeitsbereich der in der Bundesrepublik Deutschland vorkommenden Fahrbahndecken in trockenem und feuchtem Zustand durchgeführt.

Wird eine Fahrbahnmarkierung auf eine solche helle Fahrbahnoberfläche appliziert, kann der Fall eintreten, daß die Fahrbahnmarkierung sich in ihrer Helligkeit von der Helligkeit der Fahrbahnoberfläche nicht genügend oder gar nicht unterscheidet - lichttechnisch gesprochen, der Helligkeitskontrast zwischen Fahrbahnmarkierung und Fahrbahnoberfläche ist zu klein - und daß deshalb die Fahrbahnmarkierung nur noch schlecht oder gar nicht mehr erkannt wird. Dieser Bericht untersucht u.a. die Frage, ob und unter welchen Bedingungen dieser Fall eintritt und wie er verhindert werden kann.

Bei konstantem Kontrast verringert sich die Erkennbarkeit eines Sehobjektes mit abnehmender Umfeldhelligkeit und abnehmender Objektgröße. Deshalb ist i.a. die Erkennbarkeitsweite von Markierungen geringer als die geometrisch mögliche Sichtweite. Die Erkennbarkeitsweiten sind nachts trotz höheren Kontrastes wegen der um Größenordnungen niedriger liegenden Umfeldhelligkeit kleiner als am Tage.

In diesem Bericht werden die Erkennbarkeitsweiten von Fahr-
bahnmarkierungen unter verschiedenen äußeren lichttechnisch
relevanten Bedingungen ermittelt.

4 Der Kontrast Fahrbahnmarkierungen - Fahrbahnoberfläche

4.1 Helligkeitskontrast

Für den Helligkeitseindruck, den ein Beobachter von einem flächenhaften Sehobjekt hat, ist die Leuchtdichte L dieses Objekts maßgebend. Sie wird in cd/m^2 (Candela je m^2) gemessen. Da Fahrbahnmarkierungen in den meisten Fällen und Fahrbahnoberflächen immer flächenhaft gesehen werden, ist die Leuchtdichte als entscheidendes Kriterium für deren Helligkeitseindruck anzusehen. Die Fahrbahnmarkierung wird jedoch nur dann visuell von der Fahrbahnoberfläche unterschieden, wenn ihre Leuchtdichte sich um einen bestimmten Betrag von der Leuchtdichte der Fahrbahnoberfläche unterscheidet. Beide Flächen bilden einen gewissen Kontrast k zueinander:

$$k = \frac{L_M - L_F}{L_F} \quad (1)$$

L_M - Leuchtdichte der Fahrbahnmarkierung in cd/m^2

L_F - Leuchtdichte der Fahrbahnoberfläche in cd/m^2

Da die Leuchtdichte nur mit relativ großem Aufwand gemessen werden kann, werden im allgemeinen andere Größen gemessen, die einen linearen Zusammenhang mit der Leuchtdichte besitzen. Mit Hilfe dieser Größen kann dann die Leuchtdichte oder der Kontrast bestimmt werden.

Für den Helligkeitseindruck am Tage kann anstelle der Leuchtdichte der Leuchtdichtefaktor β herangezogen werden. Der Leuchtdichtefaktor ist das Verhältnis der Leuchtdichte der Meßprobe und der Leuchtdichte einer vollkommenen streuenden und reflektierenden Fläche bei gleicher Beobachtungsrichtung und Beleuchtung [14]. Bei Fahrbahnmarkierungen wird der Leuchtdichtefaktor mit sogenannten Farbdifferenz-Meßgeräten wie folgt gemessen: Das Licht der Lichtquelle fällt unter 45° auf die Oberfläche der Markierung. Der Anteil des Lichts, der von der Oberfläche in senkrechter Richtung reflektiert

wird (45/0-Meßgeometrie nach [15], s. auch Bild 1), wird auf die Reflexion des oben definierten idealen Weißstandards unter den gleichen Bedingungen bezogen.

Diese Meßgeometrie entspricht jedoch nicht den realen Sichtbedingungen am Tage. Bei Tageslicht wird die Fahrbahn überwiegend diffus beleuchtet und unter einem sehr streifenden Winkel von ca. 2° bis 6° vom Kraftfahrer betrachtet. Es mußte untersucht werden, ob die Messung mit der 45/0-Geometrie mit den realen Bedingungen, die etwa durch die Beobachtungsgeometrie d/5 bezeichnet werden könnte, übereinstimmt.

Ca. 50 Proben von Fahrbahnmarkierungen unterschiedlicher Oberflächenstruktur und Helligkeit mit den Abmessungen $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ wurden in einer Ulbrichtschen Kugel diffus beleuchtet. Unter einem Beobachtungswinkel von 5° wurde mit einem Pritchard-Leuchtdichtemesser die Leuchtdichte und mit einem Farbdifferenz-Meßgerät unter der Standardgeometrie 45/0 der Leuchtdichtefaktor β gemessen. Den Zusammenhang zwischen beiden Meßgrößen zeigt Bild 2. Es ergibt sich eine gute Linearität zwischen realer Leuchtdichte und Leuchtdichtefaktor, die lineare Regressionsrechnung ergab ein $r^2 = 0,87$. Je stärker der Anteil an spiegelnder Reflexion (hervorgerufen durch die Oberflächenstruktur) oder an Retroreflexion (verursacht durch die Glasperlen an der Oberfläche der Markierung) ist, um so weiter weichen die Meßwerte von der Geraden ab. Bei Abwesenheit von spiegelnder und Retroreflexion, also ganz überwiegender diffuser Reflexion, liegen die Meßwerte auf der Geraden. Dies gilt für nicht strukturierte Fahrbahnmarkierungen mit wenig Glasperlen an der Oberfläche und natürlich erst recht für Fahrbahnoberflächen. Damit kann für den Fall aller herkömmlichen Markierungen mit nicht zu starker Strukturierung ein linearer Zusammenhang zwischen Leuchtdichte und Leuchtdichtefaktor angenommen werden, so daß in (1) die Leuchtdichte durch

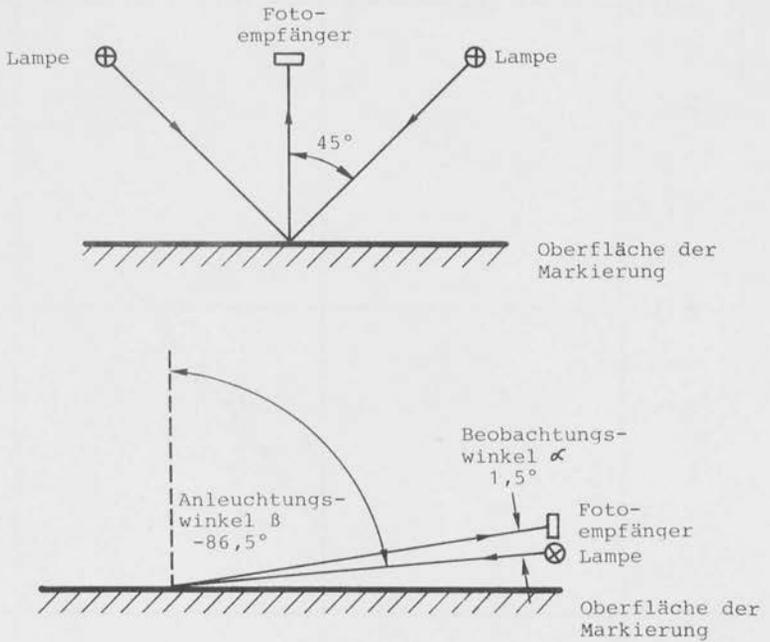


Bild 1: Schematische Darstellung der Meßgeometrie zur Messung des Leuchtdichtefaktors β (oben) und des Leuchtdichtekoeffizienten bei Retroreflexion R_L

Leuchtdichte in der Ulbrichtschen Kugel Geometrie d/5 (cd/m²)

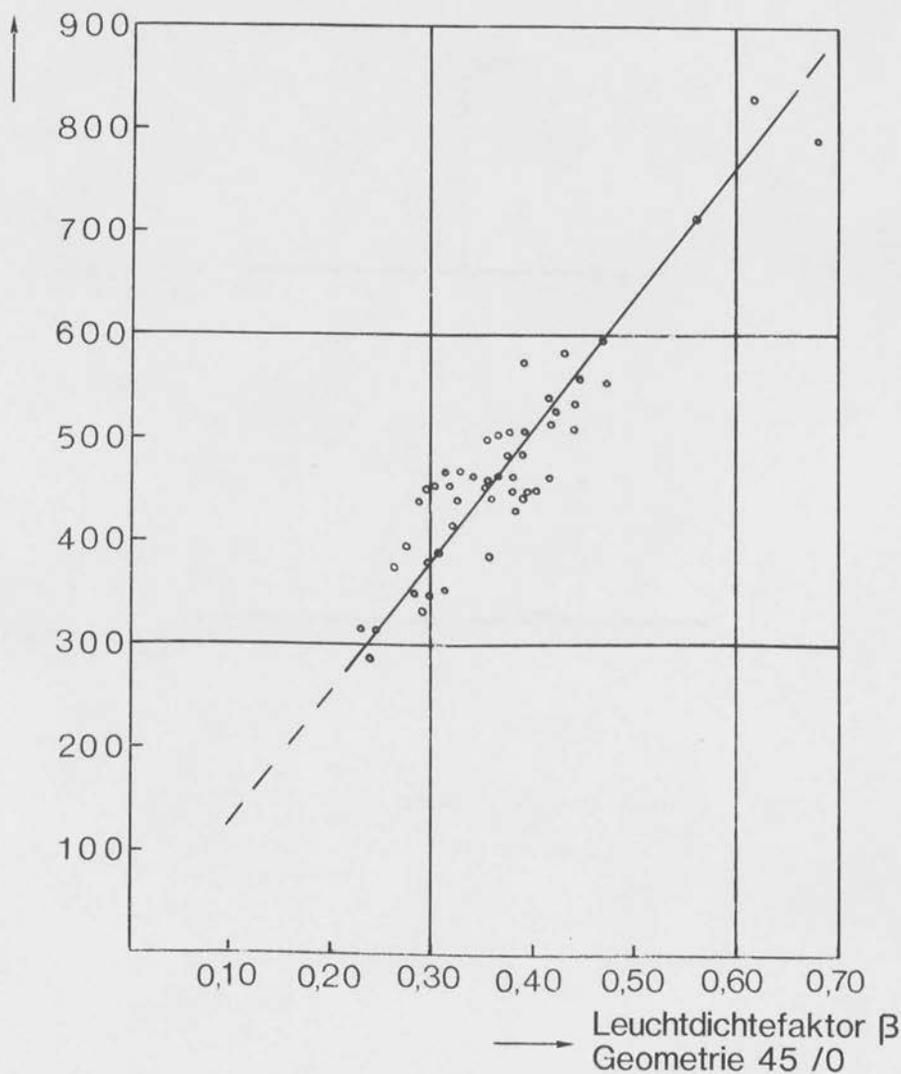


Bild 2: Zusammenhang zwischen Leuchtdichte und Leuchtdichtefaktor β bei Markierungsstoffen

den Leuchtdichtefaktor ersetzt werden kann:

$$k_{\text{Tag}} = \frac{\beta_M - \beta_F}{\beta_F} \quad (2)$$

β_M - Leuchtdichtefaktor der Markierung

β_F - Leuchtdichtefaktor der Fahrbahnoberfläche.

Für den Helligkeitseindruck einer Fahrbahnmarkierung oder Fahrbahnoberfläche bei Nacht unter den Sichtbedingungen des Fahrens nur mit Kfz-eigener Beleuchtung, also bei Abwesenheit von ortsfester Beleuchtung, wird anstelle des Leuchtdichtefaktors der Leuchtdichtekoeffizient bei Retroreflexion R_L ¹⁾ in mcd/m²·lx (Millicandela je m² und Lux) herangezogen. Dieser Leuchtdichtekoeffizient R_L oder Nachtsichtbarkeit ist ein Maß für die Retroreflexionsfähigkeit (Fähigkeit einer Oberfläche, einen Teil des einfallenden Lichts in Richtung der anleuchtenden Lichtquelle zurückzuwerfen) der Fahrbahnmarkierung oder Fahrbahnoberfläche und gibt an, unter welcher Leuchtdichte L (in mcd/m²) ein Kraftfahrer die vor ihm befindliche Fahrbahnmarkierung oder Fahrbahnoberfläche sieht, wenn diese mit einer bestimmten Beleuchtungsstärke E_L (gemessen in lx am Ort des Sichtpunktes des Kraftfahrers senkrecht zur Anleuchtungsrichtung) beleuchtet wird:

$$L = R_L \cdot E_L.$$

¹⁾ Die Bezeichnung "Leuchtdichtekoeffizient bei Retroreflexion", Formelzeichen R_r , wurde 1985 von der "Commission Internationale de l'Eclairage" international vereinbart [29], [32] und wird nunmehr auch in der Bundesrepublik Deutschland verwendet. Sie ersetzt die bisherige Bezeichnung "spezifische Leuchtdichte", Formelzeichen q' , die von der BAST zur Kennzeichnung der Retroreflexion von Fahrbahnmarkierungen eingeführt worden ist und auch Eingang in die "Zusätzlichen Technischen Vorschriften und Richtlinien für Markierungen auf Straßen ZTV-M", Ausgabe September 1984, gefunden hat.

Es mag erstaunen, daß auch bei Fahrbahnoberflächen vom Vorhandensein einer Retroreflexion gesprochen werden kann. Bei allen realen, mehr oder weniger rauhen Oberflächen setzt sich die Reflexion aus der diffusen, gerichteten und Retroreflexion zusammen. So reflektieren auch bituminöse und Zementbetondecken einen gewissen Anteil des auf sie auffallenden Scheinwerferlichts in Richtung des Kraftfahrzeugs zurück. Dieser Anteil ist gerade dafür verantwortlich, daß beim nächtlichen Fahren nur mit Kfz-eigener Beleuchtung der Kraftfahrer das vor ihm liegende Straßenstück überhaupt mit einer gewissen Helligkeit wahrnehmen kann. Verschwindet z.B. bei Regen die Retroreflexion zugunsten einer verstärkten spiegelnden Reflexion, erscheint das gleiche Fahrbahnstück dem Kraftfahrer als schwarz. Die Retroreflexion bei den Fahrbahndecken wird durch die Teile der rauhen Oberfläche erzeugt, die aus dieser herausragen und deshalb senkrecht angeleuchtet werden (v.a. Splitkörner).

Beim Leuchtdichtekoeffizienten R_L ist es notwendig, Anleuchtungs- und Beobachtungswinkel mit anzugeben, da R_L von diesen beiden Winkeln abhängt. Die Leuchtdichte läßt sich durch Multiplikation des Leuchtdichtekoeffizienten R_L mit der Beleuchtungsstärke E_{\perp} , die von den Kfz-Scheinwerfern erzeugt wird, ermitteln:

$$L_M = R_{LM} \cdot E_{\perp} \quad \text{bzw.} \quad L_F = R_{LF} \cdot E_{\perp}$$

Durch Einsetzen in (1) ergibt sich

$$k_{\text{Nacht}} = \frac{R_{LM} - R_{LF}}{R_{LF}} \quad (3)$$

Dabei sind

- R_{LM} der Leuchtdichtekoeffizient bei Retroreflexion der Markierung in $\text{mcd/m}^2 \cdot \text{lx}$
- R_{LF} der Leuchtdichtekoeffizient bei Retroreflexion der Fahrbahn in $\text{mcd/m}^2 \cdot \text{lx}$

Dabei wird vorausgesetzt, daß der Quotient $L/E_{\perp} = R_L$ bei gleicher Meßgeometrie bei Markierung und Fahrbahnoberfläche konstant ist. In Abschnitt 6.2 wird gezeigt werden, daß dies tatsächlich der Fall ist.

Der Kontrast unter den Bedingungen des nächtlichen Fahrens kann also analog wie am Tag durch Messung einer lichttechnischen Größe bestimmt werden. Eine Besonderheit ergibt sich beim nächtlichen Fahren bei ortsfester Beleuchtung. Hier werden Fahrbahn und Fahrbahnmarkierung sowohl durch die Leuchten der Straßenbeleuchtung als auch durch die Kfz-Scheinwerfer angestrahlt, so daß das Helligkeitsniveau durch Leuchtdichtefaktor β und Leuchtdichtekoeffizienten R_L beeinflusst wird. Die Kfz-eigene Beleuchtung liefert jedoch nur 5 bis 10 % der Gesamtleuchtdichte, so daß sich dieser Fall praktisch nicht von den Verhältnissen bei Tageslicht unterscheidet und deshalb nicht gesondert behandelt zu werden braucht.

4.2 Farbkontrast

Nach StVO müssen Fahrbahnmarkierungen als Dauermarkierungen weiß sein; lichttechnisch gesehen, sind sie grau bis weiß. Da sowohl bituminöse als auch Zementbetondecken als grau anzusehen sind, existiert kein Farbkontrast zwischen Fahrbahnmarkierung und Fahrbahnoberfläche. Ein hoher Farbkontrast würde den Signalwert und damit die Erkennbarkeit von Fahrbahnmarkierungen erhöhen, wobei ein konstanter Helligkeitskontrast vorausgesetzt wird. Es ist jedoch nicht möglich, Dauermarkierungen bei vertretbaren Kosten farbig zu gestalten, wie in [16] nachgewiesen wurde. So muß die Erkennbarkeit einer Dauermarkierung allein durch deren Helligkeitskontrast hervorgerufen werden.

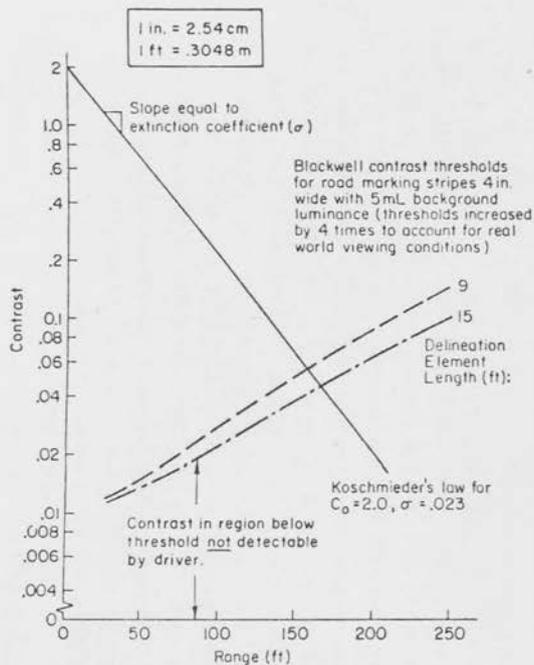
Werden Fahrbahnmarkierungen farbig gestaltet, sinkt der Leuchtdichtefaktor, der Helligkeitskontrast zur Fahrbahn verringert sich ebenfalls und damit auch die Erkennbarkeitsweite. Ob die Erhöhung der Auffälligkeit durch den Farbkontrast die Verringerung der Erkennbarkeit durch den geringeren

Helligkeitskontrast kompensiert, ist noch nicht erforscht worden.

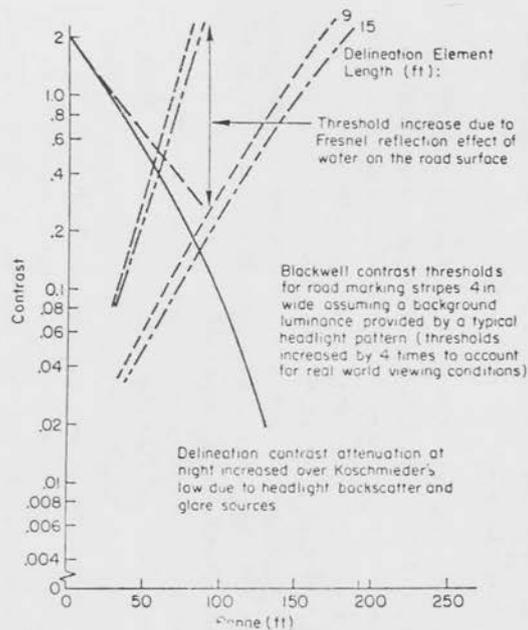
Vorübergehende Markierungen in Arbeitsstellen sind gemäß der Wiener Konvention gelb ausgeführt. Hier ist eine hohe Auffälligkeit der Markierung notwendig, während wegen der begrenzten Geschwindigkeit auf eine hohe Erkennbarkeitsweite verzichtet werden kann.

5 Ermittlung der Erkennbarkeitsweite bei Tag und Nacht nach der Methode von Allen u.a.

Allen u.a. [6] haben Kurven angegeben, die den Zusammenhang zwischen Helligkeitskontrast und Erkennbarkeitsentfernung bei Tag und Nacht herstellen. Diese Kurven sind in Bild 3 wiedergegeben. Sie gelten für einen Markierungsstreifen mit den Abmessungen 0,10 m x 2,74 m (4 in x 9 ft) bzw. 0,10 m x 4,75 m (4 in x 15 ft). Die Kurven beruhen auf den Arbeiten von Blackwell und Taylor [21], die die Zusammenhänge zwischen Größe eines Sehobjektes, dessen Schwellenkontrast (Minimalkontrast, bei dem das Sehobjekt gerade vom Beobachter wahrgenommen wird) und Umfeldleuchtdichte ermittelten. Demnach sind alle Erkennbarkeitsweiten als die Entfernungen zu betrachten, bei denen die jeweilige Markierung gerade sichtbar wird. Bei der für Tageslicht geltenden Kurve (Bild 3a) ist eine Leuchtdichte von 17 cd/m^2 vorausgesetzt, das bedeutet Helligkeitsverhältnisse bei starkem Nebel oder bei Sonnenuntergang und bewölktem Himmel. Für die bei Nacht geltende Kurve wurde eine Leuchtdichteverteilung für bituminöse Deckschichten auf der Straße zugrundegelegt, die in Bild 4 abgebildet ist. Diese Kurve soll später diskutiert werden. Für beide Kurven wurde ein viermal so hoher Schwellenkontrast angenommen, als nach [21] theoretisch notwendig. Dieser Sicherheitszuschlag berücksichtigt den Einfluß von Umgebungsbedingungen, die die Wahrnehmung der Fahrbahnmarkierung beeinträchtigen (z.B. verschmutzte Scheinwerfer und Windschutzscheiben, matte Reflektoren der Scheinwerfer, Betrieb bei zu niedriger Lampenspannung, getrübe Atmosphäre). Es muß betont werden, daß dieser Sicherheitszuschlag nicht ausreicht, um alle Faktoren, die die Erkennbarkeit von Fahrbahnmarkierungen negativ beeinflussen können, gleichzeitig zu berücksichtigen. Es wird also nicht der denkbar schlechteste Fall beschrieben, der durch $S = 0 \text{ m}$ gekennzeichnet ist (z.B. bei starkem Nebel). Im normalen Fahrbetrieb treten diese Umgebungsbedingungen sehr häufig auf. Ihr Einfluß auf die Erkennbarkeitsweite ist kaum zu quantifizieren,



a. Tageslicht



b. bei Kfz-Scheinwerferbeleuchtung

Bild 3: Erkennbarkeitsweite für Markierungsstreifen der Abmessungen

--- 4 in x 9 ft und - · - 4 in x 15 ft.

Entnommen [6]

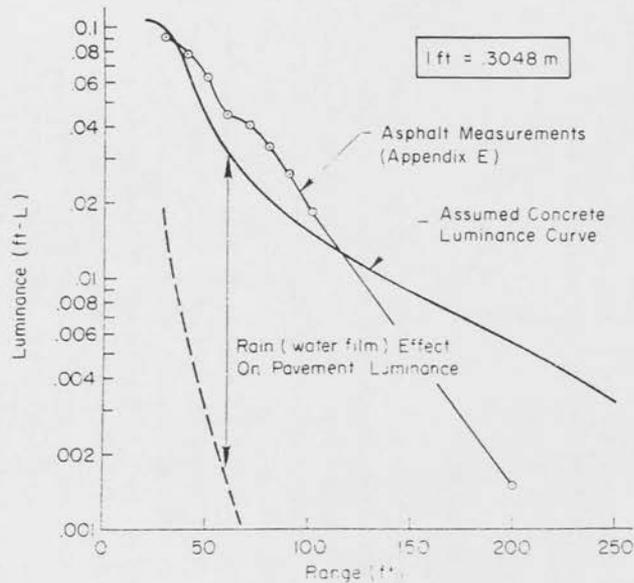


Bild 4: Leuchtdichteverlauf auf der Fahrbahn bei einer typischen Kfz-Scheinwerferbeleuchtung.

— Messung auf Asphalt

○—○ vermutete Kurve für Beton

Entnommen [6]

daher ist die Verwendung eines vervierfachen Kontrastes relativ willkürlich und als Definition der erschwerten Sichtbedingungen anzusehen, die von der Häufigkeit her sogar eher die Normalbedingungen sind. Dieses Verfahren ist zwar unbefriedigend, aber deshalb zu rechtfertigen, weil es den realen Fahrbedingungen näher kommt als ideale Sichtbedingungen.

Im folgenden sollen die Kurven von Allen u.a. zur Abschätzung der Erkennbarkeitsweite der in der Bundesrepublik Deutschland verlegten Fahrbahnmarkierungen benutzt werden.

5.1 Meßbedingungen

5.1.1 Verwendete Meßgeräte

Die zur Bestimmung der Kontraste notwendige Messung der Leuchtdichtefaktoren und der Leuchtdichtekoeffizienten R_L wurde mit Geräten durchgeführt, die in der Bundesanstalt für Straßenwesen seit Jahren mit Erfolg zur Messung der lichttechnischen Eigenschaften von Fahrbahnmarkierungen und Fahrbahnoberflächen eingesetzt werden. Der Leuchtdichtefaktor β wurde mit einem Farbdifferenzmesser der Firma Hunterlab, Typ D 25 D 2 unter Verwendung der Normlichtart C bei Anleuchtung unter 45° und Messung unter 0° (senkrecht zur Meßoberfläche) gemessen. Der Durchmesser des Meßfeldes beträgt 50 mm. Der Leuchtdichtekoeffizient bei Retroreflexion R_L wurde mit dem Optronik-Retrometer ermittelt. Der Winkel zwischen Meßfläche und Lichteinfallrichtung beträgt $3,5^\circ$, gemessen wird das unter 5° zu dieser Fläche reflektierte Licht.

Für diese vereinfachte Meßgeometrie gilt nach DIN 67 520 [17] die Bezeichnungsweise -86,5/1,5. International wurde von der Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) die Bezeichnung 3,5/5 vereinbart. Diese Differenz rührt daher,

daß, wenn eine Fahrbahnmarkierung als retroreflektierendes Material betrachtet wird, die Bezeichnungsweise nach [17] gilt, während in der CIE Fahrbahnmarkierungen als Teil der Fahrbahn betrachtet werden und demzufolge die für eine Straße mit ortsfester Beleuchtung geltende Bezeichnungsweise der Geometrie angewendet wird.

Bei der beschriebenen Geometrie wird als vereinfachend angenommen, daß Anleuchtungs- und Beobachtungsrichtung der Markierung in einer zur Fahrbahnoberfläche senkrechten Ebene liegen. Dies gilt z.B. für einen Motorradfahrer, der die Markierung genau in Fahrtrichtung vor sich hat. Der allgemeine Fall ist dadurch gekennzeichnet, daß die Markierungen links und rechts und zusätzlich unsymmetrisch zum Fahrer angeordnet sind und der Fahrer sich unsymmetrisch zwischen den beiden Scheinwerfern eines Pkw oder Lkw befindet. So existieren bei der nächtlichen Beobachtung einer Markierung im Scheinwerferlicht 4 dreidimensionale Beobachtungsgeometrien [29]:

- a: Anleuchtung der linksseitigen Markierung mit dem linken Scheinwerfer
- b: Anleuchtung der rechtsseitigen Markierung mit dem rechten Scheinwerfer
- c: Anleuchtung der linksseitigen Markierung mit dem linken Scheinwerfer
- d: Anleuchtung der rechtsseitigen Markierung mit dem rechten Scheinwerfer.

In [29] wurden die Winkel der 4 Meßgeometrien in Abhängigkeit von der Beobachtungsentfernung ermittelt. Danach ergeben sich für die Geometrie 3,5/5 Beobachtungsentfernungen von ca. 12,5 m (Fall a) bis ca. 40 m (Fall c). Die gerätetechnisch notwendige Vereinfachung der Beobachtungs- bzw. Meßgeometrie führt rein rechnerisch zu einer zu kleinen Beobachtungsentfernung. Über die Messung des Leuchtdichtekoeffizienten bei Retroreflexion von Fahrbahnmarkierungen

wird ausführlich in [18] berichtet. Die Meßgeometrie beider Geräte ist schematisch in Bild 1 dargestellt. Leuchtdichtemessungen wurden mit Leuchtdichtemessern nach Pritchard oder Moraß durchgeführt. Die verwendeten Meßgeräte können sowohl im Labor als auch auf der Straße, bei trockener und feuchter Oberfläche, eingesetzt werden.

5.1.2 Auswahl der Meßflächen

Die Leuchtdichtefaktoren β und Leuchtdichtekoeffizienten R_L , die in den Tabellen des Abschnittes 5.2 angegeben sind, wurden zum einen den Ergebnissen der Eignungsprüfungen für Markierungsstoffe 1973 entnommen, zum anderen Messungen, die an ausgewählten Markierungen durchgeführt wurden, um den Qualitätsstand der Markierungen in der Praxis festzustellen [19], als auch Messungen, die die Bundesanstalt für Straßenwesen im Rahmen von Prüfungen vorgenommen hat. Ein Teil der Messungen an Fahrbahnmarkierungen und alle Messungen an Fahrbahndeckschichten waren zu dem Zweck durchgeführt worden, die Kontrast- und Sichtbarkeitsverhältnisse von Fahrbahndecken auf verschiedenen Fahrbahnoberflächen zu untersuchen, worüber bereits an anderer Stelle kurz berichtet worden ist [20].

Die Untersuchungen erstreckten sich auf Neu- und Gebrauchszustand bei trockener und feuchter Fahrbahn. Die in den Tab. 1 und 2 jeweils angegebenen zwei Werte stellen nicht die Minima bzw. Maxima dar, die gemessen wurden, sondern geben den ungefähren Bereich an, in dem die lichttechnischen Stoffkennzahlen im allgemeinen, d.h. in etwa 95 % aller Fälle, zu erwarten sind.

Unter Neuzustand ist bei Fahrbahnmarkierungen die gerade applizierte, aber noch nicht überrollte Markierung zu verstehen, bei Fahrbahndeckschichten der Zeitpunkt bis ca. zwei Monate nach Freigabe der entsprechenden Strecke. Gebrauchszustand ist die Zeit nach den angegebenen Zeitpunkten. Unter "feucht"

ist der Zustand der Meßoberfläche frühestens 5 Minuten nach Aufhören von Regen zu verstehen, bzw. der Zeitpunkt, an dem sich kein stehendes Wasser mehr auf der Fahrbahnmarkierung oder Fahrbahndeckschicht befindet. Dieser Zustand wurde gegebenenfalls künstlich herbeigeführt, indem die Meßfläche und deren Umgebung mit Wasser übergossen und dann mit Zellstoff oder einem sauberen Lappen vorsichtig abgetupft wurde. Loser Schmutz wurde vor der Messung mit einer weichen Bürste entfernt, nicht jedoch die auf der Fahrbahnmarkierung festhaftende Verschmutzung. Zu den Meßwerten in den Tabellen ist anzumerken, daß eine Fahrbahnmarkierung oder Fahrbahndecke, die in trockenem Zustand den niedrigsten oder höchsten Meßwert aufweist, nicht notwendigerweise auch in feuchtem Zustand den niedrigsten oder höchsten Meßwert besitzen muß.

In den Tabellen werden Meßwerte unterschieden, die für Fahrbahnmarkierungen auf bituminösen bzw. Zementbetondecken erhalten wurden. Wie eine Auswertung der Meßwerte der Eignungsprüfungen für Markierungsstoffe der BAST ergab [29], besitzen die gleichen Markierungen auf unterschiedlichen Deckenarten auch signifikant unterschiedliche lichttechnische Kennwerte. Dieser Effekt muß daher auch bei der Ermittlung des Kontrastes berücksichtigt werden.

Untersucht wurden nur Markierungen, die kontinuierlich längs der Fahrtrichtung auf der Straße verlegt wurden, also Rand- und Mittelmarkierungen, nicht jedoch Markierungen wie z.B. Haltelinien oder Pfeilmarkierungen. Diese unterliegen besonderen Verschleiß- und Verschmutzungsbedingungen, auf die hier nicht eingegangen werden soll. Diese Markierungen treten fast ausschließlich auf Innerortsstraßen auf: Dort ist im allgemeinen eine ortsfeste Beleuchtung vorhanden und die gefahrenen Geschwindigkeiten sind viel niedriger als auf Außerortsstraßen. Diese Markierungen erfüllen auch dann ihre Funktionen, wenn sie auf relativ geringe Entfernungen (10 bis 20 m) wahrgenommen werden. Dies scheint erfüllt zu sein, so daß diese Markierungen hier nicht behandelt zu werden brauchen.

Da für Rand- und Mittelmarkierungen im allgemeinen unterschiedliche Materialien eingesetzt werden, Markierungen zudem verschieden stark überrollt und verschmutzt werden, treten auch unterschiedliche Leuchtdichtefaktoren β und Leuchtdichtekoeffizienten R_L auf. Deshalb sind in den Tabellen Mittel- und Randmarkierungen getrennt aufgeführt worden. Im Neuzustand kann wegen der fehlenden Überrollung nicht nach Neu- und Gebrauchszustand unterschieden werden. Die Messung der lichttechnischen Stoffkennzahlen auf der Fahrbahnoberfläche erfolgte im allgemeinen in unmittelbarer Nähe der jeweiligen Markierung; in diesem Bereich ist die visuell wahrgenommene Helligkeit bei bituminösen als auch bei Zementbetondecken am größten. Dies rührt daher, daß dieser Teil der Fahrbahn am wenigsten überrollt wird und am wenigsten verschmutzt. Deshalb bleiben in diesem Bereich die Aufhellungsmittel am längsten an der Oberfläche der Fahrbahn erhalten, die daher heller ist als die stärker überrollten Teile der Fahrbahn. Die später aus β und R_L zu errechnenden Kontraste stellen also den schlechtesten Fall bezüglich der gemessenen Fahrbahn dar.

In die Tabellen wurden auch Messungen auf nicht aufgehellten Fahrbahndeckschichten aufgenommen, um eine Übersicht über die Erkennbarkeit von Fahrbahnmarkierungen auf allen vorkommenden Fahrbahndeckschichten zu erhalten. Im Neuzustand kann nicht nach aufgehellten und nicht aufgehellten Deckschichten unterschieden werden, da die Helligkeit bei Tag und Nacht im wesentlichen vom Abstreusplit bestimmt wird, während die Aufhellungsmittel evtl. erst 2 bis 3 Jahre nach Inbetriebnahme der Strecke wirksam werden.

Es wurde bei allen Messungen darauf geachtet, daß die Meßpunkte nach visuellem Eindruck repräsentativ für den gesamten Fahrbahnabschnitt anzusehen sind. Aus diesem Grund und wegen der z.T. starken Inhomogenität der Oberflächen erwies es sich als notwendig, bis zu 30 Einzelmeßwerte pro Bewertungspunkt zu messen, aus denen die arithmetischen Mittelwerte gebildet wurden.

Bei allen Messungen wurde darauf geachtet, daß offensichtliche Applikationsfehler ausgeschlossen wurden und daß keine Strecken berücksichtigt wurden, auf denen besonders starke Verschmutzung (Flugsand, starker Verkehr, landwirtschaftlicher Verkehr o.ä.) zu erkennen war.

5.2 Ermittlung der Erkennbarkeit aus den von Allen u.a. angegebenen Kurven

In Tabelle 1 sind die Leuchtdichtefaktoren und in Tabelle 2 die Leuchtdichtekoeffizienten R_L unter den im vorigen Abschnitt erläuterten Meßbedingungen zusammengestellt. Daraus wurden nach den Formeln (2) bzw. (3) die Helligkeitskontraste errechnet, die in den Tabellen 3 und 4 wiedergegeben sind. Es ist im allgemeinen nicht zu erwarten, daß die Fahrbahnmarkierung mit dem z.B. niedrigsten Leuchtdichtefaktor auf einer Fahrbahnoberfläche mit deren ebenfalls niedrigsten Leuchtdichtefaktor verlegt worden ist. Es wurde vielmehr der niedrigste Leuchtdichtefaktor der Markierung mit dem höchsten Leuchtdichtefaktor der Deckschicht kombiniert und umgekehrt. Daraus ergeben sich dann die niedrigsten bzw. höchsten zu erwartenden Kontraste für eine bestimmte Kombination Fahrbahnmarkierung - Fahrbahndeckschicht. Entsprechendes gilt auch für die Leuchtdichtekoeffizienten R_L . Diese Kontraste wurden in die Tabellen 3 und 4 eingetragen. Es soll auch hier angemerkt werden, daß in Ausnahmefällen diese Kontraste über- bzw. unterschritten werden können. Die Angabe n.d. bedeutet, daß wegen $\beta = 0$ bzw. $R_L = 0$ ein Kontrast nicht definiert ist. Die so ermittelten Kontraste können benutzt werden, um die Erkennbarkeitsweiten mittels der Kurven von Allen u.a. zu bestimmen.

5.2.1 Erkennbarkeitsweite bei Tag

Bild 3a ist zu entnehmen, daß am Tage ein Markierungsstreifen $0,10 \text{ m} \times 4,57 \text{ m}$ (4 in \times 15 ft) bei einem Kontrast von 0,1 eine Erkennbarkeitsentfernung von $250 \text{ ft} = 75 \text{ m}$ besitzt. Die in der

Tabelle 1: Ungefährer Bereich der Leuchtdichtefaktoren β von
 Fahrbahnmarkierungen und Fahrbahnoberflächen

Markierungsart	Leuchtdichtefaktor β							
	Neuzustand				Gebrauchszustand			
	trocken		feucht		trocken		feucht	
Randmarkierungen auf Zementbeton	0,67	0,85	0,60	0,78	0,30	0,65	0,23	0,49
Randmarkierungen auf bituminöser Deckschicht	0,50	0,80	0,43	0,70	0,25	0,47	0,20	0,40
Mittelmarkierungen auf Zementbeton	0,67	0,85	0,60	0,78	0,30	0,59	0,37	0,55
Mittelmarkierungen auf bituminöser Deckschicht	0,50	0,80	0,43	0,70	0,24	0,59	0,21	0,50
Zementbetondecken	0,18	0,44	0,16	0,23	0,21	0,24	0,08	0,13
aufgehellte bituminöse Deckschichten	0,08	0,14	0,03	0,09	0,08	0,17	0,05	0,10
nicht aufgehellte bituminöse Deckschichten	0,08	0,14	0,03	0,09	0,02	0,10	0,01	0,03

Tabelle 2: Ungefährer Bereich der Leuchtdichtekoeffizienten bei Retroreflexion R_L von Fahrbahnmarkierungen und Fahrbahnoberflächen

	Leuchtdichtekoeffizient R_L (in mcd/m ² .lx)							
	Neuzustand				Gebrauchszustand			
	trocken		feucht		trocken		feucht	
Randmarkierungen auf Zementbeton	65	550	30	300	57	420	37	246
Randmarkierungen auf bituminöser Deckschicht	65	440	30	250	50	220	35	150
Mittelmarkierungen auf Zementbeton	65	550	30	300	72	274	30	190
Mittelmarkierungen auf bituminöser Deckschicht	64	440	30	250	49	304	30	240
Zementbetondecken	33	47	4,5	11	12	28	2	8
aufgehellte bituminöse Deckschichten	8	24	0	6	5	34	0	17
nicht aufgehellte bituminöse Deckschichten	8	24	0	6	0	10	0	3

Tabelle 3: Minimaler und maximaler Helligkeitskontrast zwischen Fahrbahnmarkierung und Fahrbahnoberfläche bei Tag

		Helligkeitskontrast							
		Neuzustand				Gebrauchszustand			
		trocken		feucht		trocken		feucht	
Rand- markierung auf	Zementbeton	0,52	3,7	1,6	3,9	0,25	2,1	0,77	5,1
	aufgehellter bituminöser Deckschicht	2,6	9,0	6,8	22	0,47	4,9	2,0	7,0
	nicht aufgehellter bituminöser Deckschicht	2,6	9,0	6,8	22	1,5	2,3	5,7	39
Mittel- markierung auf	Zementbeton	0,52	3,7	1,6	3,9	0,25	1,8	1,8	5,9
	aufgehellter bituminöser Deckschicht	2,6	9,0	6,8	22	0,41	6,4	1,1	9,1
	nicht aufgehellter bituminöser Deckschicht	2,6	9,0	6,8	22	1,4	29	6,0	49

Tabelle 4: Minimaler und maximaler Helligkeitskontrast zwischen Fahrbahnmarkierung und Fahrbahnoberfläche bei Nacht

		Helligkeitskontrast							
		Neuzustand				Gebrauchszustand			
		trocken		feucht		trocken		feucht	
Rand- markierung auf	Zementbeton	0,38	16	1,7	66	1,0	34	3,8	122
	aufgehellter bituminöser Deckschicht	1,7	54	4,0	n.d.	0,47	43	1,1	n.d.
	nicht aufgehellter bituminöser Deckschicht	1,7	54	4,0	n.d.	4,0	n.d.	11	n.d.
Mittel- markierung auf	Zementbeton	0,38	16	1,7	66	1,6	22	2,8	9,4
	aufgehellter bituminöser Deckschicht	1,7	54	4,0	n.d.	0,44	60	0,77	n.d.
	nicht aufgehellter bituminöser Deckschicht	1,7	54	4,0	n.d.	3,9	n.d.	9	n.d.

Bundesrepublik Deutschland verlegten Markierungen haben jedoch eine Breite von 0,12 bis 0,30 m und eine Länge von 4 bis 6 m. Allein diese Vergrößerung der Fläche führt zu einer Erhöhung der Erkennbarkeitsentfernung von schätzungsweise 10 bis 20 m.

Der niedrigste Kontrast lt. Tabelle 3 beträgt 0,25. Die Kurven der Abbildung 3a sind nur für einen Kontrast $k < 0,2$ und eine Entfernung $S \leq 250$ ft angegeben. Unter allen untersuchten Bedingungen sind demnach in der Bundesrepublik Deutschland Erkennbarkeitsweiten von deutlich mehr als 75 m zu erwarten.

In den "Zusätzlichen Technischen Vorschriften und Richtlinien für Markierungen auf Straßen ZTV-M", Ausgabe September 1984, wird im Neuzustand ein Mindestwert des Leuchtdichtefaktors $\beta_M = 0,50$ verlangt, im Gebrauchszustand auf bituminöser Deckschicht $\beta_M = 0,35$ und auf Zementbetondecke $\beta_M = 0,40$. Bestimmt man hierfür mittels der jeweils höchsten Leuchtdichtefaktoren aus Tabelle 1 die Kontraste und daraus weiter die Erkennbarkeitsweiten aus Bild 3a, erhält man wieder in allen Fällen Werte $S > 75$ m.

Der Kontrast und damit auch die Erkennbarkeitsweite der Markierung ist auf aufgehellten bituminösen Deckschichten i.a. höher als auf Zementbetondecken. Letztere sind deshalb als kritischerer Fall anzusehen.

So gibt es auch Einzelfälle, bei denen trotz eines ausreichenden Kontrastes, errechnet aus den bei der 45/0-Geometrie gemessenen Leuchtdichtefaktoren, eine Erkennbarkeitsentfernung auftreten kann, die erheblich unter der aus Bild 3a bestimmten Erkennbarkeitsweite liegt. So wurde beispielsweise auf einer Zementbetondecke einer Autobahn ein $\beta_F = 0,40$ gemessen, der Leuchtdichtefaktor der Mittelmarkierung betrug $\beta_M = 0,50$. Mit einem Kontrast von 0,20 ergibt sich nach Bild 3a noch eine Erkennbarkeitsentfernung von weit mehr als 75 m. Die Markierung

war tatsächlich bei bedecktem Himmel sowie seitlichem oder rückwärtigem Sonnenstand auf eine Entfernung von 100 bis 150 m erkennbar. Bei schräg von vorn einfallender und relativ tiefstehender Sonne war die Markierung nur in der Nähe erkennbar, in größerer Entfernung verschwand sie völlig, da kein Kontrast zur Fahrbahndecke mehr vorhanden war. Die Erkennbarkeitsweite betrug 20 bis 30 m.

Dieser Effekt rührt daher, daß der Leuchtdichtefaktor β , gemessen bei 45/0-Geometrie, für die weitaus meisten, aber nicht für alle Fälle der Himmelsbeleuchtung ein repräsentatives Maß der Helligkeit der Oberflächen von Fahrbahn und Markierung darstellt. Im geschilderten Fall nimmt der Leuchtdichtefaktor der Markierung bei tiefstehender Sonne, also bei streifendem Einfallswinkel, relativ gegenüber dem Leuchtdichtefaktor der Fahrbahnoberfläche ab, wodurch es zu einer Kontrastverminderung und sogar Kontrastauslöschung kommt, was eine Verringerung der Erkennbarkeitsentfernung nach sich zieht. Dieser Effekt kann verhindert werden, wenn Markierungsstoffe eingesetzt werden, die einen Leuchtdichtefaktor besitzen, der im Neuzustand und einige Monate danach 0,60 nicht unterschreitet.

5.2.2 Erkennbarkeitsweite bei Nacht

Die Kurve für die Erkennbarkeit bei Nacht des Bildes 3b ist für Entfernungen bis ca. 190 ft = 58 m dargestellt worden. Aus den Kontrasten der Tabelle 4 wurde mit dieser Kurve die Erkennbarkeitsweite bei Nacht ermittelt und in Tabelle 5 wiedergegeben. Bei Fahrbahnmarkierungen auf Zementbeton beträgt die niedrigste Erkennbarkeitsweite 46 m, auf aufgehellten bituminösen Deckschichten im trockenen Zustand 38 m und im feuchten Zustand 29 m. Auf nicht aufgehellten Deckschichten ist die Erkennbarkeitsentfernung meistens größer als 60 m.

Das von Allen u.a. angegebene Diagramm nach Bild 3a wird als brauchbares Mittel angesehen, um am Tage die Erkennbarkeitsweiten von Fahrbahnmarkierungen zu ermitteln. Für das bei

Tabelle 5: Minimale und maximale Erkennbarkeitsweite S (in m) bei Nacht, ermittelt nach Allen u.a. (Bild 3b)

		Neuzustand				Gebrauchszustand			
		trocken		feucht		trocken		feucht	
	Zement- beton	36	>60	53	>60	46	>60	>60	
Rand- markie- rung auf	aufgeh. bitumin. Deck- schicht	53	>60		>60	39	>60	>60	
	nicht aufgeh. bitumin. Deck- schicht	53	>60		>60	>60		>60	
	Zement- beton	13	>60	53	>60	52	>60	>60	
Mittel- markie- rung auf	aufgeh. bitum. Deck- schicht	53	>60	53	>60	38	>60	29	>60
	nicht aufgeh. bitumin. Decksch.	53	>60	53	>60	>60		>60	

Nacht geltende Diagramm trifft das nicht in gleicher Weise zu. Allen u.a. gehen von einer Straßenleuchtdichte aus, die für dunkle bituminöse Deckschichten bei Fahrlicht eines Kfz (Typ Dodge Van) gilt (Bild 4). Es wird in dieser Abbildung für Zementbeton bei Entfernungen bis ca. 40 m ein zwar qualitativ anderer, aber quantitativ ähnlicher Leuchtdichteverlauf wie bei bituminösen Deckschichten angenommen. Erst für Entfernungen $S > 40$ m nehmen auch Allen u.a. eine erheblich höhere Leuchtdichte für Zementbetondecken an.

Diese Vermutung ist jedoch mindestens für die in der Bundesrepublik Deutschland vorhandenen Verhältnisse nicht zutreffend. Die Meßwerte von R_L in Tabelle 2 zeigen, daß das Leuchtdichteniveau von Zementbetondecken deutlich über dem von bituminösen Decken liegen muß. Befährt man nachts eine Straße, bei der ein Fahrstreifen aus Zementbeton und ein danebenliegender aus einer Schwarzdecke besteht, ist die Zementbetondecke deutlich heller. Auch das Leuchtdichteniveau von aufgehellten bituminösen Deckschichten liegt über dem von nicht aufgehellten, schließlich ist dieser Effekt ja das Ziel der Aufhellung.

Die gleichen Schlüsse können auch aus den Bildern 7 und 8 gezogen werden: Dort ist der Leuchtdichteverlauf einer Zementbetondecke bzw. einer Randmarkierung in Abhängigkeit von der Entfernung vor einem Pkw für trockene und feuchte Fahrbahn eingezeichnet. Der qualitative Verlauf der Leuchtdichte ist für alle Deckenarten und Markierungen sowohl auf trockenen und feuchten Oberflächen gleich, während das Leuchtdichteniveau für die verschiedenen Oberflächen im ganzen Meßbereich von 0 bis 125 m sehr verschieden hoch ist und, wie später ausgeführt werden wird, von R_L abhängt. Die Ergebnisse stimmen mit denen von Fleischer [22] völlig überein, der die durch Kfz-eigene Beleuchtung hervorgerufene Leuchtdichteverteilung von Straßendecken verschiedener Art untersucht hat.

6 Ermittlung der Erkennbarkeitsweite bei Nacht nach eigenen Berechnungen

In diesem Kapitel wird die Erkennbarkeitsweite von Fahrbahnmarkierungen nach einem ähnlichen Verfahren wie von Allen u.a. für verschiedene Deckenarten bei den Bedingungen des nächtlichen Fahrens auf trockener und feuchter Straße ermittelt.

6.1 Geometrische Bedingungen

Ein Fahrbahnmarkierungsstreifen wird wegen des fast streifenförmigen Beobachtungswinkels vom Kraftfahrer perspektivisch stark verkürzt gesehen, bei einer bestimmten Entfernung als Quadrat und bei noch größerer Entfernung sogar als liegendes Rechteck. Man kann die visuelle Gestalt eines solchen Markierungsstreifens in der Größe des vertikalen und horizontalen Sehwinkels s_v und s_h ausdrücken. Die geometrischen Umrechnungsformeln dafür sind

$$s_v = 3438 \cdot \frac{h \cdot l}{S^2} \quad (\text{in Minuten})$$

$$s_h = 3438 \cdot \frac{b}{S} \quad (\text{in Minuten})$$

h - Augenhöhe des Kraftfahrers in m

l - Länge des Markierungsstreifens in m

b - Breite des Markierungsstreifens in m

S - Entfernung Kraftfahrer - Mitte des Markierungsstreifens

Die rechteckige Fläche, ausgedrückt in $s_v \times s_h$, die der Kraftfahrer sieht, kann durch einen Kreis gleicher Fläche ersetzt werden. Dieser Kreis hat den sogenannten "äquivalenten Durchmesser" \emptyset

$$\emptyset = 2 \sqrt{\frac{s_v \cdot s_h}{\pi}} = 6876 \sqrt{\frac{h \cdot l \cdot b}{\pi \cdot S^3}} \quad (\text{in Minuten})$$

Diese Näherungsformel gilt etwa für $S > 15$ m.

Der äquivalente Durchmesser entspricht dem Sehwinkel, unter dem der Kraftfahrer die vor ihm liegende Markierung sieht. Er hängt außer von den Abmessungen der Markierung und der Augenhöhe stark von der Beobachtungsentfernung ab (Bild 5).

Die in der Bundesrepublik hauptsächlich verwendeten Fahrbahnmarkierungsstreifen haben die Abmessungen

0,15 m x 6 m und 0,30 m x 6 m auf Autobahnen und
0,12 m x 4 m und 0,25 m x 4 m auf Außerortstraßen.

Die für die vier Abmessungen durchgeführten Berechnungen sind in Tabelle 6 wiedergegeben; für die Abmessungen 0,12 m x 4 m sind als Beispiel die vertikalen und horizontalen Sehwinkel eingetragen und für alle Abmessungen die äquivalenten Durchmesser. Zugrundegelegt wurde eine Augenhöhe von 1,30 m. Da sich die äquivalenten Durchmesser der Abmessungen 0,25 m x 4 m und 0,15 m x 6 m nur um ca. 5 % voneinander unterscheiden, wurde bei der weiteren Rechnung der Markierungsstreifen der Abmessungen 0,25 m x 4 m weggelassen, dessen Erkennbarkeitsweite demnach geringfügig über der des Markierungsstreifens mit den Abmessungen 0,15 m x 6 m liegt. Der früher auf Autobahnen verwendete Markierungsstreifen der Abmessungen 0,15 m x 9 m besitzt demnach eine Erkennbarkeitsweite, die zwischen der der Streifen mit den Abmessungen 0,15 m x 6 m und 0,30 m x 6 m liegt. Die Abhängigkeit des äquivalenten Durchmessers der drei in Betracht gezogenen Markierungsstreifen von der Beobachtungsentfernung zeigt Bild 5.

6.2 Ermittlung des Helligkeitskontrastes

Grundlage zur Ermittlung der Erkennbarkeitentfernung S ist die Kenntnis des Helligkeitskontrastes zwischen Markierung und Fahrbahnoberfläche. Dieser kann auf zwei Arten hergeleitet werden:

- durch Messung der Leuchtdichten der Markierung L_M und der Fahrbahn L_F

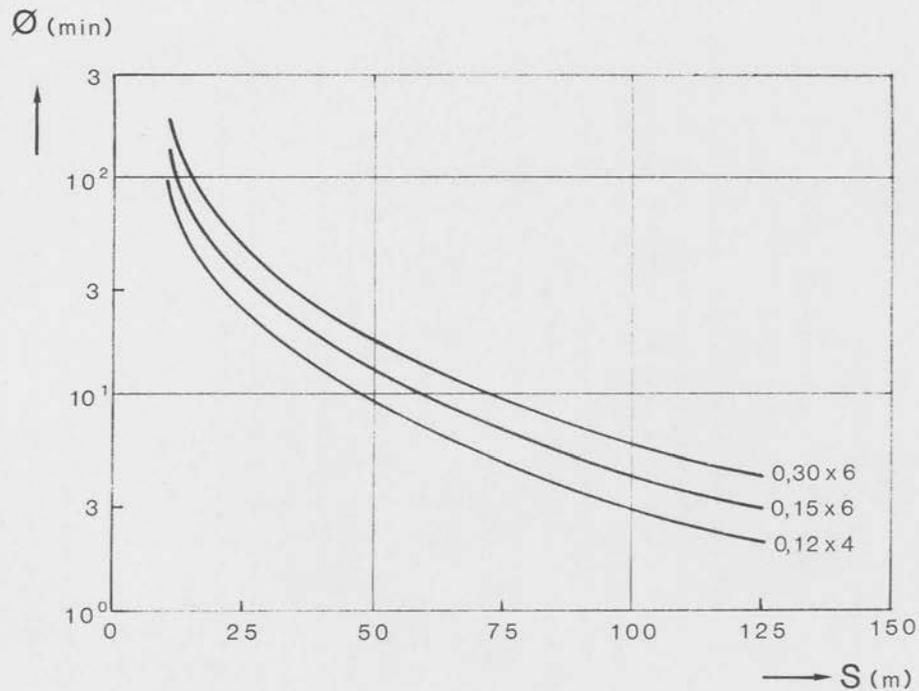


Bild 5: Äquivalenter Durchmesser \varnothing von Markierungsstreifen in Abhängigkeit von der Beobachtungsentfernung S .
 Parameter: Abmessungen der Markierungsstreifen
 (Breite in m x Länge in m)

Tabelle 6 : Visuelle Winkelgröße und äquivalenter Durchmesser von Fahrbahnmarkierungsstreifen für verschiedene Beobachtungsentfernungen und eine Augenhöhe von 1,30 m

Breite x Länge des Markierungs- streifens	Winkel bzw. äqui- valenter Durch- messer \varnothing (in min)	Beobachtungsentfernung (in m)						
		10	15	25	50	75	100	125
0,12 m x 4 m	vert. Winkel s_v	179	79	29	7,2	3,2	1,8	1,1
	horiz. Winkel s_h	41	28	17	8,3	5,5	4,1	3,3
	äquivalenter Durchmesser	97	53	25	8,7	4,7	3,1	2,1
0,15 m x 6 m	äquivalenter Durchmesser	133	72	34	12	6,5	4,2	3,0
0,25 m x 4 m	äquivalenter Durchmesser	140	76	35	13	6,8	4,5	3,1
0,30 m x 6 m	äquivalenter Durchmesser	187	102	47	17	9,2	6,0	4,2

- Durch Messung der Leuchtdichtekoeffizienten der Markierung R_{LM} und der Fahrbahn R_{LF} .

Der Kontrast wird dann aus den Formeln (1) bzw. (2) errechnet.

Zu diesem Zweck wurden auf Autobahnen im Raum Köln - Düsseldorf Messungen der Leuchtdichte und der Leuchtdichtekoeffizienten durchgeführt. Um den Meßaufwand möglichst gering zu halten, wurden die Meßstrecken möglichst so ausgewählt, daß einige bituminöse und aufgehellte bituminöse Deckschichten sowie Zementbetondecken möglichst unmittelbar nebeneinander gemessen werden konnten: z.B. Fahrbahnstreifen - aufgehellter Gußasphalt, Standstreifen - Zementbetondecke.

Die Messungen erfolgten in trockenem Zustand; bei einigen Meßstrecken konnten die Messungen auch bei feuchtem Straßenzustand durchgeführt werden. Feucht bedeutet hier, daß die Messung dann stattfand, wenn die Fahrbahnoberfläche noch deutlich feucht ist, aber kein Wasser mehr darauf steht. Dieser Zustand tritt etwa 5 bis 30 min nach Aufhören von Regen ein. Es wurden je 18 Verläufe der Leuchtdichte für Fahr- und Fernlicht aufgenommen.

6.2.1 Messung der Leuchtdichte

Als Meßfahrzeuge standen ein Opel Rekord Caravan und ein VW Scirocco zur Verfügung, die beide mit H 4-Scheinwerfern ausgerüstet waren. Das Alter der Scheinwerfer betrug weniger als ein Jahr und kann auch nach einer Sichtkontrolle als praktisch neu bezeichnet werden. Das Meßfahrzeug wurde i.a. so aufgestellt, daß die Randmarkierung sich genau unterhalb der Längsachse des Fahrzeugs befand. Unmittelbar vor dem Fahrzeug wurde der Pritchard-Leuchtdichtemesser aufgebaut. Der Meßkopf befand sich in Augenhöhe. Durch diese Anordnung des Pkw auf der Fahrbahn war es möglich, in einem Meßgang die Leuchtdichte

des rechten Fahrstreifens, der Randmarkierung und des Standstreifens zu messen. Die Messung fand bei laufendem Motor statt, die Lampenspannung, gemessen direkt an einem Fahrzeugscheinwerfer, betrug 11,8 bis 12,0 V. Während der Messung saß eine Person auf dem Fahrersitz, um die Belastung des Fahrzeugs im normalen Fahrbetrieb herzustellen. Vor den Leuchtdichtemessungen wurde bei beiden Fahrzeugen die Abhängigkeit der Beleuchtungsstärke von der Entfernung gemessen. In Bild 6 ist die von dem Opel Rekord erzeugte Beleuchtungsstärke bei Fahr- und Fernlicht dargestellt, die mit der des VW Scirocco weitgehend übereinstimmt, so daß im folgenden auf die Angabe des jeweiligen Meßfahrzeugs verzichtet werden kann. Die Bilder 7 und 8 geben die gemessenen Leuchtdichten der rechten Fahrbahn (Zementbeton) bzw. der daneben liegenden Randmarkierung auf der BAB A 59 bei Düsseldorf-Garath wieder, gemessen bei Fahr- und Fernlicht.

Die Leuchtdichte der Fahrbahn und der Markierung zeigt in allen 4 Zuständen - Fahr- und Fernlicht bei trockener und feuchter Fahrbahn - im Bereich 25 bis 125 m einen gleichartigen Verlauf. Bei jeweils gleicher Beleuchtungsart besitzen die Kurven einen nahezu konstanten Abstand voneinander. Da die Leuchtdichte auf der Ordinate logarithmisch aufgetragen ist, bedeutet das, daß sich die Leuchtdichte in den verschiedenen Zuständen nur um einen konstanten Faktor voneinander unterscheidet, z.B.:

$$L_M \text{ (Randmark.)} = 7 \cdot L_F \text{ (Beton)}$$

$$L_F \text{ (trocken)} = 5 \cdot L_F \text{ (feucht)}$$

für alle Entfernungen von 25 bis 125 m.

Aus der ersten dieser beiden Gleichungen kann gefolgert werden

$$L_M/L_F = \text{const.}$$

Ein gleichartiges Verhalten weisen auch die anderen Kurvenverläufe auf, so daß auf deren Wiedergabe verzichtet werden kann. Nach Formel (1) wurde bei jeder Meßentfernung der Kontrast

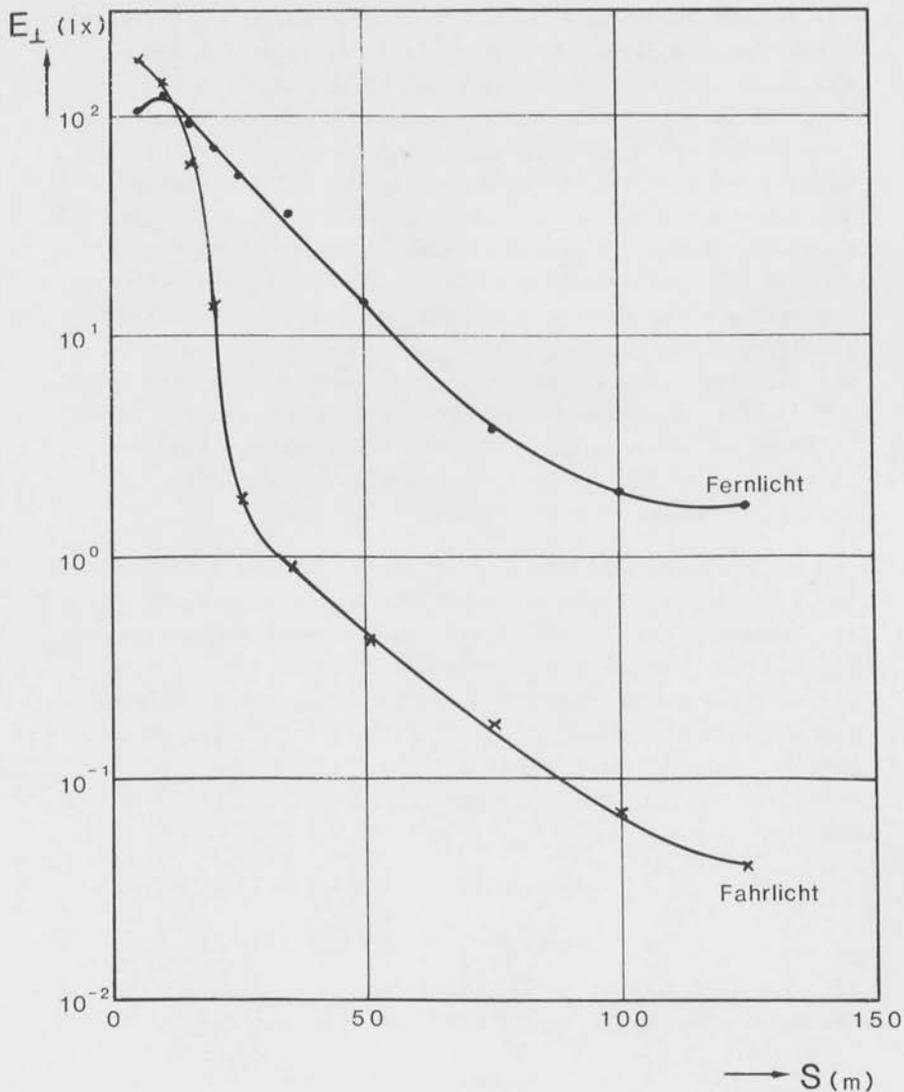


Bild 6: Abnahme der Beleuchtungsstärke E_{\perp} (senkrecht zur Anleuchtungsrichtung gemessen) mit der Entfernung S . Opel Rekord, belastet mit 1 Person, H 4 - Scheinwerfer

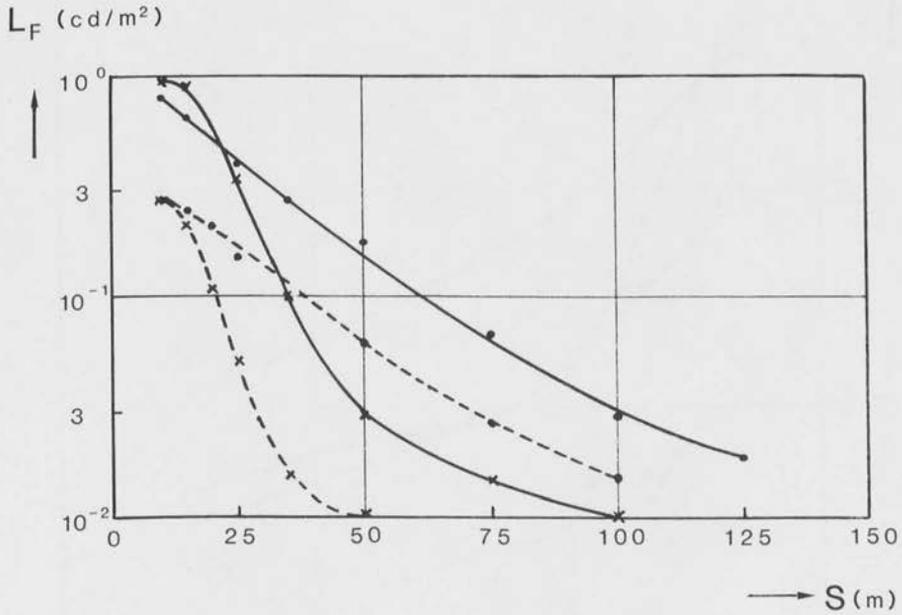


Bild 7: Fahrbahnleuchtdichte L_F in Abhängigkeit von der Beobachtungsentfernung S bei KFZ-Scheinwerferlicht. Meßort: BAB A 59 bei Düsseldorf-Garath, Zementbeton

•	—	•	- - -	•	Fernlicht
x	—	x	- - -	x	Fahrlicht

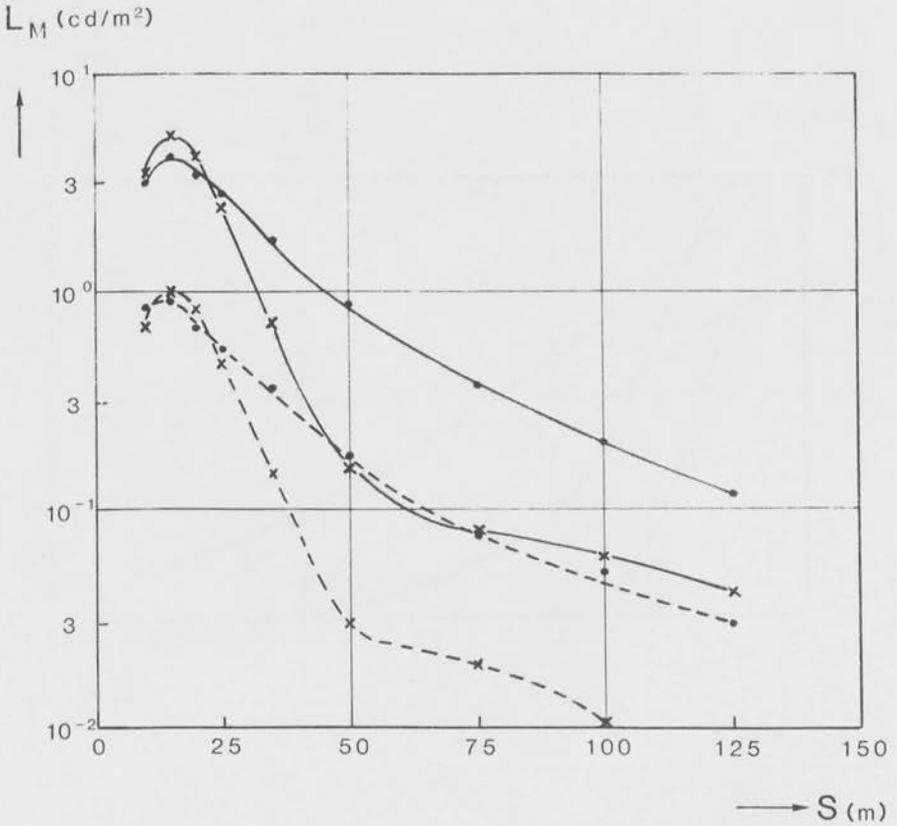


Bild 8: Leuchtdichte einer Randmarkierung L_M in Abhängigkeit von der Beobachtungsentfernung S bei KFZ-Scheinwerferlicht. Meßort: BAB A 59 bei Düsseldorf-Garath

trocken	feucht	
● ———	● - - - - -	● Fernlicht
x ———	x - - - - -	x Fahrlicht

errechnet. Der Kontrastverlauf ist in Bild 9 ebenfalls für die A 59 bei Düsseldorf-Garath angegeben. Wenn, wie ausgeführt, $L_M/L_F = \text{const.}$ ist, so muß nach (1) auch $k = \text{const.}$ sein. Bild 9 ist zu entnehmen, daß dies für Entfernungen $S > 25$ m auch angenähert gilt, eine Abhängigkeit des Kontrastes von der Entfernung ist nicht zu erkennen. Die relativ großen Schwankungen sind vor allem durch Meßgenauigkeiten zu erklären (Schwankung der Anzeige und Meßfehler des Leuchtdichtemessers, bedingt in der Hauptsache durch das Umschalten auf andere Meßbereiche, Schwierigkeit der genauen Entfernungseinstellung). Auf die Darstellung des Kontrastverlaufs der anderen Meßstrecken kann ebenfalls verzichtet werden.

6.2.2 Messung des Leuchtdichtekoeffizienten bei Retroreflexion

Parallel zur Messung der Leuchtdichtevertellung wurden die Leuchtdichtekoeffizienten R_L der Fahrbahnoberfläche und der Markierungen gemessen. Es wurden Meßstellen ausgewählt, die nach Augenschein als repräsentativ für die Meßstrecke angesehen werden konnten. Wegen der oftmals vorhandenen Inhomogenitäten der Meßoberfläche wurden mindestens 10 Einzelmeßwerte aufgenommen und R_L durch arithmetische Mittelwertbildung ermittelt.

Alle Messungen wurden mit einem Optronik-Retrometer durchgeführt. Aus den Mittelwerten von R_L wurde nach Formel (3) der Kontrast bestimmt.

6.2.3 Vergleich der beiden Methoden zur Ermittlung des Helligkeitskontrastes

In Abschnitt 6.2.1 war festgestellt worden, daß der aus der Leuchtdichtemessung ermittelte Kontrast im Bereich der Meßentfernung 25 bis 125 m konstant ist. Bei allen Meßstrecken wurde für diesen Bereich der arithmetische Mittelwert des Kontrastes gebildet und mit dem Kontrast verglichen, der nach

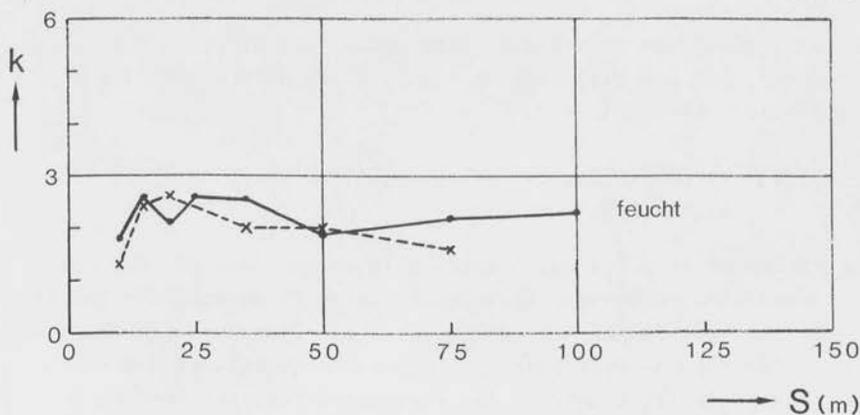
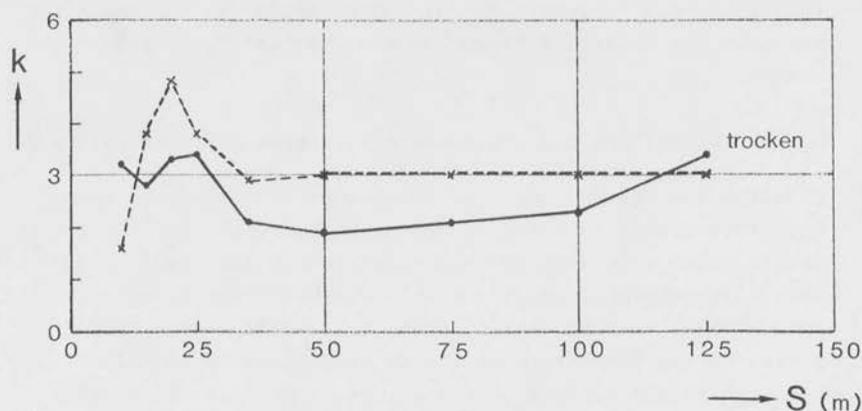
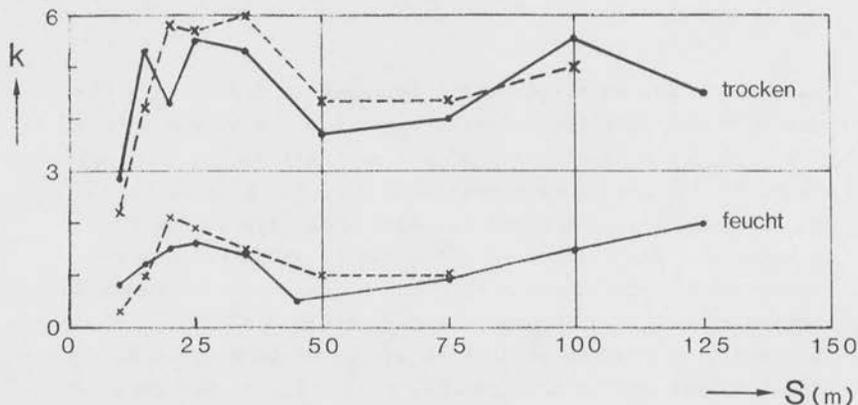


Bild 9: Kontrast k zwischen Randmarkierung und Standspur (oben) bzw. zwischen Randmarkierung und Fahrspur (Mitte und unten).
 Meßort: BAB A 59 bei Düsseldorf-Garath.

Abschnitt 6.2.2 aus der Messung der Leuchtdichtekoeffizienten R_L herrührt. Im Idealfall ergibt sich in beiden Fällen der gleiche Kontrast. Die grafische Darstellung ist in Bild 10 wiedergegeben; eine lineare Regressionsrechnung ergab

$$\begin{aligned}k \text{ (aus L)} &= 0,04 + 1,01 \cdot k \text{ (aus } R_L) \\ \text{mit } r^2 &= 0,92.\end{aligned}$$

Diese ausgezeichnete Übereinstimmung erlaubt es, den Helligkeitskontrast zwischen Markierung und Fahrbahnoberfläche in der Praxis durch die leicht durchzuführende Messung der Leuchtdichtekoeffizienten R_L zu bestimmen und auf die relativ mühsame Leuchtdichtemessung zu verzichten. An dieser Stelle soll eine Bemerkung zum Leuchtdichtekoeffizienten bei Retroreflexion eingeführt werden: Der Leuchtdichtekoeffizient von Markierungen R_{LM} ist, wie in [18] näher ausgeführt, stark von der Beobachtungs- und Meßgeometrie abhängig. Diese Abhängigkeit führt dazu, daß sich R_{LM} mit zunehmender Entfernung, also mit streifender werdendem Beobachtungswinkel α und Anleuchtungswinkel β , vergrößert. Fleischer [22] stellt für R_L von Fahrbahnoberflächen ebenfalls eine Zunahme mit der Entfernung fest. Demgegenüber vertreten Lundkvist u.a. [23] sowie Lundkvist und Sørensen [24] die Meinung, daß R_{LF} im wesentlichen über die Entfernung konstant bleibt, bestätigen aber auch die Zunahme von R_{LM} mit der Entfernung. Jedoch aus den für diese Untersuchung durchgeführten Messungen ergibt sich ein mit der Entfernung zunehmendes R_{LF} .

$$\begin{aligned}\text{Aus den Beziehungen} & \quad L_M(\alpha, \beta) = R_{LM}(\alpha, \beta) \cdot E_{\perp} \quad (\text{s. S.16}) \\ \text{und} & \quad L_F(\alpha, \beta) = R_{LF}(\alpha, \beta) \cdot E_{\perp} \quad (\text{s. S.16}) \\ \text{mit} & \quad L_M(\alpha, \beta) = c \cdot L_F(\alpha, \beta) \quad (c = \text{const.}) \\ \text{folgt} & \quad R_{LM}(\alpha, \beta) = c \cdot R_{LF}\end{aligned}$$

Aus dem gleichartigen Leuchtdichteverlauf für Fahrbahnoberflächen und Fahrbahnmarkierungen folgt also auch ein gleichartiger Verlauf des Leuchtdichtekoeffizienten für beide

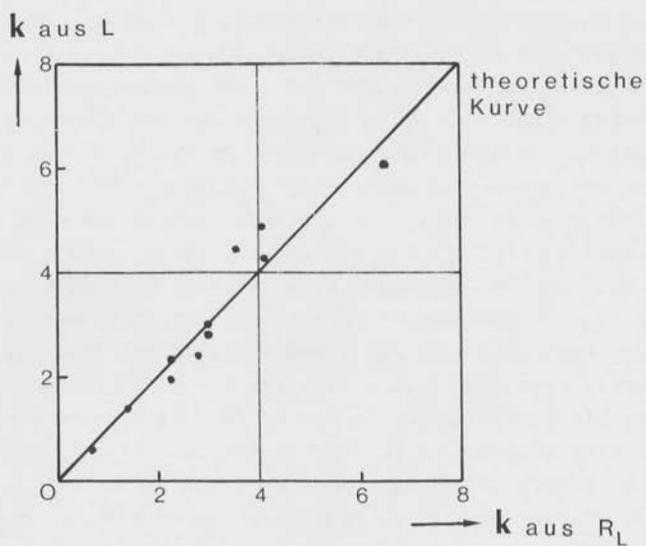


Bild 10: Zusammenhang zwischen dem aus der Leuchtdichtemessung und dem aus der Messung des Leuchtdichtekoeffizienten R_L ermittelten Kontrast k

Oberflächenarten. Es reicht aus, R_{LM} und R_{LF} bei einer bestimmten Meßgeometrie zu messen, um den für den Entfernungsbereich 25 bis 125 m gültigen Kontrast berechnen zu können; es ist demnach nicht notwendig, den speziellen Verlauf der Leuchtdichtekoeffizienten zu kennen.

6.2.4 Die standardisierte Fahrbahnleuchtdichte

Zur Bestimmung der Erkennbarkeitsentfernung eines Markierungsstreifens sind notwendig

- der Sehwinkel, unter dem der Markierungsstreifen gesehen wird. Der Sehwinkel ist identisch mit dem in Abschnitt 6.1 definierten äquivalenten Durchmesser \emptyset
- der Helligkeitskontrast k zwischen Markierung und Fahrbahn
- die Leuchtdichte L_u in der Umgebung des Markierungsstreifens, gegeben durch die Fahrbahnleuchtdichte L_F , die den Adaptationszustand des Kraftfahrers bestimmt.

Die Fahrbahn und deren Umgebung präsentiert sich dem Fahrer beim nächtlichen Fahren nur mit Kfz-eigener Beleuchtung auf Außerortsstraßen als sehr ungleichmäßig ausgeleuchtet. Der größte Teil des Sichtfeldes ist lichtlos, der Fahrer richtet seinen Blick auf leuchtende Objekte wie Markierungen, Rückstrahler an Leitpfosten, Verkehrszeichen, Lichtquellen anderer Fahrzeuge oder Störlichter; er benutzt diese Lichtquellen vor allem auch zur optischen Führung. Erfahrungsgemäß blickt der Fahrer auf die vor ihm liegende Markierung, und zwar vorwiegend dorthin, wo er sie gerade noch sieht, oder auf die Rückstrahler an Leitpfosten, die meistens eine größere Erkennbarkeitsweite besitzen als Markierungen, aber fast immer gegen einen völlig lichtlosen Hintergrund gesehen werden. Deshalb kann die Fahrbahnleuchtdichte bei der Entfernung, bei der die Markierung gerade sichtbar ist, als Adaptationsleuchtdichte angenommen werden; Blicke zu anderen Lichtquellen können

als kurzfristige Störungen dieses Adaptationszustandes in Richtung höherer Adaptationsleuchtdichten angesehen werden, die hier nicht behandelt werden sollen.

Auch hier kann die Messung der Fahrbahnleuchtdichte durch die Messung von R_{LF} ersetzt werden: Bei sämtlichen Meßstrecken wurde bei allen Meßentfernungen von 10 bis 125 m der Quotient E_F aus der gemessenen Fahrbahnleuchtdichte L_F und dem gemessenen Leuchtdichtekoeffizienten R_{LF} für Fahr- und Fernlicht gebildet:

$$E_F = L_F / R_{LF}$$

E_F stellt formal eine Beleuchtungsstärke dar.

Für jede Entfernung wurde der arithmetische Mittelwert aller E_F -Werte errechnet. Daraus ergibt sich die in Bild 11 in relativen Einheiten aufgetragene "standardisierte Beleuchtungsstärke" E_F^* . Multipliziert man diese E_F^* -Werte für die einzelnen Entfernungen mit bestimmten festen Werten der spezifischen Leuchtdichte $R_{LF}(\text{fest})$, erhält man die "standardisierte Fahrbahnleuchtdichte L_F^* in Abhängigkeit von der Entfernung mit R_{LF} als Parameter:

$$L_F^* = R_{LF}(\text{fest}) \cdot E_F^*$$

Zusätzlich wurde berücksichtigt, daß die Windschutzscheibe die Leuchtdichte um etwa 15 % verringert. L_F^* ist in den Bildern 12 und 13 für Fahr- und Fernlicht dargestellt. Als $R_{LF}(\text{fest})$ wurde 5, 7, 10, 15, 20, 30 und 40 mcd/m²·lx gewählt. Diese Werte überdecken den gesamten bei Fahrbahndecken im trockenen und feuchten Zustand vorkommenden Bereich der Leuchtdichtekoeffizienten. Mittels dieser Parameterdarstellung kann jede gemessene R_{LF} der Fahrbahn der Leuchtdichteverlauf im Entfernungsbereich von 10 bis 125 m zugeordnet werden.

...

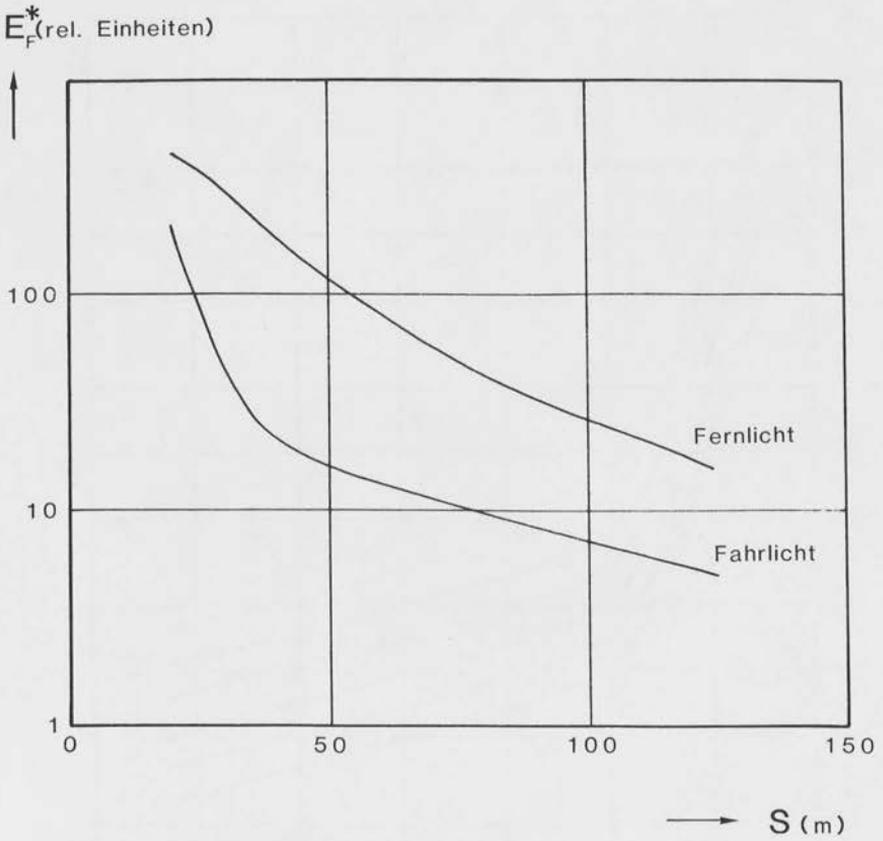


Bild 11: Standardisierte Beleuchtungsstärke E_F^* in Abhängigkeit von der Entfernung S

L_F^* (cd/m²)

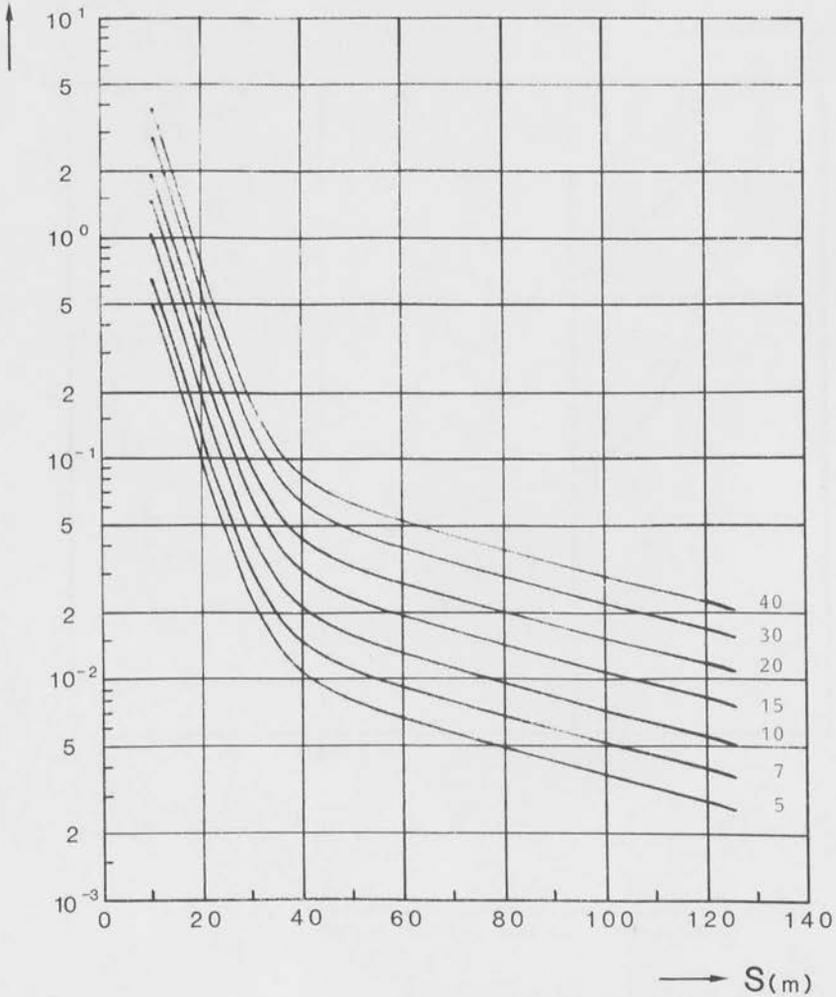


Bild 12: Abhängigkeit der standardisierten Fahrbahnleucht-
dichte L_F^* von der Beobachtungsentfernung S , Fahr-
licht. Parameter: Leuchtdichtekoeffizient der Fahr-
bahn R_{LF} (mcd/m²·lx)

L_F^* (cd/m²)

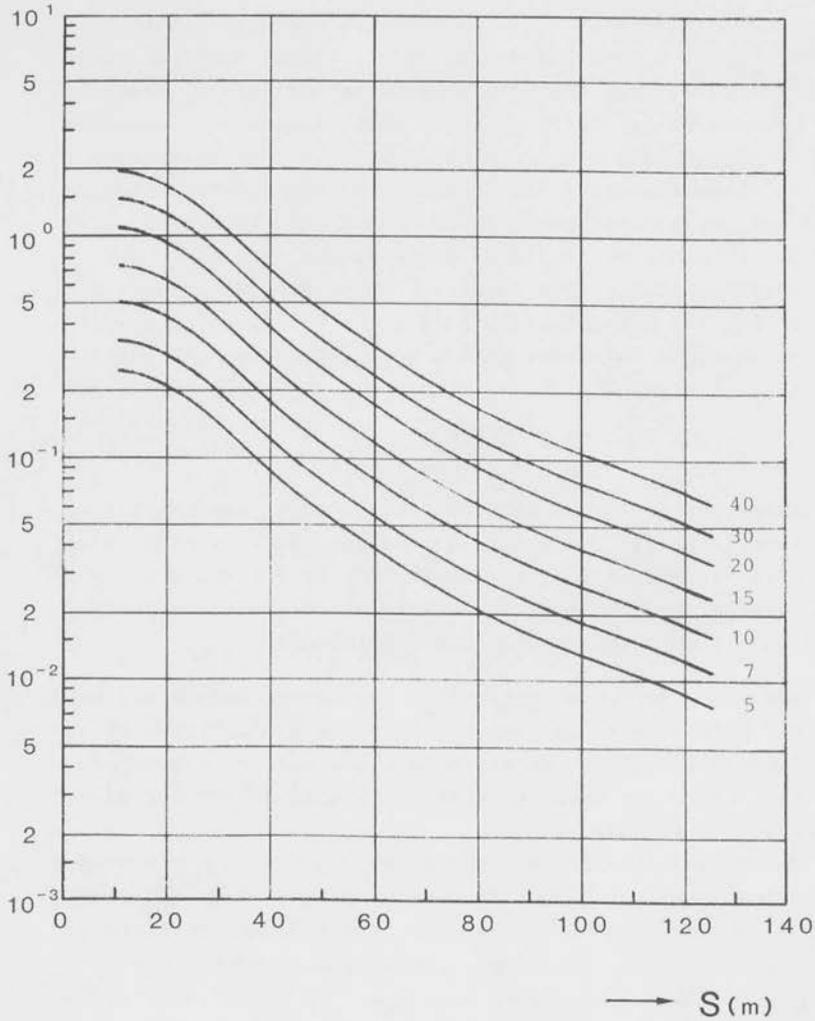


Bild 13: Abhängigkeit der standardisierten Fahrbahnleuchtdichte L_F^* von der Beobachtungsentfernung S , Fernlicht.
Parameter: Leuchtdichtekoeffizient der Fahrbahn R_{LF} (mcd/m².lx)

6.3 Ermittlung der Erkennbarkeitsweite

Adrian [24] hat Kurven für die Unterschiedsleuchtdichte $\Delta L = L_{\text{Sehobj.}} - L_u$, bei der das Sehobjekt gerade sichtbar wird, in Abhängigkeit von der Unterschiedsleuchtdichte L_u angegeben. Parameter ist der Sehwinkel. Auch diese Kurven basieren auf Untersuchungen von Blackwell [25]. Die Darbietungszeit des Sehobjektes betrug bei den Blackwellschen Untersuchungen 15 s und liegt damit genau in der benötigten Größenordnung: Für das Erkennen des weiteren Verlaufs der Markierung auf der Fahrbahn stehen im allgemeinen bei einer Geschwindigkeit von 60 bis 120 km/h etwa 3 bis 20 s zur Verfügung. Die von Adrian angegebenen Kurven wurden so umgerechnet, daß anstelle ΔL der Kontrast k

$$k = \frac{\Delta L}{L_u} = \frac{L_{\text{Sehobj.}} - L_u}{L_u}$$

in Abhängigkeit von der Umfeldleuchtdichte L_u dargestellt werden kann (Bild 14). Parameter ist wieder der Sehwinkel. Wie aus Bild 14 ersichtlich ist, nimmt der zur Erkennung eines Sehobjektes notwendige Schwellenkontrast mit steigender Umfeldleuchtdichte und zunehmendem Sehwinkel ab.

Auf der Basis der in Abschnitt 6.2 gewonnenen Ergebnisse kann nun mit Hilfe des Schwellenkontrastes die Erkennbarkeitsweite für Fahrbahnmarkierungsstreifen bestimmt werden. Das Schema der Ermittlung der Erkennbarkeitsweite soll anhand des Bildes 16 erläutert werden:

Ein Markierungsstreifen mit den Abmessungen 0,15 m x 6 m, der unter dem Sehwinkel \varnothing von 10' gerade erkannt wird, ist nach Bild 5 vom Fahrer 57 m weit entfernt. Bei dieser Entfernung ist aus Bild 12 bei Fahrlicht eine Fahrbahnleuchtdichte L_F von $2,8 \cdot 10^{-2}$ cd/m² abzulesen, wenn $R_{LF} = 20$ mcd/m² · lx ist. Aus Bild 14 ergibt sich für ein $L_F = L_u = 2,8 \cdot 10^{-2}$ cd/m² bei dem vorausgesetzten Sehwinkel von 10' und idealen Sichtbedingungen

. . .

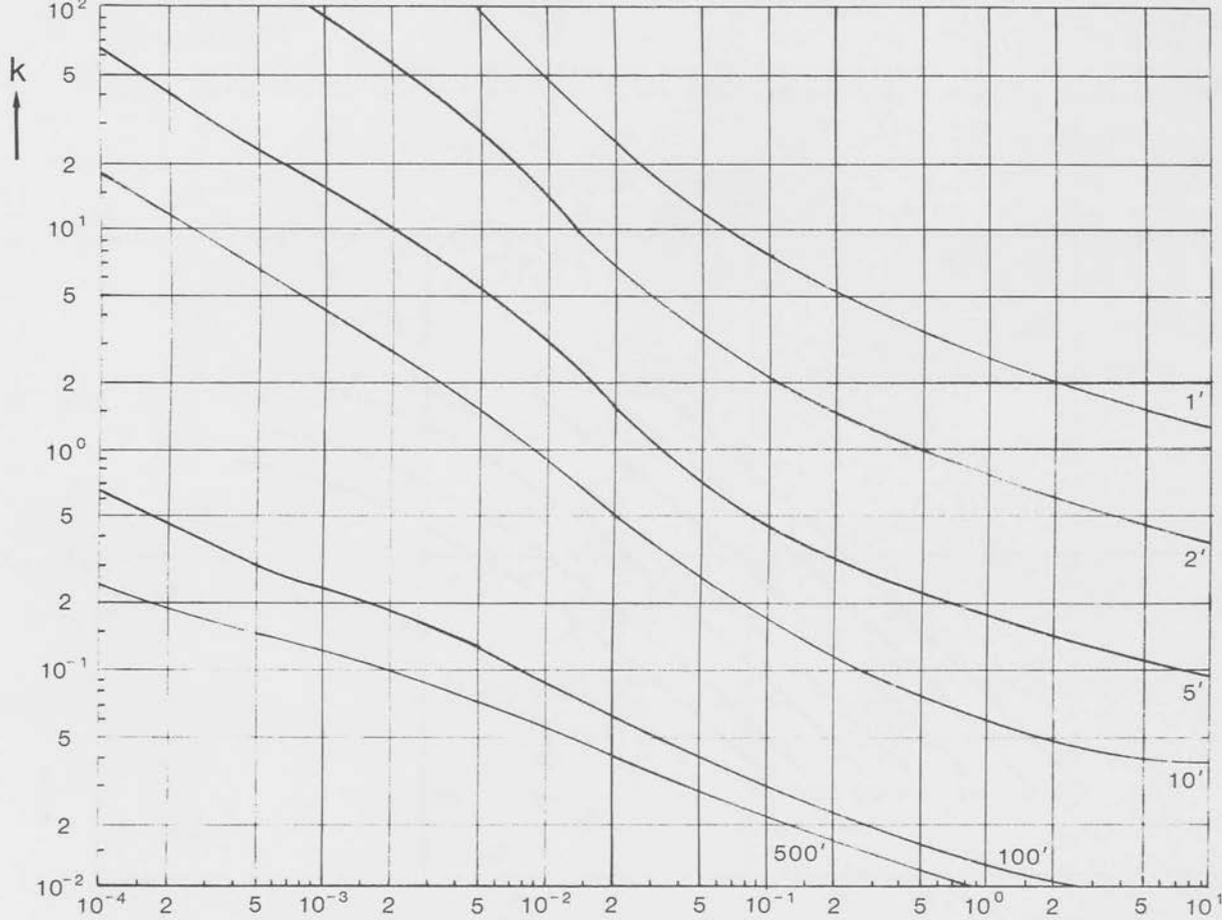


Bild 14: Schwellenkontrast k in Abhängigkeit von der Umfeldleuchtdichte L_U .
 Parameter: Sehwinkel ϕ in min.

→ L_U (cd/m^2)

R_{LM} (mcd/m²lx)

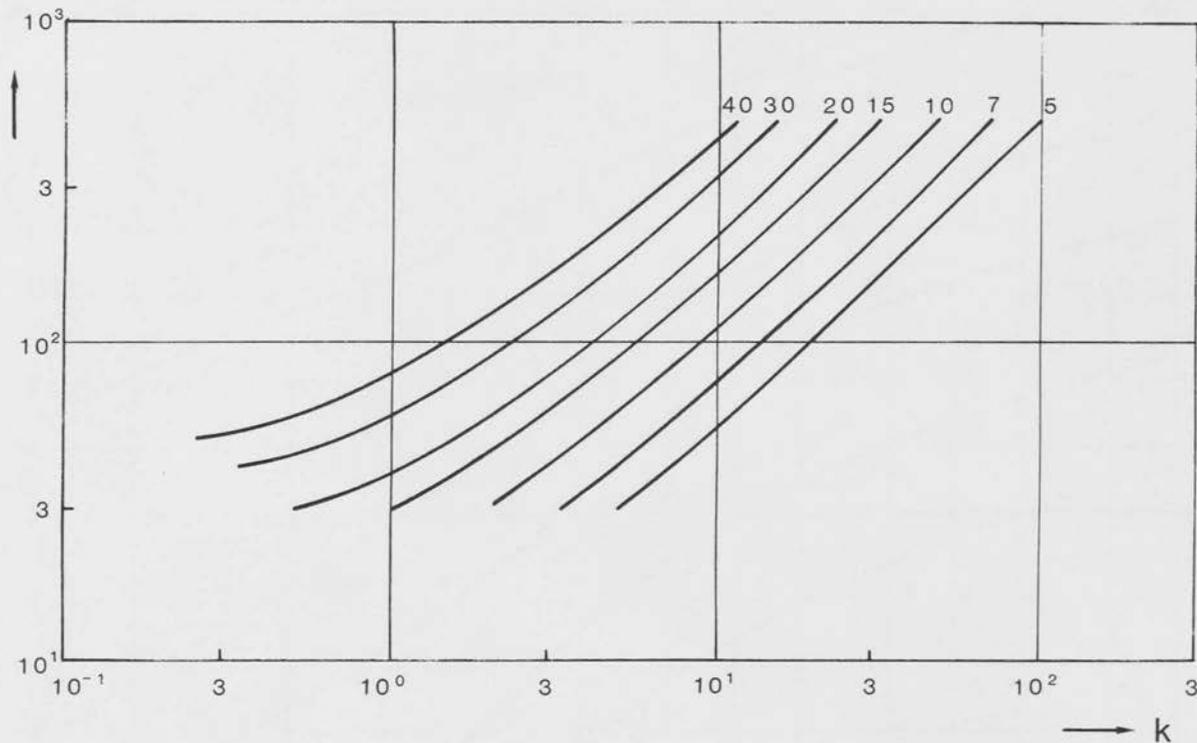


Bild 15: Zusammenhang zwischen Kontrast k und Leuchtdichtekoeffizient der Markierung R_{LM}
Parameter: Leuchtdichtekoeffizient der Fahrbahnoberfläche R_{LF} (mcd/m².lx)

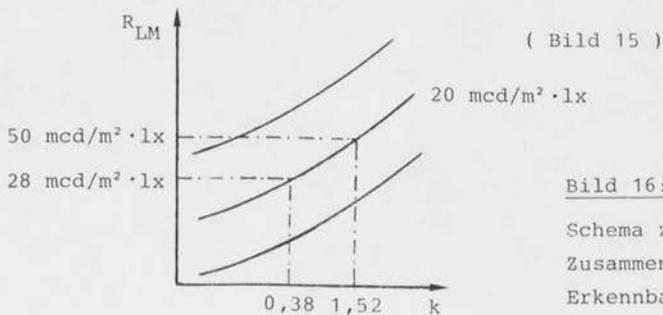
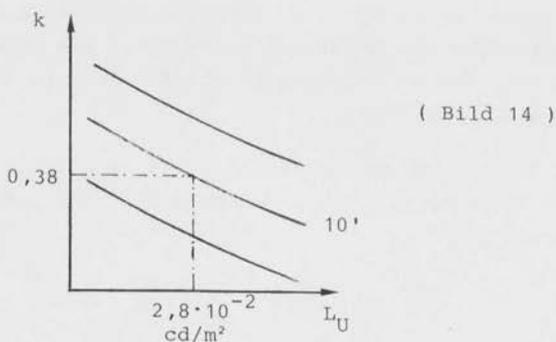
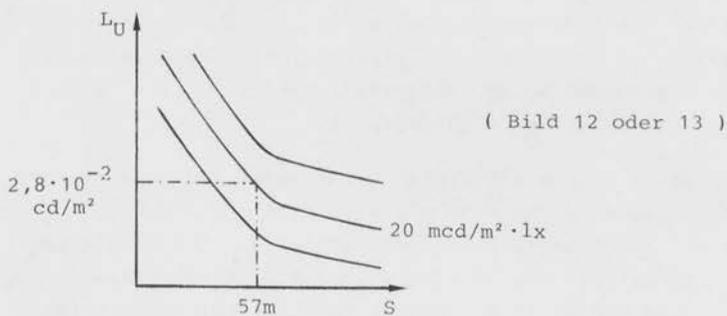
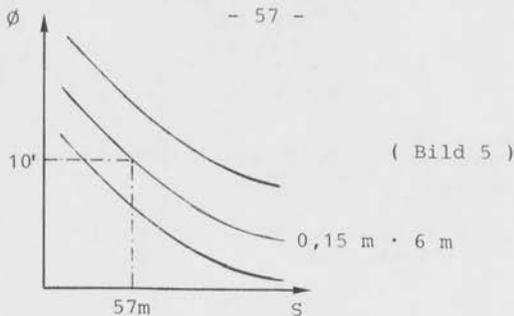


Bild 16:

Schema zur Bestimmung des Zusammenhangs zwischen Erkennbarkeitsweite S und Leuchtdichtekoeffizient R_{LM}

ein Schwellenkontrast von ca. 0,38. Für diesen Kontrast ergibt sich aus der Formel (3)

$$k = \frac{R_{LM} - R_{LF}}{R_{LF}}$$

oder aus Bild 15, das die grafische Entsprechung von (3) darstellt, für ein $R_{LF} = 20 \text{ mcd/m}^2 \cdot \text{lx}$ ein $R_{LM} = 28 \text{ mcd/m}^2 \cdot \text{lx}$. Bei erschwerten Sichtbedingungen, bei denen eine Vervierfachung des Schwellenkontrastes für die Erkennbarkeit des Markierungsstreifens angenommen wurde, ergibt sich mit $4 \cdot k = 4 \cdot 0,38 = 1,52$ aus Bild 15 ein $R_{LM} = 50 \text{ mcd/m}^2 \cdot \text{lx}$.

Auf diese Weise wurden die Erkennbarkeitsweiten von Markierungsstreifen der Abmessungen $0,12 \text{ m} \times 4 \text{ m}$, $0,15 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ und $0,30 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ für Leuchtdichtekoeffizienten R_{LF} der Markierung von $R_{LM} = 20$ bis $500 \text{ mcd/m}^2 \cdot \text{lx}$ und Leuchtdichtekoeffizienten $R_{LF} = 5$ bis $40 \text{ mcd/m}^2 \cdot \text{lx}$ für Fahr- und Fernlicht bei idealen und erschwerten Sichtbedingungen ermittelt. Der Bereich für R_{LF} schließt aufgehellte und nicht aufgehellte bituminöse Deckschichten sowie Betondecken, jeweils für trockenen und feuchten Fahrbahnzustand, ein. Die sich daraus ergebenden Kurvenscharen sind in Anhang A zusammengestellt.

In Anhang B sind Kurvenscharen dargestellt, die den Zusammenhang zwischen dem Kontrast und der Erkennbarkeitsweite zeigen. Dabei ist R_{LF} Parameter.

7 Diskussion der Ergebnisse

7.1 Ausgewählte Kurven

Da die Vielzahl der in den Anhängen dargestellten Kurven der Erkennbarkeitsentfernung doch etwas verwirrend erscheinen mag, werden zur schnellen Orientierung die wichtigsten Kurven der Erkennbarkeitsentfernung in Abhängigkeit von den Leuchtdichtekoeffizienten R_{LM} der Markierung (Bild 17, 18) bzw. in Abhängigkeit vom Kontrast (Bild 19, 20) nochmals wiedergegeben.

Als häufigste Fahrsituation bei Nacht ist das Fahren mit Fahrlicht unter (leicht) erschwerten Sichtbedingungen anzusehen. Als Markierungsstreifen wurde der auf Autobahnen verlegte Mittelstreifen mit den Abmessungen 0,15 m x 6 m gewählt. In jedem Bild sind die Fahrbahnoberflächen bezüglich R_{LF} nur nach dunkler und aufgehellter bituminöser Deckschicht, dunkler und heller Zementbetondecke unterschieden.

Bei trockener Fahrbahn besitzen aufgehellte bituminöse Deckschichten und dunkle Zementbetondecken etwa das gleiche Leuchtdichteniveau bei Kfz-Scheinwerferlicht, während bei feuchter Fahrbahn die Leuchtdichteniveaus dunkler bituminöser Deckschichten und dunkler Zementbetondecken in etwa zusammenfallen. Deshalb wurde die Einteilung nach den in Tabelle 2 zusammengestellten Werten wie folgt vorgenommen:

Bild 17, 19 (trockene Fahrbahn)	Kurve A	10 mcd/m ² .lx	dunkle bituminöse Deckschicht
	Kurve B	20 mcd/m ² .lx	aufgehellte bituminöse Deckschicht und dunkle Zementbetondecke
	Kurve C	40 mcd/m ² .lx	helle Zementbetondecke
Bild 18, 20 (feuchte Fahrbahn)	Kurve A	5 mcd/m ² .lx	dunkle bituminöse Deckschicht und dunkle Zementbetondecke
	Kurve B	10 mcd/m ² .lx	helle Betondecke
	Kurve C	15 mcd/m ² .lx	aufgehellte bituminöse Deckschicht

S (m)

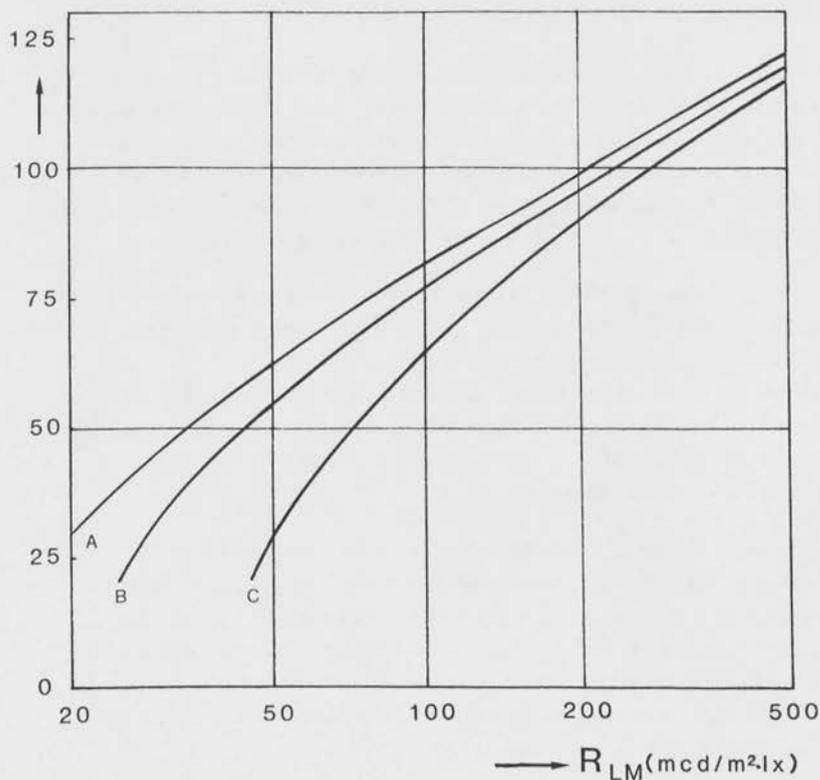


Bild 17: Erkennbarkeitsweite S eines Markierungsstreifens der Abmessung 0,15 m x 6 m in Abhängigkeit von dem Leuchtdichtekoeffizienten R_{LM} im Fahrlicht eines PKW, bei erschwerten Sichtbedingungen und trockener Fahrbahn.

Kurve A : dunkle bituminöse Deckschicht

Kurve B : aufgehellte bituminöse Deckschicht bzw. dunkle Zementbetondecke

Kurve C : helle Betondecke

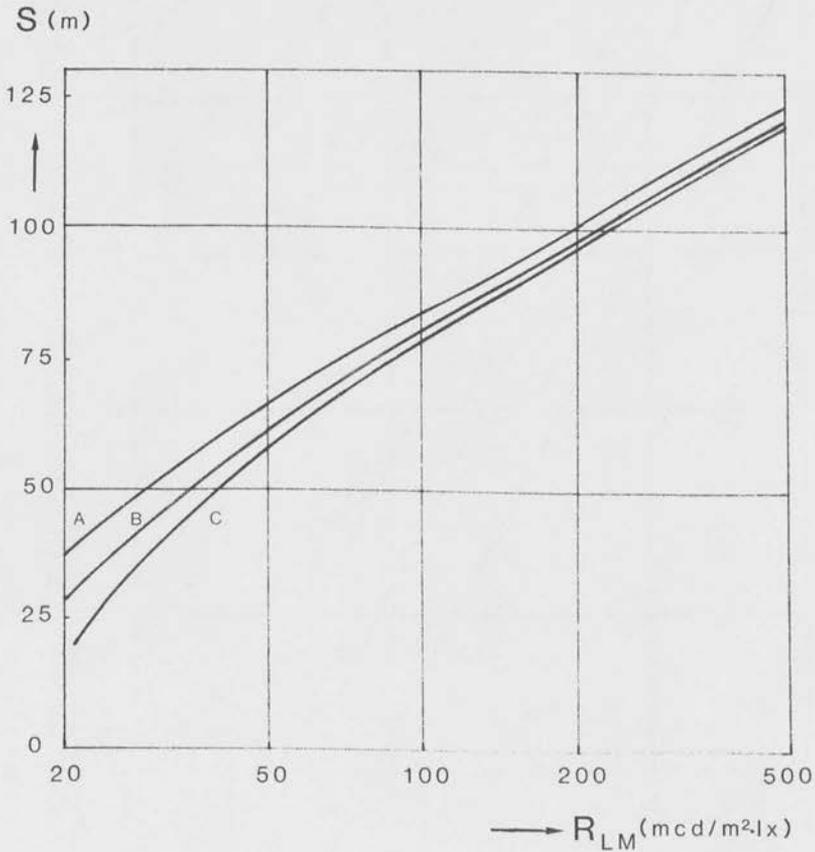


Bild 18: Erkennbarkeitsweite S eines Markierungsstreifens der Abmessung 0,15 m x 6 m in Abhängigkeit von dem Leuchtdichtekoeffizienten R_{LM} im Fahrlicht eines PKW, bei erschweren Sichtbedingungen und feuchter Fahrbahn.

Kurve A : dunkle bituminöse Deckschicht und dunkle Zementbetondecke

Kurve B : helle Betondecke

Kurve C : aufgehellte bituminöse Deckschicht

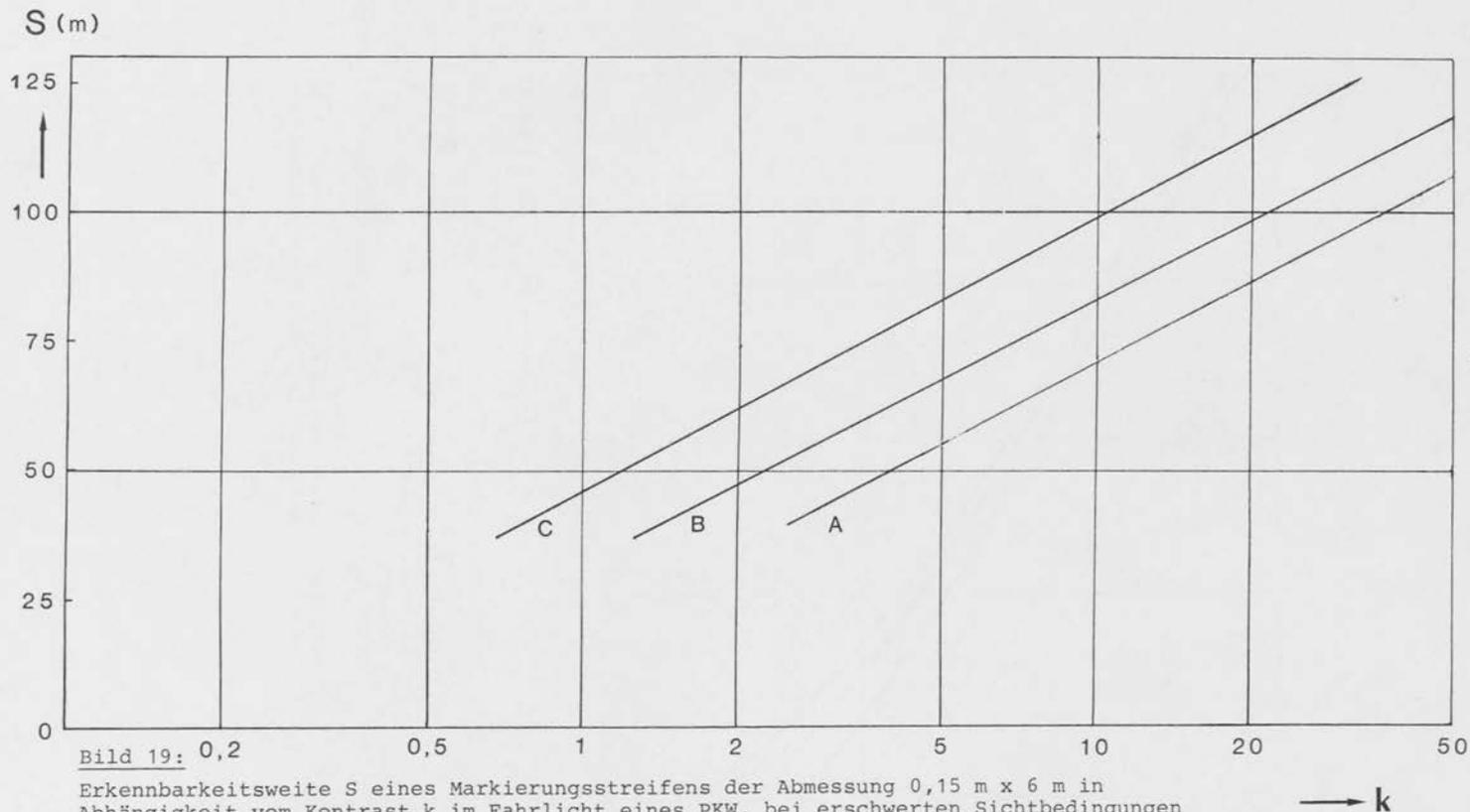


Bild 19: 0,2

0,5

1

2

5

10

20

50

Erkennbarkeitsweite S eines Markierungsstreifens der Abmessung 0,15 m x 6 m in Abhängigkeit vom Kontrast k im Fahrlicht eines PKW, bei erschwerten Sichtbedingungen und trockener Fahrbahn.

Kurve A : dunkle bituminöse Deckschicht

Kurve B : aufgehellte bituminöse Deckschicht bzw. dunkle Zementbetondecke

Kurve C : helle Betondecke

→ k

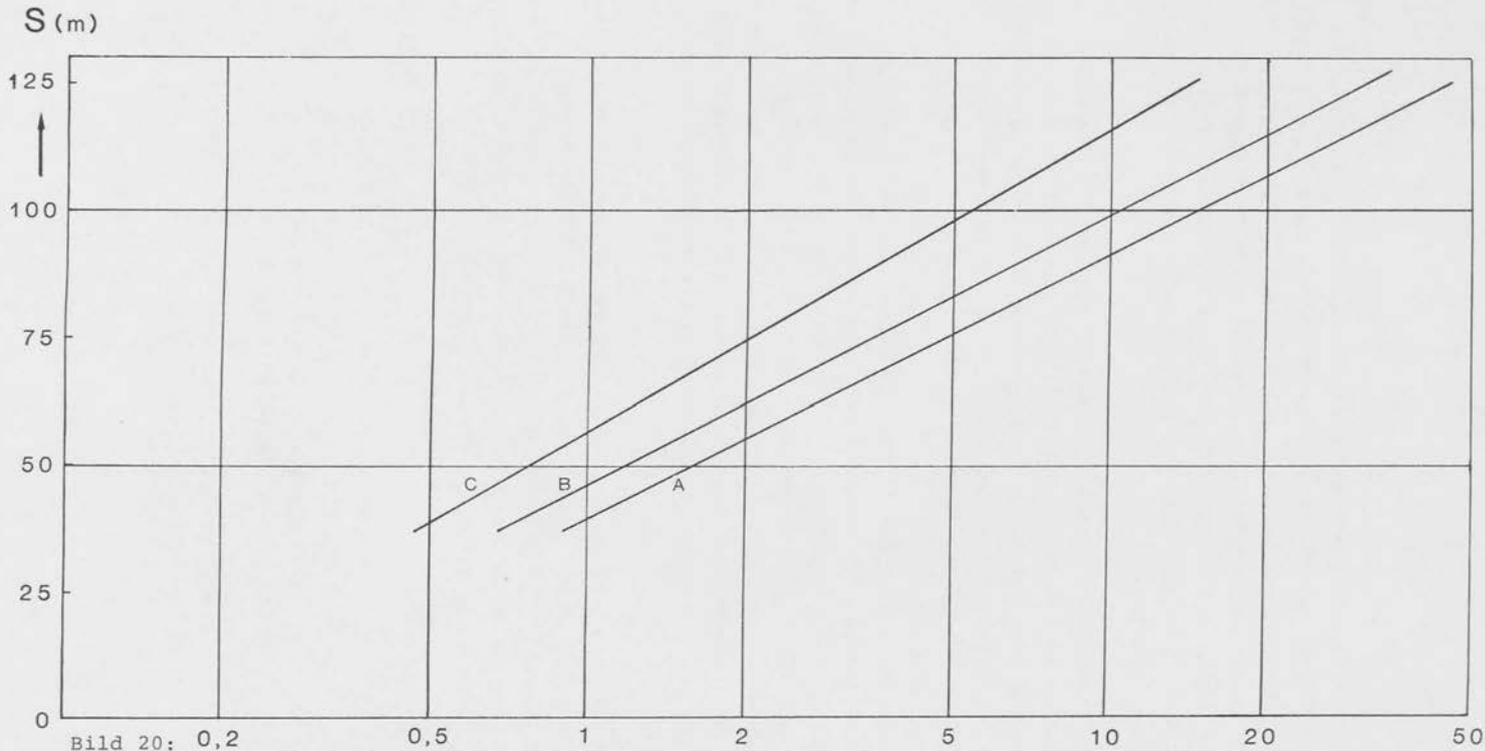


Bild 20: 0,2 0,5 1 2 5 10 20 50

Erkennbarkeitsweite S eines Markierungsstreifens der Abmessung 0,15 m x 6 m in Abhängigkeit vom Kontrast k im Fahrlicht eines PKW, bei erschwerten Sichtbedingungen und feuchter Fahrbahn.

- Kurve A : dunkle bituminöse Deckschicht und dunkle Zementbetondecke
- Kurve B : helle Betondecke
- Kurve C : aufgehellte bituminöse Deckschicht

→ k

Betrachtet man die Werte der Tabelle 2, stellt man fest, daß in feuchtem Zustand der Leuchtdichtekoeffizient R_{LM} der Fahr-
bahnmarkierung auf ca. 50 % und die der Fahrbahndecken auf ca.
25 % (außer bei aufgehellten bituminösen Deckschichten) des
Leuchtdichtekoeffizienten R_{LM} in trockenem Zustand zurückge-
hen. Diese Prozentzahlen werden auch in den Berechnungen des
Kapitels 7 verwendet.

Diese Abnahme auf 25 % bei Fahrbahndecken ist in obiger Zu-
sammenstellung nicht so deutlich, weil die Zahl der Kurven
möglichst klein gehalten werden sollte. Die Abweichungen sind
aber nicht sehr stark: Bei den dunklen bituminösen Deckschich-
ten wurden die Werte 10 bzw. 5 $\text{mcd/m}^2 \cdot \text{lx}$ gewählt anstelle 12
und 3 $\text{mcd/m}^2 \cdot \text{lx}$.

Die Diagramme nach Bild 17 und 18 können zur Bestimmung der
Erkennbarkeitsweite herangezogen werden, wenn der Leuchtdichte-
koeffizient R_{LM} der Markierung und die Deckenart bekannt sind.
Als Wert für R_{LM} im feuchten Zustand kann 50 % von R_{LM} in
trockenem Zustand angesetzt werden. Die Diagramme nach Bild 19
und 20 können benutzt werden, wenn die Leuchtdichtekoeffizienten
 R_{LM} und R_{LF} von Markierungen und Fahrbahnoberflächen bekannt
sind.

Eine genauere Betrachtung der Diagramme der Anhänge ergibt, daß
sich für den in der Praxis hauptsächlich interessierenden Be-
reich von $R_{LM} = 50$ bis $200 \text{ mcd/m}^2 \cdot \text{lx}$ ungefähr konstante Zu- oder
Abschläge der Erkennbarkeitsweiten nach Bild 17 bis 20 angeben
lassen, wenn ein einzelner Parameter verändert wird:

Beim Übergang von

-	erschwert zu idealen Sichtbedingungen	+ 32 m
-	Fahrlicht zu Fernlicht	+ 25 m
-	0,15 m x 6 m zu 0,30 m x 6 m	+ 16 m
-	0,15 m x 6 m zu 0,12 m x 4 m	- 12 m

Bei gleichzeitiger Veränderung mehrerer Parameter addieren sich
die einzelnen Zu- oder Abschläge.

Die Diagramme von Bild 17 bis 20 und die angegebenen Zu- und Abschläge können zur schnellen Bestimmung der Erkennbarkeitsweiten unter den verschiedensten Bedingungen herangezogen werden, sind aber nur als "Faustformeln" zu betrachten. Zur genaueren Ermittlung der Erkennbarkeitsweiten sind nur die Diagramme der Anhänge geeignet.

Eine Schwierigkeit ergibt sich, wenn die Erkennbarkeitsweite einer ununterbrochenen Markierung bestimmt werden soll. Sie liegt oberhalb der Erkennbarkeitsweite eines einzelnen Streifens gleicher Breite, kann aber nach der hier benutzten Methode nicht näher bestimmt werden, wie auch nicht die Erkennbarkeitsweite einer Reihe hintereinander liegender Markierungsstreifen.

In den weiter unten durchzuführenden Berechnungen wird deshalb für eine durchgehende Markierung, im Regelfall eine Randmarkierung, stets die Erkennbarkeitsweite des Streifens mit den Abmessungen 0,15 m x 6 m eingesetzt, die demnach als untere Abschätzung für eine Randmarkierung mit 0,15 m Breite anzusehen ist.

7.2 Diskussion der Erkennbarkeitsweitendiagramme

Folgende Abhängigkeiten sind aus den Diagrammen des Anhangs bzw. aus Bild 17 bis 20 (bei Konstanzhaltung der übrigen Parameter) abzulesen:

Die Erkennbarkeitsweite nimmt zu

- mit steigendem Leuchtdichtekoeffizienten R_{LM}
- mit zunehmender Größe des Markierungsstreifens
- beim Umschalten von Fahr- auf Fernlicht.

Die Erkennbarkeitsweite nimmt ab

- mit zunehmendem Leuchtdichtekoeffizienten R_{LF}
- beim Übergang von idealen zu erschwerten Sichtbedingungen
- beim Übergang von trockener zu feuchter Fahrbahn
(für $R_{LM} > \text{ca. } 50 \text{ mcd/m}^2 \cdot \text{lx}$).

Sämtliche Abhängigkeiten sind natürlich bekannt, sie werden durch die angegebenen Diagramme nun auch quantifizierbar. Bei der Variation von R_{LF} treten zwei gegenläufige Effekte auf: Bei Erhöhung von R_{LF} verringert sich der Kontrast, gleichzeitig wird die Fahrbahn- und damit die Adaptationsleuchtdichte erhöht. Aber der Einfluß der Kontrastverminderung überwiegt den Einfluß der Erhöhung der Adaptationsleuchtdichte so stark, daß sich die Erkennbarkeitsweite im ganzen verringert.

Ein Sonderfall ergibt sich beim Übergang vom trockenen in den feuchten Fahrbahnzustand. Während bei $R_{LM} > 50 \text{ mcd/m}^2 \cdot \text{lx}$ die Erkennbarkeitsweite erwartungsgemäß zurückgeht, kann sich dieses Verhalten bei kleinerem R_{LM} und größerem R_{LF} ($\geq 20 \text{ mcd/m}^2 \cdot \text{lx}$) umkehren, wie dies die Beispiele der Tabelle 7 zeigen. Es wird vorausgesetzt, daß bei feuchter Fahrbahn R_{LM} auf 50 % und R_{LF} auf 25 % des Wertes bei trockener Fahrbahn abnehmen.

Tabelle 7: Veränderung der Erkennbarkeitsweite bei Übergang von trockener zu feuchter Fahrbahnoberfläche (Beispiele)

Bedingungen	Abmessungen	R_{LM}	R_{LF}	S	Fahrbahn
		(mcd/m ² · lx)			
ideale Sichtbedingungen, Fernlicht	0,12 m x 4 m	200	40	96	trocken
		100	10	94	feucht
		100	20	87	trocken
		50	5	85	feucht
		50	20	70	trocken
		25	5	73	feucht
ideale Sichtbedingungen, Fahrlicht	0,30 m x 6 m	200	20	108	trocken
		100	5	99	feucht
		100	40	79	trocken
		50	10	73	feucht
		50	40	30	trocken
		25	10	49	feucht

Die Begründung für den teilweisen Anstieg der Erkennbarkeitsweite bei niedrigem R_{LM} ist darin zu sehen, daß im feuchten Zustand die Helligkeit der Fahrbahn und damit die Adaptationsleuchtdichte auf bis zu 25 % zurückgeht, die Helligkeit der Markierung jedoch nur auf ca. 50 %. Dadurch verbessert sich der Kontrast, was im unteren Bereich die Verringerung der Adaptationsleuchtdichte mehr als ausgleichen kann.

Diese Beispiele sind natürlich als Extremfälle zu betrachten, da ein $R_{LM} < 50 \text{ mcd/m}^2 \cdot \text{lx}$ in der Praxis kaum noch anzutreffen ist. Bei den Diagrammen des Anhangs A ist die starke Spreizung der Kurven im unteren Bereich von R_{LM} auffällig. Bei erschweren Sichtbedingungen und einem R_{LM} von $50 \text{ mcd/m}^2 \cdot \text{lx}$ beträgt S je nach Leuchtdichtekoeffizienten der Fahrbahn 28 bis 67 m, bei $R_{LM} = 100 \text{ mcd/m}^2 \cdot \text{lx}$ ist $S = 65$ bis 85 m und bei $500 \text{ mcd/m}^2 \cdot \text{lx}$ steigt S auf 117 bis 125 m. Der Absolutwert von S steigt also steil an bei gleichzeitiger starker Verringerung des Intervalls: Während bei niedrigem R_{LM} dieses Intervall noch 39 m (± 41 % vom Mittelwert 47,5 m) beträgt, sinkt es bei hohem R_{LM} auf 8 m ($121 \text{ m} \pm 3,3$ %). In der Praxis bedeutet das, daß es in der Hauptsache darauf ankommt, eine Markierung mit möglichst hohem Leuchtdichtekoeffizienten auch im Gebrauchszustand auszuwählen. Dann ist auch ein sehr heller Belag für die Erkennung der Markierung "unschädlich". Ist dagegen der Leuchtdichtekoeffizient einer Markierung sehr niedrig, so wird die ohnehin eingeschränkte Sichtbarkeit dieser Markierung auf einer hellen Fahrbahnoberfläche weiter verringert. Der sinkende Einfluß von R_{LF} auf die Erkennbarkeit mit zunehmendem R_{LM} ist darin begründet, daß bei hohem R_{LM} eine Änderung von R_{LF} nur eine geringe Änderung des Kontrastes bewirkt, bei niedrigem R_{LM} aber eine Veränderung von R_{LF} den Kontrast und damit S stark beeinflusst.

7.3 Anwendung der Ergebnisse

7.3.1 Die Erkennbarkeitsweite für Fahrbahnmarkierungen im deutschen Straßennetz

Aus den in den Tabellen 2 und 4 angegebenen Leuchtdichtekoeffizienten und Kontrasten wurde mittels der Diagramme der Anhänge A und B

die Erkennbarkeitsweite errechnet und in Tabelle 8 zusammengestellt. Die Werte gelten für einen Markierungsstreifen der Abmessungen 0,15 m x 6 m bei Fahrlicht unter erschwerten Bedingungen.

Nun besteht eine Randmarkierung normalerweise aus einer durchgehenden und nicht aus einer unterbrochenen Linie. Die Erkennbarkeit ersterer ist höher als die einer unterbrochenen Linie oder gar eines einzelnen Strichs, so daß die Erkennbarkeitsweite der durchgehenden Randmarkierung nach Tabelle 8 als untere Abschätzung anzusehen ist. S. hierzu auch Abschnitt 7.5.

Da es sich bei den Angaben der Tabellen 2 und 4 um Mindest- bzw. Höchstwerte handelt, geben die Werte der Tabelle 8 das Intervall an, in dem die Erkennbarkeitsweiten auf den verschiedenen Deckenarten liegen. Das >-Zeichen vor einer Zahl bedeutet, daß die Erkennbarkeitsweite oberhalb des in dieser Arbeit untersuchten Intervalls liegt.

Die minimalen auftretenden Erkennbarkeitsweiten von 32 bis 61 m sind als nicht befriedigend anzusehen. Auf feuchter Fahrbahn sinkt die Erkennbarkeitsweite im allgemeinen nur unwesentlich ab und steigt in einigen Fällen, wie anhand der Tabelle 7 gezeigt, sogar leicht an, am meisten bei Rand- und Mittelmarkierungen auf Zementbetondecken im Neuzustand: Von 32 m auf 43 m.

Während im Neuzustand Markierungen auf Zementbetondecken - die hier die hellsten der drei untersuchten Deckenarten sind - die kleinsten Erkennbarkeitsweiten aufweisen, besitzen im Gebrauchszustand Markierungen auf aufgehellten bituminösen Deckschichten die geringsten Erkennbarkeitsweiten. Die Helligkeit von Zementbetondecken und aufgehellten bituminösen Deckschichten liegen im Gebrauchszustand in der gleichen Größenordnung, gleichzeitig ist der Leuchtdichtekoeffizient von Markierungen auf bituminösen Deckschichten meist geringer als auf Zementbetondecken, wodurch sich hier die schlechtere Erkennbarkeit erklärt.

Tabelle 8: Minimale und maximale Erkennbarkeitsweite S eines Markierungsstreifens
mit den Abmessungen 0,15 m x 6 m im Fahrlicht bei erschwerten Sichtbedingungen

		Neuzustand				Gebrauchszustand			
		trocken		feucht		trocken		feucht	
Rand- markie- rung auf	Zement- beton	32	122	43	113	50	118	52	>130
	aufgeh. bitumin. Deck- schicht	59	118	55	>110	36	104	36	> 95
	nicht aufgeh. bitumin. Deck- schicht	59	118	55	>110	62	>106	ca.65	> 95
Mittel- markie- rung	Zement- beton	32	122	43	113	64	103	51	>130
	aufgeh. bitumin. Decksch.	59	118	55	>110	36	115	40	>115
	nicht aufgeh. bitumin. Decksch.	59	118	55	>110	61	>115	ca.58	115

7.3.2 Erkennbarkeitsweite für die Mindestwerte der Nachtsichtbarkeit gemäß den Prüfbestimmungen für Markierungsstoffe

Der Mindestwert der Nachtsichtbarkeit der bis 1984 gültigen "Technischen Bestimmungen für die Prüfung von Markierungsstoffen auf Bundesfernstraßen TP-M", Ausgabe 1972, betrug $47 \text{ mcd/m}^2 \cdot \text{lx}$ (in der TP-M ist der Mindestwert in einer anderen Dimension aufgeführt. Die Umrechnung ergibt $47 \text{ mcd/m}^2 \cdot \text{lx}$) für den Neu- und Gebrauchszustand. In den seither verbindlichen "Zusätzlichen Technischen Vorschriften und Richtlinien für Markierungen auf Straßen ZTV-M", Ausgabe September 1984, wurde dieser Wert auf $150 \text{ mcd/m}^2 \cdot \text{lx}$ für den Neuzustand angehoben, für den Gebrauchszustand beträgt der Mindestwert $100 \text{ mcd/m}^2 \cdot \text{lx}$ für selten und $70 \text{ mcd/m}^2 \cdot \text{lx}$ für ständig oder häufig überfahrene Markierungen. Bei diesen Mindestwerten ergeben sich die Erkennbarkeitsweiten der Tabelle 9. Zur Berechnung dienten die Diagramme von Bild 17 bzw. 18. In feuchtem Zustand wurde wieder eine Abnahme von R_{LM} auf 50 % und von R_{LF} auf 25 % vorausgesetzt, die Berechnungen gelten für einen Strich der Abmessungen $0,15 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ im Fahrlicht bei erschwerten Sichtbedingungen.

Der umgerechnete TP-M-Mindestwert von $47 \text{ mcd/m}^2 \cdot \text{lx}$ ergibt Sichtweiten von 23 bis 60 m und ist daher als nicht ausreichend anzusehen. Ein Markierungsstrich, der den Mindestwert der ZTV-M im Neuzustand erfüllt, ist auf ca. 75 bis 95 m zu erkennen. Dabei sind die Differenzen auf den drei Deckenarten gering. Auch unterscheiden sich die Erkennbarkeitsweiten auf neuen Decken nur wenig von denen auf älteren Decken. Nur der Abfall der Erkennbarkeitsweite bei älteren, aufgehellten bituminösen Deckschichten von 91 auf 76 m beim Übergang zum feuchten Zustand ist auffällig. Hier kommt zum Tragen, daß sich bei diesen Deckschichten infolge des Einsatzes von (vorwiegend künstlichen) hellen Splitten die Helligkeit in feuchtem Zustand nicht so stark vermindert, wie das von nicht aufgehellten bituminösen Deckschichten oder Zementbetondecken bekannt ist.

Tabelle 9: Mittlere Erkennbarkeitsweite S (in m) für die Mindestwerte des Leuchtdichtekoeffizienten R_{LM} nach TP-M und ZTV-M für einen Markierungsstrich von 0,15 m x 6 m im Fahrlicht, erschwerte Sichtbedingungen

	TP-M		ZTV-M			
Mindestwert R_{LM} Neuzustand	47 mcd/m ² .lx		150 mcd/m ² .lx			
	für neue und ältere Decken		für neue Decken		für ältere Decken	
	trocken	feucht	trocken	feucht	trocken	feucht
Zement- beton	23	34	76	74	81	76
aufgehellte bituminöse Deckschicht	56	ca. 48	88	80	88	70
nicht aufgehellte bituminöse Deckschicht	56	ca. 48	88	80	91	76
Mindestwert R_{LM} Gebr. zust.	47 mcd/m ² .lx		70 mcd/m ² .lx		100 mcd/m ² .lx	
	trocken	feucht	trocken	feucht	trocken	feucht
Zement- beton	23	36	49	50	65	61
aufgehellte bituminöse Deckschicht	60	44	67	56	78	58
nicht aufgehellte bituminöse Deckschicht	52	28	73	45	82	61

Ein Markierungsstreifen mit $70 \text{ mcd/m}^2 \cdot \text{lx}$ - dem Mittelwert für häufig überfahrene Markierungen - erbringt Erkennbarkeitsweiten von 45 bis 73 m, auch diese sind sicherlich als nicht besonders hoch anzusehen. Bei $100 \text{ mcd/m}^2 \cdot \text{lx}$ steigt die Erkennbarkeitsweite auf 58 bis 82 m an.

Es ist nicht Sinn dieser Arbeit, Vorgaben für die aus lichttechnischer Sicht notwendigen Mindestwerte für den Leuchtdichtekoeffizienten von Markierungsstoffen zu machen; deshalb haben die in Tabelle 10 zusammengestellten R_{LM} -Werte nur informativen Charakter. Es wurde anhand der Diagramme 17 und 18 ermittelt, wie hoch diese Mindestwerte liegen müßten, wenn für den Markierungsstrich von $0,15 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ bei Fahrlicht und erschwerten Sichtbedingungen Erkennbarkeitsweiten von 75, 100 bzw. 125 m im Neu- und Gebrauchszustand erzielt werden sollen.

Während bei trockener Fahrbahn für eine Erkennbarkeitsweite von 75 m für Markierungen auf bituminöser Deckschicht ca. $90 \text{ mcd/m}^2 \cdot \text{lx}$ und auf Zementbetondecken $140 \text{ mcd/m}^2 \cdot \text{lx}$ genügen, steigen diese Mindestwerte bei gewünschten 100 m auf ca. 220 bzw. 280 $\text{mcd/m}^2 \cdot \text{lx}$ an. Will man die gleiche Erkennbarkeitsweite auch bei feuchter Fahrbahn erreichen, müßten die Mindestwerte auf allen Deckenarten bei 75 m ca. $150 \text{ mcd/m}^2 \cdot \text{lx}$ und bei 100 m sogar 400 bis 500 $\text{mcd/m}^2 \cdot \text{lx}$ betragen. Erkennbarkeitsweiten von 125 m sind für alle Deckenarten sowohl auf feuchter als auch auf trockener Fahrbahn als illusorisch anzusehen, da hierfür mehr als $500 \text{ mcd/m}^2 \cdot \text{lx}$ erforderlich sind.

Es sei nochmals betont, daß die Rechnungen für einen Markierungsstreifen von $0,15 \text{ m}$ Breite und 6 m Länge im Fahrlicht unter erschwerten Sichtbedingungen durchgeführt wurden. Für einen Streifen mit einer größeren Fläche bzw. im Fernlicht oder unter idealen Sichtbedingungen sind die genannten Erkennbarkeitsweiten bei weitaus geringeren Leuchtdichtekoeffizienten zu erreichen.

Tabelle 10: Mindestwerte für die Leuchtdichtekoeffizienten R_{LM} eines Markierungsstreifens von 0,15 m x 6 m, wenn bestimmte Erkennbarkeitsweiten S erreicht werden sollen. Fahrlicht, erschwerte Sichtbedingungen.

Jeweils 1. Zeile: trockene Fahrbahn

2. Zeile: feuchte Fahrbahn

gewünschte Erkennbarkeitsweite (in m)	Neuzustand			Gebrauchszustand		
	75	100	125	75	100	125
Mindestwert R_{LM} ($\text{mcd/m}^2 \cdot \text{lx}$)						
Zementbeton	140 ca.175	295 450	>500 >500	125 ca.160	275 420	>500 >500
aufgehellte bituminöse Deckschicht	92 ca.140	220 360	>500 >500	96 ca.180	235 490	>500 >500
nicht aufgehellte bituminöse Deckschicht	92 ca.140	220 380	>500 >500	78 140	210 360	>500 >500

7.3.3 Die Erkennbarkeitsweite von profilierten Markierungen bei Nässe

Herkömmliche Markierungen besitzen bei Regen wegen der dann fast ausschließlich spiegelnden Reflexion keine Retroreflexion mehr und sind demzufolge nachts auch nicht mehr sichtbar. Seit einigen Jahren wird versucht, durch Profilierung der Oberfläche der Markierung zu erreichen, daß diese auch bei Regen sichtbar bleiben. Wie aus dem Zwischenbericht eines an der TU Darmstadt durchgeführten Forschungsauftrages [13] hervorgeht, scheint dies bei einigen Markierungsmustern zu gelingen. Nach einer Liegezeit von ca. 2 Jahren besitzen bei Regen noch 7 der 15 auf der Bundesstraße 9 getesteten Markierungen einen Leuchtdichtekoeffizienten von 30 bis 125 mcd/m².lx. Auf der BAB A 61, bei erheblich höherer Verkehrsbelastung, liegt der Leuchtdichtekoeffizient der gleichen Muster im Bereich von 21 bis 102 mcd/m².lx. Das sind noch 20 bis 70 % des Wertes bei trockener Fahrbahn. Ein Muster (mit Markierungsperlen eines Durchmessers > 5 mm versehen) besitzt bei Regen sogar eine Leuchtdichte, die höher ist als die Leuchtdichte bei trockener Fahrbahn. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, daß diese Werte bei der Meßgeometrie -88,6/0,95 gewonnen wurden. Der Leuchtdichtekoeffizient bei dieser Geometrie muß mit dem Faktor ca. 1,15 multipliziert werden, um die spezifische Leuchtdichte bei der -86,5/1,5 - Geometrie zu erhalten.

Will man die Erkennbarkeitsweite von Markierungen bei Nässe ermitteln, benötigt man die Leuchtdichte Verteilung der Fahrbahnoberfläche und Markierung bei Nässe. Diese sind nicht bekannt; so soll im folgenden angenommen werden, daß die Leuchtdichte Verteilungen aller 3 Deckenarten und der profilierten Markierungen gleich sind und daß das Leuchtdichteniveau der Fahrbahn noch einmal um den Faktor 2 niedriger liegt als bei feuchten Decken (d.h., insgesamt 1/8 der Leuchtdichte der trockenen Decke beträgt). In der Praxis dürfte die Leuchtdichte noch darunter liegen, weil auch auf Decken bei Regen eine fast ausschließlich spiegelnde Reflexion vorhanden ist. So rechnen Blaauw und Padmos [30] mit

einer Abnahme auf ca. 10 % beim Übergang von trockener zu feuchter Fahrbahn. Wegen der mit abnehmender Fahrbahnleuchtdichte größer werdenden Erkennbarkeitsweite bedeutet dies wieder eine untere Abschätzung der Erkennbarkeitsweite.

Deshalb wurden in Bild 21 nicht wie üblich separate Kurven für die einzelnen Decken, sondern nur ein Bereich angegeben, innerhalb dessen die Erkennbarkeitsweite für Markierungen auf allen drei Deckenarten liegt. Auf der Abszisse wurde der bei Nässe mittels der Meßgeometrie -88,6/0,95 gemessene Leuchtdichtekoeffizient aufgetragen.

In der Tabelle 11 sind die Erkennbarkeitsweiten zusammengestellt, die jeweils auf trockener, feuchter und nasser Fahrbahn bei den gleichen Leuchtdichtekoeffizienten erzielt werden.

Tabelle 11: Bereich der Erkennbarkeitsweiten von Markierungsstreifen der Abmessung 0,15 m x 6 m, Fahrlicht, erschwerte Sichtbedingungen, mit den gleichen Leuchtdichtekoeffizienten bei verschiedenen Fahrbahnzuständen

	Leuchtdichtekoeffizient der Markierung (mcd/m ² .lx)		
	30	50	100
Erkennbarkeitsweite (in m) auf			
trockener	0 - 45	25 - 62	65 - 77
feuchter	42 - 52	58 - 67	79 - 84
nasser	ca. 52	ca. 70	ca. 85
Fahrbahn			

Man erkennt, daß zur Ermittlung bestimmter Erkennbarkeitsweiten im nassen Zustand deutlich niedrigere Leuchtdichtekoeffizienten genügen als bei trockener Fahrbahn. Aus Bild 21 ist zu ersehen,

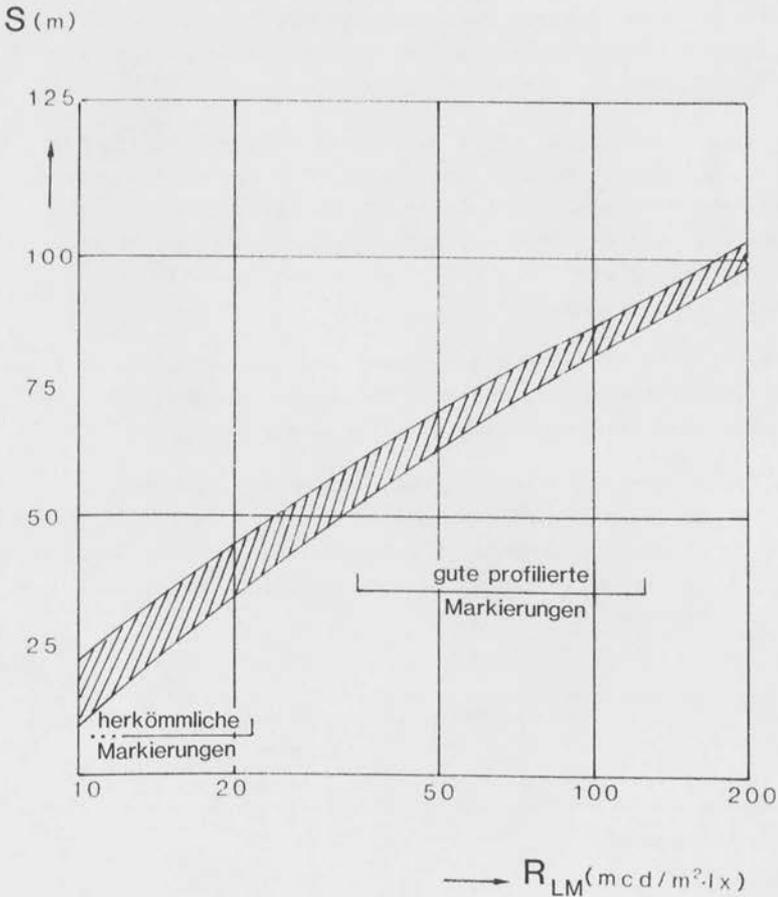


Bild 21: Erkennbarkeitsweite S eines Markierungsstreifens der Abmessung $0,15 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ in Abhängigkeit von dem Leuchtdichtekoeffizienten R_{LM} im Fahrlicht eines PKW, bei erschwerten Sichtbedingungen und n a s s e r Fahrbahn.

daß die lichttechnisch besten profilierten Markierungen (30 bis $120 \text{ mcd/m}^2 \cdot \text{lx}$) Erkennbarkeitsweiten von 50 bis 85 m besitzen; aus lichttechnischer Sicht sind einige der profilierten Markierungen bereits als gut anzusehen.

7.4 Vergleich der ermittelten Erkennbarkeitsweite mit den Ergebnissen anderer Autoren

In der Literatur liegen nur wenige Angaben über die Erkennbarkeitsweiten von Fahrbahnmarkierungen vor. Yu [27] stellte 1970 durch Beobachtungsversuche fest, daß eine retroreflektierende Markierung bei klarem Wetter nachts auf 140 m sichtbar ist, bei schlechtem Wetter dagegen auf 75 m (Abnahme auf 54 %). Bei Vorhandensein entgegenkommender Fahrzeuge sinkt die Erkennbarkeitsweite auf 97 bzw. 47 m (Abnahme bei schlechtem Wetter auf 48 %). Es wird jedoch nicht mitgeteilt, wie hoch die Retroreflexion der Markierung war und was unter schlechtem Wetter zu verstehen ist. Eine Erkennbarkeitsweite von 140 m bei idealen Sichtbedingungen deutet auf einen Leuchtdichtekoeffizienten der Markierung auf weit mehr als $500 \text{ mcd/m}^2 \cdot \text{lx}$ hin, was nicht verwunderlich wäre, wenn es sich um eine frisch applizierte Markierung handelt. 75 m Erkennbarkeitsweite bei schlechtem Wetter entspricht der in dieser Arbeit gefundenen Erkennbarkeitsweite bei feuchter Fahrbahn. Allerdings muß sich der Leuchtdichtekoeffizient der von Yu getesteten Markierung um mehr als 50 % in feuchtem Zustand verringert haben oder die Wetterbedingungen waren schlechter, als sie in dieser Arbeit in Betracht gezogen worden sind.

Die Untersuchungen von Allen u.a. [6] sind bereits ausführlich besprochen worden. In Tabelle 12 wird die Erkennbarkeitsweite, die aus dem von diesen Autoren angegebenen Diagramm 3b herzuleiten ist, mit der aus Bild 3 des Anhangs B abzulesenden Erkennbarkeitsweite bei gleichem Kontrast verglichen.

Tabelle 12: Erkennbarkeitsweite (in m) für zwei Markierungsstreifen mit ähnlichen Abmessungen

Kontrast	Erkennbarkeitsweite (in m) für einen Markierungsstreifen mit den Abmessungen	
	0,12 m x 4,57 m nach Bild 3b	0,12 m x 4 m nach Anhang B, Bild 3
1	45	25 - 50
2	48	30 - 64

Nach Bild 4 besitzt eine von Allen u.a. gemessene bituminöse Deckschicht in 100 ft \approx ca. 30 m Entfernung eine Leuchtdichte von 0,02 footlambert \approx 0,07 cd/m². Gemäß Bild 12 tritt eine solche Leuchtdichte unter deutschen Verhältnissen in 30 m Entfernung bei einem $R_{LF} = 15$ mcd/m².lx auf, also im mittleren Bereich der vorkommenden Leuchtdichtekoeffizienten der Fahrbahn. Deshalb entsprechen die Allenschen Werte etwa der mittleren Erkennbarkeitsweite nach Bild 3 des Anhangs A, so daß von einer guten Übereinstimmung gesprochen werden kann.

Serres [28] gibt Messungen des Kontrastes bei Tag und Nacht wieder. Nach Bild 9 und 10 ihrer Arbeit reicht der Leuchtdichtekontrast am Tage von 0,04 bis 4,6 bei trockener und von 0,04 bis 7 bei feuchter Fahrbahn. Die Messungen wurden bei unterschiedlichem Sonnenstand und Bewölkungsgrad durchgeführt. Die Kontraste liegen im Mittel unterhalb der Werte, die in Tabelle 3 der vorliegenden Arbeit aufgeführt sind. Bei ihren Messungen stellt Serres keinen Zusammenhang zwischen dem Leuchtdichtekontrast und dem Leuchtdichtefaktor β fest, betont aber, daß der Kontrast um so größer ist, je dunkler die Fahrbahn ist. Diese Aussage spricht für einen gewissen Zusammenhang zwischen Leuchtdichtekontrast und dem aus der Messung der Leuchtdichtefaktoren herrührenden Kontrast. Eine

Korrelation zwischen diesen beiden Kontrasten wird nicht durchgeführt. Dies ist aussagekräftiger als der Vergleich des Leuchtdichtekontrastes mit dem Leuchtdichtefaktor der Markierung oder der Helligkeit der Fahrbahn, weil hierbei verschiedene lichttechnische Größen miteinander in Beziehung gesetzt werden und nicht zwei gleichartige Größen wie die beiden Kontraste.

Aus den angegebenen Leuchtdichtekontrasten wird nicht auf die Erkennbarkeitsentfernung geschlossen; wendet man das Diagramm 3a auf diese Werte an, erhält man selbst für die drei schlechtesten Kontraste von 0,04 bis 0,09 noch Erkennbarkeitsweiten von 50 bis 70 m. Bei 68 von 71 Messungen auf trockener Fahrbahn, bei Kontrasten $k > 0,1$, ergeben sich Erkennbarkeitsweiten von mehr als 75 m, wie dies in Abschnitt 5.2.1 auch für das deutsche Straßennetz festgestellt wurde.

Bei der Ermittlung des Kontrastes bei Nacht stellt Serres fest, daß dieser bei ortsfester Beleuchtung unabhängig vom Leuchtdichtekoeffizienten ist, während bei Fahren nur mit Kfz-eigener Beleuchtung der Leuchtdichtekontrast vom Verhältnis des Leuchtdichtekoeffizienten der Markierung und der Fahrbahn abhängig ist. In Fahrversuchen wurde getestet, welcher Leuchtdichtekoeffizient der Markierung von 29 Versuchspersonen als gut bewertet wurde. 21 Personen, also mehr als 2/3 empfanden erst einen Leuchtdichtekoeffizienten von $150 \text{ mcd/m}^2 \cdot \text{lx}$ als ausreichend hoch. Dieser Wert wurde in Frankreich als Mindestwert des Leuchtdichtekoeffizienten festgelegt. Es ist nicht bekannt und war auch nicht Ziel der Untersuchung von Serres, nach welchen Kriterien - Erkennbarkeitsweite, Helligkeit im Nah- oder Fernbereich, Kontrast - die Versuchspersonen ihre Bewertung trafen.

Die CIE [29] gibt für $150 \text{ mcd/m}^2 \cdot \text{lx}$ nach einer von Blaauw und Padmos [10], [30] angewandten Methode, die der in vorliegender Untersuchung in ihren Grundzügen ähnlich ist, eine Erkennbarkeitsweite von 90 m an. Nach dem oberen Diagramm von Bild 22 gilt diese Entfernung für ideale Sichtbedingungen. Es ist aber zu

berücksichtigen, daß der Leuchtdichtekoeffizient in Frankreich bei der $-86,5/1,0$ -Geometrie gemessen wird. $150 \text{ mcd/m}^2 \cdot \text{lx}$ nach der in Frankreich verwendeten Geometrie bedeuten nach der in Deutschland angewandten $-86,5/1,5$ -Geometrie ca. $130 \text{ mcd/m}^2 \cdot \text{lx}$. Außerdem werden in Frankreich gelbe Scheinwerfer verwendet, die ca. 30 bis 40 % weniger Lichtstrom abgeben als weiße. Um auf einer Markierung die gleiche Leuchtdichte zu erzielen wie in Frankreich, reichen unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Meßgeometrien und des anderen Scheinwerferlichts in Deutschland 80 bis $90 \text{ mcd/m}^2 \cdot \text{lx}$ aus. Dafür ergeben sich bei idealen Sichtbedingungen Erkennbarkeitsweiten von 100 - 110 m und bei erschwer- ten Sichtbedingungen 70 - 80 m.

Auch Blaauw und Padmos gehen in ihren Untersuchungen von den Ar- beiten von Blackwell aus und ermitteln die Erkennbarkeitsweite über den äquivalenten Durchmesser des Markierungsstreifens. An- stelle eine bestimmte Länge der Markierung in der Rechnung zu berücksichtigen, ermittelten sie durch Beobachtungsversuche ei- nen Faktor, der die Veränderung des Schwellenkontrastes infolge der unterschiedlichen Wahrnehmung einer kontinuierlichen gegen- über einer unterbrochenen Markierung berücksichtigt (neben an- deren Kriterien, die die Wahrnehmung der Markierung beeinträch- tigen können). Die Berechnungen werden mittels dieses Faktors für eine bituminöse Fahrbahn ($R_{LF} = 11 \text{ mcd/m}^2 \cdot \text{lx}$) in trockenem und nassem Zustand bei einer Markierungsbreite von 0,15 m und drei unterschiedlichen meteorologischen Sichtbedingungen Z durchgeführt. Z = 15 km bedeutet klare Sicht, Z = 1 km leichter und Z = 0,2 km stärkerer Nebel. Weiterhin wurde nach neuen und gebrauchten Scheinwerfern unterschieden. Die sich daraus erge- benden Erkennbarkeitsweiten sind in Bild 22 wiedergegeben. In Bild 23 sind die wichtigsten Kurven aus Bild 22 und die Kurve für erschwerte Sichtbedingungen, Fahrlicht, Abmessungen 0,15 m x 6 m, $R_{LF} = 10 \text{ mcd/m}^2 \cdot \text{lx}$, eingezeichnet. Diese Kurve liegt um 8 bis 18 m über der für Z = 1 km, also leichten Nebel. Im Vergleich zur Kurve Z = 15 km, klares Wetter, aber für ge- brauchte Scheinwerfer, beträgt der Abstand sogar 15 bis 28 m.

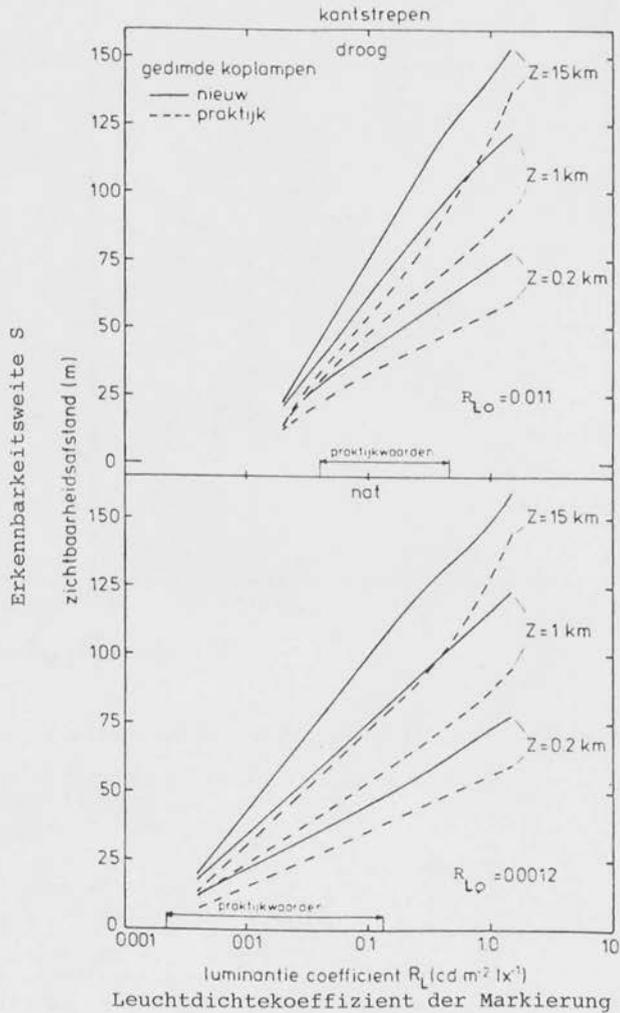


Bild 22: Berechnete Erkennbarkeitsweite S als Funktion des Leuchtdichtekoeffizienten einer Randmarkierung bei drei meteorologischen Bedingungen (Z=15 km, 1 km und 0,2 km) für eine Lichtstärke von neuen und gebrauchten Scheinwerfern, Fahrlicht. Entnommen [30]
 Oberes Diagramm : Trockene Fahrbahn
 Unteres Diagramm : Nasse Fahrbahn

S (m)

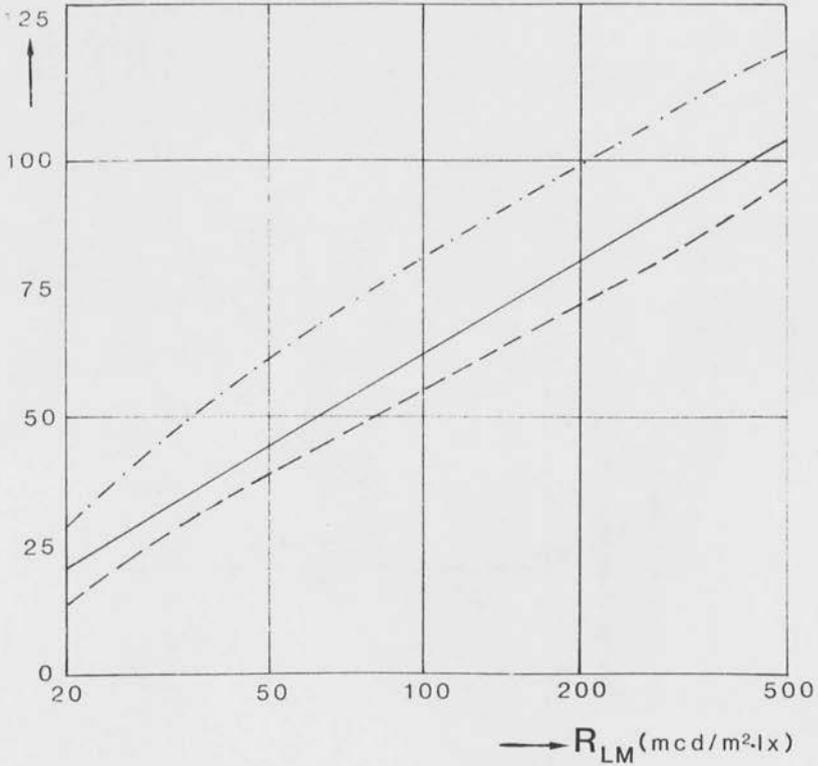


Bild 23: Vergleich der Erkennbarkeitsweiten nach

Anlage A, Bild 3 - · - · - · Markierungsstreifen 0,15 m x 6 m
erschwerter Sichtbedingungen,
Fahrlicht, $R_{LF} = 10 \text{ mcd/m}^2 \cdot \text{lx}$

Blaauw und
Padmos [30]

— $Z = 1$, neue Scheinwerfer, durch-
gehende Markierung 0,15 m Breite,
Fahrlicht, $R_{LF} = 11 \text{ mcd/m}^2 \cdot \text{lx}$

- - - $Z = 15$, gebrauchte Scheinwerfer,
durchgehende Markierung 0,15 m
Breite, Fahrlicht, $R_{LF} = 11 \text{ mcd/m}^2 \cdot \text{lx}$

Auf das Einzeichnen der Kurve für $Z = 1$ km und gebrauchte Scheinwerfer wurde verzichtet, hier ergaben sich Unterschiede in der Erkennbarkeitsweite von mehr als 30 m. Aus diesen Differenzen wird nochmals deutlich, daß durch die Vervierfachung des Schwellenkontrastes längst nicht alle Faktoren, die die Wahrnehmung einer Markierung negativ beeinflussen, berücksichtigt werden konnten und daß die erschwerten Sichtbedingungen eher den Normalzustand darstellen; das Fahren bei idealen Sichtbedingungen ist nur in den seltensten Fällen möglich. Ein weiterer Grund für den Unterschied in der berechneten Erkennbarkeitsweite ist darin zu sehen, daß bei vergleichbaren Leuchtdichtekoeffizienten R_{LF} der Fahrbahn in vorliegender Arbeit um ca. 80 % höhere Leuchtdichten - vermutlich infolge höherer Scheinwerferleuchtdichten - gemessen wurden als von Blaauw und Padmos. Das führt über die Erhöhung der Adaptationsleuchtdichte zu einer höheren Erkennbarkeitsweite. Auch der Gültigkeitsbereich des von Blaauw und Padmos experimentell ermittelten Faktors zur Erhöhung des Schwellenkontrastes kann die Erkennbarkeitsweite beeinflussen.

7.5 Abschätzung der Genauigkeit des verwendeten Verfahrens zur Ermittlung der Erkennbarkeitsweite

Es sind zwei Gruppen von Größen zu unterscheiden, die die Exaktheit des verwendeten Verfahrens beeinflussen.

a) Größen, die die Meßgenauigkeit bestimmen.

Sie können statistischer oder systematischer Natur sein: Die Meßgenauigkeit ist durch die Genauigkeit der verwendeten lichttechnischen Meßgeräte festgelegt sowie durch die Exaktheit, mit der die Meßentfernung festgestellt werden konnte. Dadurch wird die Messung der Leuchtdichtevertelung, der Zusammenhang Fahrbahn- bzw. Markierungsleuchtdichte L bzw. L_M mit den Leuchtdichtekoeffizienten R_{LF} bzw. R_{LM} und die Ermittlung der standardisierten Leuchtdichte L beeinflußt. Da jedoch L_F^* durch Mittelwertbildung erhalten wurde, werden einige statistische Fehler wieder

eliminiert. Der Gesamtfehler von L_F^* wird auf maximal ca. $\pm 10\%$ veranschlagt. 10 % Änderung der Leuchtdichte bedeuten eine Veränderung der Erkennbarkeitsweite von ca. ± 6 m.

b) Annahmen und Abschätzungen

Sie können ebenfalls zu systematischen Fehlern führen. Bei der Ermittlung des äquivalenten Durchmessers wurde stillschweigend angenommen, daß der Schwellenkontrast unabhängig von der Form des Sehobjekts ist. Diese Annahme trifft strenggenommen nicht zu. Bei der trapezförmigen bis rechteckigen Form des gesehenen Markierungsstreifens ist aber zu erwarten, daß der dadurch hervorgerufene Fehler nur sehr gering ist.

Da die Retroreflexionsmechanismen von Fahrbahn- und Markierungsoberfläche verschieden sind, ist theoretisch auch eine unterschiedliche Leuchtdichteverteilung in Abhängigkeit von der Entfernung für Fahrbahnen und Markierungen zu erwarten. Die Unterschiede sind jedoch so klein, daß sie in der unter a) besprochenen Meßgenauigkeit untergehen. Deshalb führt die aus der Annahme gleicher Leuchtdichteverteilung für Fahrbahnen und Markierungen folgende Unabhängigkeit des Kontrastes von der Entfernung zu keiner Einschränkung der Genauigkeit.

Die Leuchtdichtemessungen wurden mit Fahrzeugen durchgeführt, die mit H 4-Scheinwerfern ausgerüstet waren. Diese sind natürlich nicht für alle im Straßenverkehr befindlichen Fahrzeuge repräsentativ. Bei Fahrzeugen mit herkömmlichen Scheinwerfern und Bilux-Lampen sind wegen der geringeren Lichtstärke kleinere, bei Fahrzeugen mit H 4-Doppelscheinwerfern dagegen größere Erkennbarkeitsweiten zu erwarten. Auch hier gilt, daß $\pm 10\%$ Unterschied in der Leuchtdichte ca. ± 6 m Änderung der Erkennbarkeitsweite hervorrufen.

Die schwierigste Frage ist die Zugrundelegung des Schwellenkontrastes. Jede Festlegung eines erhöhten Schwellenkontrastes (anstelle einer Erhöhung des Schwellenkontrastes hätte auch eine

Erhöhung der Adaptationsleuchtdichte in Betracht gezogen werden können) zur Berücksichtigung von Faktoren, die im praktischen Fahrbetrieb die Erkennbarkeit einer Markierung verschlechtern, ist willkürlich. Es können nicht alle Einflüsse gleichzeitig berücksichtigt werden, zu dem können sich diese u.U. ständig ändern (z.B. der Verschmutzungszustand); deshalb ist es nicht möglich, einen konstanten Schwächungsfaktor für den Schwellenkontrast anzugeben. Das bedeutet, wie auch der Vergleich mit den Ergebnissen von Blaauw und Padmos gezeigt hat, daß es in der Praxis schlechtere als die durch die Vervierfachung des Schwellenkontrastes definierten erschwerten Sichtbedingungen gibt, für die auch erheblich kleinere Erkennbarkeitsweiten zu erwarten sind. Es ist jedoch möglich, für jeden einzelnen Faktor, der das Leuchtdichteniveau und/oder den Helligkeitskontrast zwischen Markierung und Fahrbahn herabsetzt, anhand der hier vorgelegten Kurven die Verringerung der Erkennbarkeitsweite zu ermitteln.

Der letzte Punkt betrifft die Erkennbarkeit einer durchgehenden Markierung im Verhältnis zu einem einzelnen Markierungsstrich und die damit zusammenhängende Erwartungshaltung des Kraftfahrers beim nächtlichen Fahren.

Der Kraftfahrer weiß, daß die Markierung nicht plötzlich an einem unbekanntem Ort in seinem Gesichtsfeld auftaucht, sondern sich kontinuierlich aus dem relativ hell leuchtenden Nahbereich sozusagen ins Dunkle hinein verlängert. Diese Erwartungshaltung führt aus wahrnehmungspsychologischen Gründen zu einer gewissen Erhöhung der Erkennbarkeitsweite bzw. kann als Herabsetzung des Schwellenkontrastes aufgefaßt werden.

Aus ähnlichen Gründen ist die Erkennbarkeit einer durchgehenden Markierung größer als die eines einzelnen Markierungsstreifens. Der Kraftfahrer kann sich die Fortsetzung einer durchgehenden Markierung etwas leichter vorstellen als das Auftauchen des nächsten, einzelnen Markierungsstreifens. Auch dies führt zu einer etwas verbesserten Erkennung der durchgehenden Markierung.

Die von Blaauw und Padmos angewandte Methode der Ermittlung eines fiktiven äquivalenten Durchmessers schließt neben anderen Faktoren, die die Erkennbarkeitsweite einer Markierung in der Praxis beeinflussen, auch die Erwartungshaltung des Kraftfahrers ein. Diese Methode bietet daher die Möglichkeit, die Erkennbarkeitsweite einer durchgehenden Markierung zu bestimmen. Sie konnte aber in vorliegender Arbeit nicht angewandt werden, weil zur statistischen Absicherung des von Blaauw und Padmos gefundenen Faktors ausführliche Beobachtungsversuche notwendig gewesen wären. Diese hätten den Rahmen dieses Forschungsauftrages jedoch bei weitem gesprengt. Es wird daher künftigen Arbeiten auf diesem Gebiet vorbehalten bleiben, sich auch mit der Frage der Definition und praktischen Bewertung der Sichtbedingungen zu beschäftigen, um die erhaltenen Ergebnisse weiter zu präzisieren.

Schrifttum

- [1] Bitzl, F.: Verkehrsunfallanalyse 1952-1958 für die Bundesstraße 2 (München-Garmisch-Patenkirchen); Niedersächsisches Landesverwaltungsamt, Abt. Straßenbau: Untersuchung von Verkehrsunfällen auf der Bundesstraße 3 (Hannover-Celle). Enthalten in Schriftenreihe Straßenbau, Verkehrstechnik und Verkehrssicherheit "Wirksamkeit von Leiteinrichtungen". Der Berater für Schadenverhütung (HUK), Köln 1961
- [2] Chich, Y.: Le guidage visuel par marquage latéral sur la chaussée: une tentative d'analyse de son efficacité dans le domaine de la sécurité. O.E.C.D., Paris 1972
- [3] Domhan, M.: Die Umsetzung von Verkehrssicherheitsmaßnahmen in die Praxis in den USA. Straßenverkehrstechnik 24 (1980), S. 179
- [4] James, J.G., Reid, J.A.: Notes on the costs, lives and effectiveness of various road markings. Transport and Road Research Laboratory, RRL Report LR 285, 1969
- [5] Schönborn, H.D. und Domhan, M.: Handbuch für die Markierung von Straßen (HMS). Verlag O. Elsner, Darmstadt 1981
- [6] Allen, R.W. u.a.: Driver's Visibility Requirements for Roadway Delineation. Report FHWA-RD-77-165, Springfield, Virginia
- [7] East Sussex Text of the Use of Egdelines in Reducing Road Accidents. Road Marking Industry Group, August 1977
- [8] The South Yorkshire Test of the Use of Egdelines in Reducing Accidents. Road Marking Industry Group, Oktober 1977
- [9] Schreuder, D.A.: Profilierte Fahrbahnmarkierungen. Literaturstudie. Heft 2 der Deutschen Studiengesellschaft der Hersteller von Markierungsglasperlen (DSGM), Essen 1981

- [10] Blaauw, G.J. und Padmos, P.: Nighttime Visibility of Various Types of Road Markings. SAE-Kongreß 1982, Nr. 820412
- [11] Krauze, P.: Visibilité de nuit des marquages routiers par temps de pluie. Forschungsbericht FAER 1.02.24 des Laboratoire Regionale de Saint-Quentin (1979)
- [12] Cathelain, M.: Factors related to the Visibility of Night Time of Delineation Systems under Wet Conditions. Symposium der Commission Internationale d'Eclairage (CIE), Paris, Mai 1983
- [13] Paulmann, G. und Neis, H.: Untersuchungen über die Erhöhung der Nachsichtbarkeit bei Nässe durch Verstärkung der Retroreflexion infolge profilierter Fahrbahnmarkierungen. Forschungsauftrag 3.143 G 81 C des Bundesministers für Verkehr. 2. Zwischenbericht Darmstadt, September 1984
- [14] DIN 5036, Teil 2: Bewertung und Messung der lichttechnischen Eigenschaften von Werkstoffen. Lichttechnische Stoffkennzahlen, Begriffe.
- [15] DIN 6171, Teil 1: Aufsichtfarben für Verkehrszeichen. Farben und Farbgrößen bei Beleuchtung mit Tageslicht.
- [16] Meseberg, H.H.: Erfahrungen mit farbigen Fahrbahndecken zur besseren Verkehrsleitung. Straßenverkehrstechnik 22 (1978), S. 87
- [17] DIN 67 520, Teil 1: Retroreflektierende Materialien zur Verkehrssicherung. Lichttechnische Bewertung, Messung und Kennzeichnung von Rückstrahlern und Reflexstoffen.
- [18] Meseberg, H.H. und Goerner, E.W.: Methoden zur Messung der Retroreflexion von Fahrbahnmarkierungen. Heft 5 der Schriftenreihe der DSGM, Essen 1984
- [19] Meseberg, H.H. und Seliger, R.: Erläuterungen zu den Anforderungen und Prüfverfahren der "Zusätzlichen Technischen Vorschriften und Richtlinien für Markierungen auf Straßen" (ZTV-M 1984). Erscheint in Straßenverkehrstechnik, 28 (1984), Heft 3

- [20] Meseberg, H.H.: Lichttechnische Untersuchungen über den Kontrast zwischen Fahrbahnmarkierungen und hellen Zementbetondecken. Straße und Autobahn 28 (1977), S. 200
- [21] Blackwell, H.R. und Taylor, J.H.: Survey on Laboratory Studies of Visual Detection. NATO-Seminar, Den Haag, August 1969 (zitiert nach [6])
- [22] Fleischer, K.: Leuchtdichtevertelung auf Straßendecken durch kraftfahrzeugeigene Beleuchtung. Dissertation D 83, TU Berlin 1984
- [23] Lundkvist, S.O., u.a.: Reflection Properties of Road Surfaces in Headlight Illumination. Mörkertrafik Nr. 4, VTI Linköping 1982
- [24] Lundkvist, S.O. und Sørensen, K.: Reflection Properties of Road Surfaces and Road Markings in Headlight Illumination. Interner Bericht Linköping/Schweden und Lyngby/Dänemark 1984
- [25] Adrian, W.: Die Unterschiedsempfindlichkeit des Auges und die Möglichkeit ihrer Berechnung. Lichttechnik 21 (1969), S. 2A
- [26] Blackwell, H.R.: Contrast Thresholds of the Human Eye. J. Opt. Soc.Am. 36 (1946), S. 624 (Zitiert nach [25]).
- [27] Yu, J.C.: Delineator Effectiveness for Median Visibility. In "Focus on Road markings and materials" S. 13. Reprint (Fa. Ballotini) von Traffic Engineering and Control, März 1979
- [28] Serres, A.M.: La visibilité des marques routières. Bull. liaison Labo. P. et Ch. 114 (1981), S. 27
- [29] Commission Internationale de l'Eclairage: Visual Aspects of Road Markings. Technical Report des TC 4.04, Entwurf Februar 1985
- [30] Blaauw, G.J. und Padmos, P.: De zichtbaarheid 's nachts van wegmarkeringen op droge en natte wegdekken. Report Nr. IZF 1981-C20 des Instituts voor zintuigfysiologie, Soesterberg 1981

- [31] Schreuder, A.: Visibility of Road Markings on Wet Road Surfaces. Literaturstudie des Studie Centrum Wegenbouw, Arnhem 1978
- [32] Commission Internationale de l'Eclairage: Internationales Wörterbuch der Lichttechnik, 4. Auflage. Deutsche Ausgabe, Stand Januar 1985

Zusammenstellung der im Text verwendeten Formelzeichen

S	Erkennbarkeitsweite, Entfernung
k	Kontrast
k_{Tag}	Kontrast am Tage
k_{Nacht}	Kontrast bei Nacht
L	Leuchtdichte
L_F	Leuchtdichte der Fahrbahnoberfläche
L_M	Leuchtdichte der Markierungsoberfläche
β	Leuchtdichtefaktor, auch Anleuchtungswinkel
α	Beobachtungswinkel
β_F	Leuchtdichtefaktor der Fahrbahn
β_M	Leuchtdichtefaktor der Markierung
R_L	Leuchtdichtefaktor bei Retroreflexion
R_{LF}	Leuchtdichtefaktor bei Retroreflexion der Fahrbahn
R_{LM}	Leuchtdichtefaktor bei Retroreflexion der Markierung
E_{\perp}	Beleuchtungsstärke senkrecht zur Anleuchtungsrichtung
\emptyset	äquivalenter Durchmesser bzw. Sehwinkel
s_h	horizontaler Sehwinkel
s_v	vertikaler Sehwinkel
h	Augenhöhe des Fahrers
b	Breite der Markierung
l	Länge der Markierung
L_U	Leuchtdichte der Umgebung
E_F	Quotient L_F/R_F , formal Beleuchtungsstärke
E_F^*	standardisierte Beleuchtungsstärke
L_F^*	standardisierte Leuchtdichte
ΔL	Unterschiedsempfindlichkeit
Z	meteorologische Sichtweite

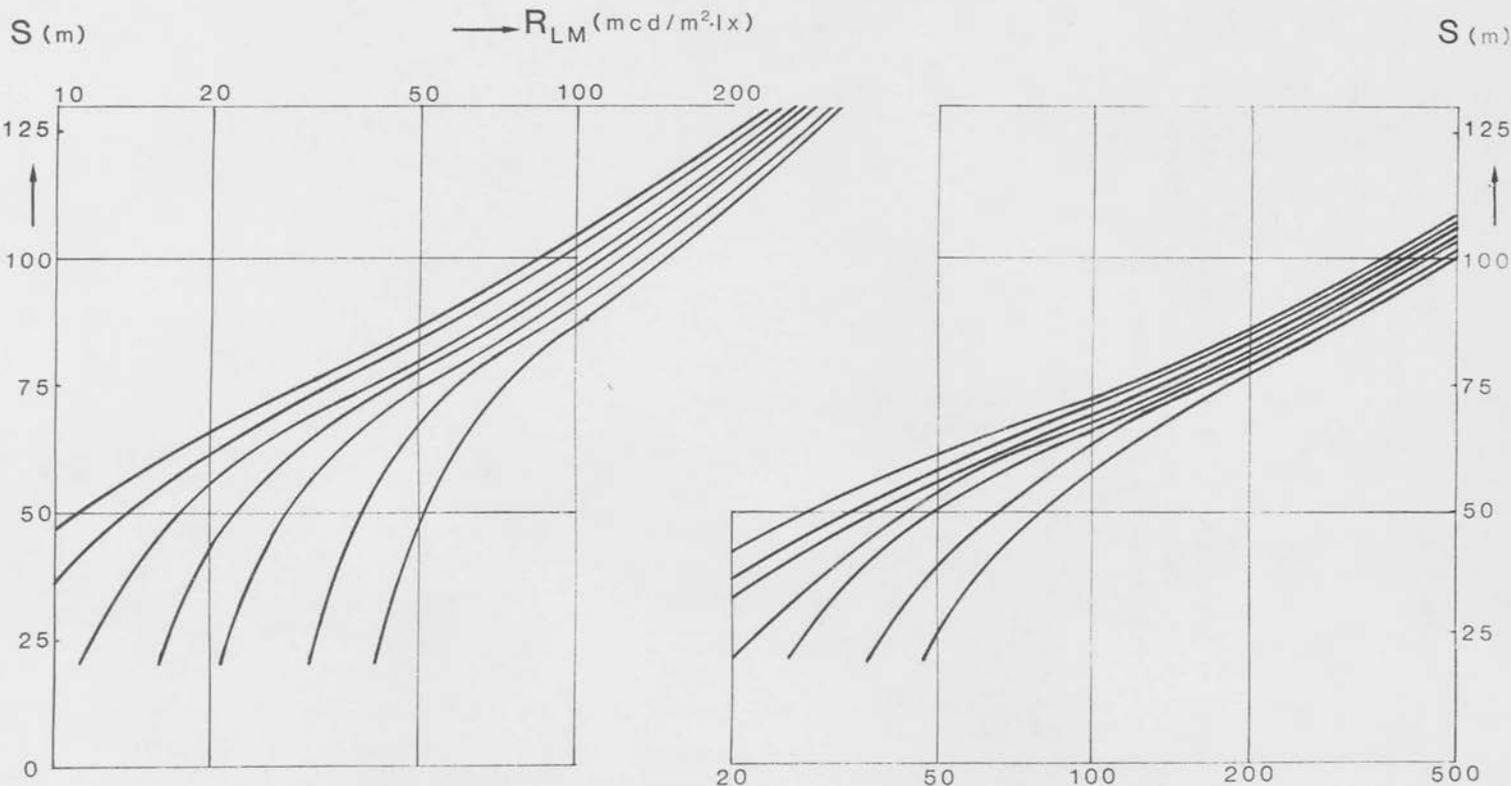


A N H Ä N G E

Anhang A: Erkennbarkeitsweite von Fahrbahnmarkierungs-
streifen in Abhängigkeit vom Leuchtdichte-
koeffizienten bei Retroreflexion

ideale Sichtbedingungen

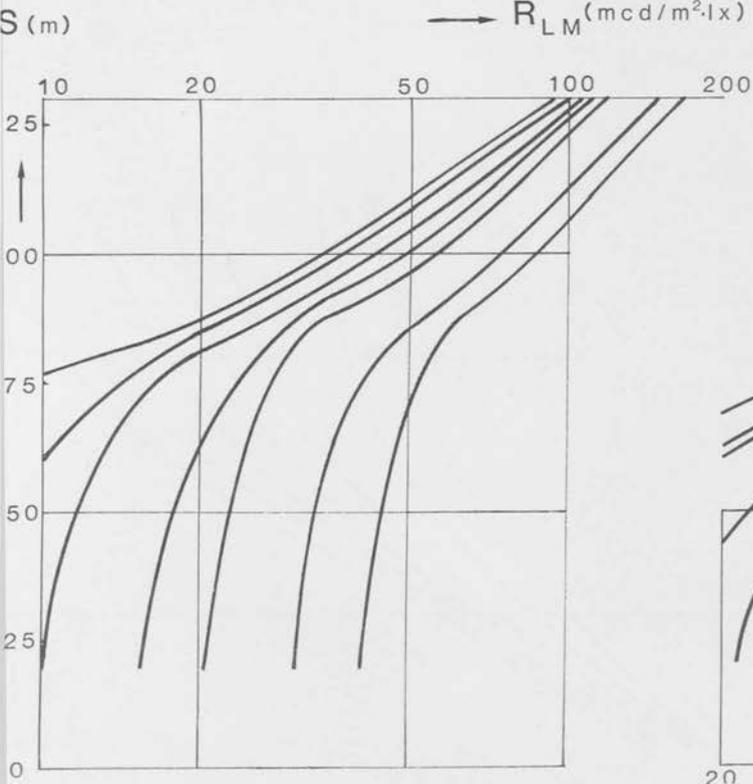
erschwerte Sichtbedingungen



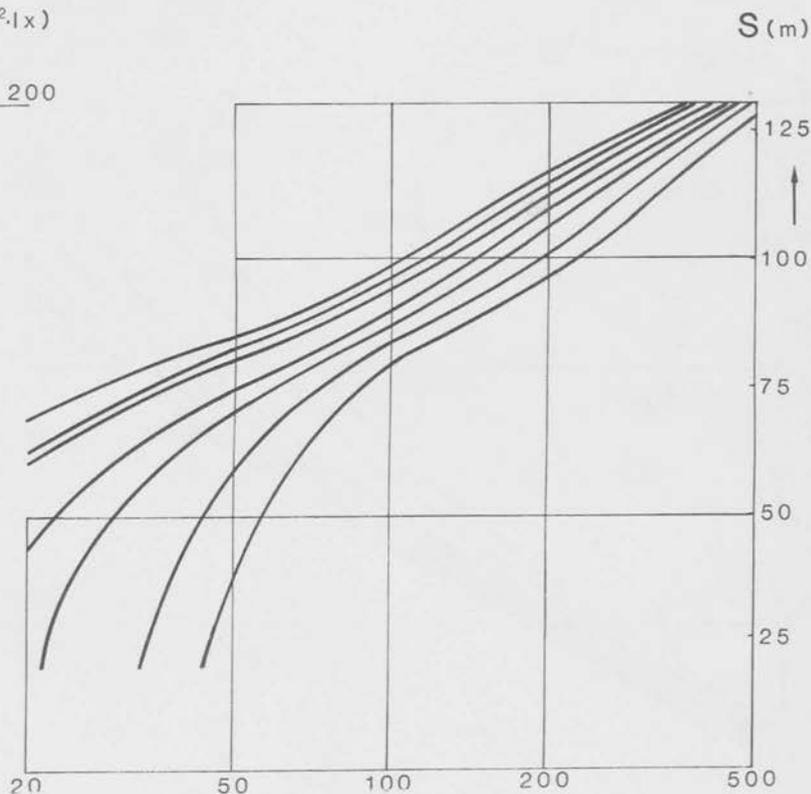
Erkennbarkeitsweite S eines Markierungsstreifens der Abmessung 0,12 m x 4 m in Abhängigkeit von dem Leuchtdichtekoeffizienten der Markierung R_{LM} .
 Parameter: Leuchtdichtekoeffizient der Fahrbahn R_{LF} (von links nach rechts 5, 7, 10, 15, 20, 30, 40 mcd/m².lx). Fahrlicht

→ R_{LM} (mcd/m².lx)

ideale Sichtbedingungen



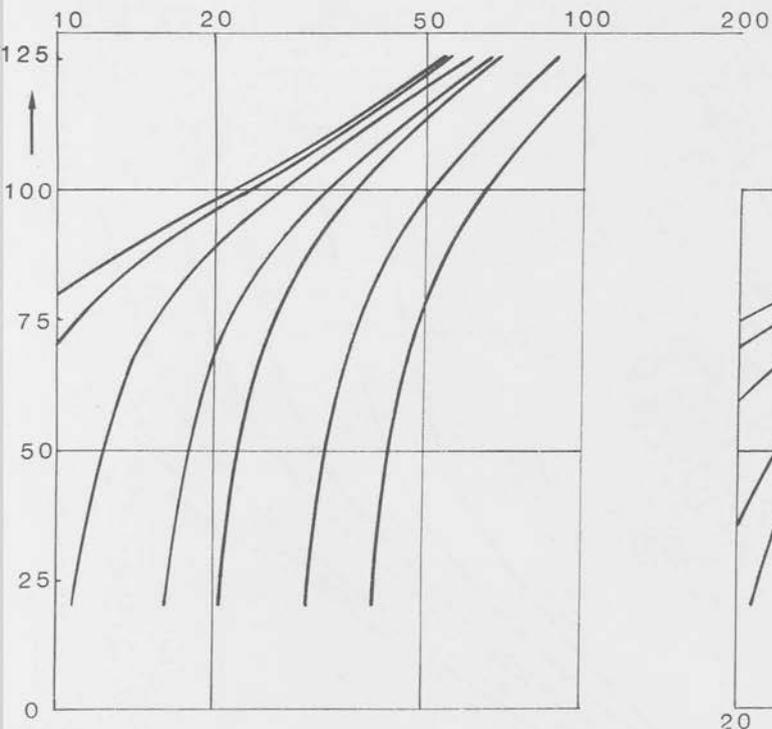
erschwerte Sichtbedingungen



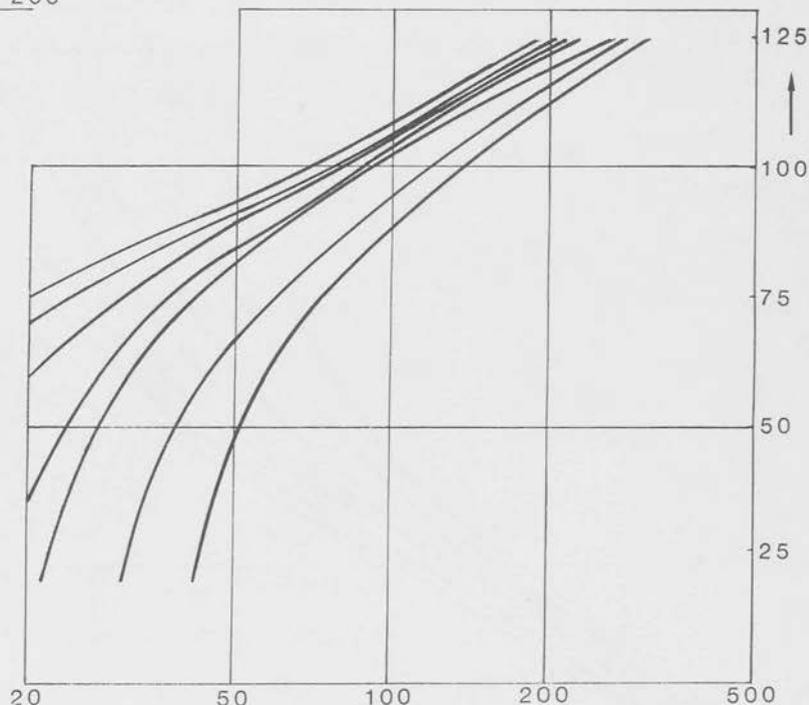
Erkennbarkeitsweite S eines Markierungsstreifens der Abmessung 0,12 m x 4 m in Abhängigkeit von dem Leuchtdichtekoeffizienten der Markierung R_{LM} .
Parameter: Leuchtdichtekoeffizient der Fahrbahn R_{LF} (von links nach rechts 5, 7, 10, 15, 20, 30, 40 mcd/m².lx). Fernlicht

→ R_{LM} (mcd/m².lx)

S (m)

→ R_{LM} (mcd/m²·lx)

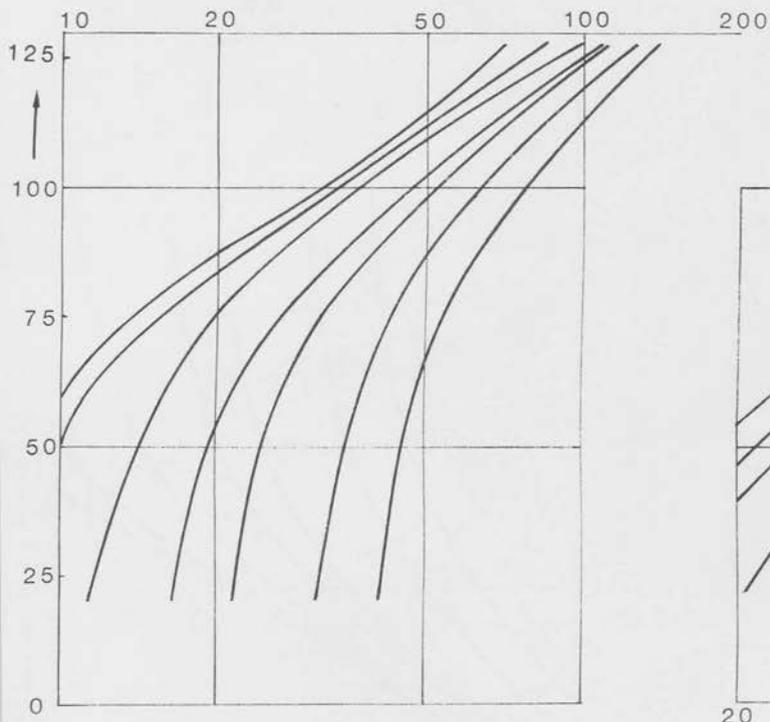
S (m)



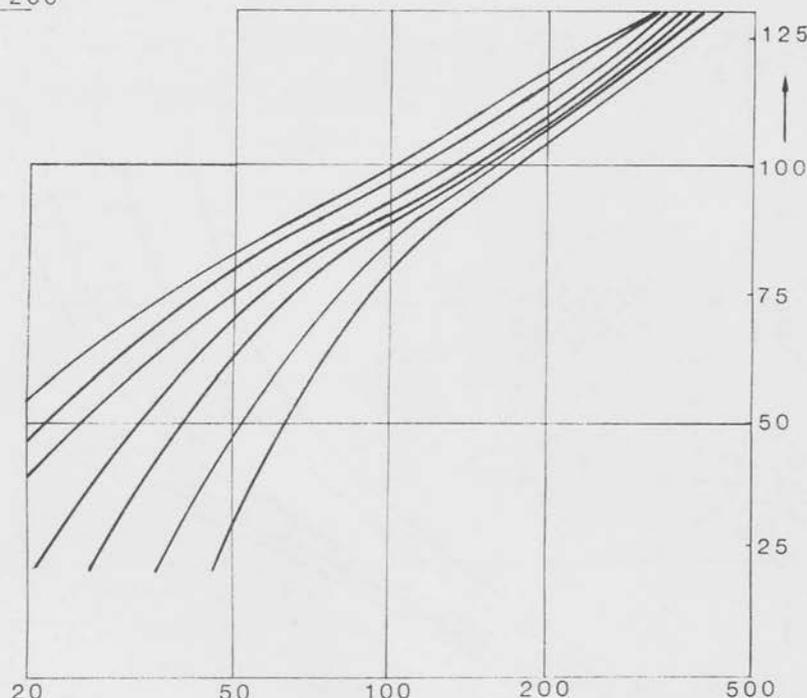
Erkennbarkeitsweite S eines Markierungsstreifens der Abmessung 0,15 m x 6 m in Abhängigkeit von dem Leuchtdichtekoeffizienten der Markierung R_{LM} . Parameter: Leuchtdichtekoeffizient der Fahrbahn R_{LF} (von links nach rechts 5, 7, 10, 15, 20, 30, 40 mcd/m²·lx). Fernlicht

→ R_{LM} (mcd/m²·lx)

S (m)

→ $R_{LM} (\text{mcd}/\text{m}^2 \cdot \text{lx})$ 

S (m)



Erkennbarkeitsweite eines Markierungsstreifens der Abmessung $0,30 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ in Abhängigkeit von dem Leuchtdichtekoeffizienten der Markierung R_{LM} .
 Parameter: Leuchtdichtekoeffizient der Fahrbahn R_{LF} (von links nach rechts 5, 7, 10, 15, 20, 30, 40 $\text{mcd}/\text{m}^2 \cdot \text{lx}$). Fahrlicht

→ $R_{LM} (\text{mcd}/\text{m}^2 \cdot \text{lx})$

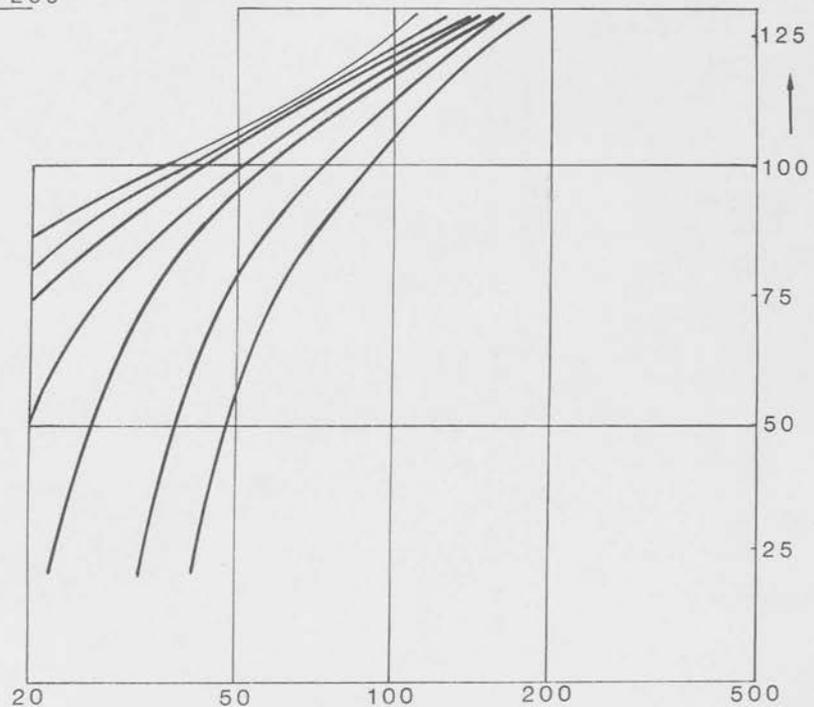
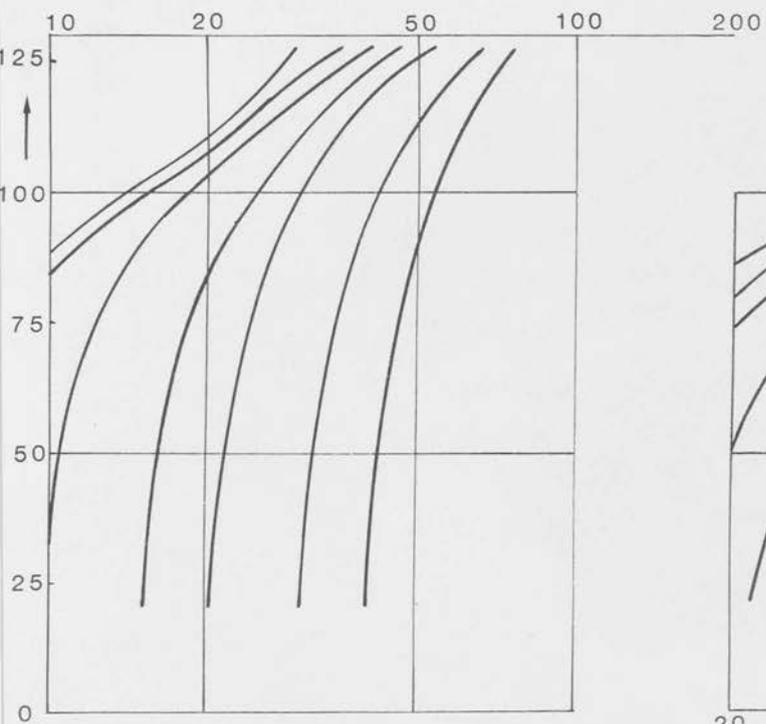
ideale Sichtbedingungen

erweiterte Sichtbedingungen

S (m)

→ R_{LM} (mcd/m².lx)

S (m)



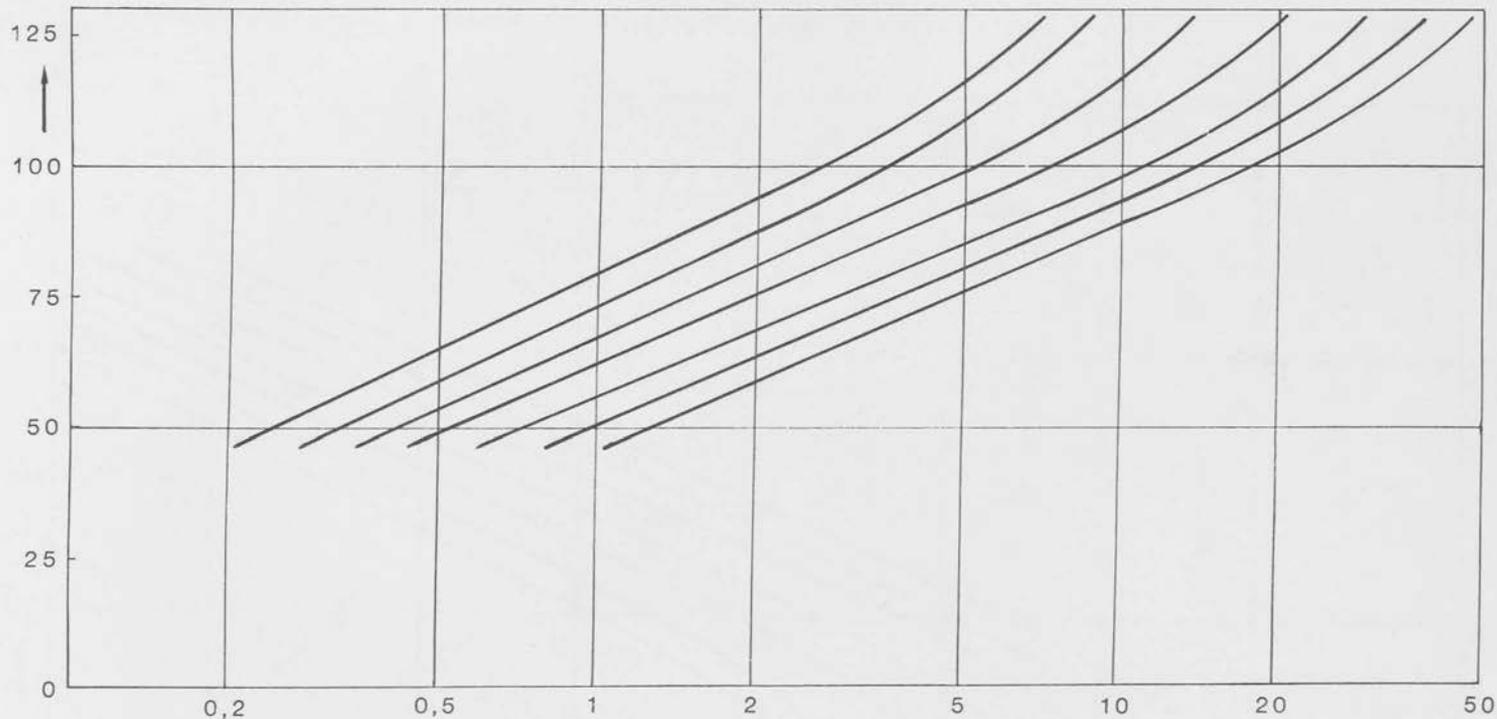
Erkennbarkeitsweite S eines Markierungsstreifens der Abmessung 0,30 m x 6 m in Abhängigkeit von dem Leuchtdichtekoeffizienten der Markierung R_{LM} . Parameter: Leuchtdichtekoeffizient der Fahrbahn R_{LF} (von links nach rechts 5, 7, 10, 15, 20, 30, 40 mcd/m².lx). Fernlicht

→ R_{LM} (mcd/m².lx)

Anhang B : Erkennbarkeitsweite von Fahrbahnmarkierungs-
streifen in Abhängigkeit vom Kontrast zwischen
Markierung und Fahrbahnoberfläche

Fahrlicht, ideale Sichtbedingungen

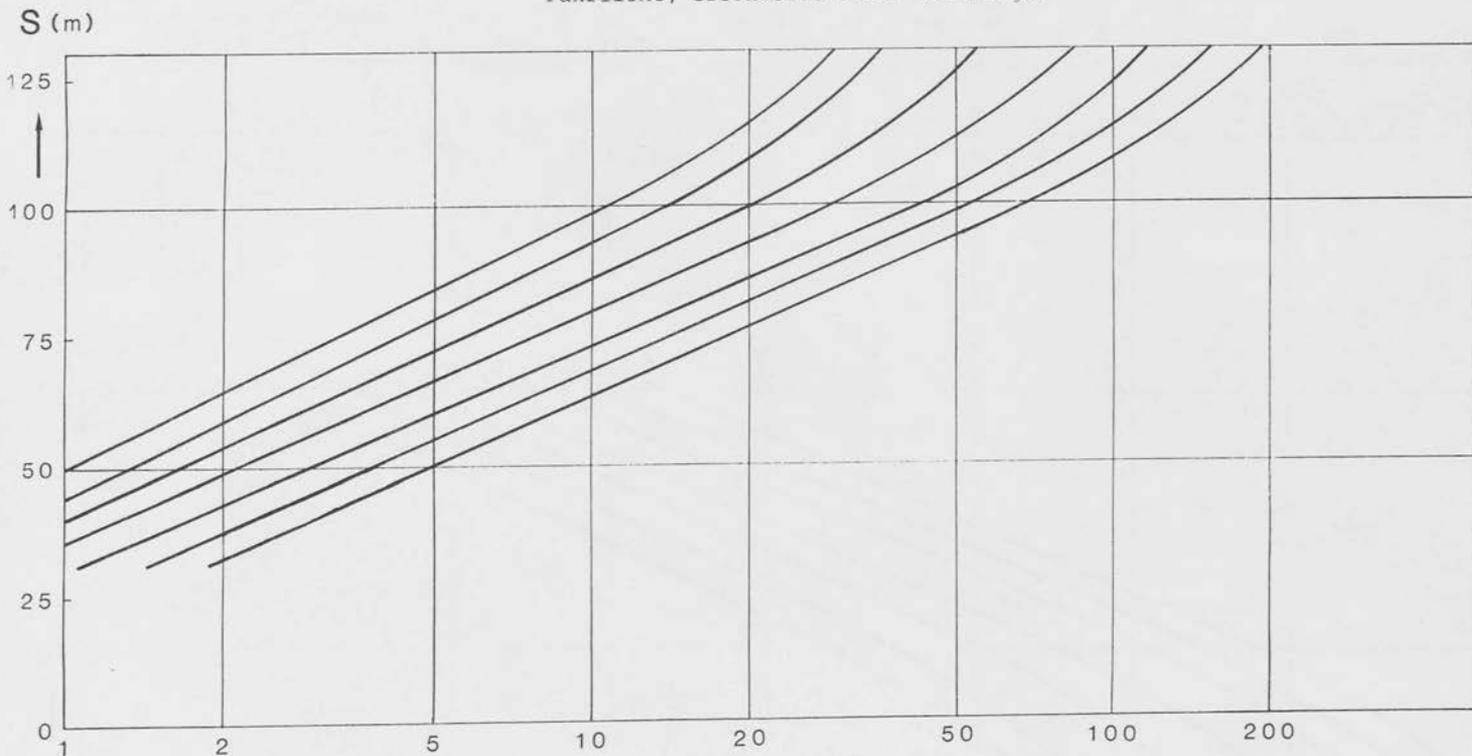
S (m)



Erkennbarkeitsweite S eines Markierungstreifens der Abmessung $0,12 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ in Abhängigkeit vom Kontrast k . Parameter: Leuchtdichtekoeffizient der Fahrbahn R_{LF} (von rechts nach links 5, 7, 10, 15, 20, 30, 40 $\text{mcd/m}^2 \cdot \text{lx}$)

→ k

Fahrlicht, erschwerte Sichtbedingungen

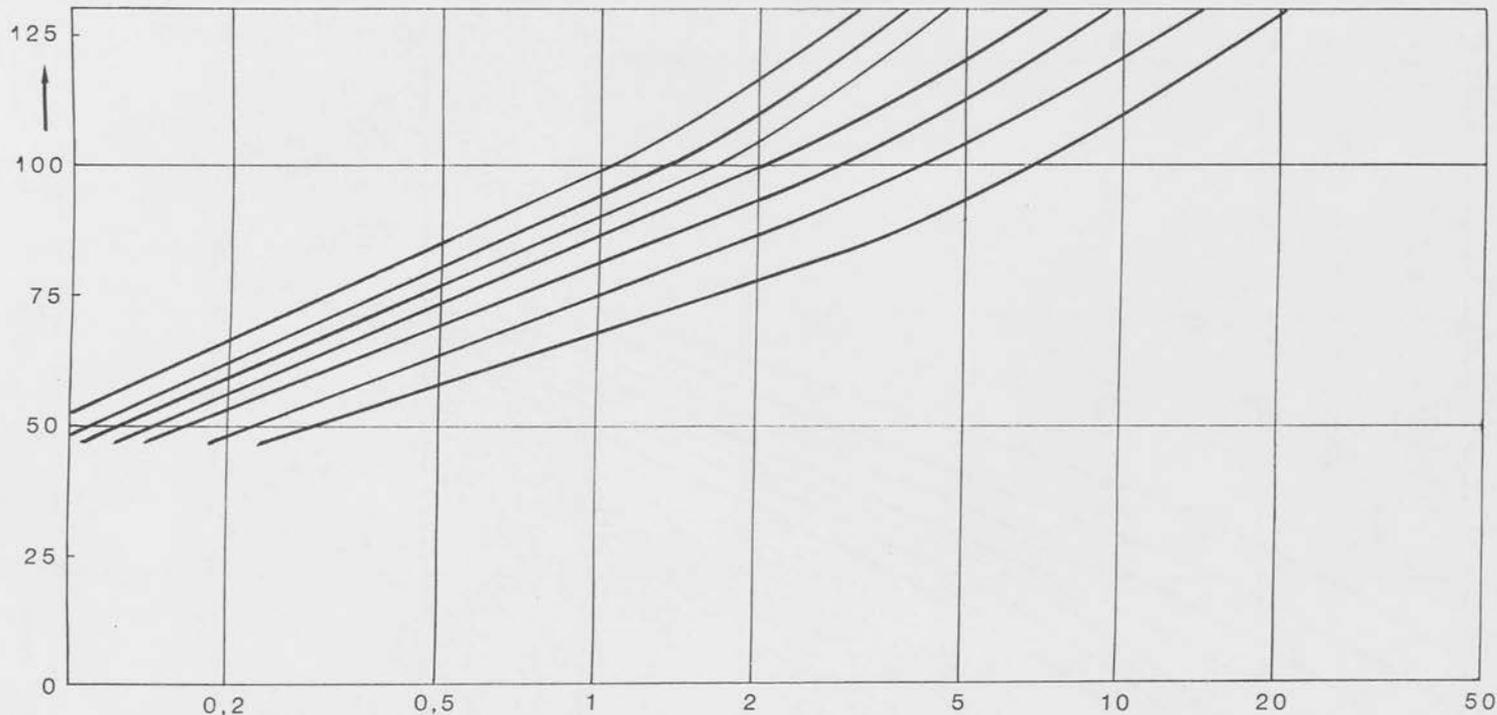


Erkennbarkeitsweite S eines Markierungsstreifens der Abmessung $0,12 \text{ m} \times 4 \text{ m}$
 in Abhängigkeit vom Kontrast k . Parameter: Leuchtdichtekoeffizient der
 Fahrbahn R_{LF} (von rechts nach links 5, 7, 10, 15, 20, 30, 40 $\text{mcd/m}^2 \cdot \text{lx}$)

→ k

Fernlicht, ideale Sichtbedingungen

S (m)

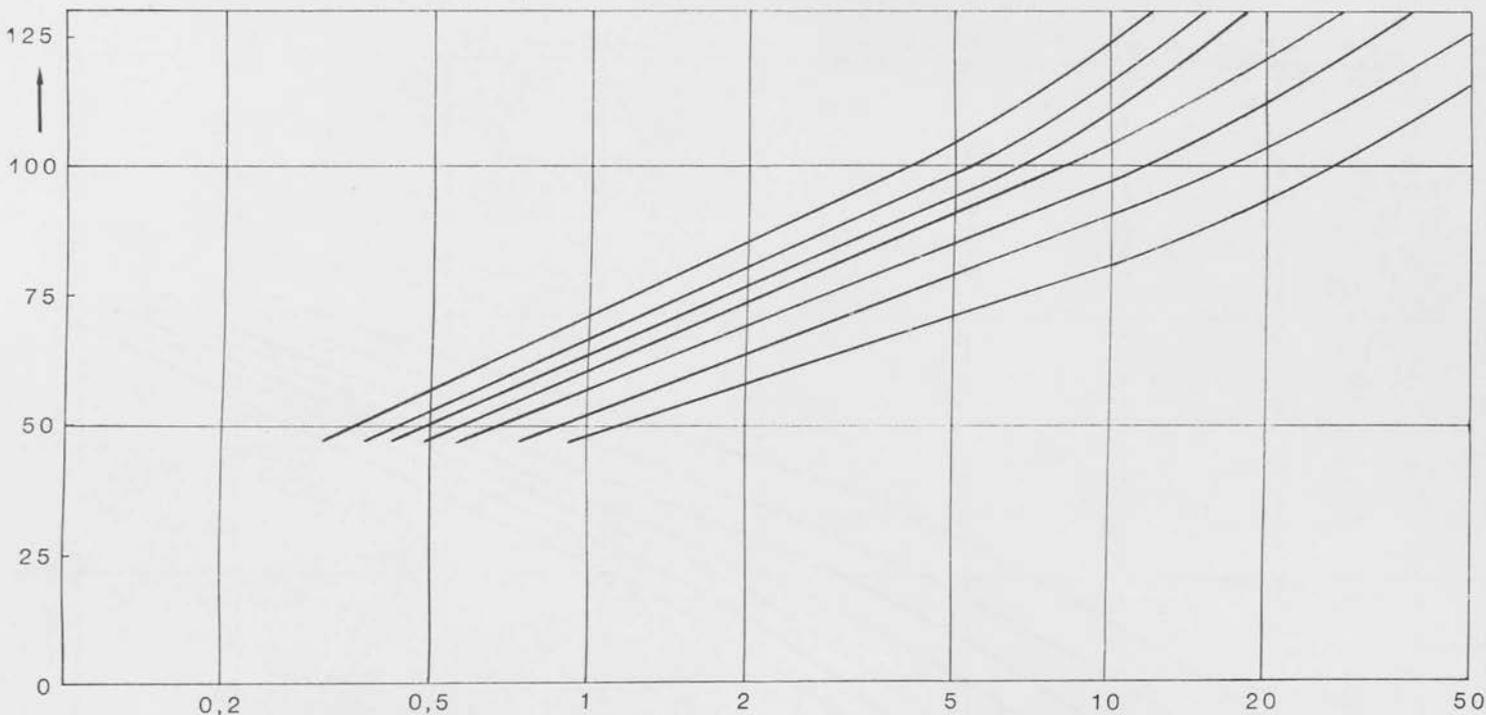


Erkennbarkeitsweite S eines Markierungsstreifens der Abmessung 0,12 m x 4 m
in Abhängigkeit vom Kontrast k. Parameter: Leuchtdichtekoeffizient der
Fahrbahn R_{LF} (von rechts nach links 5, 7, 10, 15, 20, 30, 40 mcd/m².lx)

→ k

Fernlicht, erschwerte Sichtbedingungen

S (m)

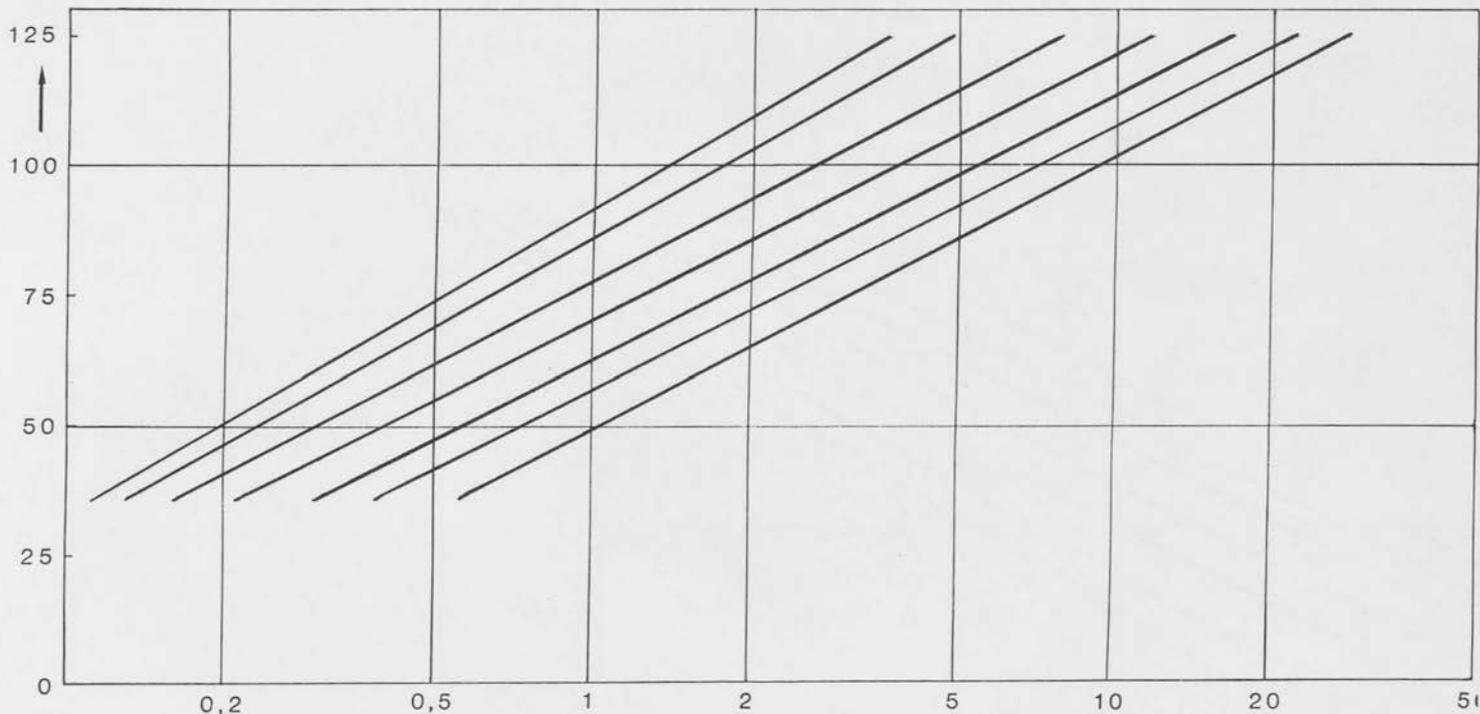


Erkennbarkeitsweite S eines Markierungsstreifens der Abmessung $0,12 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ in Abhängigkeit vom Kontrast k . Parameter: Leuchtdichtekoeffizient der Fahrbahn R_{LF} (von rechts nach links 5, 7, 10, 15, 20, 30, 40 $\text{mcd/m}^2 \cdot \text{lx}$)

→ k

Fahrlicht, ideale Sichtbedingungen

S (m)

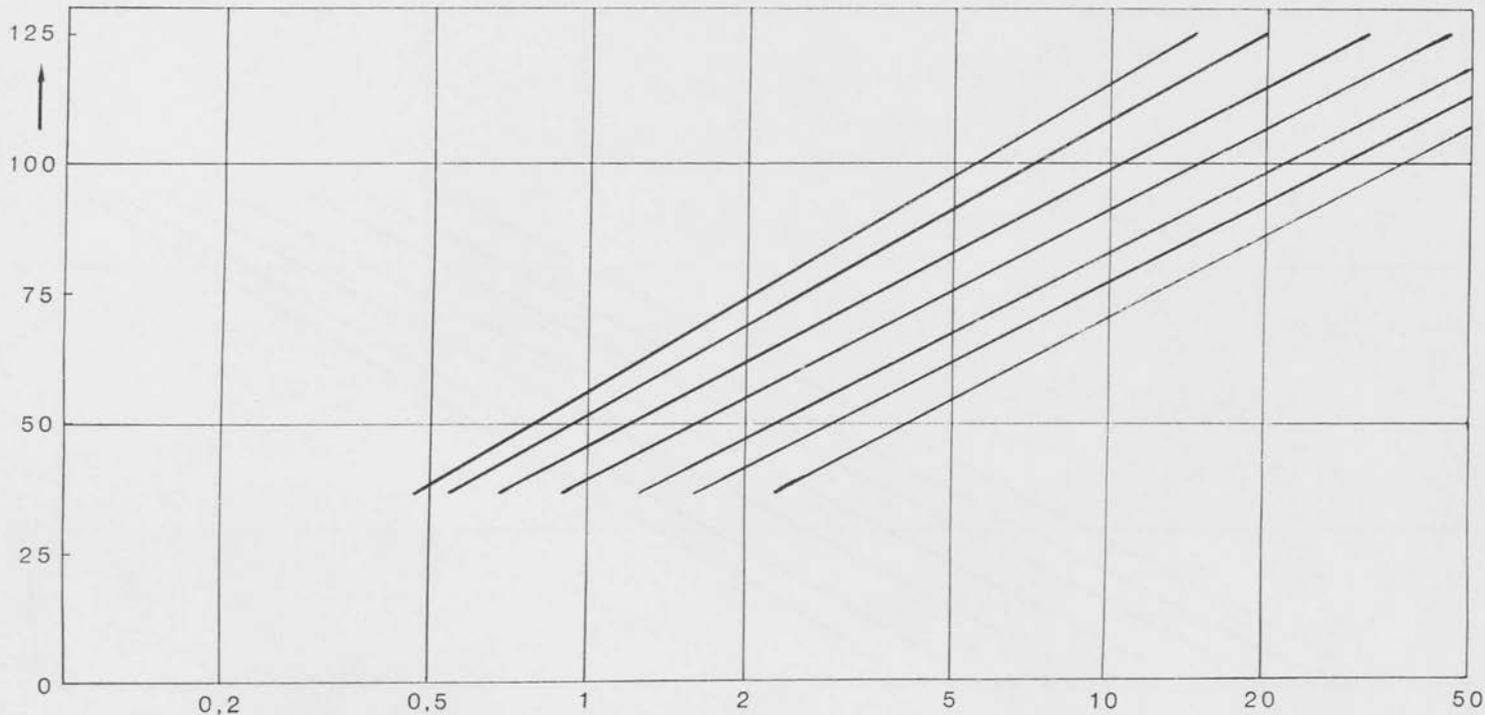


Erkennbarkeitsweite S eines Markierungsstreifens der Abmessung $0,15 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ in Abhängigkeit vom Kontrast k . Parameter: Leuchtdichtekoeffizient der Fahrbahn R_{LF} (von rechts nach links 5, 7, 10, 15, 20, 30, 40 mcd/m².lx)

→ k

Fahrlicht, erschwerte Sichtbedingungen

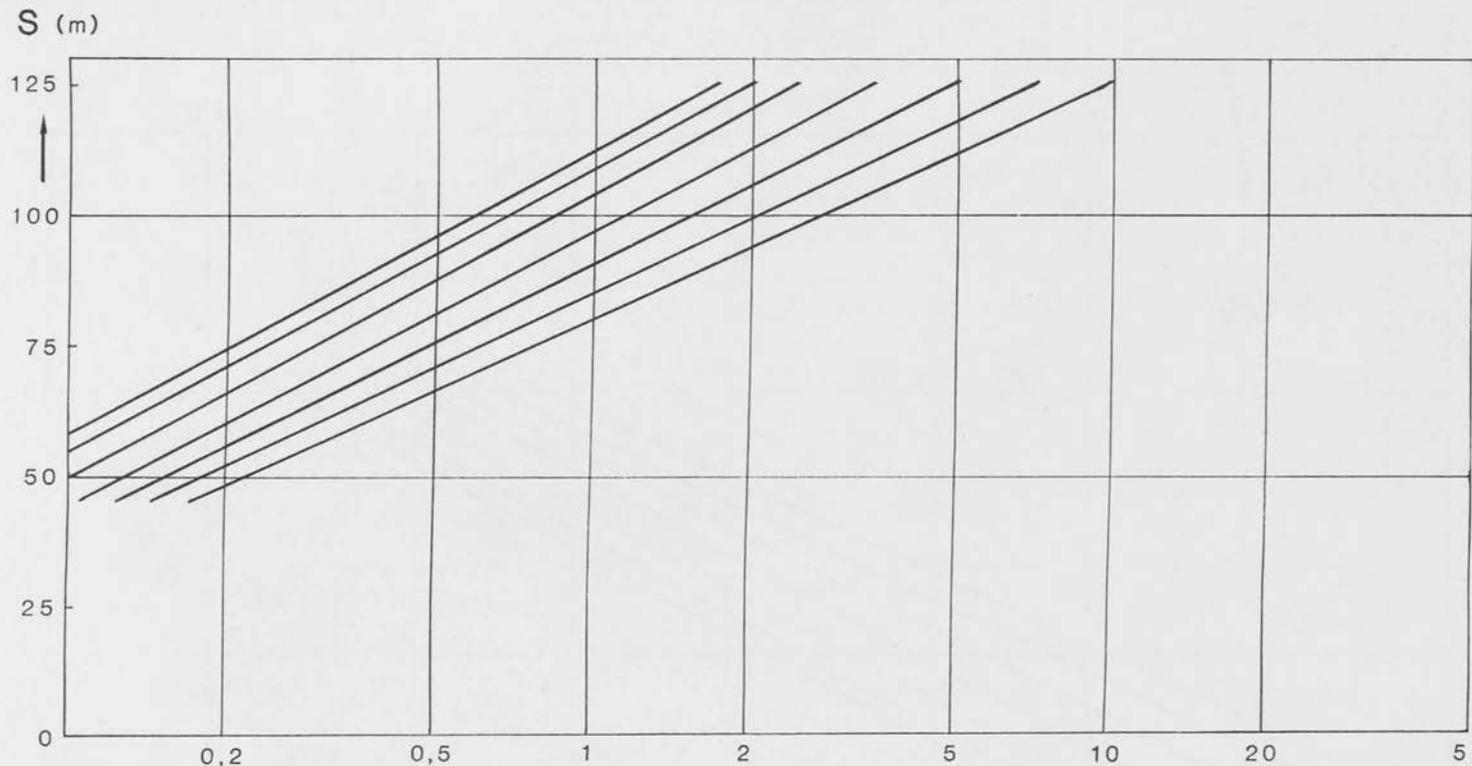
S (m)



Erkennbarkeitsweite S eines Markierungsstreifens der Abmessung $0,15 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ in Abhängigkeit vom Kontrast k . Parameter: Leuchtdichtekoeffizient der Fahrbahn R_{LF} (von rechts nach links 5, 7, 10, 15, 20, 30, 40 $\text{mcd/m}^2 \cdot \text{lx}$)

→ k

Fernlicht, ideale Sichtbedingungen

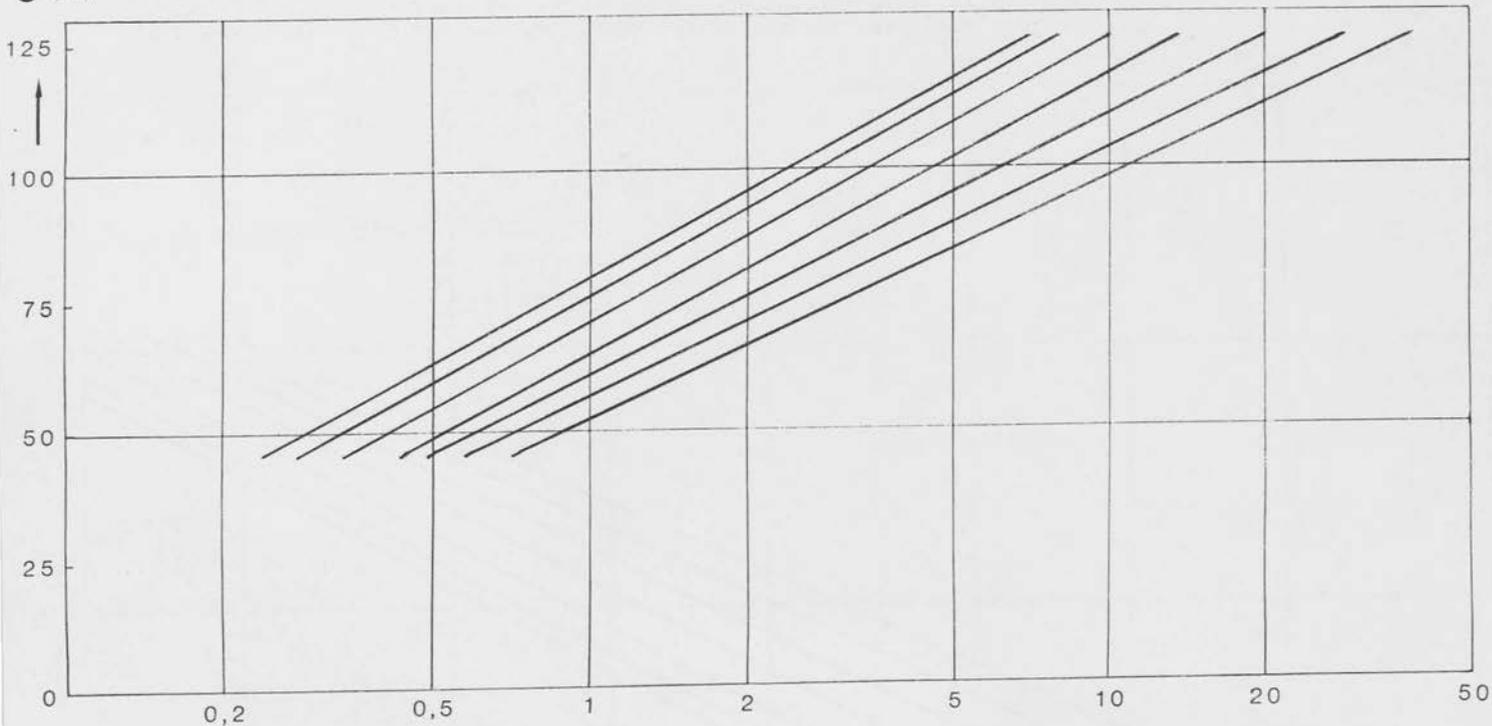


Erkennbarkeitsweite S eines Markierungsstreifens der Abmessung $0,15 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ in Abhängigkeit vom Kontrast k . Parameter: Leuchtdichtekoeffizient der Fahrbahn R_{LF} (von rechts nach links 5, 7, 10, 15, 20, 30, 40 $\text{mcd/m}^2 \cdot \text{lx}$)

→ k

Fernlicht, erschwerte Sichtbedingungen

S (m)

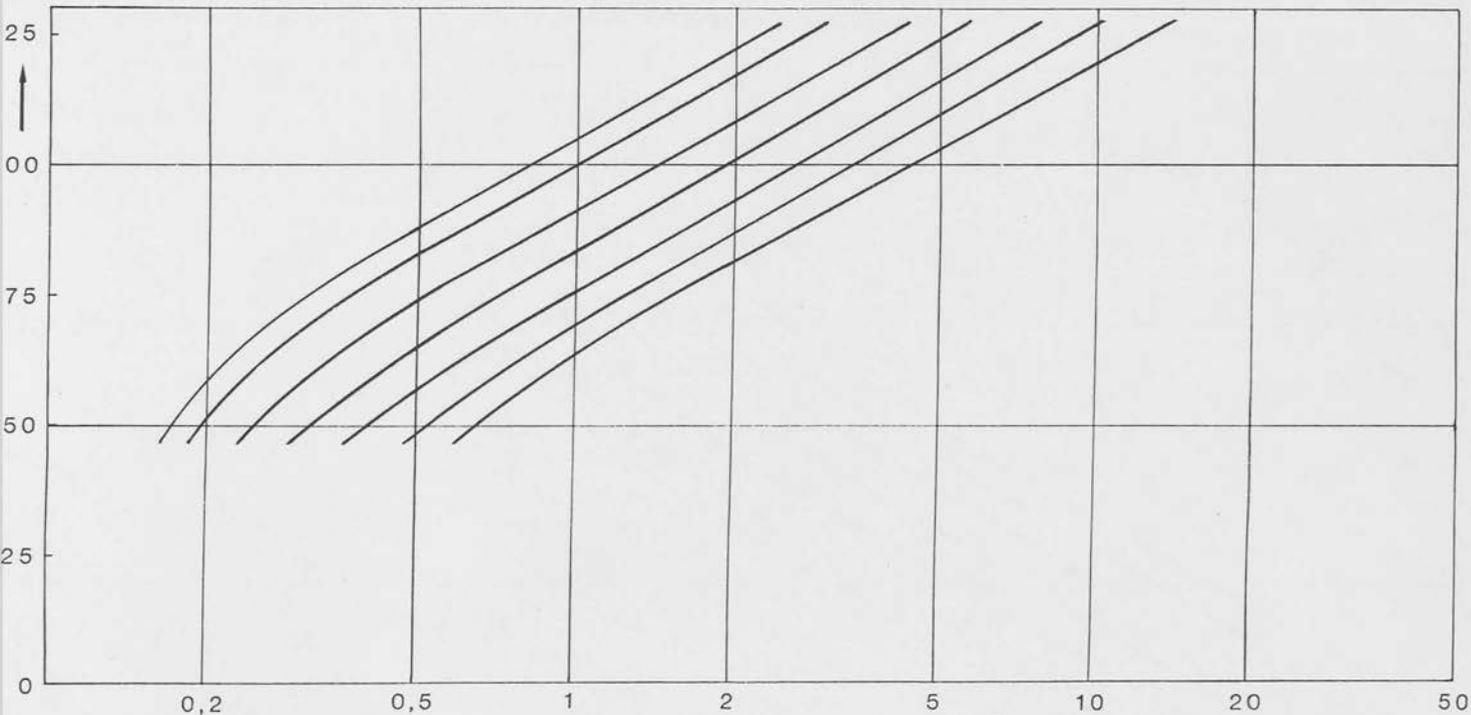


Erkennbarkeitsweite S eines Markierungsstreifens der Abmessung $0,15 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ in Abhängigkeit vom Kontrast k . Parameter: Leuchtdichtekoeffizient der Fahrbahn R_{LF} (von rechts nach links 5, 7, 10, 15, 20, 30, 40 mcd/m²·lx)

→ k

Fahrlicht, ideale Sichtbedingungen

S (m)



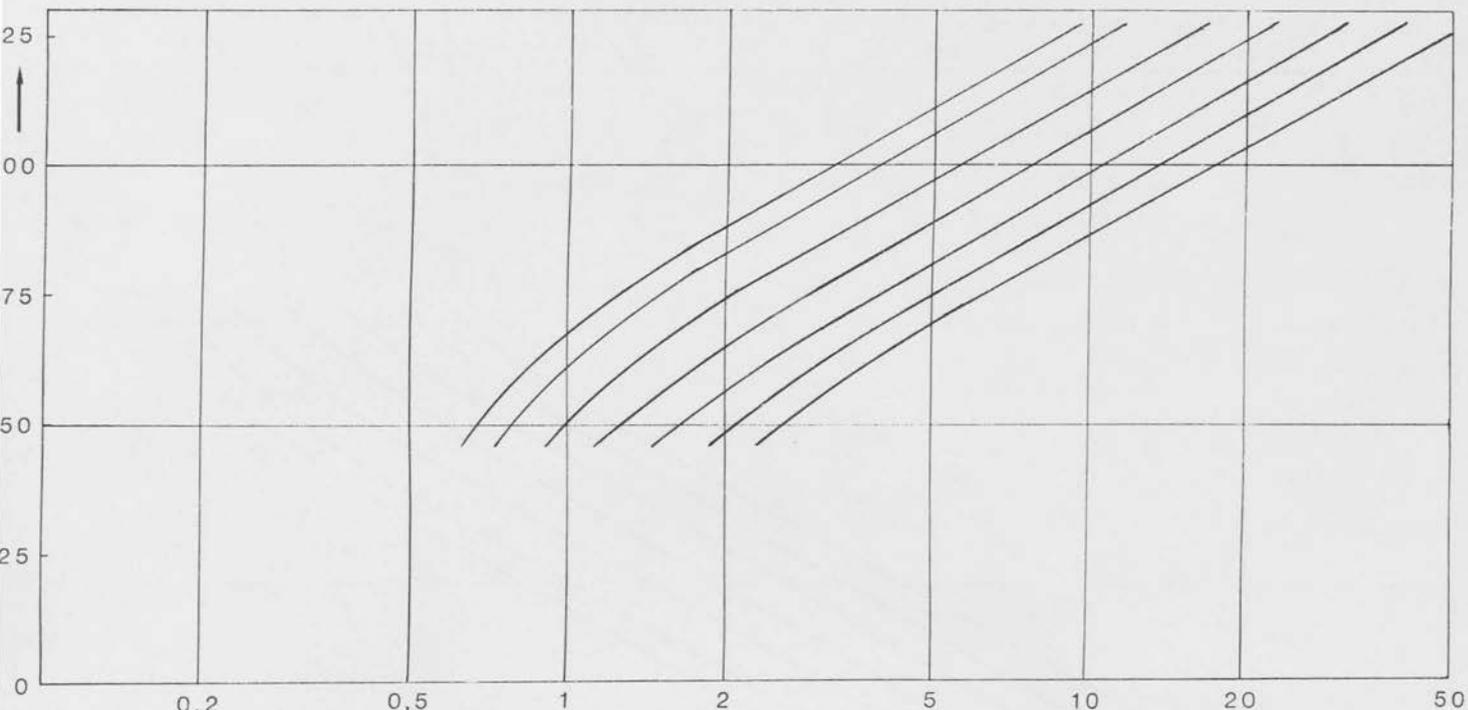
Erkennbarkeitsweite S eines Markierungsstreifens der Abmessung 0,30 m x 6 m
 in Abhängigkeit vom Kontrast k. Parameter: Leuchtdichtekoeffizient der
 Fahrbahn R_{LF} (von rechts nach links 5, 7, 10, 15, 20, 30, 40 $\text{mcd/m}^2 \cdot \text{lx}$)

→ k

BAST V 3.3m 06/85

Fahrlicht, erschwerte Sichtbedingungen

S (m)

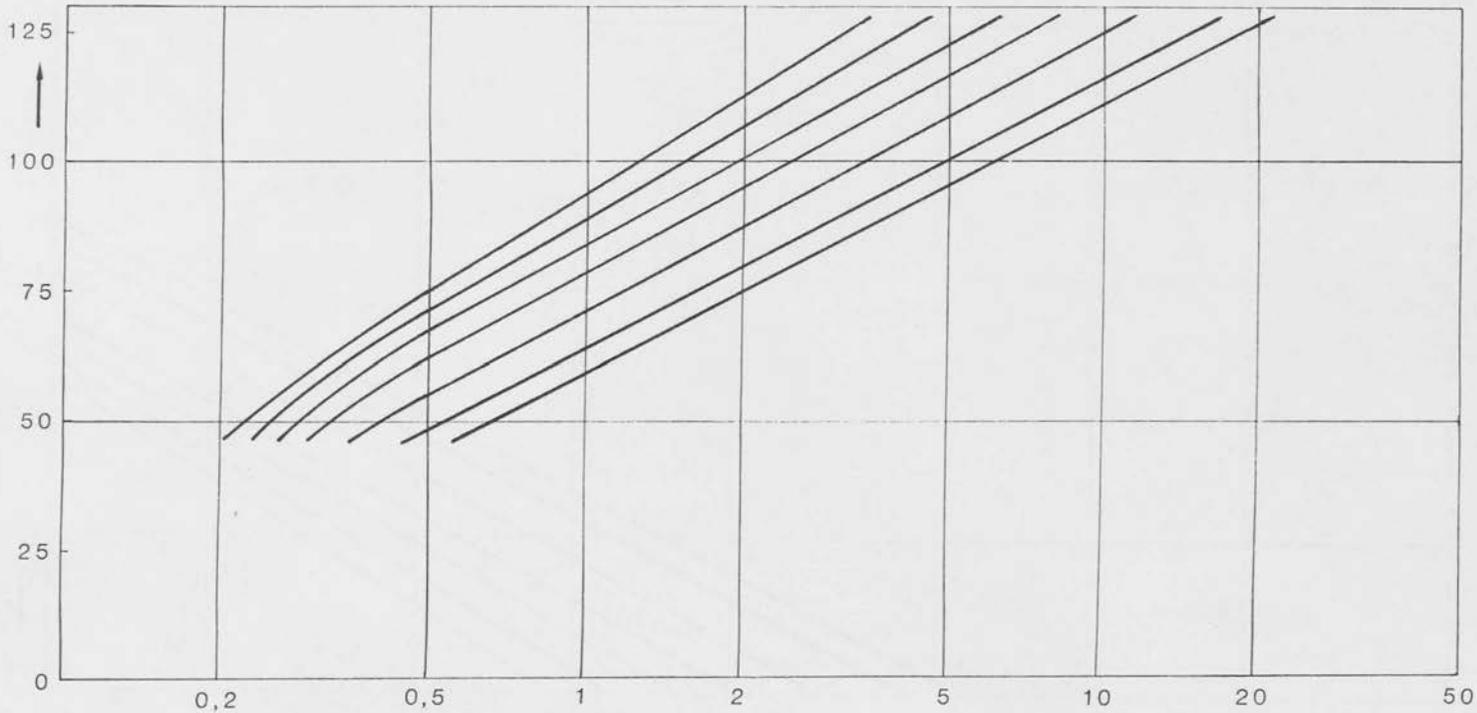


Erkennbarkeitsweite S eines Markierungsstreifens der Abmessung $0,30 \text{ m} \times 6 \text{ m}$
 in Abhängigkeit vom Kontrast k . Parameter: Leuchtdichtekoeffizient der
 Fahrbahn R_{LF} (von rechts nach links 5, 7, 10, 15, 20, 30, 40 $\text{mcd/m}^2 \cdot \text{lx}$)

→ k

Fernlicht, erschwerte Sichtbedingungen

S (m)



Erkennbarkeitsweite S eines Markierungsstreifens der Abmessung 0,30 m x 6 m in Abhängigkeit vom Kontrast k. Parameter: Leuchtdichtekoeffizient der Fahrbahn R_{LF} (von rechts nach links 5, 7, 10, 15, 20, 30, 40 $\text{mcd/m}^2 \cdot \text{lx}$)

→ k