



Wasserstraßen- und
Schifffahrtsverwaltung
des Bundes

**Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt
- Unterabteilung Verkehrstechnik -**

TFV-03

Tragweiten und Lichtstärken von Feuern und Signallichtern

Version 1.02

Stand: 08.02.2023

Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt
- Unterabteilung Verkehrstechnik -
Am Propsthof 51
53121 Bonn

Telefon +49 (0)228 7090 0
E-Mail: gdws@wsv.bund.de

Technische Forderungen, Visuell, Nr. 3 (TFV-03)
Tragweiten und Lichtstärken von Feuern und Signallichtern

Version	Datum	Geänderte Kapitel	Grund der Änderung
-	seit 1968		Ursprungsversion: Allgemeine Dienstvorschrift der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung, ADW Nr. 4521
-	seit 1985		Herausgabe als Verwaltungsvorschrift der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung, VV-WSV 2405
1.0	16.07.2018	alle	Neuherausgabe als Technische Forderung, visuell der Unterabteilung Verkehrstechnik der GDWS, vollständige Überarbeitung
1.01	09.10.2020		Fehlerkorrekturen
1.02	08.02.2023		Fehlerkorrekturen

INHALTSVERZEICHNIS

1	ANWENDUNGSGEBIET	5
2	BEGRIFFE	5
2.1	Lichtstärke	5
2.1.1	Photometrische Lichtstärke	5
2.1.2	Betriebslichtstärke	5
2.1.3	Visuell wirksame Lichtstärke, Übertragungsgrad	5
2.1.4	Visuell wirksame Betriebslichtstärke	6
2.2	Beleuchtungsstärke	6
2.3	Sichtwert und Sichtweite	6
2.3.1	Sichtwert	6
2.3.2	Bezugssichtwert / Reversichtwert	7
2.3.3	Praktische meteorologische Sichtweite	7
2.4	Beobachtungsabstände	7
2.4.1	Tragweite, parametrische Tragweite	7
2.4.2	Nenntragweite	7
2.4.3	Nutzabstände	8
3	ALLARD'SCHE FORMEL	8
4	GRENZWERTE FÜR DIE BELEUCHTUNGSSTÄRKE	9
4.1	Minimal erforderliche Beleuchtungsstärke	9
4.2	Maximal zulässige Beleuchtungsstärke	9
5	BERECHNUNGEN	10
5.1	Minimale Lichtstärke	10
5.2	Maximale Lichtstärke	10
5.3	Empfohlene Lichtstärke	10
5.4	Abweichung von berechneten Werten	11
5.5	Tragweiten	11
5.6	Nenntragweite	11
5.6.1	Nenntragweite bei Nacht	11
5.6.2	Nenntragweite bei Tag	11
6	TRAGWEITENDIAGRAMME (PARAMETRISCHE TRAGWEITE)	13
6.1	Nacht, alle Feuer außer Richtfeuer, auch zur Bestimmung der Nenntragweite	13
6.2	Nacht, Richtfeuer im Nutzbereich, nicht zur Bestimmung der Nenntragweite	14
6.3	Tag, alle Feuer, auch zur Bestimmung der Nenntragweite	15
7	ANHANG UND ERGÄNZUNGEN	16
7.1	Bezugssichtwerte	16

7.1.1	Revierbezogene Sichtwerte.....	16
7.1.2	Technologische Grenzen	16
7.1.3	Typische Lichtstärken für Feuer mit Berechnungsgrundlage $E_{min} = 2 \cdot 10^{-7} lx$	17
7.1.4	Typische Lichtstärken für Feuer mit Berechnungsgrundlage $E_{min} = 1 \cdot 10^{-6} lx$	18
7.2	Geographische Sichtweite	19
7.3	Vertikale Streuwinkel der Lichtstärkeverteilung	20
7.4	Konkurrierende Lichter und Hintergrundaufhellung	21
7.4.1	Konkurrierende Lichter (Lichtpunkte).....	21
7.4.2	Hintergrundaufhellung (diffus)	22
7.5	Tragweiten am Tage (informativ)	23
7.6	Übersicht der Berechnungsverfahren (informativ)	24
7.6.1	Berechnung der minimalen photometrischen Lichtstärke	26
7.6.2	Berechnung der maximalen photometrischen Lichtstärke	26
7.6.3	Berechnung der parametrischen Tragweite.....	26
7.6.4	Berechnung der Nenntragweite	26
8	CHARAKTERISIERUNG VON SICHTWEITEN	27
9	FORMELZEICHEN.....	28
10	REFERENZEN	29

Das Verhältnis zwischen der visuell wirksamen Lichtstärke I_{eff} und dem zeitlichen Maximum der photometrischen Lichtstärke $\max_t I_{ph}(t)$ heißt Übertragungsgrad:

$$k = \frac{I_{eff}}{\max_t I_{ph}(t)} \quad (2).$$

Bei kontinuierlich brennenden Feuern gilt $k = 1$. Bei getakteten Feuern ist das Verfahren „Modified Allard“ zu verwenden [4].

Für Feuer, deren Leuchtmittel (LED) schnell schalten (Schaltzeit $< 0,1$ s), gilt mit ausreichender Genauigkeit:

$$k = \frac{T_{min}}{T_{min} + T_C} \quad (3)$$

mit T_{min} kürzeste Hellzeit einer Taktfolge und $T_C = 0,1$ s.

Beispiel:

Taktfolge: [1 s hell] – [2 s dunkel] – [0,5 s hell] – [4 s dunkel]

kürzeste Hellzeit: $T_{min} = 0,5$ s

Übertragungsgrad: $k = \frac{0,5 \text{ s}}{0,5 \text{ s} + 0,1 \text{ s}} = \frac{0,5}{0,6} = 0,833$

2.1.4 Visuell wirksame Betriebslichtstärke

Die einem Feuer zugeordnete Lichtstärke berücksichtigt sowohl die Trägheit des Auges als auch die Lichtverluste im Betrieb und heißt visuell wirksame Betriebslichtstärke $I_{eff,B}$.

Sie ergibt sich rechnerisch aus der photometrischen Lichtstärke zu:

$$I_{eff,B} = b * I_{eff} = b * k * \max_t I_{ph}(t) \quad (4).$$

Für die Berechnung von Tragweiten ist die visuell wirksame Betriebslichtstärke zu verwenden.

2.2 Beleuchtungsstärke

Die von einem Beobachter wahrgenommene Helligkeit eines Feuers wird durch die Beleuchtungsstärke beschrieben [1][3].

Beleuchtungsstärke E Einheit: Lux [lx]

Die Beleuchtungsstärke am Beobachteraue ist abhängig von der Lichtstärke des Feuers, dem Abstand sowie von den atmosphärischen Sichtbedingungen (z.B. Nebel, Dunst).

Zur Berechnung der benötigten Lichtstärke eines Feuers ist die Festlegung einer minimalen Beleuchtungsstärke am Beobachteraue erforderlich.

2.3 Sichtwert und Sichtweite

2.3.1 Sichtwert

Der Sichtwert T_M beschreibt die Sichtbedingungen in der Atmosphäre. Er ist definiert als das Verhältnis der Beleuchtungsstärken $E_A(D_U)$ und $E_O(D_U)$ bei dem Bezugsabstand $D_U = 1852 \text{ m} = 1 \text{ M}$ (eine Seemeile).

$$T_M := \frac{E_A(D_U)}{E_O(D_U)} \quad (5)$$

$E_A(D_U)$: Die bei getrübter Atmosphäre von einem Feuer im Abstand D_U auf einer Ebene senkrecht zur Ausstrahlungsrichtung erzeugte Beleuchtungsstärke.

$E_O(D_U)$: Die für ungetrübte Atmosphäre und für sonst gleiche Verhältnisse aus der Lichtstärke nach dem photometrischen Abstandsgesetz berechnete Beleuchtungsstärke.

D_U : Bezugsabstand, der Sichtwert ist immer bezogen auf 1 Seemeile ($D_U = 1M = 1852 m$).

2.3.2 Bezugssichtwert / Reviersichtwert

Der Bezugssichtwert $T_{M,B}$ ist der Sichtwert, für den ein Feuer unter Berücksichtigung der regionalen Verhältnisse und nautischen Vorgaben ausgelegt wird. Wird für ein größeres Gebiet mit mehreren Feuern der gleiche Bezugssichtwert verwendet, so wird dieser Reviersichtwert genannt.

2.3.3 Praktische meteorologische Sichtweite

Eine Alternative zum Sichtwert ist die Angabe der praktischen meteorologischen Sichtweite V .

Diese ist definiert als:

$$V = \frac{\lg(0.05)}{\lg(T_M)} * D_U \quad (6)$$

mit $D_U = 1852 m = 1 M$

(lg: Dekadischer Logarithmus)

Bemerkungen:

- Die praktische meteorologische Sichtweite beschreibt den Zustand der Trübung der Atmosphäre und kann durch Beobachtung abgeschätzt werden. Sie beschreibt nicht die Sichtbarkeit von beliebigen Einzelobjekten. Die Sichtbarkeit von Objekten hängt z.B. zusätzlich von der Größe, Farbe und der Leuchtdichte ab. Für die meteorologische Sichtweite werden ein ausreichender Sehwinkel und eine sehr geringe Leuchtdichte $L_{Obj} \approx 0$ für das Objekt angenommen.
- Die Definition gilt nur für Tagbeobachtung. Es existiert die Definition einer so genannten meteorologischen optischen Sichtweite für Nachtbeobachtung, die aber zur Tragweitenberechnung generell nicht verwendet wird. Im Allgemeinen wird vorausgesetzt, dass die praktische meteorologische und die meteorologische optische Sichtweite annähernd gleich sind.

2.4 Beobachtungsabstände

2.4.1 Tragweite, parametrische Tragweite

Die Tragweite eines Feuers ist der Abstand D , in dem das vom Feuer in die Beobachtungsrichtung ausgestrahlte Licht, bei der jeweils vorhandenen Lichtdurchlässigkeit der Atmosphäre T_M , eine definierte Beleuchtungsstärke E_{min} am Beobachteraue erzeugt [1]. Um die Abhängigkeit der Tragweite von den Parametern zu verdeutlichen wird hier auch der Begriff „parametrische Tragweite“ $D_P = D(E_{min}, T_M)$ verwendet.

2.4.2 Nenntragweite

Die Nenntragweite D_N (Nacht) bzw. D_T (Tag) eines Feuers ist die Tragweite, die sich unter der Voraussetzung einer homogen getrübten Atmosphäre bei dem Sichtwert $T_{M,N} =$

0,7411 (Sichtweite $V = 10 M$) und einer minimalen Beleuchtungsstärke von $E_{min} = 2 * 10^{-7} lx$ (Nacht) bzw. $E_{min} = 10^{-3} lx$ (Tag) ergibt [1].

Für die Angabe von Tragweiten im Leuchtfeuerverzeichnis und in Seekarten wird ausschließlich die Nenntagweite (jeweils für Nacht oder Tag) verwendet.

Die Nenntagweite eines Feuers ist von historischer Bedeutung, da weder Hintergrundaufhellung noch Bezugssichtwert berücksichtigt werden. Sie dient der Schiffsführung zur Einschätzung der Sichtbarkeit von Feuern bei bekannter meteorologischer Sichtweite.

Die Nenntagweite ist in der Regel größer als die nautisch nutzbare Tragweite. Die Nenntagweite wird nicht zur Berechnung von erforderlichen Lichtstärken genutzt.

2.4.3 Nutzabstände

Ein Feuer wird häufig in unterschiedlichen horizontalen Sektoren genutzt (Abbildung 1). Der tatsächlich genutzte Bereich innerhalb eines Sektors wird durch den maximalen (D_{max}) und minimalen (D_{min}) Nutzabstand beschrieben, in dem das Feuer nautisch wirksam sein soll.

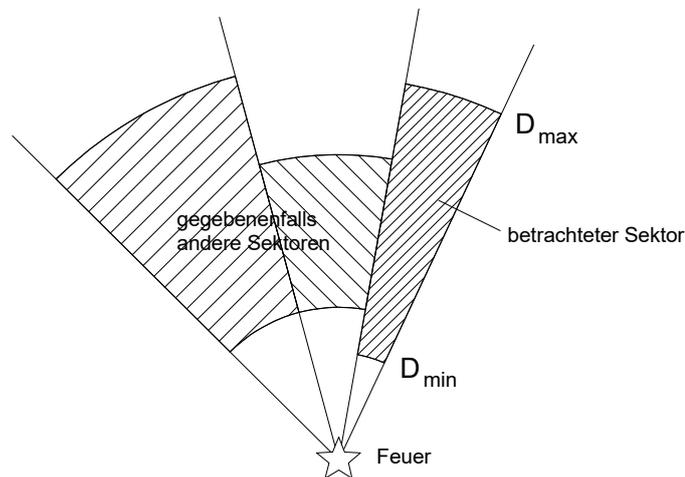


Abbildung 1: Betrachteter Sektor eines Feuers

Ein Feuer kann mehrere Sektoren mit unterschiedlichen Nutzabständen haben, sodass hierfür auch unterschiedliche Lichtstärken notwendig sind.

3 Allard'sche Formel

Eine Leuchte mit der Lichtstärke I_0 erzeugt in einem bestimmten Abstand d in einer Ebene senkrecht zur Ausstrahlungsrichtung eine Beleuchtungsstärke $E(d)$. Diese Beleuchtungsstärke berechnet sich nach folgender Gleichung (Allard'sche Formel [1][3]):

$$E(d) = I_0 * \frac{e^{-z*d}}{d^2} \quad (7)$$

I_0 Lichtstärke der Leuchte

d Abstand zwischen Leuchte und Mess- bzw. Beobachtungspunkt

z Schwächungskoeffizient (beschreibt Trübung der Atmosphäre)

$E(d)$ Beleuchtungsstärke in der Bezugsebene

Die Allard'sche Formel wird in der Regel mit dem Sichtwert T_M (siehe 2.3.3) ausgedrückt. Zwischen dem Schwächungskoeffizient z und dem Sichtwert T_M gilt folgende Beziehung.

$$T_M = e^{-D_U * z} \quad (8)$$

mit $D_U = 1852 \text{ m} = 1M$ (Konstante)

Benutzt man den Sichtwert T_M in der Allard'schen Formel, so ist:

$$E(d) = I_0 * \frac{T_M^{\frac{d}{D_U}}}{d^2} \quad (9)$$

mit $D_U = 1852 \text{ m} = 1M$ (Konstante)

Hierbei ist d in m und I_0 in cd einzugeben. Man erhält den Wert der Beleuchtungsstärke in lx .

4 Grenzwerte für die Beleuchtungsstärke

4.1 Minimal erforderliche Beleuchtungsstärke

Ein Feuer gilt dann als ausreichend dimensioniert, wenn es bei dem Bezugssichtwert T_M und dem maximalen Nutzabstand D_{max} eine definierte Beleuchtungsstärke E_{min} erreicht und keine konkurrierenden Lichter oder Hintergrundaufhellung (Abschnitt 7.4) festgestellt werden, welche die nautische Nutzbarkeit einschränken.

Es gelten die folgenden minimal erforderlichen Beleuchtungsstärken E_{min} :

(I) für alle Leuchtfeuer außer Richtfeuer bei Nacht

$$E_{min} = 2 * 10^{-7} lx \quad (10)$$

(II) für Richtfeuer bei Nacht

$$E_{min} = 10^{-6} lx \quad (11)$$

(III) für Leuchtfeuer bei Tag

$$E_{min} = 10^{-3} lx \quad (12)$$

Bemerkung:

Es empfiehlt sich bei Hintergrundaufhellung im Umfeld des Leuchtfeuers höhere Beleuchtungsstärken für E_{min} festzulegen. Dies erfolgt mit den Mitteln aus Abschnitt 7.4.

4.2 Maximal zulässige Beleuchtungsstärke

Ein Feuer gilt dann als „durch Blendung störend“, wenn es bei dem Sichtwert $T_M = 1$ (beste Sichtbedingungen) und dem minimalen Nutzabstand D_{min} eine definierte Beleuchtungsstärke E_{max} überschreitet. Es wird nur die Blendung in der Nacht berücksichtigt.

Es gelten die folgenden maximal zulässigen Beleuchtungsstärken E_{max} :

(I) für sehr dunkle Umgebung

$$E_{max} = 0,01 lx \quad (13)$$

(II) für hellere Umgebung

$$E_{max} = 0,1 \text{ lx} \quad (14)$$

5 Berechnungen

5.1 Minimale Lichtstärke

Die minimal erforderliche Lichtstärke $I_{eff,B,min}$ eines Feuers soll sicherstellen, dass bei der Bezugssichtweite $T_{M,B}$ und dem maximalen Nutzabstand D_{max} die minimal erforderliche Beleuchtungsstärke E_{min} erreicht wird. Sie berechnet sich zu:

$$I_{eff,B,min} = D_{max}^2 * E_{min} * T_{M,B} \frac{D_{max}}{D_U} \quad (15)$$

mit $D_U = 1852 \text{ m} = 1 \text{ M}$

Hierbei handelt es sich um den Minimalwert für die effektive Betriebslichtstärke.

Der Minimalwert für die photometrische Lichtstärke ergibt sich dann zu:

$$I_{ph,min} = \frac{1}{k*b} * I_{eff,B,min} \quad (16)$$

mit k Übertragungsgrad (siehe 2.1.3) und $b = 0,75$ Betriebsfaktor (siehe 2.1.2)

5.2 Maximale Lichtstärke

Der Maximalwert der Lichtstärke $I_{eff,max}$ soll Blendung im Nahbereich (D_{min}) bei guten Sichtbedingungen (D_{min}) vermeiden. Zur Worst-Case-Betrachtung wird davon ausgegangen, dass die Leuchte im Neuzustand ist, der Betriebsfaktor (Lichtschwächung) wird daher nicht einberechnet.

$$I_{eff,max} = D_{min}^2 * E_{max} \quad (17)$$

mit $D_U = 1852 \text{ m} = 1 \text{ M}$.

Der Maximalwert für die photometrische Lichtstärke ist dann:

$$I_{ph,max} = \frac{1}{k} * I_{eff,max} \quad (18)$$

mit k Übertragungsgrad (siehe 2.1.3)

5.3 Empfohlene Lichtstärke

Durch die vorstehenden Berechnungen ergibt sich in der Regel ein großes Intervall für die zulässige Lichtstärke. In vielen Fällen gilt sogar: $I_{ph,max} > 10 * I_{ph,min}$.

Bei der Suche nach geeigneten Leuchten sollte die Lichtstärke weiter eingeschränkt werden. Dies kann durch die Festlegung einer empfohlenen Lichtstärke erreicht werden. Dabei soll berücksichtigt werden, dass die eingesetzte Technik meistens günstiger in der Beschaffung und im Betrieb ist, wenn geringere Lichtstärken realisiert werden. Außerdem sollte die Lichtimmission - unter Voraussetzung, dass die nautisch-funktionalen Anforderungen erfüllt sind - geringgehalten werden.

Aus vorgenannten Gründen bietet es sich an, die empfohlene Lichtstärke an die minimale Lichtstärke zu binden. Die empfohlene Lichtstärke soll 20 % höher als die minimale Lichtstärke sein:

$$I_{eff,B,empf} = 1,2 * I_{eff,B,min} \quad (19)$$

bzw.

$$I_{ph,empf} = 1,2 * I_{ph,min} \quad (20)$$

Die empfohlene Lichtstärke ist bei der Suche nach geeigneten Leuchten zu verwenden.

Grundsätzlich kann der Fall auftreten, dass die berechnete minimal erforderliche Lichtstärke größer ist als die maximal zulässige. Hierfür kann kein allgemein gültiges Verfahren zur Lösung des Problems angegeben werden. Es sind Einzelfallentscheidungen zu treffen oder eine andere Position des Feuers in Erwägung zu ziehen.

5.4 Abweichung von berechneten Werten

Grundsätzlich können auf Grund abweichender nautisch-funktionaler Anforderungen oder technologischer Grenzen andere Lichtstärken zur Anwendung kommen. Die Notwendigkeit hierzu ist in der leuchtfeuertechnischen Berechnung zu dokumentieren.

5.5 Tragweiten

Die Tragweite D eines Feuers berechnet sich aus der visuell wirksamen Lichtstärke $I_{eff,B,Leuch}$, dem Sichtwert $T_{M,B}$ und der minimal erforderlichen Beleuchtungsstärke E_{min} nach folgender Gleichung:

$$D^2 * E_{min} = I_{eff,B,Leuchte} * T_{M,B}^{D/D_U} \quad (21)$$

mit $D_U = 1852 \text{ m} = 1 \text{ M}$

Da die Zielgröße D auf beiden Seiten der Gleichung steht und nicht auflösbar ist, erfolgt die Lösung durch iterative Verfahren. Alternativ kann die Tragweite aus den Diagrammen in Abschnitt 6 herausgelesen werden.

5.6 Nenntragweite

Jedes Feuer bzw. jeder Sektor eines Feuers wird zusätzlich mit der so genannten Nenntragweite charakterisiert. Die Nenntragweite ist sowohl für Nacht- als auch für Tagesfeuer nachstehend definiert. Die Bemerkungen zur Berechnung aus 5.5 gelten für die Nenntragweite ebenfalls.

5.6.1 Nenntragweite bei Nacht

Die Nenntragweite D_N eines Feuers bei Nacht ist die Tragweite eines Feuers für die Beleuchtungsstärke $E_{min} = 2 * 10^{-7} \text{ lx}$ und dem Sichtwert $T_{M,N} = 0,7411$.

Die Nenntragweite D_N eines Feuers berechnet sich aus der Lichtstärke $I_{eff,B,Leuch}$ nach folgender Gleichung:

$$D_N^2 * E_{min} = I_{eff,B,Leuch} * T_{M,N}^{D_N/D_U} \quad (22)$$

mit $D_U = 1852 \text{ m} = 1 \text{ M}$, $E_{min} = 2 * 10^{-7} \text{ lx}$ und $T_{M,N} = 0,7411$.

5.6.2 Nenntragweite bei Tag

Die Nenntragweite D_T eines Feuers bei Tag ist die Tragweite eines Feuers für die Beleuchtungsstärke $E_{min} = 10^{-3} \text{ lx}$ und dem Sichtwert $T_{M,N} = 0,7411$.

Die Nenntragweite D_T eines Feuers berechnet sich aus der Lichtstärke $I_{eff,B,Leuch}$ nach folgender Gleichung:

$$D_T^2 * E_{min} = I_{eff,B,Leuchte} * T_{M,N}^{D_T/D_U} \quad (23)$$

mit $D_U = 1852 \text{ m} = 1 \text{ M}$, $E_{min} = 10^{-3} \text{ lx}$ und $T_{M,N} = 0,7411$.

6 Tragweitendiagramme (parametrische Tragweite)

6.1 Nacht, alle Feuer außer Richtfeuer, auch zur Bestimmung der Nenntagweite

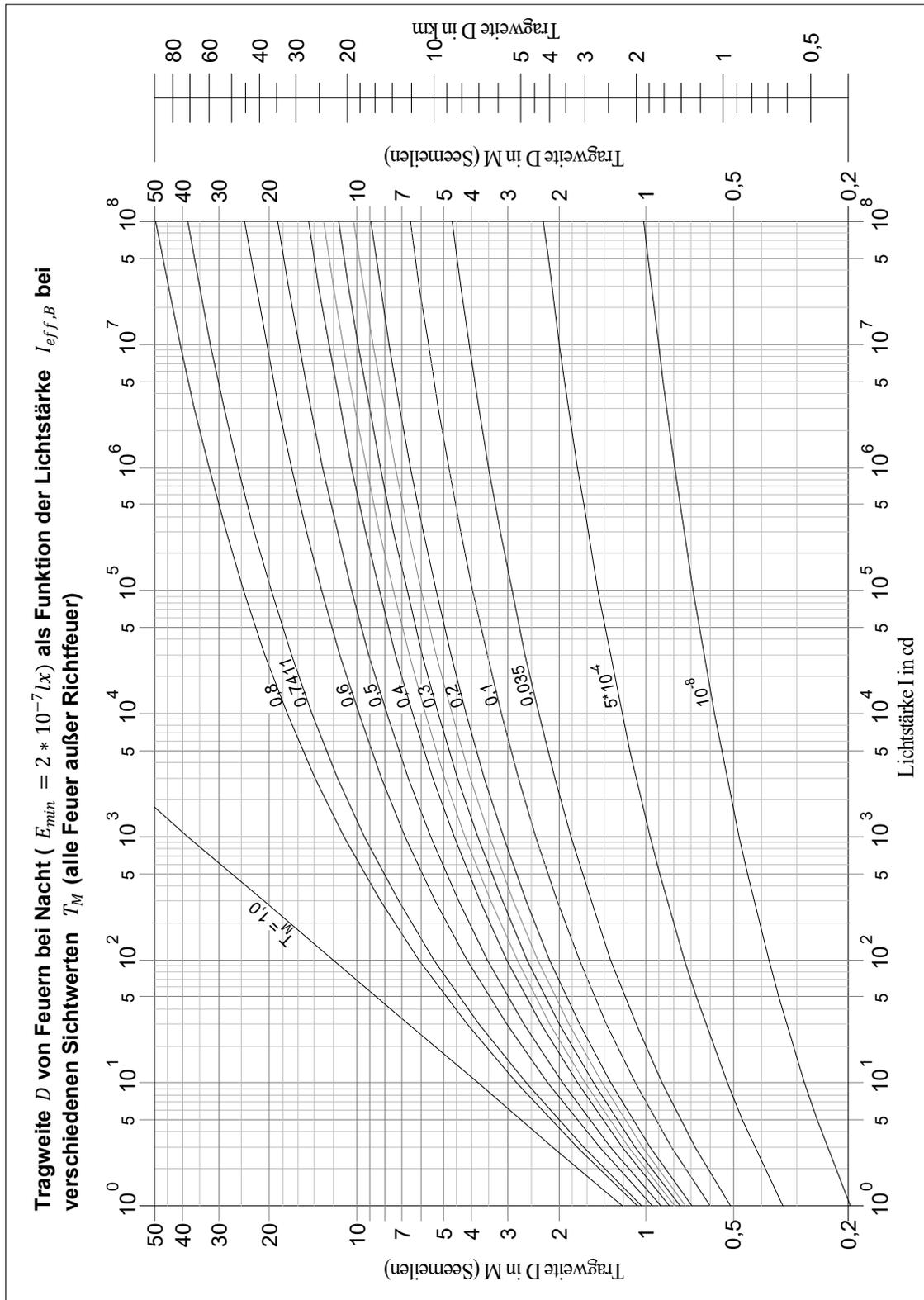


Abbildung 2: Tragweitendiagramm für $E_{min} = 2 * 10^{-7} lx$

6.2 Nacht, Richtfeuer im Nutzbereich, nicht zur Bestimmung der Nenntragweite

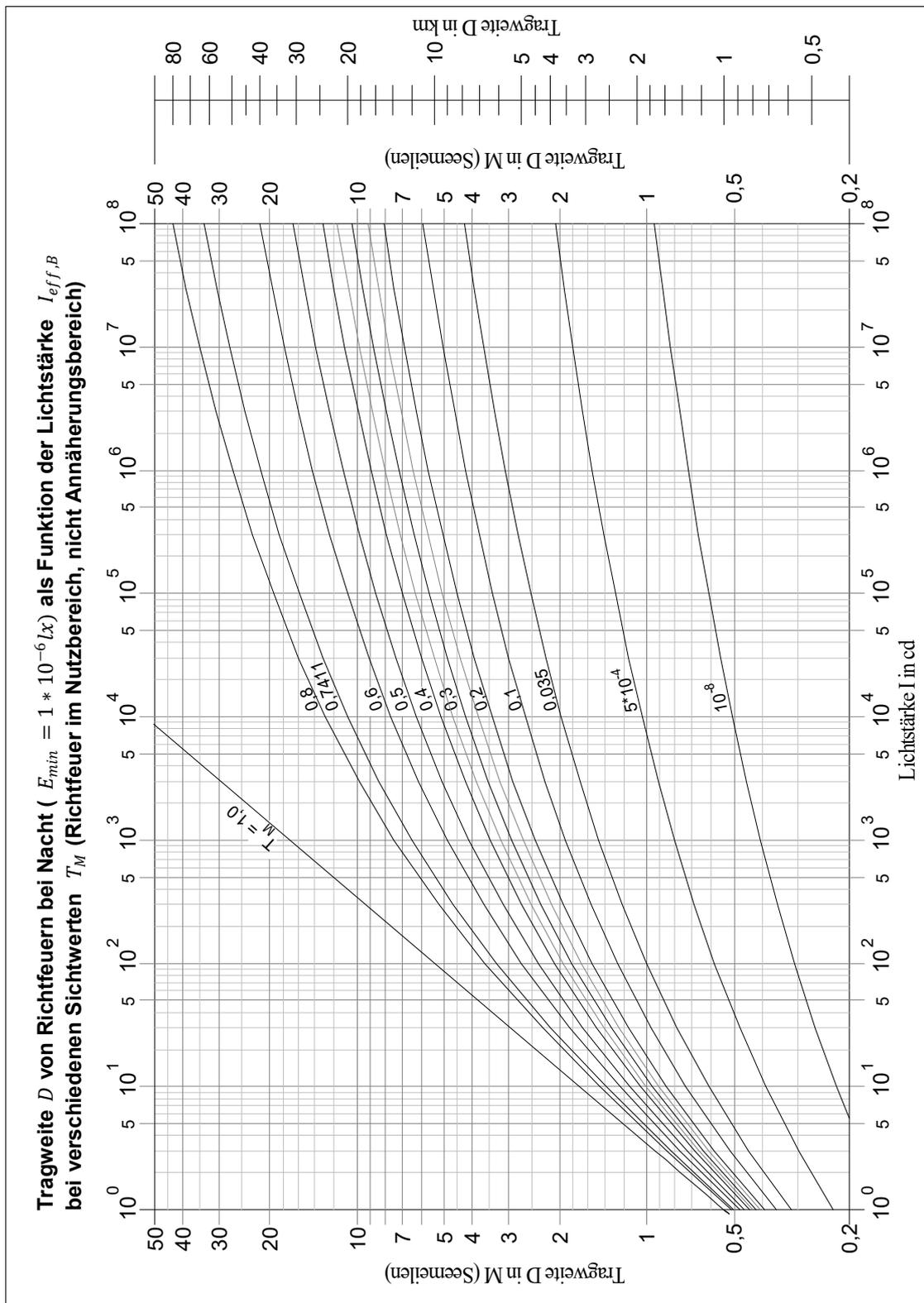


Abbildung 3: Tragweitendiagramm für $E_{min} = 10^{-6} lx$

Bemerkung: Die Nenntragweite eines Richtfeuers wird mit der Abbildung aus 6.1 ($E_{min} = 2 \cdot 10^{-7} lx$) ermittelt.

6.3 Tag, alle Feuer, auch zur Bestimmung der Nenntagweite

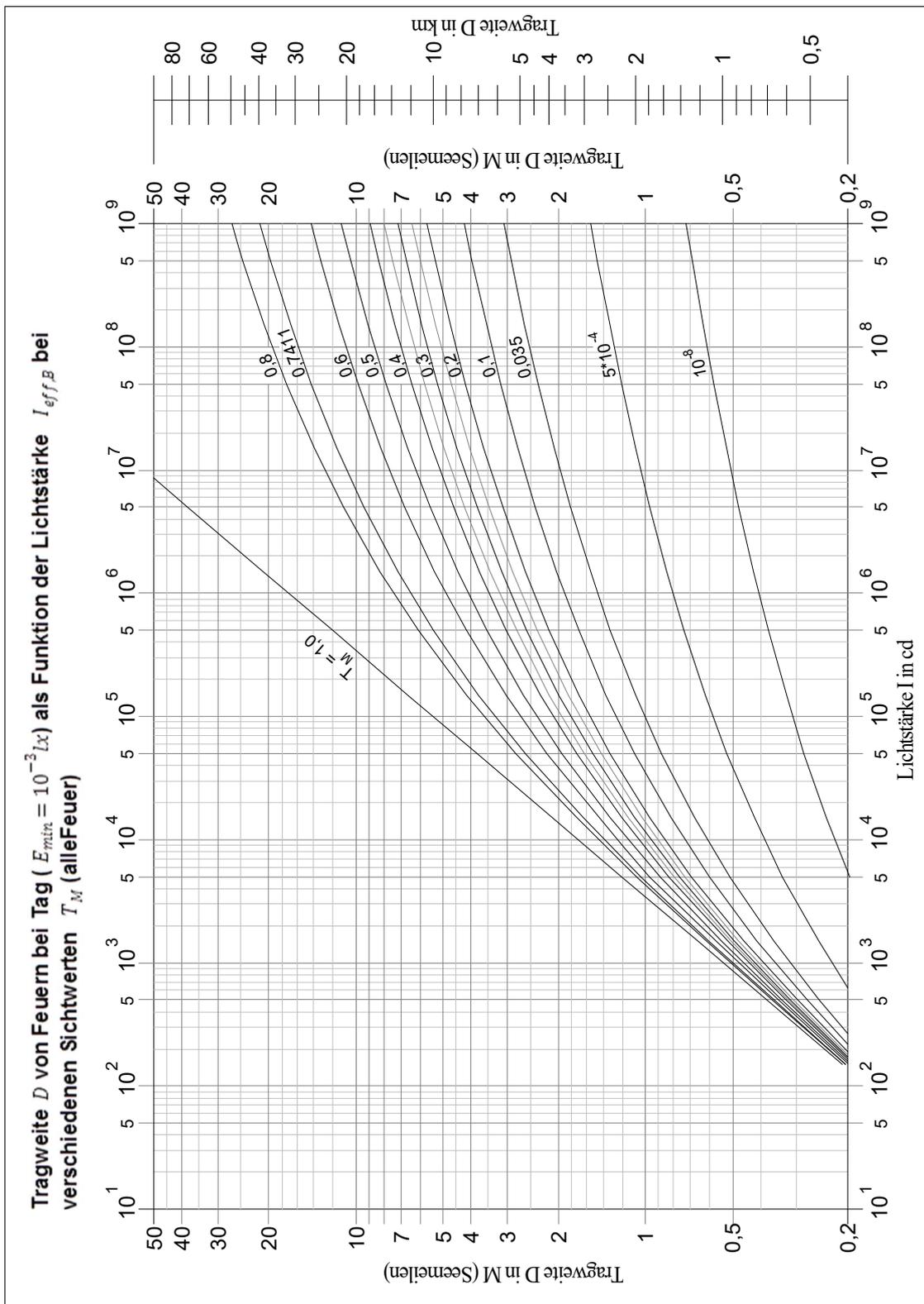


Abbildung 4: Tragweite für $E_{min} = 10^{-3} lx$

7 Anhang und Ergänzungen

7.1 Bezugswert

Der gewählte Bezugswert $T_{M,B}$ für die Berechnung hat einen starken Einfluss auf die ermittelten Lichtstärken, da kleine Änderungen im Sichtwert die Lichtstärke um Faktoren erhöhen können.

7.1.1 Revierbezogene Sichtwerte

In der Vergangenheit wurden die Bezugswerte revierbezogen festgelegt und es kam in der WSV ein Intervall $0,25 \leq T_{M,B} \leq 0,5$ zur Anwendung. Im Rahmen einer Fortschreibung der entsprechenden Fachkonzepte ist eine Vereinheitlichung der Sichtwerte angestrebt.

Folgende revierbezogene Sichtwerte wurden verwendet:

Reviere / Bereiche	Sichtwert $T_{M,B}$
Bremen	0,3
Bremerhaven	0,3
Brunsbüttel	0,35
Cuxhaven	0,35
Emden	0,5
Hamburg	0,25 (*)
Kiel-Holtenau	0,4
Lübeck	0,4
Stralsund (Außenbereich)	0,4
Stralsund (Boddengewässer)	0,3
Tönning	0,4
Wilhelmshaven	0,4

(*) Aktuelle Planungen basieren auf $T_{M,B} = 0,35$.

Grundsätzlich sollte sich eine Neuberechnung von Feuern an den vorhandenen Berechnungen orientieren. Dies bedeutet, dass man im ersten Ansatz die bestehenden revierbezogenen Sichtwerte übernimmt.

7.1.2 Technologische Grenzen

Zu beachten ist, dass es für die maximal erreichbare Lichtstärke technologische Grenzen gibt. Daraus folgt, dass für bestimmte Nutzabstände die Nutzbarkeit für kleine Bezugswerte aus technischen Gründen nicht verwirklicht werden kann.

In diesen Fällen sind ein anderer Standort für das Feuer oder alternative Navigationshilfen (z.B. Betonung) zur Bezeichnung der Wasserstraße in Erwägung zu ziehen.

Eine Abschätzung der technologischen Grenzen ist in den beiden nachstehenden Abschnitten dargestellt. Die angegebenen Lichtstärkegrenzen sind nur grobe Schätzungen und müssen im konkreten Fall anhand von Produktdatenblättern passender Leuchten verifiziert werden.

7.1.3 Typische Lichtstärken für Feuer mit Berechnungsgrundlage $E_{min} = 2 * 10^{-7} lx$

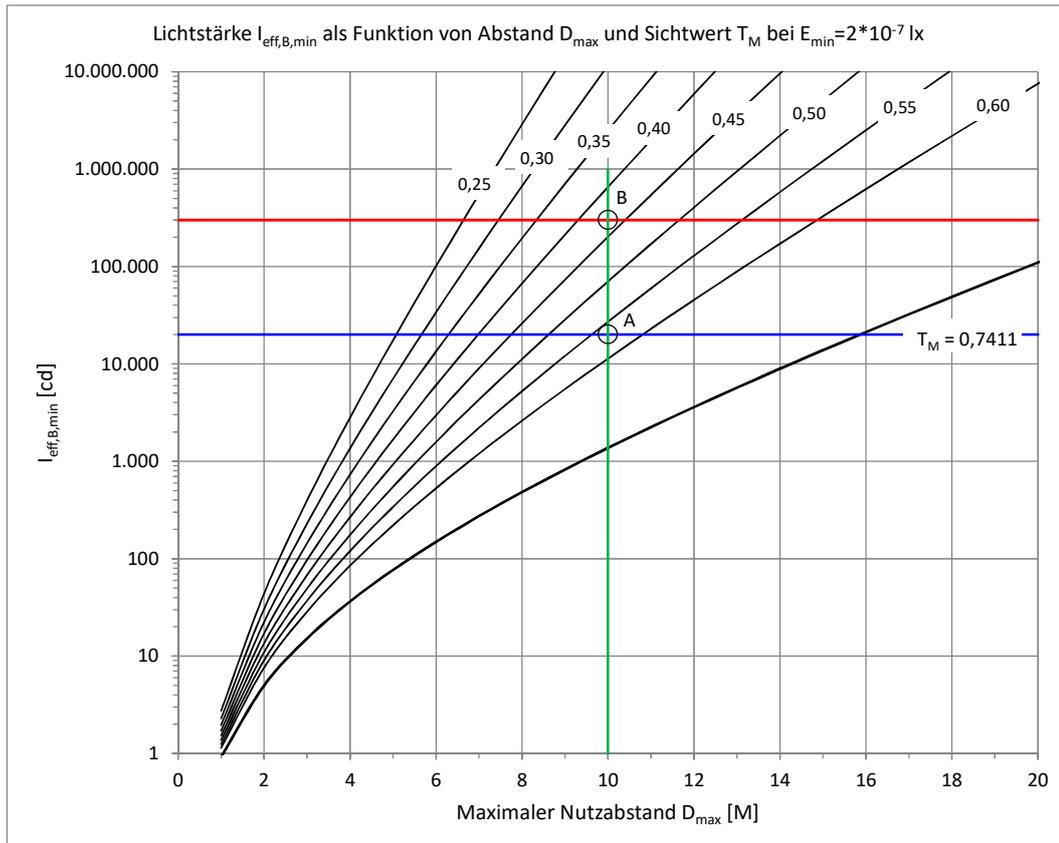


Abbildung 5: Erforderliche Lichtstärke bei $E_{min} = 2 * 10^{-7} lx$ (alle Feuer außer Richtfeuer)

Durch marktübliche Leuchten sind folgende effektive Betriebslichtstärken darstellbar (grobe Schätzung):

- Drehfeuer und Projektoren (Sektorenfeuer mit horizontalen Abstrahlwinkeln bis zu 10°): ca. 300 000 cd
- Sektorenfeuer als Gürtelanordnung mit horizontalen Abstrahlwinkeln bis zu 360° : ca. 20 000 cd

Die Lichtstärke kann durch Sonderkonstruktionen in einigen Fällen erhöht werden.

Zahlenbeispiele:

Maximaler Nutzabstand $D_{max} = 10 M$

Für Sektorenfeuer als Gürtelanordnung (20 000 cd) kann der Nutzabstand von 10 Seemeilen nur bis zu einem Sichtwert von minimal $T_M = 0,57$ ausreichend ausgeleuchtet werden (Diagramm, Punkt A).

Der maximale Nutzabstand von 10 Seemeilen wird mit Projektoren (300 000 cd) bis zu einem Sichtwert von minimal $T_M = 0,43$ ausreichend ausgeleuchtet (Diagramm, Punkt B).

7.1.4 Typische Lichtstärken für Feuer mit Berechnungsgrundlage $E_{min} = 1 * 10^{-6} lx$

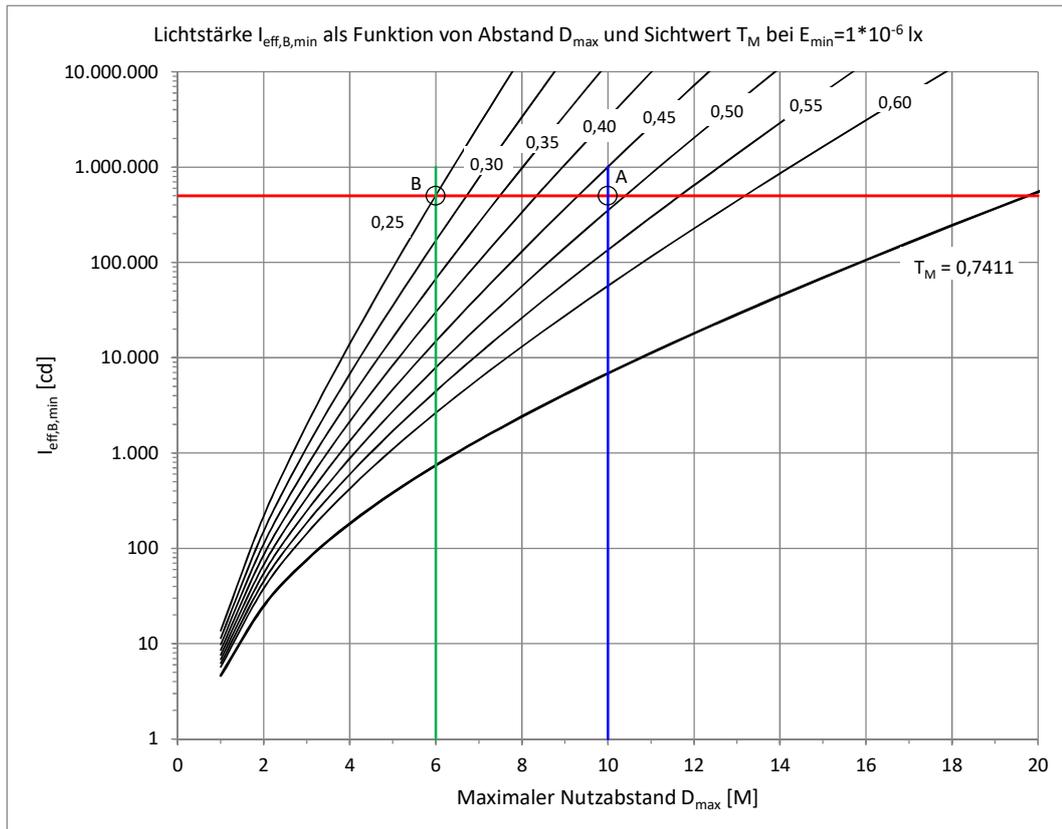


Abbildung 6: Erforderliche Lichtstärke bei $E_{min} = 1 * 10^{-6} lx$ (Richtfeuer)

Mit marktüblichen Leuchten können Richtfeuer bis 500 000 cd realisiert werden. Durch Mehrfachanordnungen sind auch höhere Werte realisierbar.

Zahlenbeispiele:

Richtfeuer mit 500 000 cd effektiver Betriebslichtstärke.

Der Nutzabstand von 10 Seemeilen kann bis zu einem Sichtwert $T_M = 0,48$ (Diagramm, Punkt A) ausgeleuchtet werden.

Bei kürzerem Nutzabstand (6 Seemeilen) ist auch eine Nutzung bis zu einem Sichtwert von $T_M = 0,25$ (Diagramm, Punkt B) möglich.

7.2 Geographische Sichtweite

Bei großen Beobachtungsabständen ist zusätzlich zur Tragweite auch die geographische Sichtweite s_G zu berücksichtigen.

Sie ist der größte Abstand, aus dem unter Berücksichtigung der Erdkrümmung und der Strahlenbrechung ein Feuer über dem Horizont hinweg gerade noch gesehen werden kann. Die geographische Sichtweite ist abhängig von der Erdkrümmung, der Strahlenbrechung, der Feuerhöhe H und der Augeshöhe H_B .

$$s_G = \sqrt{\frac{2R}{1 - \kappa}} * \left(\sqrt{\frac{H}{s_U}} + \sqrt{\frac{H_B}{s_U}} \right)$$

Mit $R = 6\,336\,200\text{ m}$, $\kappa = 1/7$ und der Einheitsstrecke $s_U = 1\text{ m}$ ergibt sich:

$$s_G = 3850\text{ m} * (\sqrt{H} + \sqrt{H_B})$$

Dabei müssen die Höhen H und H_B in Meter eingesetzt werden. Die Feuerhöhe H wird bezogen auf mittleres Hochwasser (MHW) oder Mittelwasser (MW), die Augeshöhe zur festgelegten Wasserlinie.

Die geographische Sichtweite s_G für die kleinste Augeshöhe H_B muss stets größer sein als der maximale Nutzabstand D_{max} .

Daraus folgt für die minimale Höhe H_{min} des Feuers über MHW oder MW:

$$H_{min} \geq \left(\frac{D_{max}}{3850\text{ m}} - \sqrt{\frac{H_B}{1\text{ m}}} \right)^2$$

Zeigt ein Feuer mehrere Sektoren mit unterschiedlichen maximalen Nutzabständen an, so ist der größte maximale Nutzabstand aller Sektoren einzusetzen.

Um die Tagessichtbarkeit eines Feuerträgers sicherzustellen, wird ein Feuer in vielen Fällen deutlich höher gesetzt, als es die Formel darstellt. Die Tagesmarke wird in der Regel unterhalb des Feuers angebracht und es muss eine gewisse Höhe und Breite für die Tagesmarke bereitgestellt werden, damit die Tagesmarke aus großen Entfernungen sichtbar ist.

Des Weiteren müssen Hindernisse (Bauwerke, Deich, ...), die zwischen Beobachter und Feuer bzw. Tagesmarke liegen, berücksichtigt werden. Dies kann ebenfalls dazu führen, dass ein Feuer höher aufgestellt wird.

7.3 Vertikale Streuwinkel der Lichtstärkeverteilung

Der vertikale Streuwinkel soll sicherstellen, dass unter Berücksichtigung verschiedener Augeshöhen, der Tide sowie möglicher Justiertoleranzen an der Leuchte eine ausreichende Lichtstärke für alle relevanten Beobachtungspositionen gewährleistet ist.

Die benötigte vertikale Streuung ist am größten bei dem kleinsten Nutzabstand, allerdings ist dort die benötigte Lichtstärke am geringsten.

Das nachstehende Verfahren sollte für die Abschätzung des benötigten Streuwinkels angewandt werden, wobei eine glockenförmige Lichtstärkeverteilung vorausgesetzt wird.

Die Streuung wird durch den sogenannten Halbstreuwinkel der Verteilung beschrieben. Im Horizont wird eine Lichtstärke I_0 angenommen. Der Halbstreuwinkel der vertikalen Lichtstärkeverteilung ist der Winkelbereich, indem die Lichtstärke über 50% des Wertes von I_0 liegt (Abbildung 7).

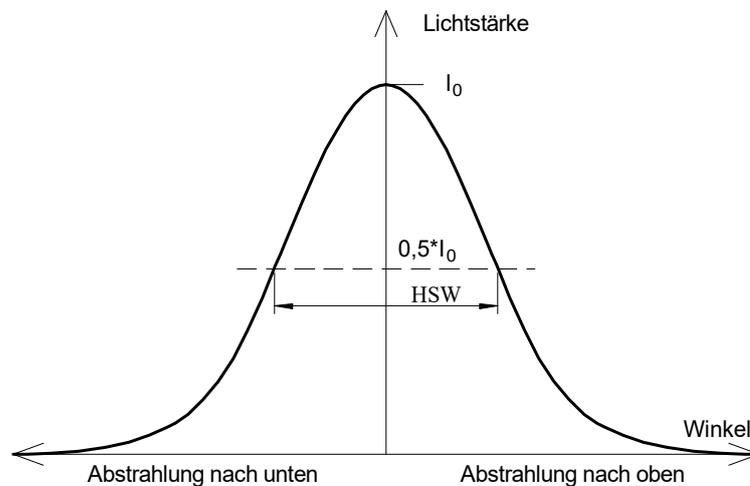


Abbildung 7: Zur Definition des Halbstreuwinkels

Der Halbstreuwinkel HSW sollte mindestens das 1,5-fache des Winkels SW betragen, der zwischen der größten Augeshöhe bei mittlerem Hochwasser und der kleinsten Augeshöhe bei mittlerem Niedrigwasser zum Feuer liegt (Abbildung 8).

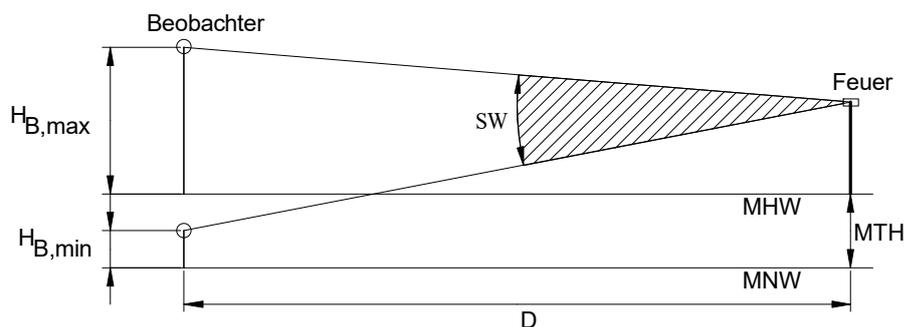


Abbildung 8: Vertikaler Streuwinkel

Dabei wird ein Beobachtungsabstand in der Mitte der Nutzstrecke D vorausgesetzt.

$$HSW \geq 1,5 * \arctan \left(\frac{H_{B,max} - H_{B,min} + MTH}{D} \right)$$

mit

- $D = \frac{1}{2} * (D_{max} + D_{min})$
- $H_{B,max}$ höchste Augeshöhe
- $H_{B,min}$ niedrigste Augeshöhe
- MTH mittlerer Tidenhub
- MHW Mittleres Hochwasser
- MNW Mittleres Niedrigwasser

7.4 Konkurrierende Lichter und Hintergrundaufhellung

Bei der Ermittlung der erforderlichen Lichtstärke muss berücksichtigt werden, dass das betrachtete Feuer in vielen Fällen von Lichtern Dritter (z.B. Beleuchtungsanlagen, befeuerte Windenergieanlagen, Navigationsleuchten von Schiffen) umgeben ist.

Diese Lichter können zwei unterschiedlich zu handhabende Auswirkungen erzeugen:

- Störende und irritierende Lichtpunkte (konkurrierende Lichter),
- Diffuser Lichtschleier (Hintergrundaufhellung).

Die Feststellung, dass konkurrierende Lichter oder Hintergrundaufhellung einen Einfluss auf die Sichtbarkeit von Schifffahrtszeichen haben, sollte in der Regel durch eine Bereisung des entsprechenden Fahrwasserabschnittes bestätigt sein. Die Bereisung kann auch eine Messung diffuser Hintergrundaufhellung nach Abschnitt 7.4.2 beinhalten.

Falls konkurrierende Lichter oder Hintergrundaufhellung in Betracht gezogen werden müssen, so ist der erste Schritt die Notwendigkeit dieser Lichter im Umfeld der Leuchtfeuer zu hinterfragen. Die hoheitliche Aufgabe zur Befuerung der Wasserstraße ist nach WaStrG § 34 Abs. 4 vorrangig gegenüber Beleuchtungen Dritter zu betrachten. In diesen Fällen sollte der Betreiber dazu gebracht werden, die betroffenen Lichter zu entfernen, dunkler zu machen oder so zu verändern, dass die Störung des betroffenen Feuers minimiert wird.

In einigen Fällen ist dies jedoch nicht möglich (sicherheitsrelevante Lichter und Signale, z. B. Luftfahrtfeuer). In diesen Fällen sollten die nachstehenden Maßnahmen ergriffen werden.

7.4.1 Konkurrierende Lichter (Lichtpunkte)

Konkurrierende Lichter erscheinen immer als Lichtpunkte. Sie werden somit wie die Leuchtfeuer durch eine Lichtstärkeangabe (Candela, cd) beschreiben.

Damit das Leuchtfeuer gegenüber dem konkurrierenden Licht mit ausreichender Helligkeit wahrgenommen wird, sollte das Leuchtfeuer ungefähr die gleiche Beleuchtungsstärke am Beobachterauge erzeugen wie das konkurrierende Licht. Dazu ist eine Berechnung mit der Allard'schen Formel (Kapitel 3, siehe auch [7]) erforderlich.

Befindet sich das konkurrierende Licht in der Nähe des Leuchtfeuers, so ist folgendes vereinfachtes Verfahren zulässig:

Falls die formal berechnete Lichtstärke des Leuchtfeuers $I_{eff,B,min}$ unterhalb der Lichtstärke des konkurrierenden Lichtes I_{kon} ist, so sollte die Lichtstärke des Leuchtfeuers auf das Niveau des konkurrierenden Lichtes angehoben werden.

Folgende Werte für konkurrierende Lichter sind bekannt:

Feuertyp	Lichtstärke
Luftfahrt, Hindernisfeuer, rot ES [5]	maximal 25 cd
Windenergieanlage Feuer W, rot ES [5]	maximal 255 cd
Gefahrenfeuer, rot [5]	ca. 2000 cd
Navigationsleuchten, weiß, Schiff bis 12 m [6]	ca. 4 cd
Navigationsleuchten, weiß, Schiff 12 m bis 50 m [6]	12 bis 52 cd
Navigationsleuchten, weiß, Schiff über 50 m [6]	ca. 94 cd

Beispiele:

(a) Die Lichtstärke eines Leuchtfeuers wird zu $I_{eff,B,min} = 13 \text{ cd}$ berechnet. In unmittelbarer Nähe stehen Windenergieanlagen mit Feuer W, rot (maximal 255 cd). Damit das Feuer ausreichend hell gegenüber den Windenergieanlagen erscheint, wird die Lichtstärke des Leuchtfeuers hoch gesetzt auf 255 cd.

(b) Die Lichtstärke eines Feuers wird zu $I_{eff,B,min} = 5 \text{ cd}$ berechnet. Es sind keine festen störende Lichter vorhanden, die Wasserstraße wird mit Schiffen bis zu einer Länge von 50 m befahren. Damit das Feuer ausreichend hell gegenüber den Navigationsleuchten erscheint, wird die Lichtstärke des Leuchtfeuers auf 52 cd heraufgesetzt.

(c) Die Lichtstärke eines Unterfeuers (Richtfeuer) wird zu $I_{eff,B,min} = 100\,000 \text{ cd}$ berechnet. In der Umgebung stehen zahlreiche Windenergieanlagen mit Feuer W, rot (max. 255 cd). Hier ist keine Anpassung der Lichtstärke des Unterfeuers erforderlich, da das Richtfeuer ausreichend heller ist als das Feuer W, rot.

7.4.2 Hintergrundaufhellung (diffus)

Unter Hintergrundaufhellung wird immer ein diffuser Lichtschleier verstanden. Dieser wird durch die Angabe einer Leuchtdichte (Candela/Quadratmeter, cd/m^2) erfasst.

Die Berücksichtigung von Hintergrundaufhellung erfolgt dadurch, dass man je nach der Stärke der Hintergrundaufhellung die minimal erforderliche Beleuchtungsstärke E_{min} höher setzt.

Die Beurteilung der Hintergrundaufhellung setzt eine Begutachtung der Sichtverhältnisse vor Ort voraus. Dabei sollte die Hintergrundaufhellung bei guten Sichtbedingungen (praktische meteorologische Sichtweite $V > 5 M$) mit einem Leuchtdichtemessgerät gemessen werden.

Ein Leuchtdichtemessgerät stellt über einen Fernrohreinblick (Okular) oder eine Kamera (Bildschirm, Sucher) die zu beurteilende Szene dar. In dieser Szene wird ein Messfeld ausgewählt, innerhalb dessen die Leuchtdichte gemessen wird.

In Abbildung 9 ist die Umgebung eines Richtfeuers zu sehen. Das Messfeld wird in die Nähe des Richtfeuers gelegt – ohne jedoch die Richtfeuer oder andere punktförmige Lichter zu erfassen. Das Messgerät liefert dann die Leuchtdichte $L_{Messung}$ innerhalb dieses Messfeldes.

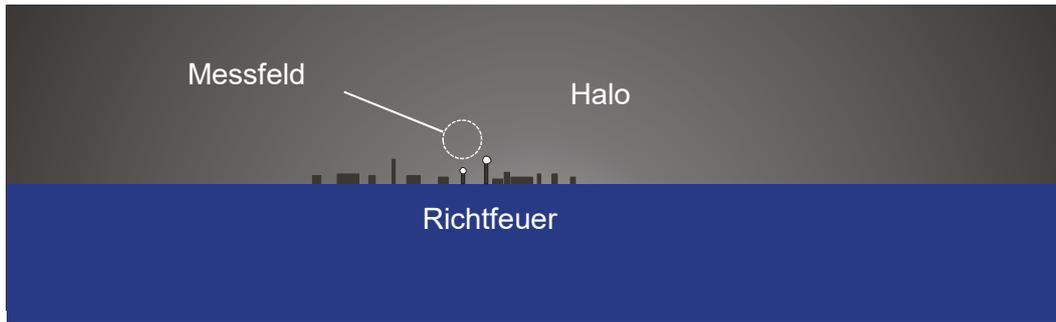


Abbildung 9: Hintergrundaufhellung (Halo), Richtfeuer und Messfeld zur Leuchtdichtemessung

Aus dem Messwert für die Leuchtdichte $L_{Messung}$ ergibt sich die Beleuchtungsstärke am Beobachterauge E_{min} zu:

$$E_{min} = (0,242 * 10^{-6} lx) * (1 + \sqrt{0,4 * L_{Messung} / L_U})$$

mit $L_U = 1 \text{ cd/m}^2$ Einheitsleuchtdichte.

Vereinfachung für kleine Nutzabstände:

Für Feuer mit sehr kleinen Nutzabständen kann auf die Messung verzichtet werden, wenn die resultierenden Lichtstärken mit vertretbarem Aufwand durch handelsübliche Leuchten darstellbar sind.

Für Nutzabstände bis $D_{max} = 2 M = 3704 \text{ m}$ kann die Beleuchtungsstärke E_{min} bei festgestellter mittlerer Hintergrundaufhellung ohne weitere Prüfung gewählt werden zu:

$$E_{min} = 2 * 10^{-6} lx.$$

Für Nutzabstände bis $D_{max} = 1,5 M = 2778 \text{ m}$ kann die Beleuchtungsstärke E_{min} bei festgestellter starker Hintergrundaufhellung ohne weitere Prüfung gewählt werden zu:

$$E_{min} = 2 * 10^{-5} lx.$$

7.5 Tragweiten am Tage (informativ)

Bei der formalen Berechnung der Tragweite eines Feuers am Tage wird von einem sehr hellen Hintergrund ausgegangen. Die angenommene Leuchtdichte $10\ 000 \text{ cd/m}^2$ entspricht hellen Wolken oder einem klaren Himmel, wobei die Sonne in der Nähe zur Beobachtungsrichtung steht.

Diese Annahme ist für viele Situationen unzutreffend, sodass die errechnete Tragweite zu gering ausfällt. In diesen Fällen ist es zweckmäßig die minimal erforderliche Beleuchtungsstärke gemäß der Formel

$$E_{min} = (0,242 * 10^{-6} lx) * (1 + \sqrt{0,4 * L / L_U}) \quad \text{mit } L_U = 1 \text{ cd}$$

zu berechnen, wobei L die angenommene Leuchtdichte des Hintergrundes ist und L_U die Einheitsleuchtdichte 1 cd/m^2 .

Es ergeben sich folgende typische Werte für die minimal erforderliche Beleuchtungsstärke.

Meteorologische Bedingung	Leuchtdichte des Hintergrundes in cd/m^2	minimal erforderliche Beleuchtungsstärke in $10^{-3} lx$

Sehr dunkler bedeckter Himmel	100	0,013
Dunkler und bedeckter Himmel	200	0,024
Normal bedeckter Himmel	1 000	0,107
Heller bedeckter Himmel oder klarer Himmel, wobei die Sonne weitab der Sicht- richtung steht	5 000	0,506
Heller bedeckter Himmel oder klarer Himmel, wobei die Sonne nah der Sicht- richtung steht (Standardwert)	10 000	1
Sehr helle Wolken	20 000	1,98
Blendende Wolken	50 000	4,91

Bemerkungen:

- Bei der Beschreibung der meteorologischen Bedingung und der Leuchtdichte wird ausschließlich die Blickrichtung zum Feuer im Horizont berücksichtigt.
- An sehr hellen Tagen oder wenn die Sonne nah hinter dem Feuer steht, kann eine sichere Erkennbarkeit eines Feuers mit großer Tragweite in der Regel nicht gewährleistet werden. Dies gilt auch im Winter.
- Wird der Hintergrund des Feuers nicht durch den Himmel, sondern durch die Landschaft oder Gebäude gebildet, ist die Leuchtdichte in der Regel geringer. Dem entsprechend kann bei Lichtsignalanlagen die Erkennbarkeit am Tage durch Kontrastbleche verbessert werden.
- Die Nenntagweite am Tage wird unabhängig vom Hintergrund immer mit $E_{min} = 10^{-3}lx$ und dem Sichtwert $T_{M,N} = 0,7411$ berechnet.

Empfehlungen:

- Für die Bewertung der Erkennbarkeit eines Feuers im Winter wird empfohlen die Beleuchtungsstärke $E_{min} = 0,107 * 10^{-3}lx$ anzuwenden. Damit berechnete parametrische Tragweiten sind jedoch keine Nenntagweiten und dürfen somit nicht für leuchtfeuertechnische Angaben in den Seekarten und Leuchtfeuerverzeichnissen verwendet werden.
- Bei Lichtsignalanlagen wird für die Berechnung von Lichtstärken empfohlen die minimal erforderliche Beleuchtungsstärke $E_{min} = 0,107 * 10^{-3}lx$ zu verwenden, wenn bei dem maximalen Nutzabstand D_{max} das schwarze Hintergrundblech um das Feuer mindestens einen Kreis von 3 Bogenminuten ($3' = 0,873 \text{ mrad}$) umschreibt. Zur Beachtung: Lichtsignalanlagen zur Verkehrsregelung (z.B. Schleusensignalen) wird keine Nenntagweite zugeordnet.

7.6 Übersicht der Berechnungsverfahren (informativ)

Im nachstehenden Diagramm sind die Zusammenhänge für die Berechnung von Tragweiten aus Lichtstärken, sowie die Bestimmung der erforderlichen Lichtstärken aus den geplanten Nutzabständen grafisch dargestellt.

Die Nenntragweite dient dazu dem Nautiker die zu erwartende Sichtbarkeit und Helligkeit eines Feuers zu vermitteln. Sie stellt näherungsweise die Tragweite eines Feuers ohne Hintergrundaufhellung dar, die für ca. 50% der Zeiten erreicht wird (siehe auch Abschnitt 8).

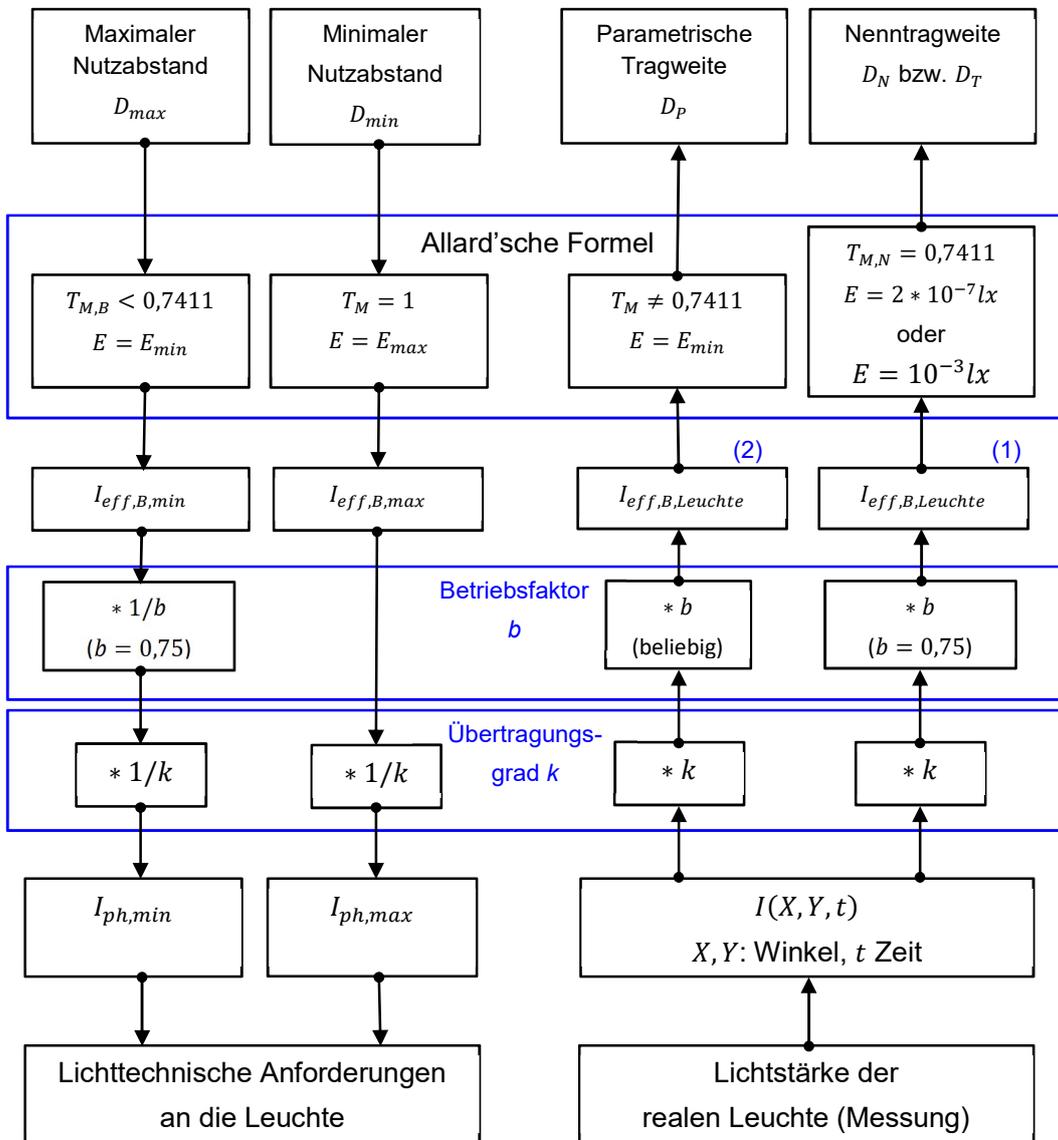


Abbildung 10: Anwendung der Berechnungen

Zu $I_{eff,B,Leuchte}$:

- (1) Für die Nenntragweite erfolgt die Berechnung immer mit $b = 0,75$ [1].
- (2) Für eine parametrische Tragweite kann die Berechnung für beliebige b ausgeführt werden.

7.6.1 Berechnung der minimalen photometrischen Lichtstärke

Die minimale photometrische Lichtstärke wird aus dem maximalen Nutzabstand D_{max} berechnet (Abbildung 10, linker Pfad, von oben nach unten). Zuerst wird über die Allard'sche Formel mit den festgelegten Werten für den Sichtwert $T_{M,B}$, der minimal erforderlichen Beleuchtungsstärke E_{min} und des Betriebsfaktors $b = 0,75$ die minimal erforderliche effektive Lichtstärke $I_{eff,min}$ berechnet.

Bei Kenntnis der Taktung, sowie der Takterzeugung wird mit dem Übertragungsgrad k (gegebenenfalls durch Abschätzung) die minimal erforderliche photometrische Lichtstärke $I_{ph,min}$ berechnet.

7.6.2 Berechnung der maximalen photometrischen Lichtstärke

Die maximale photometrische Lichtstärke wird aus dem minimalen Nutzabstand D_{min} berechnet (Abbildung 10, zweiter Pfad von links, von oben nach unten).

Zuerst wird über die Allard'sche Formel mit dem maximal möglichen Sichtwert $T_M = 1$, der maximal zulässigen Beleuchtungsstärke E_{max} und Annahme einer neuen Leuchte mit Betriebsfaktor $b = 1$ (!) die maximal zulässige effektive Lichtstärke $I_{eff,max}$ berechnet.

Bei Kenntnis der Taktung, sowie der Takterzeugung wird mit dem Übertragungsgrad k (gegebenenfalls durch Abschätzung) die maximal zulässige photometrische Lichtstärke $I_{ph,max}$ berechnet.

7.6.3 Berechnung der parametrischen Tragweite

Die Tragweitenberechnung erfolgt in Abbildung 10 von unten nach oben. Die parametrische Tragweite D_p kann für beliebige Werte E_{min} , T_M und b berechnet werden (Abbildung 10, dritter Pfad von links).

Ausgangspunkt ist die gemessene Lichtstärkeverteilung $I(X, Y, t)$ einer realen Leuchte, die für getaktete Feuer auch von der Zeit abhängt. Aus der geometrischen Verteilung (Winkel X, Y) ist die, für die Bewertung des jeweiligen Sektors geeignete, Lichtstärke zu ermitteln. Dies kann z.B. die minimale Lichtstärke der horizontalen Verteilung in dem betrachteten Sektor $\min_{X_0 \leq X \leq X_1} (I(X, 0, T))$ oder bei Richtfeuern die Achslichtstärke $I(0, 0, t)$ sein.

Daraus resultiert durch Berechnung des Übertragungsgrads k die effektive Lichtstärke I_{eff} . Von diesem Wert ausgehend ergibt sich für beliebige Parameter die parametrische Tragweite $D_p = D(E_{min}, T_M, b)$.

Bemerkung: Durch Variation von $b < 0,75$ kann z.B. ermittelt werden, welchen Einfluss starke Verschmutzungen auf die nutzbare Tragweite haben.

7.6.4 Berechnung der Nenntagweite

Die Nenntagweite wird ähnlich wie die parametrische Tragweite berechnet (Abbildung 10, rechter Pfad). Allerdings sind hier feste Daten für die Parameter vorgegeben.

Nenntagweite in der Nacht $E_{min} = 2 * 10^{-7} lx$

- $T_M = 0,7411$
- $b = 0,75$

Nenntagweite am Tag $E_{min} = 10^{-3} lx$

- $T_M = 0,7411$
- $b = 0,75$

8 Charakterisierung von Sichtweiten

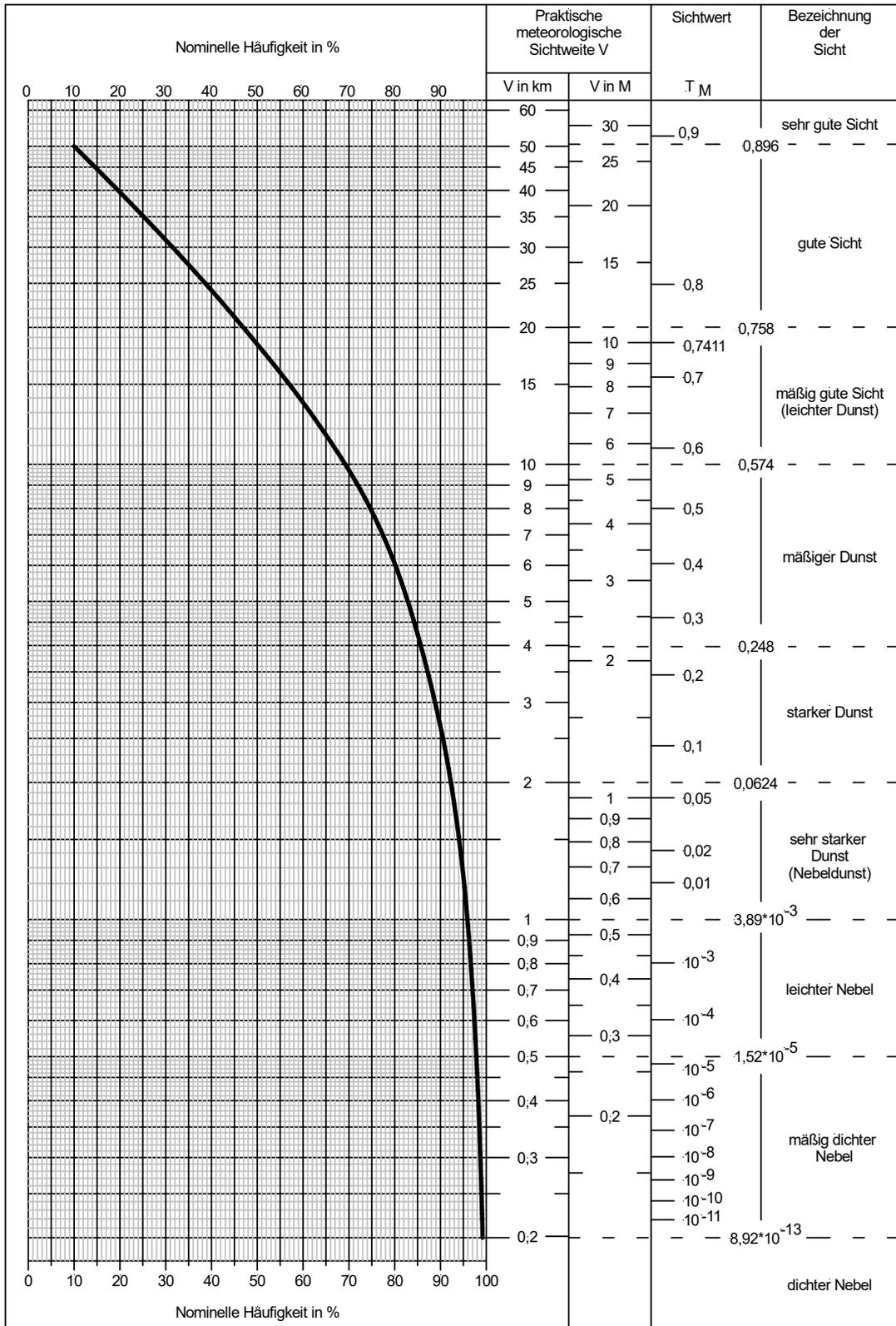


Abbildung 11: Sichtweiten, Sichtwerte, nominelle Häufigkeit

9 Formelzeichen

b	Betriebsfaktor
E	hier: allgemein Beleuchtungsstärke
E_0	theoretische Beleuchtungsstärke für ungetrübte Atmosphäre
E_{max}	maximal zulässige Beleuchtungsstärke
E_{min}	minimal erforderliche Beleuchtungsstärke
E_A	Beleuchtungsstärke bei getrübter Atmosphäre
d, D	hier: allgemein Abstand, Strecke
D_{max}	maximaler Nutzabstand
D_{min}	minimaler Nutzabstand
D_N	Nenntragweite Nacht
D_P	parametrische Tragweite
D_T	Nenntragweite Tag
D_U	Einheitsstrecke, hier immer: 1 <i>Seemeile</i> = 1 <i>M</i> = 1852 <i>m</i>
H	Höhe, Feuerhöhe
H_B	Augeshöhe
$H_{B,max}$	höchste Augeshöhe
$H_{B,min}$	niedrigste Augeshöhe
HSW	Halbstreuwinkel
I	hier: allgemein Lichtstärke
I_0	Achslichtstärke (photometrisch)
I_B	Betriebslichtstärke
I_{eff}	effektive Lichtstärke
$I_{eff,B}$	effektive Betriebslichtstärke
$I_{eff,B,Leuch}$	effektive Betriebslichtstärke der eingesetzten Leuchte
$I_{eff,B,emp}$	empfohlene effektive Betriebslichtstärke
$I_{eff,B,min}$	minimal erforderliche effektive Betriebslichtstärke
$I_{eff,max}$	maximale effektive Lichtstärke
I_{kon}	effektive Lichtstärke eines konkurrierenden Feuers
I_{ph}	photometrische Lichtstärke
$I_{ph,emp}$	empfohlene photometrische Lichtstärke
$I_{ph,min}$	minimale photometrische Lichtstärke
$I_{ph,max}$	maximale photometrische Lichtstärke
k	Übertragungsgrad
κ	Korrekturfaktor für die geographische Sichtweite (Lichtbrechung)
L	Leuchtdichte
L_U	Einheitsleuchtdichte $L_U = 1 \text{ cd/m}^2$
$L_{Messung}$	gemessene Leuchtdichte (Hintergrundaufhellung)

M	1 Seemeile ($1 M = 1852 m$)
m	1 Meter
MHW	Mittleres Hochwasser
MNW	Mittleres Niedrigwasser
MTH	Mittlerer Tidehub
MW	Mittelwasser
R	Erdradius
s_G	geographische Sichtweite
s_U	Einheitsstrecke, hier immer: $1 Meter = 1 m$
T_M	Sichtwert, bezogen auf $1 Seemeile = 1 M = 1852 m$
$T_{M,B}$	Bezugssichtwert
V	praktische meteorologische Sichtweite
z	Schwächungskoeffizient

10 Referenzen

- [1] IALA-Recommendation R0200-2 (E200-2) Marine Signal Lights - Calculation, Definition and Notation of Luminous Range
- [2] DIN 5031 Strahlungsphysik, Lichttechnik,
Teil 3: Größen , Formelzeichen und Einheiten der Lichttechnik
- [3] CIE 18.2 -1983, Technical Report, The Basis of Physical Photometry
- [4] IALA Recommendation R0200-4 (E200-4) Marine Signal Lights - Determination and Calculation of Effective Intensity
- [5] Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Kennzeichnung von Luftfahrthindernissen, BMVI, Stand: 26.08.2015
- [6] Convention on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea, 1972 (COLREGs), International Maritime Organization
- [7] Bericht FVT-0157-01-2008 Praxisnahe Bestimmung der erforderlichen Lichtstärken von Feuern und Signallichtern, Fachstelle der WSV für Verkehrstechniken, 15.01.2008