



Wasserstraßen- und  
Schifffahrtsverwaltung  
des Bundes

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

**TFV-04**

# **Dimensionierung von Richtfeuern**

**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](mailto:gdws@wsv.bund.de)

**Technische Forderungen, Visuell, Nr. 4 (TFV-04)**  
**Dimensionierung von Richtfeuern**

Version	Datum	Geänderte Kapitel	Grund der Änderung
-	seit 1985		Ursprungsversion: Verwaltungsvorschrift der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes, VV-WSV 2401
1.0	16.07.2018	alle	Neuherausgabe als Technische Forderung, visuell der Dezernate Verkehrstechnik der GDWS, vollständige Überarbeitung
1.01	09.10.2020		Fehlerkorrekturen
1.02	08.02.2023		Fehlerkorrekturen

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>1</b>	<b>ANWENDUNGSGEBIET</b> .....	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>TECHNISCHE GRÖßEN UND BEGRIFFE</b> .....	<b>6</b>
2.1	Feuer .....	6
2.2	Richtfeuer (RF) bzw. Richtfeuerlinie (RFL).....	6
2.3	Oberfeuer (OF) .....	7
2.4	Unterfeuer (UF).....	7
2.5	Feuerhöhen .....	7
2.6	Schattenmaß .....	7
2.7	Feuerabstand.....	7
2.8	Nutzabstände und Nutzweite .....	7
2.9	Annäherungsbereich.....	7
2.10	Geographische Sichtweite .....	7
2.11	Vertikaler Sehwinkel .....	7
2.12	Horizontaler Sehwinkel .....	8
2.13	Grenzwinkel .....	8
2.14	Schärfe einer Richtfeuerlinie .....	8
2.15	Sohlenbreite.....	8
2.16	Augeshöhen.....	8
2.17	Begriffe aus der Gezeitenkunde.....	8
<b>3</b>	<b>GEOMETRIE</b> .....	<b>9</b>
3.1	Vertikaler Sichtwinkel .....	9
3.1.1	Fall 1: Augeshöhe niedriger als Unterfeuer .....	9
3.1.2	Fall 2: Augeshöhe gleich oder höher als Unterfeuer .....	10
3.1.3	Bemessungsgrundsatz.....	10
3.1.4	Typische Winkelverläufe .....	10
3.2	Horizontaler Sehwinkel .....	11
3.3	Schärfe einer Richtfeuerlinie .....	12
3.4	Feuerhöhen .....	12
3.4.1	Augeshöhen.....	12
3.4.2	Feuerhöhe des Unterfeuers.....	13
3.4.3	Feuerhöhe des Oberfeuers .....	14
3.5	Feuerabstand.....	15
3.6	Strahlenbrechung in der Atmosphäre.....	15
3.7	Geographische Sichtweite .....	16
<b>4</b>	<b>LICHTTECHNIK</b> .....	<b>16</b>
4.1	Nutzabstände.....	16

4.1.1	Unterfeuer .....	16
4.1.2	Oberfeuer .....	16
4.2	Minimal erforderliche Beleuchtungsstärke am Beobachterauge .....	16
4.3	Blendungsbegrenzung .....	17
4.4	Lichtstärkeberechnung .....	17
4.4.1	Direkte Berechnung .....	17
4.4.2	Harmonisierung der Lichtstärken .....	17
4.4.3	Übergang zu photometrischen Lichtstärken .....	19
4.4.4	Vermeidung von Blendung .....	20
4.4.5	Ergänzung .....	20
4.5	Streuwinkel .....	20
4.5.1	Horizontale Streuwinkel .....	20
4.5.2	Vertikale Streuwinkel .....	21
<b>5</b>	<b>BERECHNUNGSVERFAHREN .....</b>	<b>22</b>
5.1	Prinzip .....	22
5.2	Ablauf .....	23
5.2.1	Vorzugebende Parameter .....	23
5.2.2	Reihenfolge der Berechnung .....	23
<b>6</b>	<b>ERGÄNZENDE AUFLAGEN .....</b>	<b>24</b>
6.1	Freizuhaltender Bereich .....	24
6.2	Vermeidung von Störlichtern .....	25
<b>7</b>	<b>DURCHGERECHNETE BEISPIELE .....</b>	<b>26</b>
7.1	Beispiel 1 .....	26
7.1.1	Vorgaben .....	26
7.1.2	Höhe des Unterfeuers .....	26
7.1.3	Feuerabstand .....	26
7.1.4	Höhe des Oberfeuers .....	27
7.1.5	Erforderliche Mindestlichtstärken auf der Achse .....	28
7.1.6	Harmonisierung der Lichtstärken .....	28
7.1.7	Photometrische Lichtstärken .....	28
7.1.8	Streuwinkel .....	28
7.1.9	Vertikaler Sehwinkel .....	29
7.1.10	Schärfe .....	29
7.2	Beispiel 2 .....	31
7.2.1	Vorgaben .....	31
7.2.2	Höhe des Unterfeuers .....	31
7.2.3	Feuerabstand .....	31
7.2.4	Höhe des Oberfeuers .....	31

7.2.5	Erforderliche Mindestlichtstärken auf der Achse.....	32
7.2.6	Harmonisierung der Lichtstärken.....	32
7.2.7	Photometrische Lichtstärken .....	33
7.2.8	Streuwinkel .....	33
7.2.9	Schärfe .....	34
<b>8</b>	<b>FORMELZEICHEN</b> .....	<b>35</b>
<b>9</b>	<b>REFERENZEN</b> .....	<b>35</b>

# 1 Anwendungsgebiet

Das vorliegende Dokument beschreibt die geometrische und lichttechnische Berechnung von Richtfeuern, die aus zwei Feuern (Ober- und Unterfeuer) bestehen und eine Richtfeuerlinie kennzeichnen.

Es setzt folgende IALA-Dokumente um:

- IALA-Recommendation E-112 On Leading Lights [1],
- IALA-Guideline 1023 The Design of Leading Lines [2].

Es werden die benötigten Positionen, Bauwerkshöhen sowie Lichtstärkeverteilungen berechnet. Eine Festlegung der Bauwerke als Tagesmarke erfolgt hier nicht.

Für die lichttechnischen Berechnungen wird TFV-03 Tragweiten und Lichtstärken von Feuern und Signallichtern vorausgesetzt [3].

# 2 Technische Größen und Begriffe

Die zur Berechnung benötigten Größen und Begriffe sind in der nachstehenden Abbildung eingetragen.

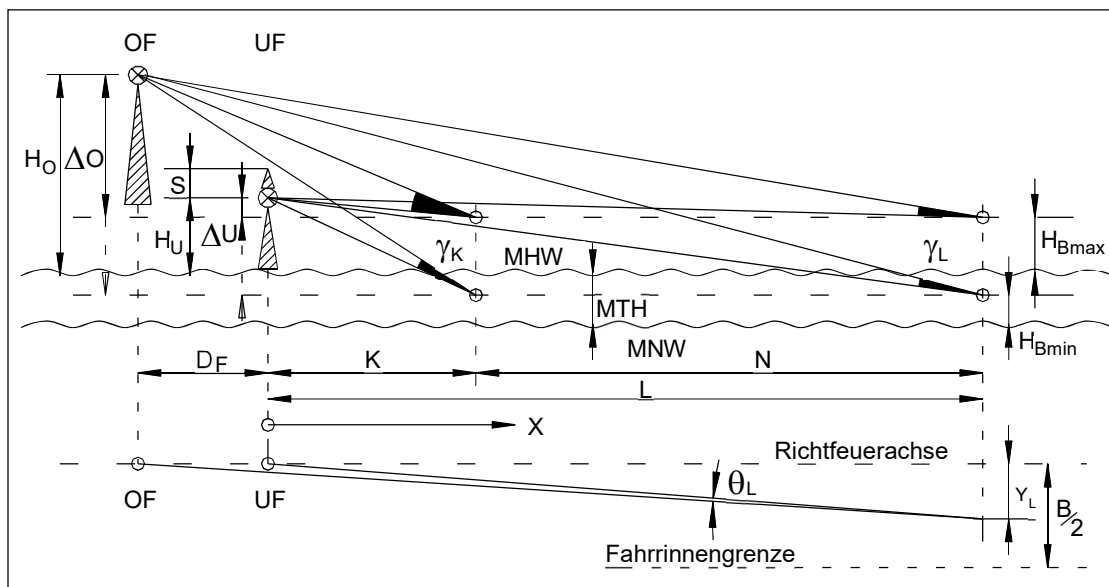


Abbildung 1: Richtfeuergeometrie

## 2.1 Feuer

Licht zur Befuerung mit Kennung (Farbe und Takt), siehe auch Objektkatalog VV-WSV 1102 [5].

## 2.2 Richtfeuer (RF) bzw. Richtfeuerlinie (RFL)

Zwei Feuer (Ober- und Unterfeuer) bilden ein Richtfeuer bzw. eine Richtfeuerlinie (auch: Richtlinie, siehe BSH, Karte 1 / Int 1, Abschnitt M1), wenn für einen Beobachter in Fahrriinnennmitte beide Feuer lotrecht übereinander angeordnet erscheinen (Deckpeilung). Die Richtfeuerlinie wird zur genauen Bahnführung von Schiffen entlang der Fahrriinnennmitte genutzt.

### Bemerkung:

Richtfeuer(linien) werden in der Regel auch am Tage im unbefeuerten Zustand als Richtmarken bzw. Richtbaken verwendet. Zur Vereinfachung wird häufig zusammenfassend nur der Begriff Richtfeuer verwendet.

### **2.3 Oberfeuer (OF)**

Feuer einer Richtfeuerlinie, das vom Beobachter am weitesten entfernt ist und ihm als höheres von beiden Feuern erscheint. Auch zur Bezeichnung des Bauwerks verwendet.

### **2.4 Unterfeuer (UF)**

Feuer einer Richtfeuerlinie, das vom Beobachter am nächsten ist und ihm als tieferes von beiden Feuern erscheint. Auch zur Bezeichnung des Bauwerks verwendet.

### **2.5 Feuerhöhen**

Die Feuerhöhen sind das vertikale Maß der Mitte des Scheinwerfers zu einem Bezugspunkt. Bei der Geometrieberechnung für das Richtfeuer ist der Bezugspunkt entweder MHW (Mittleres Hochwasser) für Tidegebiete oder MW (Mittleres Wasser) für tidefreie Gebiete.

Es werden die Bezeichnungen  $H_O$  (Oberfeuer) und  $H_U$  (Unterfeuer) benutzt.

### **2.6 Schattenmaß**

Vertikaler Abstand  $S$  zwischen dem höchsten Punkt des Bauwerkes und Feuerhöhe des Unterfeuers

### **2.7 Feuerabstand**

Horizontaler Abstand  $D_F$  zwischen Ober- und Unterfeuer

### **2.8 Nutzabstände und Nutzweite**

Abschnitt einer Richtfeuerlinie, in dem die Richtfeuerlinie zur Deckpeilung genutzt werden kann. Er wird begrenzt durch den kürzesten ( $K$ ) und längsten ( $L$ ) Nutzabstand zum Unterfeuer. Die Nutzweite  $N$  ergibt sich aus dem längsten und kürzesten Nutzabstand ( $N = L - K$ ).

### **2.9 Annäherungsbereich**

Bereich vor dem längsten Nutzabstand  $L$ , in dem beide Feuer erkannt werden können und in dem auf die Richtfeuerlinie eingedreht wird.

### **2.10 Geographische Sichtweite**

Größter Abstand  $s_g$  aus dem unter Berücksichtigung der Erdkrümmung und der Strahlenbrechung in der Atmosphäre ein Feuer über den Horizont hinweg gerade noch gesehen werden kann.

### **2.11 Vertikaler Sehwinkel**

Vertikaler Winkel  $\gamma$  zwischen Oberfeuer - Beobachteraue – Unterfeuer

### Bemerkung:

Die Winkelangaben werden im vorliegenden Dokument vorrangig in Bogenmaß angegeben. In einigen Formeln wird zur Verdeutlichung die Einheit ‚rad‘ (Radiant) an den Zahlenwert angefügt. Bei Berechnungen wird die Einheit in der Regel weggelassen.

### **2.12 Horizontaler Sehwinkel**

Horizontaler Winkel  $\theta$  zwischen Oberfeuer - Beobachteraue - Unterfeuer, der entsteht, wenn der Beobachter von der Richtfeuerlinie seitlich abweicht.

### **2.13 Grenzwinkel**

Als Grenzwinkel  $\theta_G$  wird der horizontale Sehwinkel  $\theta$  bezeichnet, bei dem für den Beobachter Oberfeuer und Unterfeuer gerade nicht mehr lotrecht untereinander erscheinen.

### **2.14 Schärfe einer Richtfeuerlinie**

Seitlicher Abstand  $Y$  rechtwinklig zu der Richtfeuerachse, bei dem ein Beobachter erkennt, dass er nicht mehr auf der Richtfeuerachse ist.

### **2.15 Sohlenbreite**

Siehe auch Definition im WSV-Objektkatalog [5]. Richtfeuer werden sowohl an natürlichen Wasserstraßen aber auch in gebaggerten Fahrrinnen angewandt. Zur Dimensionierung der benötigten Schärfe wird hier die für die Schifffahrt benötigte bzw. gemeldete Sohlenbreite  $B$  zu Grunde gelegt.

### **2.16 Augeshöhen**

Zur Berechnung der Geometrie müssen die relevanten Augeshöhen betrachtet werden. Die Augeshöhe ist dabei der vertikale Abstand des Beobachterauges auf der Schiffsbrücke zur Wasserlinie.

Die Extremwerte der Augeshöhe sind:

Kleinster Wert:  $H_{B,min}$  im Regelfall gilt:  $H_{B,min} = 3 \text{ m}$

Größter Wert:  $H_{B,max}$

Der größte Wert wird durch die Brückenhöhe der höchsten angenommenen Schiffe in dem Revier bestimmt.

### **2.17 Begriffe aus der Gezeitenkunde**

Um den Einfluss der Gezeiten auf die relativen Höhen von Feuer und Beobachter zu berücksichtigen, werden die nachstehenden Größen angewandt [6].

<i>MHW</i>	Mittleres Hochwasser
<i>MNW</i>	Mittleres Niedrigwasser
<i>MTH</i>	Mittlerer Tidenhub
<i>MW</i>	Mittelwasser
<i>NN</i>	Normalnull



### 3 Geometrie

#### 3.1 Vertikaler Sichtwinkel

Der Verlauf des vertikalen Sehwinkels  $\gamma_x$  (in Bogenmaß) ist bei vorgegebenen Feuerhöhen von Oberfeuer ( $H_O$ ) und Unterfeuer ( $H_U$ ), sowie Feuerabstand  $D_F$  abhängig vom Beobachtungsabstand  $X$  und der Augeshöhe  $H_B$ .

$$\text{Für den vertikalen Sehwinkel gilt } \gamma_x = \frac{\Delta O}{X+D_F} - \frac{\Delta U}{X} - \eta * D \quad (1)$$

mit den Höhendifferenzen  $\Delta O$  und  $\Delta U$  unter Berücksichtigung des mittleren Tidenhubs  $MTH$  ( $MTH = 0$  für tidenfreie Gebiete) und einem Faktor  $\eta$  zur Berücksichtigung der Erdkrümmung und Strahlbrechung in der Atmosphäre

$$\Delta O = H_O + MTH - H_B \quad (2)$$

$$\Delta U = H_U + MTH - H_B \quad (3)$$

$$\eta = 6,73 * 10^{-8} m^{-1} \quad (4)$$

##### 3.1.1 Fall 1: Augeshöhe niedriger als Unterfeuer

Ist die Augeshöhe niedriger als die des Unterfeuers, erreicht der vertikale Sehwinkel seinen Maximalwert

$$\gamma_{max} = \frac{(\sqrt{\Delta O} - \sqrt{\Delta U})^2}{D_F} - \eta * D \quad (5)$$

im Beobachtungsabstand

$$X_{\gamma_{max}} = D_F * \frac{\sqrt{\Delta U}}{\sqrt{\Delta O} - \sqrt{\Delta U}} \quad (6)$$

Aus physiologischen Gründen sollte für den maximalen vertikalen Sehwinkel  $\gamma_{max}$  ein Wert von 10 Winkelminuten ( $2,909 * 10^{-3}$  rad) angestrebt werden. Der vertikale Sehwinkel wird kleiner, wenn der Beobachter sich den Feuern nähert und wird Null im Punkt  $P_3$  (Abbildung 2). Sind  $P_1$  und  $P_2$  die beiden Punkte auf der Richtfeuerlinie, an denen der vertikale Sehwinkel vorgeschriebene Grenzwerte erreicht, so ist die Strecke  $\overline{P_1 P_2} = N$  die theoretisch mögliche maximale Nutzweite der Richtfeuerlinie.

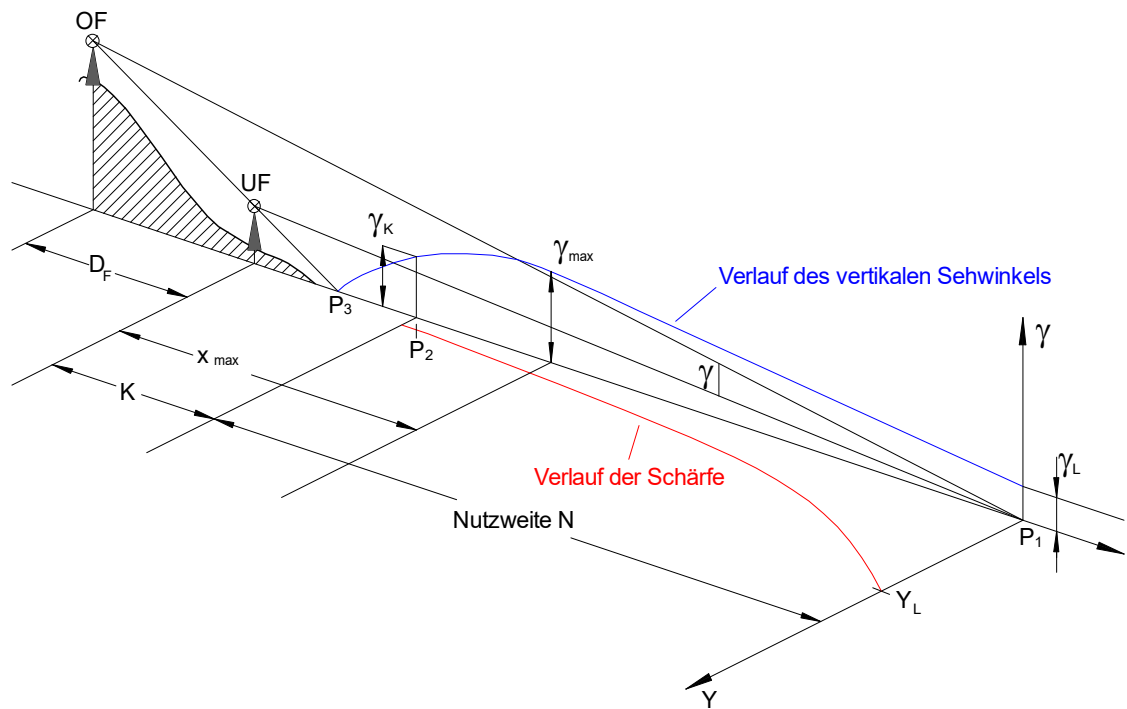


Abbildung 2: Verlauf des vertikalen Seh winkels und der Schärfe

### 3.1.2 Fall 2: Augeshöhe gleich oder höher als Unterfeuer

Ist die Augeshöhe gleich oder höher als die des Unterfeuers, wird der vertikale Sehwinkel mit kürzer werdendem Beobachtungsabstand immer größer. In diesem Fall sind die Formeln (5) und (6) sowie die Begrenzung des vertikalen Seh winkels  $\gamma_{max} \leq 10'$  nicht anwendbar. Stattdessen wird der größte vertikale Sehwinkel bei kürzestem Nutzabstand  $x = K$  erreicht.

### 3.1.3 Bemessungsgrundsatz

Richtfeuerhöhen sind so zu bemessen, dass der nach folgenden Formeln berechnete vertikale Sehwinkel bei niedriger Augeshöhe folgende Grenzwerte nicht unterschreitet.

Bei längstem Nutzabstand  $L$ :

$$\gamma_L = \frac{\Delta O}{L+D} - \frac{\Delta U}{L} - \eta * D \quad (7)$$

$$\gamma_L \geq 5' = 1,454 * 10^{-3} \text{ rad} \quad (8)$$

Bei kürzestem Nutzabstand  $K$ :

$$\gamma_K = \frac{\Delta O}{K+D} - \frac{\Delta U}{K} - \eta * D \quad (9)$$

$$\gamma_K \geq 4' = 1,164 * 10^{-3} \text{ rad} \quad (10)$$

### 3.1.4 Typische Winkelverläufe

In Abbildung 3 sind einige typische Verläufe des vertikalen Seh winkels exemplarisch dargestellt (Kurvenschar für verschiedene  $\Delta U$ ). Bei großen Abständen wird der Sehwinkel immer kleiner. Für den größten Nutzabstand sollte der Winkel größer als  $5'$  sein.

Ist die Augeshöhe gleich oder höher als das Unterfeuer (3.1.2) steigt der Winkel bei Annäherung beliebig an (Kurven für  $0 \text{ m}$ ,  $10 \text{ m}$  und  $20 \text{ m}$ ). Ist die Augeshöhe kleiner als das

Unterfeuer (3.1.1) ergibt sich ein lokales Maximum und bei weiterer Annäherung wird der Winkel wieder kleiner (Kurven für -10 m und -20 m). Im Nahbereich muss der Winkel stets größer als 4' bleiben.

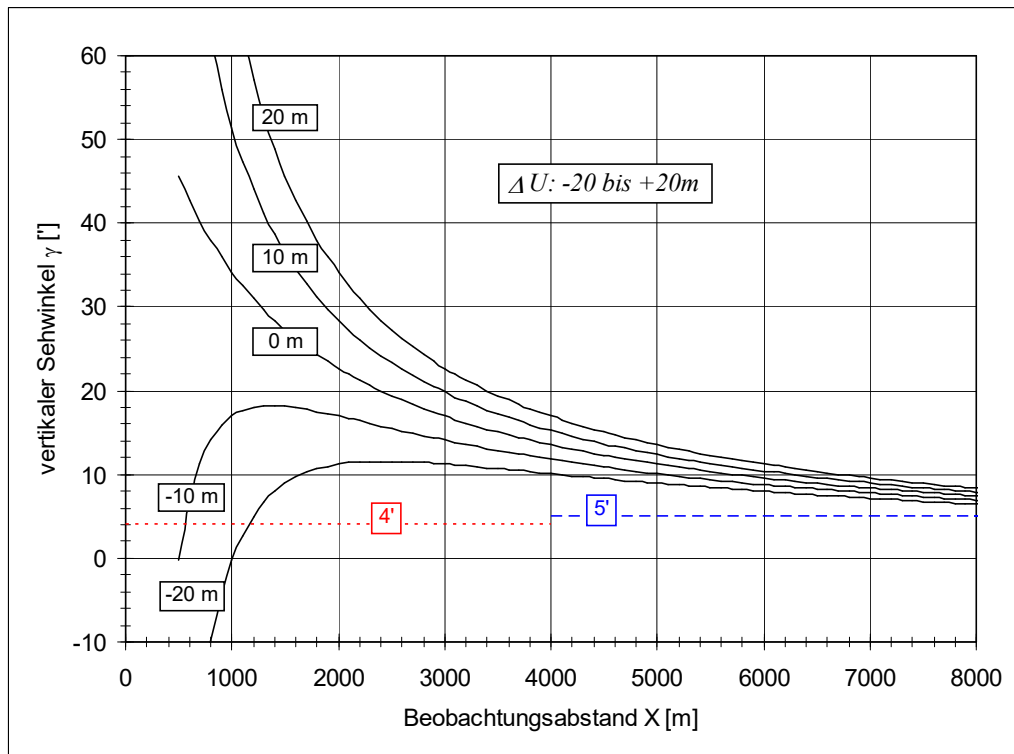


Abbildung 3: Typische Verläufe des vertikalen Seh winkels

### 3.2 Horizontaler Seh winkel

Einem Beobachter auf der Richtfeuerlinie erscheinen Ober- und Unterfeuer lotrecht untereinander bzw. in Deckpeilung. Verlässt er die Richtfeuerlinie, wandern die Feuer horizontal aus dieser Deckpeilung und erscheinen offen, bzw. um einen horizontalen Seh winkel  $\theta$  gegeneinander versetzt. Um mit Sicherheit feststellen zu können, dass die Feuer nicht mehr in Deckpeilung sind, muss der horizontale Seh winkel aus physiologischen Gründen einen bestimmten Grenzwert  $\theta_G$  überschreiten. Wird dieser Grenzwert nicht erreicht, so glaubt der Beobachter weiterhin auf der Richtfeuerachse zu sein, obwohl er sich in Wirklichkeit bereits seitwärts der Achse befindet.

Der Grenzwert  $\theta_G$  für den horizontalen Seh winkel, ab dem ein Auswandern aus der Deckpeilung sicher erkannt wird, hängt auch von dem vertikalen Seh winkel zwischen den Feuern ab. Er berechnet sich zu:

$$\theta_{G,X} = \frac{\gamma_X}{16} + 2,909 * 10^{-4} \text{ rad} \quad (11)$$

#### Bemerkungen:

Berechnung im Bogenmaß ( $2,909 * 10^{-4} \text{ rad} = \tan(1')$ ).

Durch den Index  $X$  wird verdeutlicht, dass der Grenzwert auch vom Beobachtungsabstand  $X$  abhängt. Im Folgenden werden alle Größen, die vom Abstand  $X$  abhängen, entsprechend indiziert.

### 3.3 Schärfe einer Richtfeuerlinie

Der seitliche Abstand  $Y$  rechtwinklig zu der Richtfeuerachse, bei dem ein Beobachter gemäß 3.2 erkennt, dass er nicht mehr auf der Richtfeuerachse ist, errechnet sich durch:

$$Y_X = \theta_{G,X} * \frac{X*(X+D)}{D} \quad (12)$$

Der Wert  $Y_X$  wird als Schärfe einer Richtfeuerlinie bezeichnet. Er ist abhängig vom horizontalen Sehwinkel  $\theta_G$ , den Beobachtungsabstand  $X$  und dem Abstand der beiden Feuer  $D$ .

#### Bemerkung:

Ein kleiner Wert für die Schärfe bedeutet eine genauere Bestimmung der relativen Position zur Richtfeuerachse.

Die Schärfe wird mit größer werdenden Beobachtungsabstand größer (Positionsbestimmung ungenauer) und mit größer werdendem Feuerabstand kleiner (Positionsbestimmung genauer).

#### Richtwert für die Auslegung von Richtfeuergeometrien:

Der zulässige Abstand  $Y_{zul}$  soll in der Regel nicht größer als 1/6 der Sohlbreite  $B$  des Fahrwassers sein:

$$Y_{zul,X} = \frac{B_X}{6} \quad (13)$$

Innerhalb der Nutzweite der Richtfeuerlinie  $K \leq X \leq L$  gilt für die Schärfe:

$$Y_X = \left( \frac{Y_X}{16} + 2,909 * 10^{-4} \right) * \frac{X*(X+D)}{D} \leq Y_{zul,X} \quad (14)$$

Ist die Sohlbreite  $B$  des Fahrwassers für die gesamte Nutzweite  $N$  konstant, genügt die Überprüfung der Bedingung für den größten Nutzabstand  $L$ .

$$Y_L = \left( \frac{Y_L}{16} + 2,909 * 10^{-4} \right) * \frac{L*(L+D)}{D} \leq Y_{zul,X} \quad (15)$$

Setzt man  $\gamma_L = 0,001454 \text{ rad}$  ( $5'$ ) ein, lautet die Bedingung

$$Y_L = 3,82 * 10^{-4} * \frac{L*(L+D)}{D} \leq Y_{zul,L} \quad (16)$$

Dieser Wert ist somit die kleinstmögliche Schärfe einer Richtfeuerlinie und gilt nur unter der Voraussetzung  $\gamma_L = 0,001454 \text{ rad}$  ( $5'$ ). Ist im Abstand  $X$  zum Unterfeuer das Fahrwasser eingengt, so muss für diesen Abstand die Bedingung nach Gleichung:

$$Y_X = \left( \frac{Y_X}{16} + 2,909 * 10^{-4} \right) * \frac{X*(X+D)}{D} \leq Y_{zul,X} \quad (17)$$

zusätzlich überprüft werden.

### 3.4 Feuerhöhen

Für Richtfeuerlinien im Tidegebiet sind die Feuerhöhen auf mittleres Hochwasser ( $MHW$ ), für alle anderen Richtfeuerlinien auf Mittelwasser ( $MW$ ) zu beziehen.

#### 3.4.1 Augeshöhen

Die Augeshöhen sind nach den Erfordernissen des Reviers festzulegen.

In der Regel gilt als kleinste Augeshöhe  $H_{B,min} = 3 \text{ m}$ .

### 3.4.2 Feuerhöhe des Unterfeuers

Für die formale Berechnung der Mindesthöhe eines Unterfeuers wird der nachstehende Ansatz gewählt, die sich aus zwei Anforderungen an die Bauwerkshöhe des Unterfeuers ergeben.

- (1) Anforderungen an die Tagesmarke des Bauwerks (Teilhöhe  $H_1$ )
- (2) Bauwerkserhöhung aufgrund der Erdkrümmung (Teilhöhe  $H_2$ )

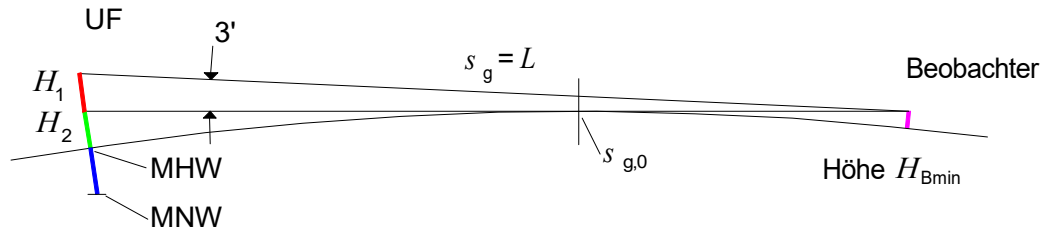


Abbildung 4: Zur Bauwerkshöhe des Unterfeuers (bei Hochwasser)

zu (1):

Um das Schattenmaß möglichst klein zu halten, sitzt die Leuchte so weit oben wie möglich, sodass die Tagesmarke des Unterfeuers im Wesentlichen durch das Bauwerk unterhalb der Laterne bestimmt ist. Für die visuelle Wirksamkeit der Tagesmarke muss sie - vom längsten Nuttabstand aus - mindestens unter einem vertikalen Sehwinkel von 3 Bogenminuten erscheinen.

Damit das Bauwerk deutlich über den Horizont herausragt und temporär auftretende Luftspiegelungen reduziert werden, sollte das Unterfeuerbauwerk im längsten Nuttabstand eine vertikale Ausdehnung von 6 Bogenminuten ( $0,001745 \text{ rad}$ ) erreichen. Mit dieser Minimalforderung wird auch erreicht, dass unter Ausnutzung der zulässigen Bebauungshöhen (siehe Abschnitt 6.1) der sichtbare Teil des Unterfeuer-Bauwerks in der Höhe immer einen Sehwinkel von 3' erreicht.

Damit ergibt sich die erste Teilhöhe  $H_1$  für ein Unterfeuer (Sichtbarkeit der Tagesmarke).

$$H_1 \approx L * \tan 6' = 0,001745 * L \quad (18)$$

zu (2):

Für die Unterkante der Tagesmarke muss die geographische Sichtweite  $s_g$  mindestens so groß wie der Nuttabstand sein. Bei einer minimalen Augeshöhe von 3 m ist die Berücksichtigung der geographischen Sichtweite erst ab einem Abstand  $L_g$  von

$$L_g > s_{g,0} = 3850 \text{ m} * \sqrt{3} = 6669 \text{ m} \approx 6700 \text{ m} \quad (19)$$

notwendig. Es ergibt sich die zweite Teilhöhe  $H_2$ :

$$H_2 \approx 1 \text{ m} * \left( \frac{L}{3850 \text{ m}} - \sqrt{\frac{H_{b,min}}{1 \text{ m}}} \right)^2 \quad \text{für } L \geq 6700 \text{ m} \quad (20)$$

#### Mindesthöhe des Unterfeuers

Es ergibt sich als Mindesthöhe der Unterfeuer (über MHW bzw. MW):

$$H_{U,min} = H_1 + H_2 \quad (21)$$

In der Tabelle 1 sind für verschiedene Nuttabstände  $L$  die Mindesthöhen der Unterfeuer angegeben. Für kleine Nutzstrecken (bis 5000 m) wird man deutlich größere Unterfeuerhöhen wählen.

Tabelle 1: Mindesthöhen von Unterfeuern bei  $H_{B,min} = 3m$

$L [m]$	$H_1 [m]$	$H_2 [m]$	$H_{U,min} [m]$
1 000	1,7	0	1,7
2 000	3,5	0	3,5
3 000	5,2	0	5,2
4 000	7,0	0	7,0
5 000	8,7	0	8,7
6 000	10,5	0	10,5
7 000	12,2	0	12,2
8 000	14,0	0,1	14,1
9 000	15,7	0,4	16,1
10 000	17,5	0,7	18,2
11 000	19,2	1,3	20,5
12 000	20,9	1,9	22,9
13 000	22,7	2,7	25,4
14 000	24,4	3,6	28,1
15 000	26,2	4,7	30,9

Neben der vorstehenden visuell begründeten Mindesthöhe sind u.a. noch folgende Aspekte bei der Wahl der Unterfeuerhöhe zu berücksichtigen.

- Größe der Tagesmarke (vertikale Sehwinkel der Tagesmarke sollte mindestens 3' bei größtem Nutzabstand sein)
- Höhe des Grundes über Normalnull an der UF-Position
- Vergleichbarkeit mit den Unterfeuerhöhen benachbarter Richtfeuerlinien
- Bebauung und Bewuchs in unmittelbarer Nähe sowie Verdeckung durch Schiffe
- konkurrierende Lichter

### 3.4.3 Feuerhöhe des Oberfeuers

Die Feuerhöhe des Oberfeuers  $H_O$  ist abhängig von der Feuerhöhe des Unterfeuers  $H_U$  vom Feuerabstand  $D_F$ , vom vertikalen Sehwinkel bei längstem ( $\gamma_L$ ) und kürzestem ( $\gamma_K$ ) Nutzabstand, von der kleinsten festgelegten Beobachtungshöhe  $H_{B,min}$ , vom mittleren Tidenhub  $MTH$  und vom Schattenmaß  $S$ .

Nach Umstellung der Gleichungen (7) und (9) und Einbeziehung der Gleichung (1) müssen folgende Bedingungen erfüllt werden (siehe auch 3.1).

#### Forderung 1:

Bei längstem Nutzabstand muss das Feuer unter dem Winkel  $\gamma_L$  über dem Unterfeuer erscheinen.

$$H_O \geq H_{B,min} - MTH + (L + D_F) * \left( \frac{\Delta U}{L} + \eta * D_F + \gamma_L \right) \quad (22)$$

### Forderung 2:

Bei kürzestem Nutzabstand muss das Feuer unter dem Winkel  $\gamma_K$  über dem Unterfeuer erscheinen.

$$H_O \geq H_{B,min} - MTH + (K + D_F) * \left( \frac{\Delta U}{K} + \eta * D_F + \gamma_K \right) \quad (23)$$

### Forderung 3:

Bei kürzestem Nutzabstand darf das Feuer nicht vom Bauwerk des Unterfeuers abgeschattet werden.

$$H_O \geq H_{B,min} - MTH + (K + D_F) * \left( \frac{\Delta U + S}{K} + \eta * D_F \right) \quad (24)$$

$$\text{mit } \Delta U = H_U + MTH - H_{B,min} \quad (25)$$

Der Faktor  $\eta$  in den Gleichungen (22) bis (24) ist von der Erdkrümmung und Strahlbrechung abhängig (siehe 3.7).

## 3.5 Feuerabstand

Der Feuerabstand  $D_F$  bestimmt die Schärfe einer Richtfeuerlinie. Für die Bedingung, dass  $Y_X \leq B_X/6$  bzw.  $Y_X \leq Y_{zul,X}$  sein soll, kann der Feuerabstand  $D_F$  nach folgender Gleichung berechnet werden:

$$D_F \geq \frac{X^2}{\frac{B_X}{6 * \theta_{G,X}} - X} = \frac{X^2}{\frac{Y_{zul,X}}{\theta_{G,X}} - X} \quad (26)$$

Der Feuerabstand  $D_F$  sollte im Allgemeinen um etwa 20% länger gewählt werden, als er nach der Gleichung (26) berechnet wird, um den maximalen vertikalen Sehwinkel etwas zu reduzieren.

Für den Regelfall, dass die Sohlbreite  $B$  des Fahrwassers für die gesamte Nutzweite  $N$  konstant ist, lautet die Gleichung (26) für den größten Nutzabstand  $L$  unter Berücksichtigung der Gleichung (11) und des Grenzwertes  $\gamma_L = 5' (0,001454 \text{ rad})$ :

$$D_F = \frac{L^2}{436 * B - L} = \frac{L^2}{2618 * Y_{zul,X} - L} \quad (27)$$

## 3.6 Strahlenbrechung in der Atmosphäre

Infolge atmosphärischer Strahlenbrechung breitet sich das Licht nicht geradlinig, sondern angenähert nach einem sehr flachen Kreisbogen aus. Der Zentriwinkel dieses Kreisbogens ist ein vom senkrechten Druckgefälle der Luft abhängiger Bruchteil des Erdzentriwinkels, dessen Schenkel die Erdradien zum Beobachter und Feuer (Ziel) bilden. Dieser Bruchteil wird als Strahlenbrechungsbeiwert  $\kappa$  bezeichnet. Sein Wert ist auf  $\kappa = 1/7$  für eine Temperatur  $1^\circ\text{C}$  auf 100 m Erhöhung festgelegt.

Der von der Erdkrümmung und Strahlbrechung abhängige Faktor  $\eta$  ergibt sich zu:

$$\eta = \frac{1 - \kappa}{2R} \quad (28)$$

Mit einem Erdradius  $R = 6\,366\,200 \text{ m}$  und einem Strahlenbrechungswert  $\kappa = 1/7$  ist:

$$\eta = 6,73 * 10^{-8} \text{ m}^{-1}. \quad (29)$$

### 3.7 Geographische Sichtweite

Die geographische Sichtweite  $s_G$  ist abhängig von der Erdkrümmung und Strahlenbrechung, von der Feuerhöhe  $H$  und der Augeshöhe  $H_B$ :

$$s_G = \sqrt{\frac{2R}{1-\kappa}} * (\sqrt{H} + \sqrt{H_B}) \quad (30)$$

Mit  $R = 6\,336\,200\text{ m}$  und  $\kappa = 1/7$  ist:

$$s_G = 3850\text{ m} * \left( \sqrt{\frac{H}{1\text{ m}}} + \sqrt{\frac{H_B}{1\text{ m}}} \right) \quad (31)$$

$$s_G = 2,08\text{ M} * \left( \sqrt{\frac{H}{1\text{ m}}} + \sqrt{\frac{H_B}{1\text{ m}}} \right) \quad (32)$$

wenn die Höhen  $H$  und  $H_B$  in m eingesetzt werden.

Die geographische Sichtweite für die kleinsten Augeshöhen  $H_{Bmin}$  und die Feuerhöhe  $H_U$  des Unterfeuers muss stets größer sein als der längste Nutzabstand  $L$  der Richtfeuerlinie. Die Anforderungen an die geographische Sichtweite werden durch die Forderungen nach Abschnitt 3.4.2 automatisch erfüllt.

## 4 Lichttechnik

Die Berechnung der benötigten lichttechnischen Werte erfolgt in einem ersten Schritt gemäß TFV-03 [1]. Zur Harmonisierung der Lichtstärke von Ober- und Unterfeuer können die Lichtstärke in einem zweiten Schritt korrigiert werden.

### 4.1 Nutzabstände

Die Nutzabstände für die beiden Einzelfeuer einer Richtfeuerlinie sind unterschiedlich:

#### 4.1.1 Unterfeuer

Minimaler Nutzabstand:  $D_{UF,min} = K$  (33)

Maximaler Nutzabstand:  $D_{UF,max} = L$  (34)

#### 4.1.2 Oberfeuer

Minimaler Nutzabstand:  $D_{OF,min} = K + D_F$  (35)

Maximaler Nutzabstand:  $D_{OF,max} = L + D_F$  (36)

### 4.2 Minimal erforderliche Beleuchtungsstärke am Beobachterauge

Für die lichttechnische Dimensionierung von Richtfeuern werden die folgenden Beleuchtungsstärken verwendet:

$$E_{min} = 1 * 10^{-6}\text{ lx} \quad (\text{Nacht}) \quad (37)$$

$$E_{min} = 1 * 10^{-3}\text{ lx} \quad (\text{Tag}) \quad (38)$$

Abweichende Beleuchtungsstärken können aufgrund meteorologischer und lichttechnischer Gründe festgelegt werden (z.B. bei der Berücksichtigung von Hintergrundaufhellung und konkurrierender Lichter, siehe TFV-03 [1]).



### Nenntragweite:

Für Seekarten und Leuchtfeuerverzeichnisse muss immer die Nenntragweite angegeben werden. Die Nenntragweite ist eine historische Festlegung (seit 1933 [8]) und gilt für eine praktische meteorologische Sichtweite von 10 Seemeilen ( $T_{M,N} = 0,7411$ ) und eine Beleuchtungsstärke von  $E_{min} = 2 * 10^{-7} \text{ lx}$ . Diese Sichtbedingungen sind heutzutage insbesondere in Küstennähe durch Hintergrundaufhellung und konkurrierende Lichter nicht mehr gegeben.

### 4.3 Blendungsbegrenzung

Je nach Umfeldleuchtdichte sollten die von Ober- und Unterfeuer am Beobachteraue erzeugten Beleuchtungsstärken  $E$  zur Vermeidung von Blendung die nachstehenden Werte nicht überschreiten.

$$E_{max} \leq 0,01 \text{ lx} \quad (39) \quad \text{für sehr dunkle Umgebung}$$

$$E_{max} \leq 0,1 \text{ lx} \quad (40) \quad \text{für hellere Umgebung}$$

Die Werte  $E_{max}$  heißen auch Blendungsbeleuchtungsstärken und die Formeln ergeben eine Obergrenze für die von den Feuern abgestrahlte Lichtstärke. Die Blendungsbeleuchtungsstärken von Feuern sind für den ungünstigsten Fall zu berechnen. Dieser tritt auf, wenn ein Sichtwert  $T_M = 1$  (meteorologische Sichtweite =  $\infty$ , „unendlich“) angenommen wird und keine Betriebsverluste eingerechnet werden ( $b = 1$ ).

### 4.4 Lichtstärkeberechnung

#### 4.4.1 Direkte Berechnung

Die Lichtstärkeberechnung (als effektive Betriebslichtstärke) erfolgt mit der Allard'schen Formel (siehe TFV-03 [1]).

Für Ober- und Unterfeuer ergeben sich unterschiedliche Lichtstärken.

$$I_{UF,eff,B \min} = E_{min} * L^2 * T_{M,B}^{-L/D_U} \quad (41)$$

$$I_{OF,eff,B \min} = E_{min} * (L + D_F)^2 * T_{M,B}^{-(L+D_F)/D_U} \quad (42)$$

$E_{min}$  minimal erforderliche Beleuchtungsstärke [ $\text{lx}$ ]

$L$  längster Nutzabstand in [ $m$ ]

$D_F$  Feuerabstand in [ $m$ ]

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

$T_{M,B}$  Bezugssichtwert

#### 4.4.2 Harmonisierung der Lichtstärken

Die unter 4.4.1 ermittelten Lichtstärken für Unter- und Oberfeuer werden in einem zweiten Schritt, der nachfolgend erläutert wird, harmonisiert (siehe auch [2]).

Zur Vereinfachung werden folgende Abkürzungen verwendet:

Nicht harmonisierte Lichtstärke des Unterfeuers aus 4.4.1

$$I_{U,n} = I_{UF,eff,B,min} \quad (43)$$

Nicht harmonisierte Lichtstärke des Oberfeuers aus 4.4.1

$$I_{O,n} = I_{OF,eff,B,min} \quad (44)$$

Die sich ergebenden harmonisierten Lichtstärken werden  $I_{U,h}$  (Unterfeuer) und  $I_{O,h}$  (Oberfeuer) genannt. In beiden Fällen handelt es sich um effektive Betriebslichtstärken.

Erläuterung des Verfahrens:

Wenn die nach den Formeln (41) und (42) berechneten Minimalwerte realisiert werden, ist die vom Ober- und Unterfeuer im maximalen Nutzabstand  $L$  beim Bezugssichtwert  $T_{M,B}$  jeweils erzeugte Beleuchtungsstärke gleich der Beleuchtungsstärke  $E_{min}$ .

In diesem Fall erscheint in der gesamten Nutzweite  $N$  der Richtfeuerlinie beim Sichtwert  $T_{M,B}$  das Unterfeuer heller als das Oberfeuer. Wird der Sichtwert größer als der Bezugssichtwert, so erscheint das Oberfeuer in bestimmten Abschnitten der Nutzweite heller als das Unterfeuer.

Da das Verhältnis der vom Ober- und Unterfeuer am Beobachteraue erzeugten Beleuchtungsstärken  $E_O$  (Oberfeuer) und  $E_U$  (Unterfeuer) Einfluss auf die visuelle Wahrnehmung und damit auf die Schärfe einer Richtfeuerlinie hat, sollten für das Verhältnis  $E_O/E_U$  bestimmte Grenzen eingehalten werden [1].

Diese sind wie folgt festgelegt:

$$R_1 = \frac{E_O}{E_U} = \frac{I_{O,n}}{I_{U,n}} * \left( \frac{L}{L+D_F} \right)^2 \leq 5 \quad (45)$$

für den größten Nutzabstand  $L$  und Sichtwert  $T_M = 1$  (beste Sicht) und

$$R_2 = \frac{E_O}{E_U} = \frac{I_{O,n}}{I_{U,n}} * \left( \frac{K}{K+D_F} \right)^2 * T_{M,B}^{\frac{D_F}{D_U}} \geq 0,2 \quad (46)$$

für den kleinsten Nutzabstand  $K$  und dem Sichtwert gleich dem Bezugssichtwert  $T_M = T_{M,B}$  (schlechteste für die Berechnung angenommene Sicht).

Die Größen  $D_F$ ,  $K$ , und  $L$  sind dabei in  $m$  einzusetzen. Die Werte  $R_1$  und  $R_2$  sollten möglichst symmetrisch um den Wert eins liegen:  $R_1 * R_2 \approx 1$ .

Mit der Forderung  $R_1 * R_2 = 1$  kann man – unter Beachtung, dass die vorstehend berechneten Lichtstärken Minimalwerte sind – eine exakte Harmonisierung durchführen.

Im nicht harmonisierten Zustand (gekennzeichnet durch den Index  $n$ ) gilt

$$R_{1n} := \frac{E_{O,n}}{E_{U,n}} = \frac{I_{O,n}}{I_{U,n}} * \left( \frac{L}{L+D_F} \right)^2 \leq 5 \quad (47)$$

$$R_{2n} := \frac{E_{O,n}}{E_{U,n}} = \frac{I_{O,n}}{I_{U,n}} * \left( \frac{K}{K+D_F} \right)^2 * T_{M,B}^{\frac{D_F}{D_U}} \geq 0,2 \quad (48)$$

$$R_{1n} * R_{2n} = \left( \frac{I_{O,n}}{I_{U,n}} \right)^2 * const. \quad (49)$$

Da die nicht harmonisierten Lichtstärken die Minimalwerte darstellen, muss zum Erreichen des Zieles ( $R_{1h} * R_{2h} = 1$ )

im Fall  $R_{1n} * R_{2n} < 1$ :

die Lichtstärke des Oberfeuers erhöht werden und  
das Unterfeuer verbleibt beim Wert  $I_{U,h} = I_{U,n}$ ,

im Fall  $R_{1n} * R_{2n} > 1$ :

die Lichtstärke des Unterfeuers erhöht werden und  
das Oberfeuer verbleibt beim Wert  $I_{O,h} = I_{O,n}$ .

Bei fester Geometrie gilt im nichtharmonisierten Zustand (Index  $n$ ):

$$R_{1n} * R_{2n} * \left(\frac{I_{U,n}}{I_{O,n}}\right)^2 = const. \quad (50)$$

und im harmonisierten Zustand (gekennzeichnet durch Index  $h$ ,  $R_{1h} * R_{2h} = 1$ ):

$$R_{1h} * R_{2h} = \left(\frac{I_{O,h}}{I_{U,h}}\right)^2 * const = 1 \quad (51)$$

bzw.

$$\left(\frac{I_{U,h}}{I_{O,h}}\right)^2 = const \quad (52)$$

Da die Konstante in beiden Fällen gleich ist gilt:

$$R_{1n} * R_{2n} * \left(\frac{I_{U,n}}{I_{O,n}}\right)^2 = \left(\frac{I_{U,h}}{I_{O,h}}\right)^2 \quad (53)$$

Verfahrensweise:

a) Die Harmonisierung im Fall  $R_{1n} * R_{2n} < 1$  erfolgt durch

$$I_{U,h} = I_{U,n} \quad (54)$$

$$\rightarrow R_{1n} * R_{2n} * \left(\frac{I_{U,n}}{I_{O,n}}\right)^2 = \left(\frac{I_{U,n}}{I_{O,h}}\right)^2 \rightarrow R_{1n} * R_{2n} * \left(\frac{1}{I_{O,n}}\right)^2 = \left(\frac{1}{I_{O,h}}\right)^2$$

$$\rightarrow R_{1n} * R_{2n} * (I_{O,h})^2 = (I_{O,n})^2 \rightarrow$$

$$I_{O,h} = \frac{I_{O,n}}{\sqrt{R_{1n} * R_{2n}}} \quad (55)$$

b) Die Harmonisierung im Fall  $R_{1n} * R_{2n} > 1$  erfolgt durch

$$I_{O,h} = I_{O,n} \quad (56)$$

$$\rightarrow R_{1n} * R_{2n} * \left(\frac{I_{U,n}}{I_{O,n}}\right)^2 = \left(\frac{I_{U,h}}{I_{O,n}}\right)^2 \rightarrow R_{1n} * R_{2n} * (I_{U,n})^2 = (I_{U,h})^2 \rightarrow$$

$$I_{U,h} = \sqrt{R_{1n} * R_{2n}} * I_{U,n} \quad (57)$$

#### 4.4.3 Übergang zu photometrischen Lichtstärken

Die ermittelten Lichtstärken für Unter- und Oberfeuer sind die minimal erforderlichen effektiven Betriebslichtstärken  $I_{eff,B,min}$ .

Alle weiteren Berechnungen erfolgen gemäß TFV-03 Tragweiten und Lichtstärken von Feuern und Signallichtern.

Die empfohlene effektive Betriebslichtstärke liegt 20% über dem Minimalwert

$$I_{eff,B,empf} = 1,2 * I_{eff,B,min} \quad (58).$$

Beim Übergang zu photometrischen Lichtstärken sind der Übertragungsgrad  $k$  und der Betriebsfaktor  $b = 0.75$  maßgeblich.

$$I_{ph,min} = \frac{I_{eff,B,min}}{k * b} \quad (59)$$

$$I_{ph,empf} = \frac{I_{eff,B,empf}}{k * b} \quad (60)$$

#### 4.4.4 Vermeidung von Blendung

Die Bewertung der Blendung erfolgt gemäß TFV-03 Tragweiten und Lichtstärken von Feuern und Signallichtern.

#### 4.4.5 Ergänzung

Aus vorstehenden Abschnitten werden die Unter- und Obergrenzen für die jeweiligen Lichtstärken der Feuer abgeleitet. In der Regel liegt zwischen diesen Grenzen ein freies Intervall, in dem die Lichtstärken gewählt werden können. Ist dies nicht der Fall oder sind die Untergrenzen sogar größer als die Obergrenzen, so muss die Richtfeuergeometrie hinterfragt werden.

### 4.5 Streuwinkel

Die Beschreibung der erforderlichen Lichtstärkeverteilungen erfolgt durch die Angabe des so genannten Halbstreuwinkel (Abbildung 5). Dazu betrachtet man die Lichtstärkeverteilungskurve in der horizontalen bzw. vertikalen Ebene. Auf der Richtfeuerachse ( $\alpha = 0$ ) wird die maximale Lichtstärke  $I_0$  erwartet, außerhalb der Achse eine symmetrische Abnahme der Lichtstärke.

Der Halbstreuwinkel der Lichtstärkeverteilung ist der Winkelbereich, in dem die Lichtstärke mindestens die Hälfte des Maximalwertes auf der Achse beträgt (siehe auch [7]).

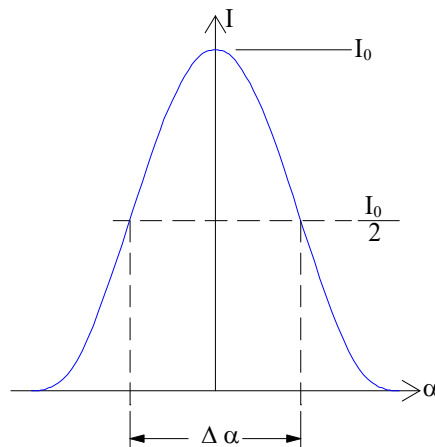


Abbildung 5:

Vereinfachte Lichtstärkeverteilung mit Maximallichtstärke und Halbstreuwinkel

#### 4.5.1 Horizontale Streuwinkel

Der horizontale Halbstreuwinkel sollte so gewählt werden, dass in der Mitte des Nutzgebietes an der Fahrrinnengrenze mindestens noch die Hälfte der Achslichtstärke erreicht wird (siehe Abbildung 6). Zum Ausgleich möglicher Justiertoleranzen sollte der Halbstreuwinkel um 50% größer gewählt werden.

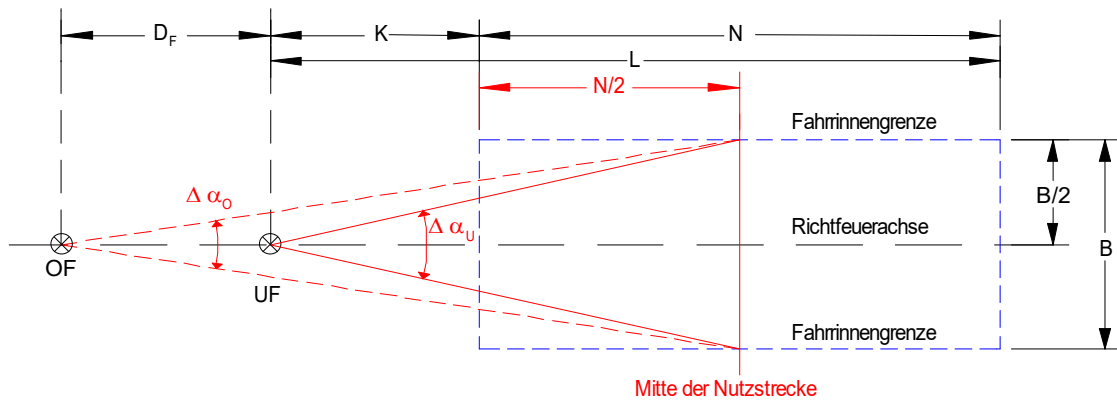


Abbildung 6: Erläuterungen zum horizontalen Streuwinkel, Draufsicht

Es ergeben sich folgende horizontale Streuwinkel:

Unterfeuer:

$$\Delta\alpha_U \geq 1,5 * 2 * \tan^{-1} \left( \frac{B/2}{K+(L-K)/2} \right) = 3 * \tan^{-1} \left( \frac{B}{L+K} \right) \quad (61)$$

Oberfeuer:

$$\Delta\alpha_O \geq 1,5 * 2 * \tan^{-1} \left( \frac{B/2}{D_F+K+(L-K)/2} \right) = 3 * \tan^{-1} \left( \frac{B}{2*D_F+L+K} \right) \quad (62)$$

Bei entsprechender nautisch-funktionaler Anforderungslage kann der horizontale Streuwinkel abweichend zu der vorstehenden Berechnung festgelegt werden für:

- den kürzesten Nutzabstand  $K$
- den Annäherungsbereich (Einschwenken in die Richtfeuerachse), Abstand  $> L$ .

#### 4.5.2 Vertikale Streuwinkel

Für den vertikalen Streuwinkel wird ebenfalls die Mitte der Nutzstrecke zu Grunde gelegt. Der vertikale Streuwinkel sollte mindestens so groß sein, dass für die größte und kleinste Augeshöhe mindestens die halbe Achslichtstärke erreicht wird. Zum Ausgleich möglicher Justiertoleranzen sollte der Halbstreuwinkel um 50% größer gewählt werden. Zusätzlich ist die Tide (über den Mittleren Tidenhub  $MTH$ ) zu berücksichtigen. Es ergeben sich folgende vertikale Halbstreuwinkel.

Unterfeuer:

$$\Delta\beta_U \geq 1,5 * 2 * \tan^{-1} \left( \frac{(H_{Bmax}-H_{Bmin}+MTH)/2}{K+(L-K)/2} \right) = 3 * \tan^{-1} \left( \frac{H_{Bmax}-H_{Bmin}+MTH}{L+K} \right) \quad (63)$$

Oberfeuer:

$$\Delta\beta_O \geq 1,5 * 2 * \tan^{-1} \left( \frac{(H_{Bmax}-H_{Bmin}+MTH)/2}{D_F+K+(L-K)/2} \right) = 3 * \tan^{-1} \left( \frac{H_{Bmax}-H_{Bmin}+MTH}{2*D_F+L+K} \right) \quad (64)$$

Um den Einfluss von Justierfehlern zu minimieren sollte der vertikale Halbstreuwinkel nicht unter  $1^\circ$  gewählt werden.

Da die Tide in der Regel keinen großen Beitrag zum Streuwinkel liefert und die Realisierung geeigneter vertikaler Streuwinkel für Richtfeuer aufgrund der großen Beobachtungsabstände unproblematisch ist, kann eine vorhandene Tide zur Vereinfachung in vielen Fällen pauschal mit 4 Meter ( $MTH = 4 \text{ m}$ ) berücksichtigt werden.

## 5 Berechnungsverfahren

### 5.1 Prinzip

Die geometrische Richtfeuerberechnung geht vereinfacht von einer rechteckigen Kontur der Fahrrinne mit der Breite  $B$  (Sohlenbreite mit der festgelegten garantierten Wassertiefe) und der Länge  $N$  aus.

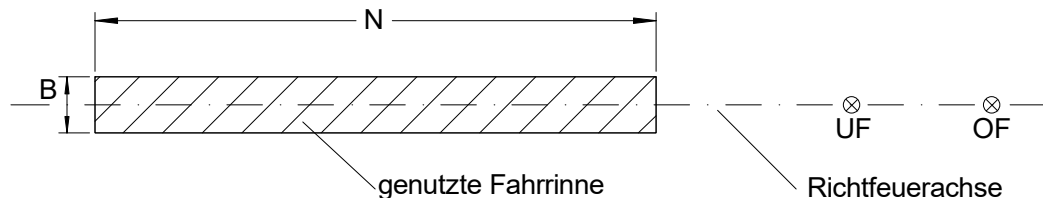


Abbildung 7: Vereinfachte Geometrie zur Richtfeuerberechnung

Da die visuelle Genauigkeit der Richtfeuerlinie zur Bahnführung bei Annäherung an die Feuer zunimmt, kann die Fahrrinne in kürzerem Abstand auch schmaler werden (Einengung). In diesem Fall zerlegt man die Fahrrinne in zwei oder mehrere aneinanderstoßende Rechtecke.

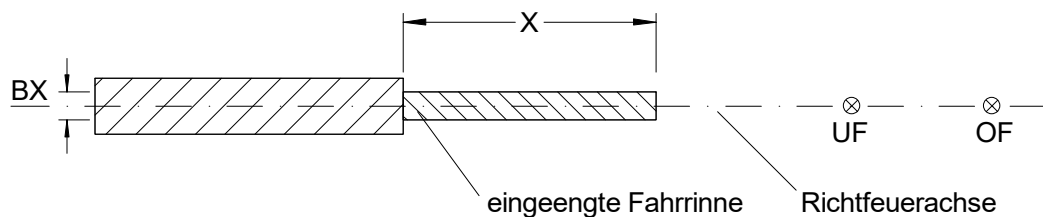


Abbildung 8: Fahrrinne mit Einengung

Die Genauigkeit, mit der das Auge die Abweichung der Beobachterposition von der Richtfeuerachse registriert, hängt von dem vertikalen Sehwinkel  $\gamma$  ab, unter dem die beiden Feuer dem Beobachter erscheinen und wird Schärfe der Richtfeuerlinie genannt.

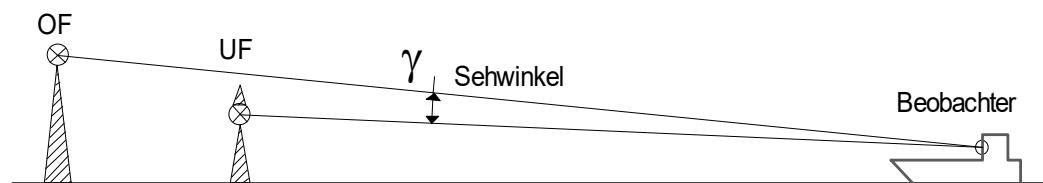


Abbildung 9: Vertikaler Sehwinkel

Der Sehwinkel  $\gamma$  hängt von den Feuerhöhen, der Beobachtungshöhe und dem Beobachtungsabstand ab. Er ändert sich daher beim Durchfahren der Nutzstrecke der Richtfeuerlinie.

Ziel der geometrischen Richtfeuerberechnung ist es, durch geeignete Wahl der Standorte und Bauwerkshöhen der Feuerträger eine ausreichend genaue visuelle Bahnführung in der Fahrrinne zu ermöglichen.

Bei festgelegter Geometrie wird durch die lichttechnische Berechnung, die Erkennbarkeit der Einzelfeuer im Nutzbereich sichergestellt, die wahrgenommene Helligkeit von Unter- und Oberfeuer für verschiedene Sichtwerte angeglichen und Blendung im Nahbereich vermieden.

Die Berechnung einer Richtfeuerlinie erfolgt iterativ. Bei einer vollständigen Neudimensionierung einer Richtfeuerlinie wird man damit beginnen, eine günstige Position und Höhe für das Unterfeuer festzulegen. Anschließend wird man aus den ergänzenden Vorgaben eine Position und Höhe des Oberfeuers berechnen. Das Ergebnis muss dann auf bautechnische und lichttechnische Darstellbarkeit sowie Zweckmäßigkeit überprüft werden. Als Ergebnis der Betrachtung ergibt sich gegebenenfalls Änderungsbedarf an den Eingangsgrößen, sodass die Berechnung mit geänderten Bedingungen wiederholt wird, bis eine abschließende Lösung gefunden ist.

## 5.2 Ablauf

### 5.2.1 Vorzugebende Parameter

- Nutzweite  $N$
- Sohlbreite  $B$
- Mittlerer Tidenhub  $MTH$
- Vorgegebenes Schattenmaß  $S_{vor}$  (durch Bauwerk vorgegeben)
- Bezugssichtwert  $T_{M,B}$
- Schwellenbeleuchtungsstärke  $E_{min}$  (abhängig von der Umfeldaufhellung)
- maximale und minimale Augeshöhe  $H_{B,max}$  und  $H_{B,min}$

### 5.2.2 Reihenfolge der Berechnung

Geometrischer Teil:

- (A)** Festlegung eines zweckmäßigen Standortes für das Unterfeuer ( $K$ )
- (B)** Höhe des Unterfeuers  $H_U$
- (C)** Feuerabstand  $D_F$
- (D)** Höhe des Oberfeuers  $H_O$  (drei Bedingungen)

Lichttechnischer Teil:

- (E)** Mindestlichtstärke auf der Achse
- (F)** Harmonisierung der Lichtstärke Oberfeuer und Unterfeuer
- (G)** Überprüfung der Blendung
- (H)** Streuwinkel

Für den Schritt (A) empfiehlt die IALA als ersten Ansatz das Unterfeuer auf eine Position mit  $K = \frac{1}{5} * N$  zu setzen.

In der Regel ist es zweckmäßig mehrere Standorte für das Unterfeuer (verschiedene  $K$ ) anzunehmen und bis zum Schritt (D) die Bauwerke zu berechnen. Erst mit den fixierten geometrischen Daten aus (A) bis (D) müssen die Anforderungen an die Lichtstärkeverteilung berechnet werden.

## 6 Ergänzende Auflagen

### 6.1 Freizuhaltender Bereich

Um die Richtfeuer bei Nacht und die Feuerträger am Tage (als Richtbaken) aus dem Nutzbereich der Richtfeuerlinie gut erkennen zu können, sind im Bereich der Feuer bestimmte Räume von einer Bebauung und Bepflanzung freizuhalten. Der freizuhaltende Bereich wird für den jeweiligen Standort abschließend durch eine nautische Bewertung festgestellt. Aus geometrischen und lichttechnischen Gründen sollen mindestens die nachstehenden Bereiche freigehalten werden.

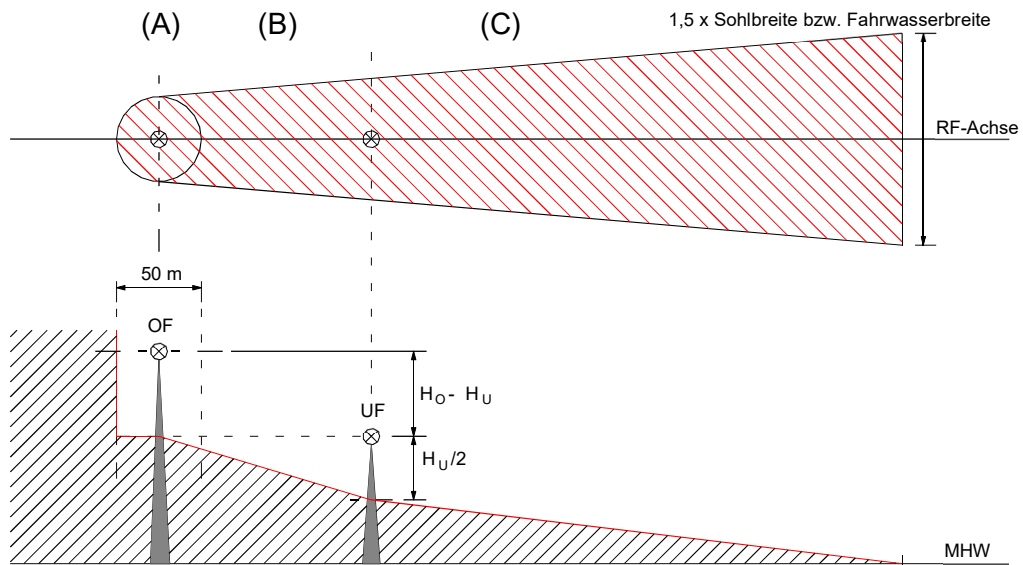


Abbildung 10: Freizuhaltender Bereich

- (A) Am Oberfeuer ein Raum mit einem Radius von 25 m um das Oberfeuer herum oberhalb einer Höhe, die der Höhe des Unterfeuers  $H_U$  entspricht.
- (B) Zwischen Oberfeuer und Unterfeuer der Raum oberhalb einer geneigten Trapezebene, die am Oberfeuer durch die Höhe  $H_U$ , am Unterfeuer durch die Höhe  $H_U/2$  verläuft und seitlich durch ein Strahlenpaar begrenzt ist, das am Oberfeuer den dort freizuhaltenden Raum tangiert und im kurzen Nutzabstand  $K$  durch die Endpunkte einer orthogonal gedachten Strecke geht, die mindestens der 1,5-fachen Sohlbreite oder Fahrwasserbreite entspricht.
- (C) Vor dem Unterfeuer ein Raum oberhalb einer geneigten Trapezebene, die am Unterfeuer durch die Höhe  $H_U/2$ , im kurzen Nutzabstand  $K$  durch die MHW-Linie verläuft und seitlich durch die im vorhergehenden Absatz definierte Linien begrenzt ist.

Zeigen die Feuer zusätzlich Sektoren, so sind die betroffenen Räume entsprechend freizuhalten.



## 6.2 Vermeidung von Störlichtern

In einem Bereich von 50 m beiderseits der Richtfeuerlinie und 500 m hinter dem Oberfeuer darf eine Bebauung mit leuchtenden Flächen nur bis zu einer Höhe von 10 m unterhalb der Höhe des Oberfeuers zugelassen werden. Unter leuchtenden Flächen werden zum Beispiel beleuchtete Fensteröffnungen oder angestrahlte Bauwerksteile verstanden.

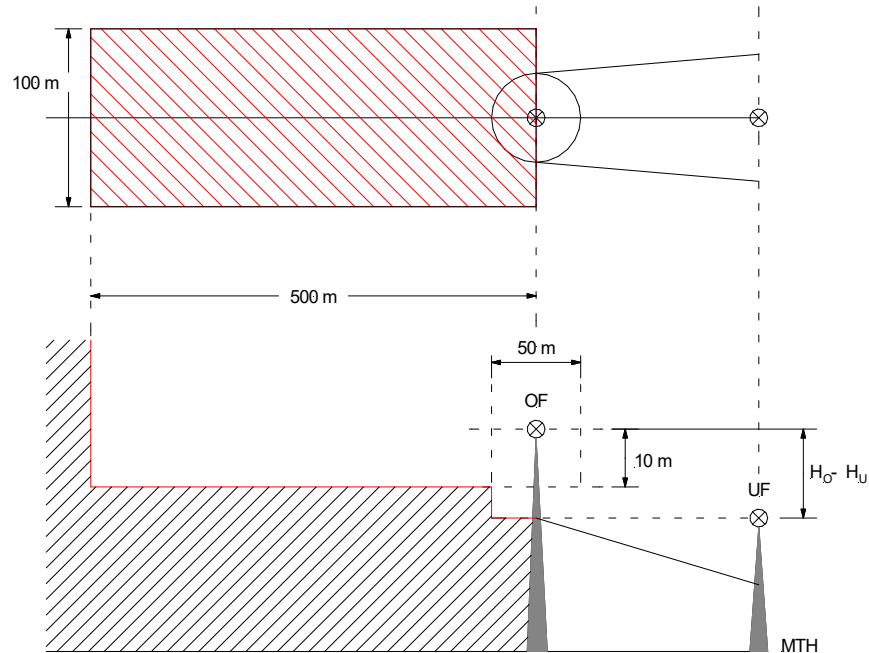


Abbildung 11: Bereich ohne beleuchtete Bauwerke

In der Regel muss auch gefordert werden, dass von der Fahrinne aus in unmittelbarer Nähe des Richtfeuers durch Dritte keine Lichter gezeigt werden, die die Sichtbarkeit des Richtfeuers beeinträchtigen oder zur Verwirrung führen können.

## 7 Durchgerechnete Beispiele

### 7.1 Beispiel 1

#### 7.1.1 Vorgaben

Es ist eine Richtfeuerlinie mit folgenden Vorgaben zu dimensionieren.

Längster Nutzabstand $L$ :	12 600 m
Kürzester Nutzabstand $K^{(1)}$ :	4 800 m
Sohlbreite $B$ :	400 m
Mittlerer Tidenhub $MTH$ :	3,0 m
Vorgegebenes Schattenmaß $S_{vor}^{(2)}$ :	1,8 m
Bezugssichtwert $T_{M,B}$ :	0,35
Minimale Beleuchtungsstärke $E_{min}^{(3)}$ :	$10^{-6}$ lx
Maximale Augeshöhe $H_{B,max}$ :	45 m
Minimale Augeshöhe $H_{B,min}$ :	3 m
Taktung:	Iso 4s (2 s hell – 2 s dunkel)

(1) Hiermit ist der Standort des Unterfeuers bereits festgelegt

(2) Bautechnische Vorgabe

(3) Wert für Richtfeuer, nachts ohne Hintergrundaufhellung

#### 7.1.2 Höhe des Unterfeuers

Aus Formel (18) erhält man für die Teilhöhe  $H_1$  des Unterfeuers:

$$H_1 = L * \tan 6' = 0,001745 * L = 0,001745 * 12600 \text{ m} = 22 \text{ m}$$

Da der Nutzabstand größer als 6700 m ist, muss auch die Teilhöhe  $H_2$  aus Formel (20) berücksichtigt werden.

$$H_2 = 1 \text{ m} * \left( \frac{L}{3850 \text{ m}} - \sqrt{\frac{H_{B,min}}{1 \text{ m}}} \right)^2 = 1 \text{ m} * \left( \frac{12600 \text{ m}}{3850 \text{ m}} - \sqrt{\frac{3 \text{ m}}{1 \text{ m}}} \right)^2 = 1 \text{ m} * (3,2727 - 1,73)^2 = 2,37 \text{ m}$$

Es ergibt sich als minimale Unterfeuerhöhe (Formel (21)):

$$H_{U,min} = H_1 + H_2 = 22 \text{ m} + 2,37 \text{ m} = 24,37 \text{ m über MHW}$$

#### 7.1.3 Feuerabstand

Aus Formel (27) ergibt sich ein minimaler Feuerabstand von:

$$D_F \geq \frac{L^2}{436 * B - L} = \frac{12600^2 \text{ m}^2}{436 * 400 \text{ m} - 12600 \text{ m}} = 981,2 \text{ m}$$

Gemäß Abschnitt 3.5 wird der Feuerabstand ca. 20% größer gewählt.

Damit erhält man:  $D_F = 1200 \text{ m}$ .

#### 7.1.4 Höhe des Oberfeuers

Berechnung der Teilgrößen  $\Delta U$  und  $\eta * D_F$  gemäß Abschnitt 3.4.3.

$$\Delta U = H_U + MTH - H_{B,min} = 24,37 \text{ m} + 3 \text{ m} - 3 \text{ m} = 24,37 \text{ m}$$

$$\eta * D_F = 6,73 * 10^{-8} * 1200 = 8,076 * 10^{-5}$$

Forderung 1 (Formel 22):

Mit  $\gamma_L = 5' = 1,4544 * 10^{-3} \text{ rad}$

$$\begin{aligned} H_O &\geq H_{B,min} - MTH + (L + D_F) * \left( \frac{\Delta U}{L} + \eta * D_F + \gamma_L \right) \\ &= 3 \text{ m} - 3 \text{ m} + (12600 \text{ m} + 1200 \text{ m}) * \left( \frac{24,37}{12600} + 8,076 * 10^{-5} + 1,4544 * 10^{-3} \right) \\ &= 13800 \text{ m} * (0,003469) = 47,88 \text{ m} \end{aligned}$$

$\Rightarrow H_O \geq 47,88 \text{ m}$

Forderung 2 (Formel 23):

Mit  $\gamma_K = 4' = 1,164 * 10^{-3} \text{ rad}$

$$\begin{aligned} H_O &\geq H_{B,min} - MTH + (K + D_F) * \left( \frac{\Delta U}{K} + \eta * D_F + \gamma_K \right) \\ &= 3 \text{ m} - 3 \text{ m} + (4800 \text{ m} + 1200 \text{ m}) * \left( \frac{24,37}{4800} + 8,076 * 10^{-5} + 1,164 * 10^{-3} \right) \\ &= 6000 \text{ m} * (0,00632) = 37,92 \text{ m} \end{aligned}$$

$\Rightarrow H_O \geq 37,92 \text{ m}$

Forderung 3 (Formel 24):

$$\begin{aligned} H_O &\geq H_{B,min} - MTH + (K + D_F) * \left( \frac{\Delta U + S_{vor}}{K} + \eta * D_F \right) \\ &= 3 \text{ m} - 3 \text{ m} + (4800 \text{ m} + 1200 \text{ m}) * \left( \frac{24,37 + 1,8}{4800} + 8,076 * 10^{-5} \right) \\ &= 6000 \text{ m} * (0,00553) = 33,20 \text{ m} \end{aligned}$$

$\Rightarrow H_O \geq 33,20 \text{ m}$

Die Forderung 1 „ $H_O \geq 47,88 \text{ m}$  über  $MHW^*$ “ ergibt die höchste Bauwerkshöhe.

### 7.1.5 Erforderliche Mindestlichtstärken auf der Achse

Unterfeuer (Formel (41) mit  $L = 12600 \text{ m}$ )

$$I_{U,n} = E_{min} * L^2 * T_{M,B}^{-\frac{L}{1852 \text{ m}}} = 10^{-6} \text{ lx} * 12600^2 \text{ m}^2 * 0,35^{-\frac{12600}{1852}}$$

$$I_{U,n} = 158,76 \text{ cd} * 1265 = 200864 \text{ cd}$$

Oberfeuer (Formel (42) mit  $L + D_F = 13800 \text{ m}$ )

$$I_{O,n} = E_{min} * (L + D_F)^2 * T_{M,B}^{-\frac{L+D_F}{1852 \text{ m}}} = 10^{-6} \text{ lx} * 13800^2 \text{ m}^2 * 0,35^{-\frac{13800}{1852}}$$

$$I_{O,n} = 190,44 \text{ cd} * 2498 = 475719 \text{ cd}$$

### 7.1.6 Harmonisierung der Lichtstärken

Nichtharmonisierte Verhältniszahlen gemäß den Formeln (47) und (48):

$$R_{1n} = \frac{E_O}{E_U} = \frac{I_{O,n}}{I_{U,n}} * \left( \frac{L}{L + D_F} \right)^2 = \frac{475719}{200864} * \left( \frac{12600}{13800} \right)^2 = 1,974$$

$$R_{2n} = \frac{E_O}{E_U} = \frac{I_{O,n}}{I_{U,n}} * \left( \frac{K}{K + D_F} \right)^2 * T_{M,B}^{-\frac{D_F}{1852 \text{ m}}} = \frac{475719}{200864} * \left( \frac{4800}{6000} \right)^2 * 0,35^{-\frac{1200}{1852}} = 0,7576$$

$$R_{1n} * R_{2n} = 1,974 * 0,7576 = 1,496 > 1$$

Da das Produkt  $R_{1n} * R_{2n}$  größer eins ist, erfolgt die Harmonisierung der Lichtstärke durch Erhöhung der Lichtstärke des Unterfeuers (siehe Abschnitt 4.4.2, Fall b).

$$I_{O,h} = I_{O,n} = 475719 \text{ cd}$$

und

$$I_{U,h} = \sqrt{R_{1n} * R_{2n}} * I_{U,n} = \sqrt{1,496} * 200864 \text{ cd} = 245678 \text{ cd}$$

### 7.1.7 Photometrische Lichtstärken

Übergang zu photometrischen Lichtstärken gemäß den Formeln (59) und (60).

Taktung ISO 4s mit Hellzeit  $T_{ein} = 2 \text{ s}$ ,

Ergibt:  $k = \frac{2 \text{ s}}{0,1 \text{ s} + 2 \text{ s}} = 0,952$

Betriebsfaktor  $b = 0,75$

Aus den effektiven Betriebslichtstärken (harmonisiert siehe 7.1.6) ergeben sich die minimalen photometrischen Lichtstärken zu:

Unterfeuer:  $I_{U,ph,min} = \frac{1}{k*b} * I_{U,h} = \frac{245678 \text{ cd}}{0,952*0,75} = 343949 \text{ cd}$

Oberfeuer:  $I_{O,ph,min} = \frac{1}{k*b} * I_{O,h} = \frac{475719 \text{ cd}}{0,952*0,75} = 666007 \text{ cd}$

### 7.1.8 Streuwinkel

Horizontale Halbstreuwinkel

Unterfeuer (Formel 61):

$$\Delta\alpha_U \geq 3 * \tan^{-1} \left( \frac{B}{L + K} \right) = 3 * \tan^{-1} \left( \frac{400}{12600 + 4800} \right) = 3,95^\circ$$

Oberfeuer (Formel 62):

$$\Delta\alpha_O \geq 3 * \tan^{-1} \left( \frac{B}{2 * D_F + L + K} \right) = 3 * \tan^{-1} \left( \frac{400}{2400 + 12600 + 4800} \right) = 3,47^\circ$$

## Vertikale Halbstreuwinkel

Unterfeuer (Formel 63):

$$\Delta\beta_U \geq 3 * \tan^{-1} \left( \frac{H_{B \max} - H_{B \min} + MTH}{L + K} \right) = 3 * \tan^{-1} \left( \frac{45 - 3 + 3}{12600 + 4800} \right) = 0,54^\circ$$

Oberfeuer (Formel 64):

$$\Delta\beta_O \geq 3 * \tan^{-1} \left( \frac{H_{B \max} - H_{B \min} + MTH}{2 * D_F * L + K} \right) = \tan^{-1} \left( \frac{45 - 3 + 3}{2400 + 12600 + 4800} \right) = 0,39^\circ$$

Entsprechend der Bemerkung aus 4.5.2 sollte für den vertikalen Halbstreuwinkel mindestens  $1^\circ$  gewählt werden.

### 7.1.9 Vertikaler Sehwinkel

Der Verlauf des vertikalen Sehwinkels bei der projizierten Richtfeuerlinie ist nachstehend für die beiden Augeshöhen 3 und 45 m dargestellt. Bei der Augeshöhe  $H_B$  von 3 m erreicht der vertikale Sehwinkel bei ca. 3000 m ein Maximum. Diese ist aber schon außerhalb des Nutzbereiches. Bei großen Abständen nähern sich die vertikalen Winkel der 5'-Grenze an.

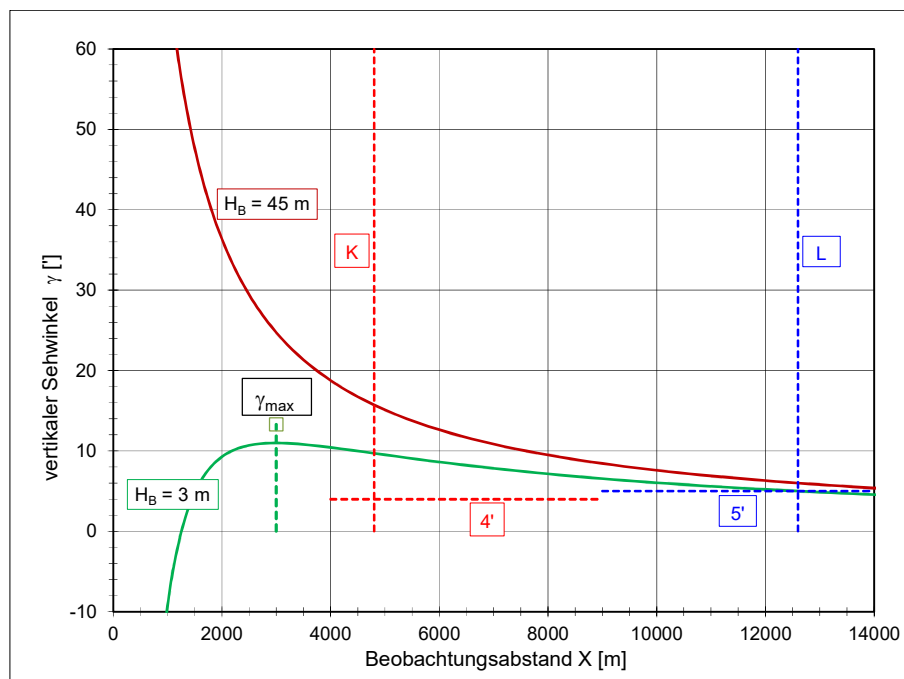


Abbildung 12: Verlauf des vertikalen Sehwinkels aus Beispiel 1

### 7.1.10 Schärfe

Der Verlauf der Schärfe ist nachstehend abgebildet. Die benötigte Schärfe von  $Y_{max} = B/6 = 66,7$  m wird im ganzen Nutzbereich unterschritten. Der Einfluss der Augeshöhe ist relativ gering.

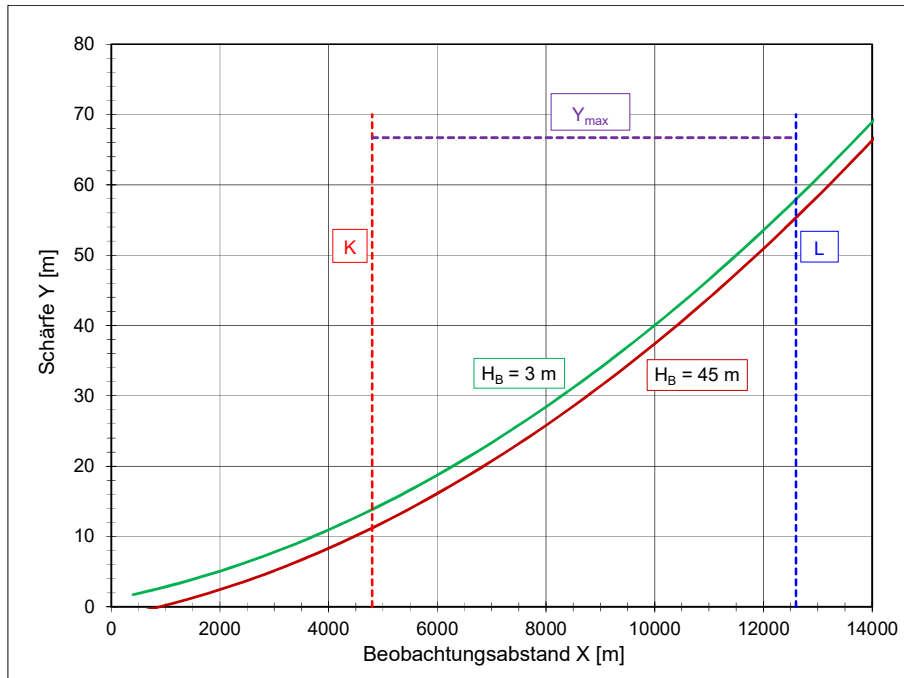


Abbildung 13: Verlauf der Schärfe aus Beispiel 1

## 7.2 Beispiel 2

### 7.2.1 Vorgaben

Es ist eine Richtfeuerlinie mit folgenden Vorgaben zu dimensionieren.

Längster Nutzabstand $L$ :	2 700 m
Kürzester Nutzabstand $K^{(1)}$ :	820 m
Sohlbreite $B$ :	100 m
Mittlerer Tidenhub $MTH$ <sup>(2)</sup> :	0,0 m
Vorgegebenes Schattenmaß $S_{vor}$ <sup>(3)</sup> :	1,0 m
Bezugssichtwert $T_{M,B}$ :	0,40
Minimale Beleuchtungsstärke $E_{min}$ <sup>(4)</sup> :	$2 \cdot 10^{-5}$ lx
Maximale Augeshöhe $H_{B,max}$ :	25 m
Minimale Augeshöhe $H_{B,min}$ :	3 m
Taktung:	Oc 3 s (2,25 s hell – 0,75 s dunkel)

- (1) Hiermit ist der Standort des Unterfeuers bereits festgelegt.
- (2) Keine Tide, Feuerhöhenangabe über  $MW$
- (3) Bautechnische Vorgabe
- (4) Festlegung aufgrund starker Hintergrundaufhellung

### 7.2.2 Höhe des Unterfeuers

Aus Formel (18) erhält man für die Teilhöhe  $H_1$  des Unterfeuers:

$$H_1 = L * \tan 6' = 0,001745 * L = 0,001745 * 2700 \text{ m} = 4,7 \text{ m}$$

Da der Nutzabstand kleiner als 6700 m ist, wird die Teilhöhe  $H_2$  gleich Null ( $H_2 = 0 \text{ m}$ ).

Es ergibt sich als minimale Unterfeuerhöhe (Formel (21)):

$$H_{U,min} = H_1 + H_2 = 4,7 \text{ m} + 0 \text{ m} = 4,7 \text{ m über MW (keine Tide)}$$

### 7.2.3 Feuerabstand

Aus Formel (27) ergibt sich ein minimaler Feuerabstand von:

$$D_F \geq \frac{L^2}{436 * B - L} = \frac{2700^2 \text{ m}^2}{436 * 100 \text{ m} - 2700 \text{ m}} = 178,2 \text{ m}$$

Gemäß Abschnitt 3.5 wird der Feuerabstand ca. 20% größer gewählt.

Damit erhält man:  $D_F = 215 \text{ m}$ .

### 7.2.4 Höhe des Oberfeuers

Berechnung der Teilgrößen  $\Delta U$  und  $\eta * D_F$  gemäß Abschnitt 3.4.3.

$$\Delta U = H_U + MTH - H_{B,min} = 4,7 \text{ m} + 0 \text{ m} - 3 \text{ m} = 1,7 \text{ m und}$$

$$\eta * D_F = 6,73 * 10^{-8} * 215 = 1,447 * 10^{-5}$$

### Forderung 1 (Formel 22):

mit  $\gamma_L = 5' = 1,4544 \cdot 10^{-3} \text{ rad}$

$$\begin{aligned} H_O &\geq H_{B,\min} - MTH + (L + D_F) * \left( \frac{\Delta U}{L} + \eta * D_F + \gamma_L \right) \\ &= 3 \text{ m} - 0 \text{ m} + (2700 \text{ m} + 215 \text{ m}) * \left( \frac{1,7}{2700} + 1,447 * 10^{-5} + 1,4544 * 10^{-3} \right) \\ &= 3 \text{ m} + 2915 * (0,0021) = 9,12 \text{ m} \end{aligned}$$

$\Rightarrow H_O \geq 9,12 \text{ m}$

### Forderung 2 (Formel 23):

mit  $\gamma_K = 4' = 1,164 \cdot 10^{-3} \text{ rad}$

$$\begin{aligned} H_O &\geq H_{B,\min} - MTH + (K + D_F) * \left( \frac{\Delta U}{K} + \eta * D_F + \gamma_K \right) \\ &= 3 \text{ m} - 0 \text{ m} + (820 \text{ m} + 215 \text{ m}) * \left( \frac{1,7}{820} + 1,447 * 10^{-5} + 1,164 * 10^{-3} \right) \\ &= 3 \text{ m} + 1035 * (0,00325) = 6,37 \text{ m} \end{aligned}$$

$\Rightarrow H_O \geq 6,37 \text{ m}$

### Forderung 3 (Formel 24):

$$\begin{aligned} H_O &\geq H_{B,\min} - MTH + (K + D_F) * \left( \frac{\Delta U + S_{vor}}{K} + \eta * D_F \right) \\ &= 3 \text{ m} - 0 \text{ m} + (820 \text{ m} + 215 \text{ m}) * \left( \frac{1,7 + 1,0}{820} + 1,447 * 10^{-5} \right) \\ &= 3 \text{ m} + 1035 * (0,00331) = 6,42 \text{ m} \end{aligned}$$

$\Rightarrow H_O \geq 6,42 \text{ m}$

Die Forderung 1: „ $H_O \geq 9,12 \text{ m}$  über MW“ ergibt die höchste Bauwerkshöhe.

## 7.2.5 Erforderliche Mindestlichtstärken auf der Achse

Unterfeuer (Formel (41) mit  $L = 2700 \text{ m}$ )

$$\begin{aligned} I_{U,n} &= E_{\min} * L^2 * T_{M,B} \frac{L}{1852 \text{ m}} = 2 * 10^{-5} \text{ lx} * 2700^2 \text{ m}^2 * 0,4 \frac{2700}{1852} \\ I_{U,n} &= 145,8 \text{ cd} * 3,8 = 554 \text{ cd} \end{aligned}$$

Oberfeuer (Formel (42) mit  $L + D_F = 2915 \text{ m}$ )

$$\begin{aligned} I_{O,n} &= E_{\min} * (L + D_F)^2 * T_{M,B} \frac{L + D_F}{1852 \text{ m}} = 2 * 10^{-5} \text{ lx} * 2915^2 \text{ m}^2 * 0,4 \frac{2915}{1852} \\ I_{O,n} &= 169,94 \text{ cd} * 4,23 = 718,7 \text{ cd} \end{aligned}$$

## 7.2.6 Harmonisierung der Lichtstärken

Nichtharmonisierte Verhältniszahlen (Formeln (47) und (48))

$$\begin{aligned} R_{1n} &= \frac{E_O}{E_U} = \frac{I_{O,n}}{I_{U,n}} * \left( \frac{L}{L + D_F} \right)^2 = \frac{718,7}{554} * \left( \frac{2700}{2700 + 215} \right)^2 = 1,11 \\ R_{2n} &= \frac{E_O}{E_U} = \frac{I_{O,n}}{I_{U,n}} * \left( \frac{K}{K + D_F} \right)^2 * T_{M,B} \frac{D_F}{1852 \text{ m}} = \frac{718,7}{554} * \left( \frac{820}{820 + 215} \right)^2 * 0,4 \frac{215}{1852} = 0,814 \\ R_{1n} * R_{2n} &= 1,11 * 0,814 = 0,904 < 1 \end{aligned}$$



Da das Produkt  $R_{1n} * R_{2n}$  kleiner eins ist, erfolgt die Harmonisierung der Lichtstärke durch Erhöhung der Lichtstärke des Oberfeuers (siehe 4.4.2, Fall b).

$$I_{U,h} = I_{U,n} = 554 \text{ cd}$$

und

$$I_{O,h} = \frac{I_{O,n}}{\sqrt{R_{1n} * R_{2n}}} = \frac{718,7 \text{ cd}}{\sqrt{0,904}} = 756 \text{ cd}$$

### 7.2.7 Photometrische Lichtstärken

Übergang zu photometrischen Lichtstärken gemäß den Formeln (59) und (60).

Taktung Oc 3s mit Hellzeit  $T_{ein} = 2,25 \text{ s}$ ,

Ergibt:  $k = \frac{2,25 \text{ s}}{0,1 \text{ s} + 2,25 \text{ s}} = 0,95745$

Betriebsfaktor  $b = 0,75$

Aus den effektiven Betriebslichtstärken (harmonisiert 7.1.6) ergeben sich die minimalen photometrischen Lichtstärken:

Unterfeuer:  $I_{U,ph,min} = \frac{1}{k*b} * I_{U,h} = \frac{554 \text{ cd}}{0,92*0,75} = 771 \text{ cd}$

Oberfeuer:  $I_{O,ph,min} = \frac{1}{k*b} * I_{U,h} = \frac{756 \text{ cd}}{0,92*0,75} = 1053 \text{ cd}$

### 7.2.8 Streuwinkel

#### Horizontale Halbstreuwinkel

Unterfeuer (Formel 61):

$$\Delta\alpha_U \geq 3 * \tan^{-1}\left(\frac{B}{L+K}\right) = 3 * \tan^{-1}\left(\frac{100}{2700+820}\right) = 4,9^\circ$$

Oberfeuer (Formel 62):

$$\Delta\alpha_O \geq 3 * \tan^{-1}\left(\frac{B}{2 * D_F + L + K}\right) = 3 * \tan^{-1}\left(\frac{100}{215+2700+820}\right) = 4,6^\circ$$

#### Vertikale Halbstreuwinkel

Unterfeuer (Formel 63):

$$\Delta\beta_U \geq 3 * \tan^{-1}\left(\frac{H_{B \max} - H_{B \min} + MTH}{L+K}\right) = 3 * \tan^{-1}\left(\frac{25-3+0}{2700+820}\right) = 1,1^\circ$$

Oberfeuer (Formel 64):

$$\Delta\beta_O \geq 3 * \tan^{-1}\left(\frac{H_{B \max} - H_{B \min} + MTH}{2 * D_F * L + K}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{25-3+0}{215+2700+820}\right) = 1,0^\circ$$

### 7.2.9 Vertikaler Sehwinkel

Der Verlauf des vertikalen Sehwinkels bei der projizierten Richtfeuerlinie ist nachstehend für die beiden Augeshöhen 3 und 25 m dargestellt.

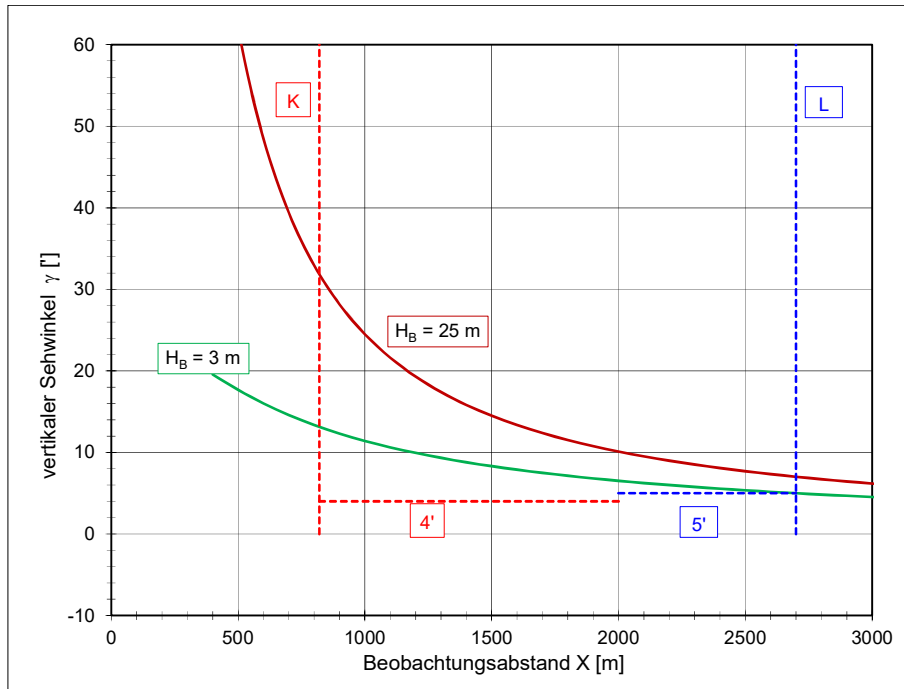


Abbildung 14: Verlauf des vertikalen Seh winkels aus Beispiel 2

### 7.2.9 Schärfe

Der Verlauf der Schärfe ist nachstehend abgebildet. Die benötigte Schärfe von  $Y_{max} = B/6 = 66,7m$  wird im ganzen Nutzbereich unterschritten. Der Einfluss der Augeshöhe ist relativ gering.

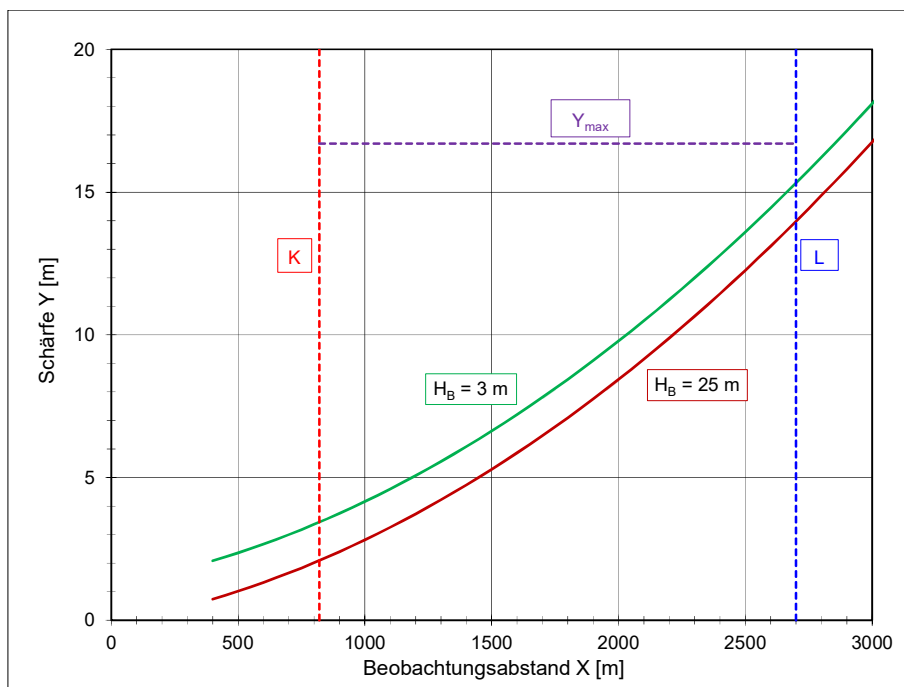


Abbildung 15: Verlauf der Schärfe aus Beispiel 2

## 8 Formelzeichen

$D_F$	Abstand zwischen Unter- und Oberfeuer
$H_{B,max}$	maximale Augeshöhe
$H_{B,min}$	minimale Augeshöhe
$H_O$	Höhe Oberfeuer
$H_U$	Höhe Unterfeuer
$K$	kürzester Nutzabstand
$L$	längster Nutzabstand
$N$	Nutzweite
$S$	Schattenmaß
$s_g$	geographische Sichtweite
$Y$	Schärfe der Richtfeuerlinie (Strecke)
$\gamma$	vertikaler Sehwinkel
$\gamma_x$	vertikaler Sehwinkel in Abhängigkeit vom Beobachtungsabstand $x$
$\theta$	horizontale Sehwinkel
$\theta_G$	Grenzwert des horizontalen Sehwinkels

## 9 Referenzen

- [1] IALA-Recommendation E-112 On Leading Lights
- [2] IALA-Guideline 1023 The Design of Leading Lines
- [3] Technische Forderungen, Visuell TFV-03 Tragweiten und Lichtstärken von Feuern und Signallichtern, GDWS
- [4] DIN 4054 Verkehrswasserbau, Begriffe (1977)
- [5] VV-WSV 1102 Objektkatalog
- [6] Begriffe aus der Gezeitenkunde, Online-Dokument des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie, [www.bsh.de](http://www.bsh.de)
- [7] IALA-Recommendation E-200 On Marine Signal Lights, Part 3 Measurement
- [8] International Technical Conference on Lighthouses and other Aids to Navigation, Paris, July, 1933