

Richtwirkung von Kaminen

Dirk Sagemühl¹, Werner Straßen²

¹ Bayer Industry Services, 41538-Dormagen, Email: dirk.sagemuehl.ds@bayerindustry.de

² Bayer Industry Services, 41538-Dormagen, Email: werner.straßen.ws@bayerindustry.de

Einleitung

Die Schallabstrahlung der Mündungen von Industrieschornsteinen weist in der Regel eine ausgeprägte Richtcharakteristik auf. Das kann dazu führen, dass das abgestrahlte Geräusch innerhalb der Anlage nicht zu hören ist, in der Werksnachbarschaft aber zu erheblicher Belästigung führt. Für die Auslegung von Schallschutzmaßnahmen, d.h. für die Dimensionierung von Rauchgas-Schalldämpfern, ist die Kenntnis dieser Richtcharakteristik deshalb von großer Bedeutung.

Zur Bestimmung dieser Richtcharakteristik wurde eine größere Zahl von Laboruntersuchungen durchgeführt, zu den neuesten gehören die Arbeiten von Schroer et.al. [2]. Untersuchungen an wirklichen Kaminen unter realen Umweltbedingungen sind in einer vom UBA geförderten Arbeit von Reinicke und Danner [1] veröffentlicht. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen liegen als Diagramme vor, aus denen für einzelne Aufgabenstellungen die erforderlichen Werte abgegriffen werden können. Die Notwendigkeit, im Rahmen von Schallausbreitungsrechnungen für eine große Anzahl von Immissionsorten unterschiedliche Richtcharakteristiken zu bestimmen, war für uns Anlass, die Richtwirkungsdiagramme mit dem Ziel zu analysieren, geeignete Algorithmen zur Berechnung der Richtwirkungsmaße zu finden.

Wirkliche Schornsteine

Wirkliche Schornsteine führen in der Regel heiße Strömung, außerdem herrscht an der Kaminmündung nur in Ausnahmefällen wirklich Windstille.

Einflussfaktoren für die Richtwirkung sind die Geometrie des Kamins, berücksichtigt in der „normierten“ Wellenzahl (im folgenden als Wellenzahl bezeichnet), die Abgastemperatur und -geschwindigkeit, die Umgebungstemperatur und die Geschwindigkeit (WG) und Richtung (WR) des Windes. Die Wellenzahl berechnet sich zu

$$ka = \frac{2\pi f}{c} a \quad (1)$$

Dabei ist f die Frequenz in Hz (i.a. in Oktaven), c die Rauchgasgeschwindigkeit in m/s und a der Kaminradius in m.

In [1] liegen die Messergebnisse für das Richtwirkungsmaß DI in Form von Polardiagrammen für die in der Praxis relevanten Wellenzahlen vor. Für kleine und große Abstrahlwinkel δ sind nur sehr wenige und unsichere Daten vorhanden. Für die Praxis ist das kein gravierender Mangel, weil für reale Ausbreitungsrechnungen im wesentlichen der Bereich zwischen $80^\circ \leq \delta \leq 120^\circ$ von Interesse ist. Bei Winkeln $< 80^\circ$ liegen die Immissionsorte i.d.R. außerhalb des Einwirkungsbereiches des Kamins, bei Winkeln $> 120^\circ$ liegen die Immissionsorte i.d.R. auf dem Gelände der Anlage selbst. Auf Grund der vorhandenen Datenlage wurde zuerst für die Wellenzahlen ka , für die Polardiagramme vorliegen, Zu-

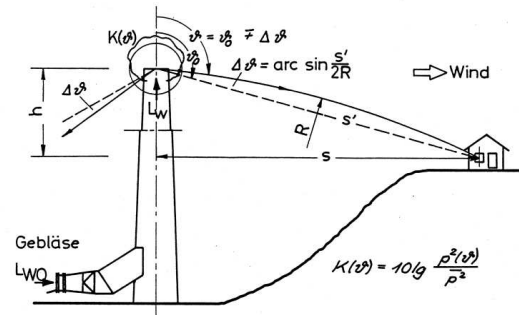


Abbildung 1: Abstrahlwinkel an einer Kaminmündung

sammenhänge zwischen dem Abstrahlwinkel δ und dem Richtwirkungsmaß $DI(\delta)$ entwickelt, und zwar für eine mittlere Rauchgastemperatur t_u von 140°C und mittlere -geschwindigkeit u von 20 m/s , für eine typische Umgebungstemperatur t_w von 20°C und „neutralen“ Wind, $w \approx 0$. Neutraler Wind heißt hier, alle Ergebnisse der Messungen bei Mitwind, Querwind, Gegenwind und allen Windgeschwindigkeiten werden gemittelt. Korrekturen für Rauchgastemperaturen und -geschwindigkeiten, die von den oben betrachteten Mittelwerten abweichen, sowie für Mitwindbedingungen, wurden durch eindimensionale Betrachtungen gewonnen. Beispielsweise wurde die Ermittlung des Einflusses der Rauchgastemperatur (s. Gleichung (5)) bei gemittelter Rauchgasgeschwindigkeit und „neutralem“ Wind durchgeführt. Diese Vorgehensweise war erforderlich, weil auf Grund der vielen zu betrachtenden Einflussgrößen eine mehrdimensionale Betrachtungsweise mit sehr großen Datenmengen notwendig wäre. Die Messdaten liegen aber wegen des erheblichen Aufwandes nicht vor. Die Untersuchungen wurden für die in [1] angegebenen Messergebnisse mit den Wellenzahlen $ka = 4, 8, 16$ und 32 durchgeführt, eingeschränkt für die Wellenzahlen $2, 64$ und 128 . Diese Wellenzahlen decken den in der Praxis interessanten Bereich der Kaminradien und den bei diesen Radien dominierenden Frequenzen ab. Gegenwindsituationen sind aus Immissionsschutzgründen nicht relevant und hier nicht berücksichtigt.

Modelluntersuchungen

Modelluntersuchen von Schroer et.al. [2], die im Labor an 125 und 250 mm weiten Rohren durchgeführt wurden, zeigen bei den Abstrahlwinkeln $0^\circ \leq \delta \leq 30^\circ$ und den Wellenzahlen $ka \geq 1$ Minima des Richtwirkungsmaßes DI . Ähnliche Minima als Folge des Geschwindigkeitsgradienten im Freistrahle weist das Richtwirkungsdiagramm aus modellähnlichen Untersuchungen von Reinicke und Danner [1] an einem 300 mm Abgasrohr auf, das in die VDI-Richtlinie 2714 übernommen wurde. Diese strömungsbedingten „Dellen“ treten bei den Untersuchungen an wirklichen Schornsteinen kaum auf. In der unten aufgeführten Tabelle 1 sind

diese „Dellen“ deshalb nicht berücksichtigt. Die Herleitung der unten angegebenen Gleichungen für δ_{w1} bis δ_{w3} basiert im wesentlichen auf den Ergebnissen in [1], die Ergebnisse der Modelluntersuchen in [2] wurden zur Erweiterung des Geltungsbereiches von t_u , u und w herangezogen. Sie erlauben außerdem eine Extrapolation bis zur Wellenzahl $ka = 0,5$; eine weitere Extrapolation bis zur Wellenzahl $ka = 0,08$ beruht auf dem Diagramm aus der VDI-Richtlinie 2714 (s.o.). Eine Extrapolation bis zur Wellenzahl $ka = 516$ beruht auf dem Trend für die Richtwirkungsmaße für $ka \leq 128$.

Berechnung des Richtwirkungsmaßes DI

Der Abstrahlwinkel δ wird entsprechend Abb.1 wie folgt berechnet:

$$\delta = \delta_0 - \Delta\delta - (\Delta\delta_{w1} + \Delta\delta_{w2} + \Delta\delta_{w3}) \tag{2}$$

mit:

$$\delta_0 = 90^\circ + \arctan\left(\frac{h}{s}\right), \Delta\delta = \arcsin\left[10^{-4}\sqrt{h^2 + s^2}\right] \tag{3,4}$$

$$\Delta\delta_{w1} = \frac{t_u - 140}{1,2 \cdot |t_u - 140| + 273} \cdot \frac{180}{\pi} \tag{5}$$

$$\Delta\delta_{w2} = \frac{20 - u}{140} \cdot \frac{180}{\pi}, \Delta\delta_{w3} = \frac{w}{40} \cdot \frac{180}{\pi} \tag{6,7}$$

Dabei ist:

- t_u die Rauchgastemperatur in °C $20^\circ\text{C} \leq t_u \leq 160^\circ\text{C}$
- u die Rauchgasgeschwindigkeit in m/s $1 \text{ m/s} \leq u \leq 30 \text{ m/s}$
- w die Windgeschwindigkeit in m/s $0 \text{ m/s} \leq w \leq 5 \text{ m/s}$
- h und s siehe Abbildung 1; der Wertebereich folgt aus [1,2]

Weiterhin müssen für den Anwendungsfall und die interessierenden Oktav-Mittenfrequenz (zwischen 32 und 8000 Hz) die Wellenzahlen ka berechnet werden. In der Wertetabelle sind die Richtwirkungsmaße DI für $m = 11$ Wellenzahlen (Zeilen) und $n = 13$ Abstrahlwinkel (Spalten) tabelliert. Ist $\Delta\delta_T$ die Differenz des berechneten Abstrahlwinkels δ zum nächst kleineren tabellierten Abstrahlwinkel δ_n , der nächst größere tabellierte Abstrahlwinkel δ_{n+1} und ist analog Δka die Differenz der berechneten Wellenzahl zu der nächst kleineren tabellierten Wellenzahl ka_m und die nächst größere tabellierte Wellenzahl ka_{m+1} , so berechnet sich das interpolierte Richtwirkungsmaß DI als Funktion von δ und ka zu:

$$DI = DI_{m,n} + \frac{\Delta\delta_T(DI_{n+1,m} - DI_{n,m})}{\delta_{n+1} - \delta_n} + \frac{\Delta ka(DI_{n+1,m} - DI_{n,m})}{ka_{m+1} - ka_m} + \frac{\Delta ka \Delta\delta_T(DI_{n+1,m+1} + DI_{n,m+1} - DI_{n,m+1} - DI_{n+1,m})}{(\delta_{n+1} - \delta_n)(ka_{m+1} - ka_m)} \tag{8}$$

$ka_m \setminus \delta_Tn$	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
0,08	0,1	0,1	0,2	1,1	1,1	0,2	-0,2	-0,5	-1	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5
0,8	0,4	0,9	1,2	1,9	2	0,5	-0,4	-1,5	-2	-1,7	-1,8	-2	-2
2	0,9	1,5	2,2	2,4	2,7	0,8	-1,2	-3,5	-4,3	-5	-5	-5,5	-6
4	1,3	1,8	2,7	3,0	2,6	0,5	-2,5	-6,0	-8,3	-9,0	-9,5	-9,9	-10,2
8	2,6	2,9	3,5	3,8	2,4	0,2	-3,7	-7,7	-11	-12	-13,1	-13,5	-13,7
16	3	3,5	4,3	4,8	3,4	-0,2	-5,5	-9,8	-14,0	-15,5	-16,1	-16,5	-17,2
32	2,6	3	3,6	5,0	4,5	-0,2	-6,4	-11,6	-16,5	-17,5	-17,5	-18,5	-19,5
64	1,9	2,3	2,9	5,1	4,6	-0,3	-6,6	-12,8	-18,5	-19,2	-20	-21	-22
128	1	1,5	2	5,1	3,8	-0,3	-6,7	-13,5	-19,7	-20,7	-21,7	-22,7	-23,7
256	0,5	0,9	1,3	5,2	3,5	-0,4	-6,7	-14,1	-20,8	-21,8	-22,8	-23,8	-24,8
512	0,2	0,4	0,8	5,2	3,3	-0,4	-6,7	-14,6	-21,6	-22,6	-23,6	-24,6	-25,6

Tabelle 1: Mittelwerte von DI über alle WR, WG, Rauchgastemperaturen und -geschwindigkeiten

In Abbildung 2 ist diese Tabelle grafisch dargestellt, Abbildung 3 zeigt die interpolierte Kurve dieser Werte und die zugrundeliegenden Messwerte für $ka = 8$. Abbildung 4

gibt das Richtwirkungsmaß bei eindimensionaler Betrachtung der Rauchgastemperatur (gemessen und gerechnet) wieder.

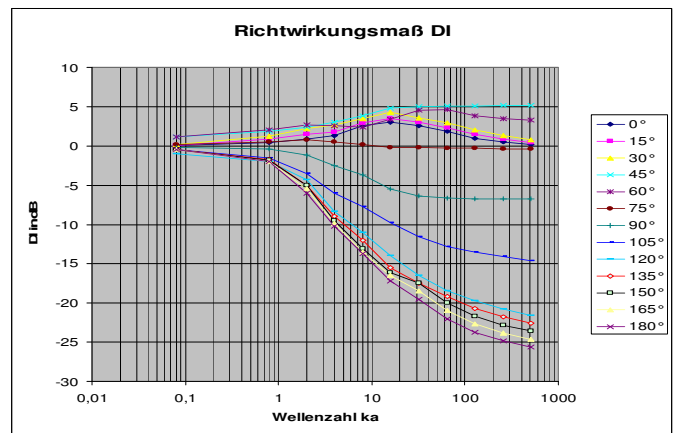


Abbildung 2: Grafische Darstellung der Tabelle 1

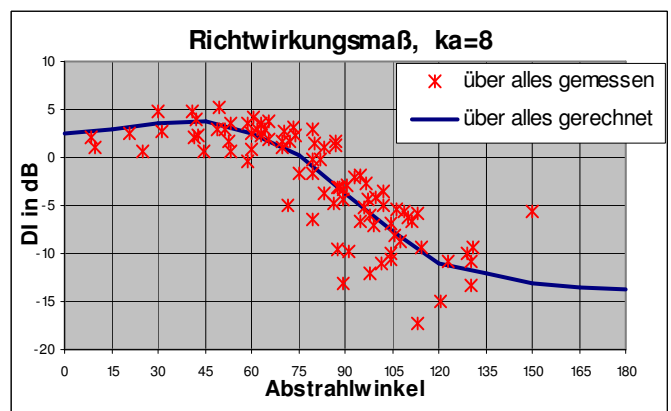


Abbildung 3: interpolierte Werte der Tabelle 1 bei $ka=8$ und der Tabelle zu Grunde liegende Messwerte

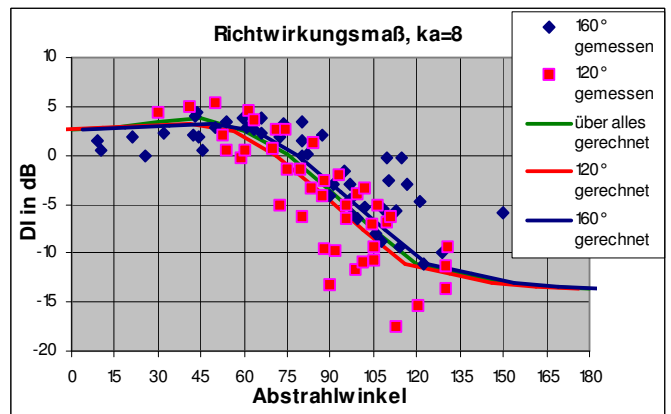


Abbildung 4: Richtwirkung bei eindimensionaler Betrachtung der Rauchgastemperatur

Literatur

- [1] Reinicke, W. und Danner, J., Untersuchungen zur Geräuschemission von großen Schornsteinen, Forschungsbericht 105 03 301 des Umweltbundesamtes Berlin, 1982
- [2] Schroer et.al., Einfluss der Temperatur auf die Schallabstrahlung von Schornsteinen, interner Bericht des Fraunhofer-Instituts Stuttgart, 2002