

Dichte und Wärmeleitfähigkeit von Gasen

Arbeitspapier, August 2025

*Dr. Dana Meißner, Dr. Werner Fröhlingdorf
Institut für Sicherheitstechnik/Schiffssicherheit e.V.*

Fragestellung

Die Motivation für dieses Arbeitspapier ergibt sich aus Fragestellungen zu den Zusammenhängen zwischen Dichte und Wärmeleitfähigkeit, die, zumindest auf den ersten Blick, nicht unbedingt intuitiv verständlich sind, z. B.:

- Wasserstoff hat die niedrigste Dichte und dennoch die höchste Wärmeleitfähigkeit aller Gase. Wenn man die Dichte von Luft durch Druckverringerung verringert, sinkt die Wärmeleitfähigkeit, bis sie im Vakuum praktisch null ist. Wie passt das zusammen?
- Warum ist die Wärmeleitfähigkeit von idealen Gasen bei niedrigen bis mittleren Drücken unabhängig vom Druck und damit unabhängig von der Dichte?
- Welche Parameter (Temperatur, Druck, Feuchtigkeit, ...) beeinflussen die Dichte in welcher Weise? Beeinflussen sie analog die Wärmeleitfähigkeit?

Inhalt

1.	Dichte	2
1.1	Temperaturabhängigkeit der Dichte	3
1.2	Druckabhängigkeit der Dichte	4
1.3	Einfluss der Feuchtigkeit auf die Dichte	5
2	Wärmeleitfähigkeit.....	6
2.1	Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit.....	8
2.2	Druckabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit	8
2.2.1	Einfluss des umgebenden Volumens auf die Druckabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit....	10
2.3	Einfluss der Feuchtigkeit auf die Wärmeleitfähigkeit	11
2.3.1	Stand der Technik (August 2025)	11
2.3.2	Eigene Überlegungen.....	13
3	Literatur	15

1. Dichte

Die Dichte von Gasen spielt für ihr Ausbreitungsverhalten sowie für deren Detektion eine wesentliche Rolle. Dabei sind zum einen die Faktoren zu beachten, die die Dichte selbst beeinflussen, wie z. B. Temperatur oder Druck. Zum anderen beeinflusst die Dichte weitere Eigenschaften von Gasen, wie z. B. die Wärmeleitfähigkeit, welche für Konzentrationsmessungen von Gasen verwendet wird. Der Zusammenhang zwischen Dichte und Wärmeleitfähigkeit, insbesondere für Luft und Wasserstoff, ist zentraler Gegenstand der folgenden Betrachtungen.

Für die betrachteten Fragestellungen sind zwei „Arten“ von Dichte relevant: Die **Teilchendichte**, also die Anzahl Teilchen pro Volumen und die **Massendichte**, welche der Masse eines Stoffes pro Volumen entspricht.

Die Teilchendichte ist für alle Gase unter Normaldruck (1013 hPa) annähernd gleich. Grundlage bildet das so genannte molare Volumen, welches unter Normbedingungen 22,4 L/mol beträgt. Das heißt, dass sich z. B. in 22,4 L Luft genauso viele Teilchen befinden wie in 22,4 L Wasserstoff, nämlich genau ein Mol. Ein Mol enthält immer $6,022 \cdot 10^{23}$ Teilchen (Avogadro-Konstante N_A) einer Substanz. Die Teilchendichte von $6,022 \cdot 10^{23}$ Teilchen (N_A) in 22,4 Litern entspricht $2,7 \cdot 10^{22}$ Teilchen/L. Die Teilchendichte von Wasserstoff und Luft beträgt also $2,7 \cdot 10^{22}$ Teilchen/L. Wie jede volumenbezogene Größe hängt die Teilchendichte vom Druck und der Temperatur ab.

Die Massendichte von Gasen hängt neben der Temperatur und dem Druck von der (Molaren) Masse der Gasteilchen ab und kann auf Basis der allgemeinen Gasgleichung wie folgt berechnet werden:

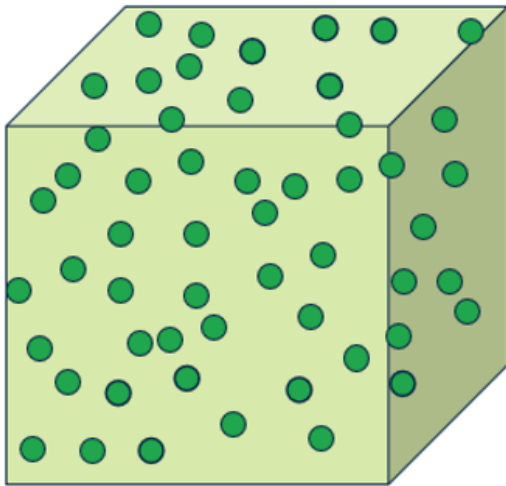
Formel 1 – Berechnung der Dichte

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Dabei ergibt sich die Masse m aus der molaren Masse M des jeweiligen Gases und der Teilchenzahl (in mol) n . Da die Teilchen von Luft und Wasserstoff unterschiedliche Molare Massen haben, ergibt sich für beide Gase trotz gleicher Teilchenanzahl pro Volumen eine unterschiedliche Massendichte: 1,292 kg/m³ für Luft und 0,089 kg/m³ für Wasserstoff bei 0 °C.

Würde man berechnen, wie viele Luftteilchen/cm³ der Massendichte von Wasserstoff bei 0 °C und Normaldruck entsprächen, käme man auf $0,185 \cdot 10^{19}$ Teilchen/cm³. Eine solche Teilchendichte hat Luft bei 70 mbar (siehe Tabelle 1). Luft im Grobvakuum und Wasserstoff bei Normaldruck haben also etwa die gleiche Massendichte von 0,089 kg/m³, Luft enthält unter diesen Bedingungen aber nur etwa 1/15 der Teilchen (Abbildung 1).

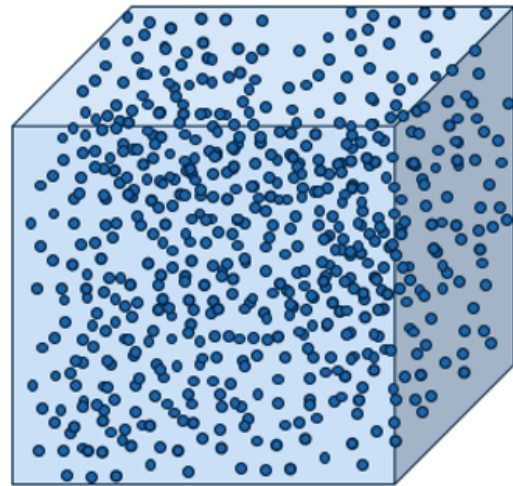
Luft bei 70 mbar (Grobvakuum)



Teilchendichte: $0,185 \cdot 10^{19}/\text{cm}^3$

Massendichte: $0,089 \text{ kg/m}^3$

Wasserstoff bei Normaldruck (1013 mbar)



Teilchendichte: $2,7 \cdot 10^{19}/\text{cm}^3$

Massendichte: $0,089 \text{ kg/m}^3$

Abbildung 1: Gleiche Massendichte von Luft und Wasserstoff bei unterschiedlicher Teilchendichte.

1.1 Temperaturabhängigkeit der Dichte

Jede Dichte ist vom Volumen abhängig. Da sich mit steigender Temperatur das Volumen vergrößert, verringern sich die Massendichte und die Teilchendichte mit steigender Temperatur.

Für Meereshöhe (1013,25 hPa) ergeben sich z. B. folgende Dichte-Werte:

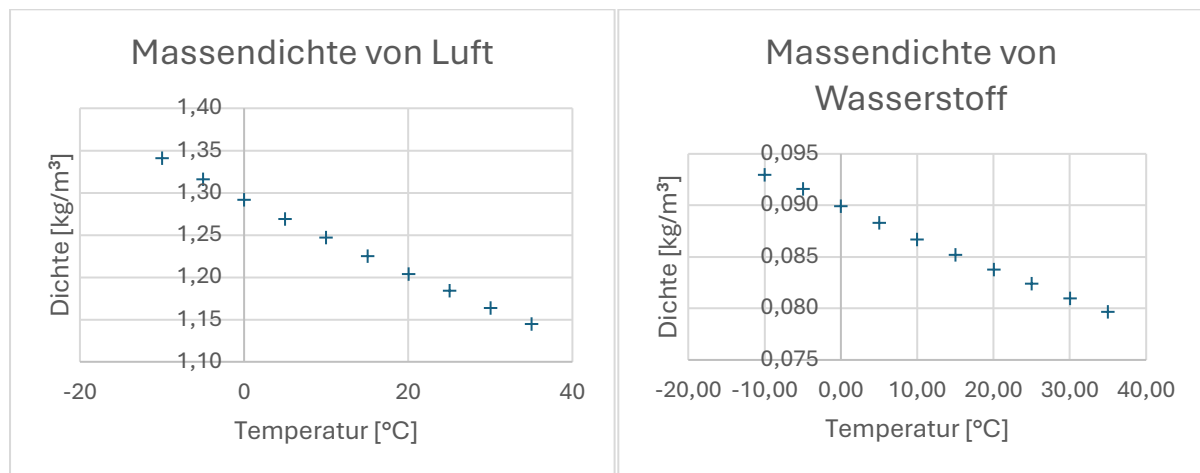


Abbildung 2: Änderung der Massendichte von Luft bzw. Wasserstoff mit der Temperatur

Die Werte zeigen, dass sich bei einer Temperaturänderung von 10 K die Massendichte, unabhängig vom Gas, um jeweils ca. 3 % verändert.

Die ISO 2533 [1] definiert für verschiedene Zwecke eine Standard-bzw. Normatmosphäre (auf Meeressniveau) mit folgenden Parametern:

- Relative Luftfeuchtigkeit: 0 %
- Druck: 1013,25 hPa (= mbar)
- Temperatur: 15 °C (= 288,15 K)
- Dichte Luft: $1,225 \text{ kg/m}^3$

1.2 Druckabhängigkeit der Dichte

Die Parameter der Standardatmosphäre wurden auf der Basis von Durchschnittswerten festgelegt.

Der Druck auf Meereshöhe ist jedoch nicht konstant. Der höchste Luftdruck in Deutschland wurde mit 1060,8 hPa (Hektopascal) an der Wetterstation Greifswald am 23.01.1907 gemessen. Weltweit hält ein Wert von 1084,8 hPa am 19. Dezember 2001 in Tosontsengel (Mongolei) den Rekord für den maximalen Luftdruck. Der tiefste weltweit beobachtete Druckwert von 870 hPa im Auge von Taifun "Tip" wurde im Oktober 1979 östlich der Philippinen verzeichnet. In Deutschland liegt der bisherige Minimalwert bei 954,4 hPa – gemessen am 27. November 1983 in Emden. Diese angegebenen Minimal- und Maximalwerte beziehen sich auf einen Stand von 2017 [2].

Die Teilchen- und damit auch die Massendichte von Luft pro m^3 ändert sich mit der Höhe, einerseits, weil die Temperatur sinkt (ca. 6,5 K/1000 m [1]). Andererseits ist Luft umso dichter, je höher die darüberliegende Luftsäule ist, also je näher man dem Erdmittelpunkt ist. Die Effekte sind gegenläufig: Die mit zunehmender Höhe sinkende Temperatur bewirkt eine Zunahme der Dichte, der sich mit zunehmender Höhe verringernde Luftdruck bewirkt eine Abnahme, wobei letzterer Effekt deutlich überwiegt. Pro 500 m Höhenunterschied nimmt die Luftdichte um ca. 5 % ab.

Je höher über dem Meeresspiegel, desto niedriger ist der Luftdruck, umso näher kommt man Vakuum-Bedingungen. Der Luftdruck auf dem Mount-Everest beträgt etwa 315 hPa.

Ein Vakuum kann auch künstlich erzeugt werden. Tabelle 1 zeigt die Zusammenhänge zwischen Druck und Teilchendichte.

Druckbereich	Druck in mbar	Moleküle pro cm^3	mittlere freie Weglänge eines Gasmoleküls
Umgebungsdruck	1013,25	$2,7 \cdot 10^{19}$	68 nm
Großvakuum	300 ... 1	$10^{19} \dots 10^{16}$	0,01 ... 100 μm
Feinvakuum	$1 \dots 10^{-3}$	$10^{16} \dots 10^{13}$	0,1 ... 100 mm
Hochvakuum (HV)	$10^{-3} \dots 10^{-7}$	$10^{13} \dots 10^9$	100 mm ... 1 km
Ultrahochvakuum (UHV)	$10^{-7} \dots 10^{-12}$	$10^9 \dots 10^4$	1 ... 10^5 km
extrem hohes Vakuum (XHV)	$< 10^{-12}$	$< 10^4$	$> 10^5$ km

Tabelle 1: Druck und Teilchendichte in Druckbereichen unterhalb des Umgebungsdruckes (Vakuum) [3]

Formel 1 (Berechnung der Dichte) gilt für ideale Gase. Für reale Gase ist der Zusammenhang zwischen Druck und Dichte, insbesondere bei hohen Drücken, nicht mehr linear. Für Wasserstoff ist dies in Abbildung 2 dargestellt.

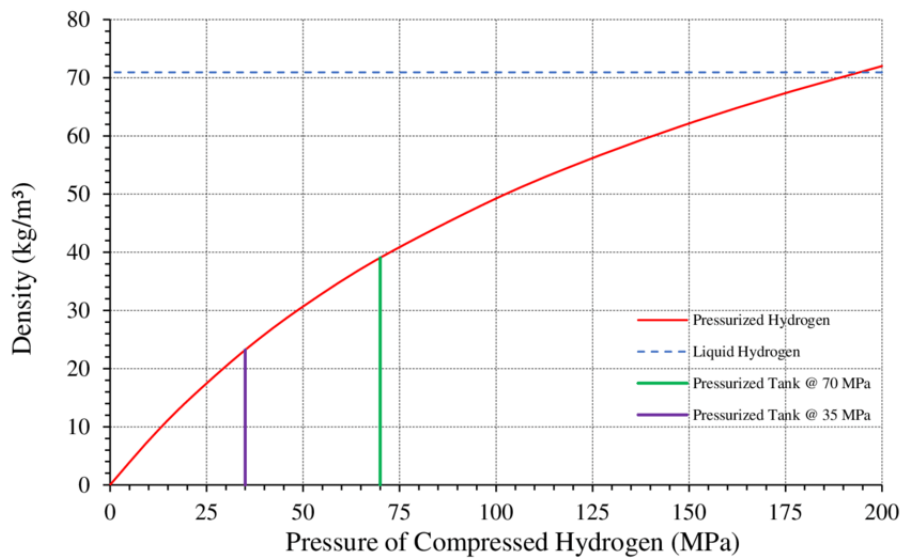


Abbildung 3: Druckabhängigkeit der Dichte von Wasserstoff [4]

1.3 Einfluss der Feuchtigkeit auf die Dichte

Die Luftdichte ist auch von der Luftfeuchtigkeit abhängig. Feuchte Luft ist leichter als trockene Luft und steigt entsprechend auf – die Grundlage für die Bildung von Wolken. Der Effekt auf gleicher Höhe ist jedoch vergleichsweise klein (Tabelle 2).

Standardbedingungen T = 15 °C, p = 101325 Pa	
Rel. Feuchte in %	Dichte Luft in kg/m ³
0	1,226
10	1,225
20	1,224
30	1,223
40	1,223
50	1,222
60	1,221
70	1,220
80	1,219
90	1,219
110	1,218

Tabelle 2: Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf die Dichte von Luft

2 Wärmeleitfähigkeit

Wärmeübertragung kann durch Konvektion, Wärmestrahlung oder Wärmeleitung erfolgen, in diesem Dokument wird nur letzteres betrachtet. Die Wärmeleitfähigkeit κ ist definiert als der Wärmestrom in Watt, der bei einer Temperaturdifferenz von 1 Kelvin stündlich durch ein 1 Meter dickes Material strömt ($\text{W/m}\cdot\text{K}$). Je kleiner der Wert ist, umso besser ist die wärmedämmende Wirkung des Materials.

Wasserstoff hat die höchste Wärmeleitfähigkeit aller Gase.

Gas	Wärmeleitfähigkeit bei 0 °C [$\text{W/m}\cdot\text{K}$]
Luft	0,0262
Argon	0,0179
CO ₂	0,0168
He	0,1567
Stickstoff	0,0260
Sauerstoff	0,0263
Wasserstoff	0,186
Wasserdampf gesättigt	0,0248

Tabelle 3: Wärmeleitfähigkeit von Gasen [5]

Der Prozess der Wärmeleitung ist an das Vorhandensein eines Mediums mit definierten Teilchen gebunden, für Gase sind das Atome oder Moleküle. Die Wärme wird durch Stöße zwischen diesen Teilchen übertragen. Die Wärmeleitung erfolgt daher umso besser, je öfter die Teilchen zusammenstoßen. Diese Stoßfrequenz hängt davon ab, wie weit die Teilchen zwischen zwei Zusammenstößen fliegen können (mittlere freie Weglänge). Dies wird wiederum bestimmt durch

- der Teilchendichte (siehe Abschnitt 1)
- die Geschwindigkeit der Teilchen
- den Stoßquerschnitt der Teilchen

Wie bereits erwähnt, ist die Anzahl der Gasteilchen unter Normbedingungen für Gase für ein gegebenes Volumen annähernd gleich. Wasserstoffmoleküle sind jedoch viel kleiner und leichter als die Stickstoff- und Sauerstoffmoleküle der Luft. Dadurch fliegen sie im Durchschnitt am schnellsten. Abbildung 4 zeigt die mittlere Geschwindigkeit von Teilchen verschiedener Gase bei 25 °C. Andererseits haben sie durch ihren kleinen Stoßquerschnitt eine vergleichsweise große mittlere freie Weglänge (siehe Tabelle 4), die sich jedoch nicht so stark von anderen Gasen unterscheidet wie die mittlere Geschwindigkeit der Teilchen.

Beide Größen gehen als Faktoren in die Berechnung der Wärmeleitfähigkeit ein.

$$\kappa = \frac{n \langle v \rangle \lambda c_v}{3 N_A}$$

Labels im Diagramm:

- Particles per unit volume → n
- Mean particle speed → $\langle v \rangle$
- Mean free path → λ
- Molar heat capacity → c_v
- Avogadro's number → N_A
- Thermal conductivity → κ

Formel 2: Berechnung der Wärmeleitfähigkeit [6]

Die große mittlere Geschwindigkeit und die große mittlere freie Weglänge der Wasserstoffmoleküle sind also die Ursache der besonders hohen Wärmeleitfähigkeit von Wasserstoff.

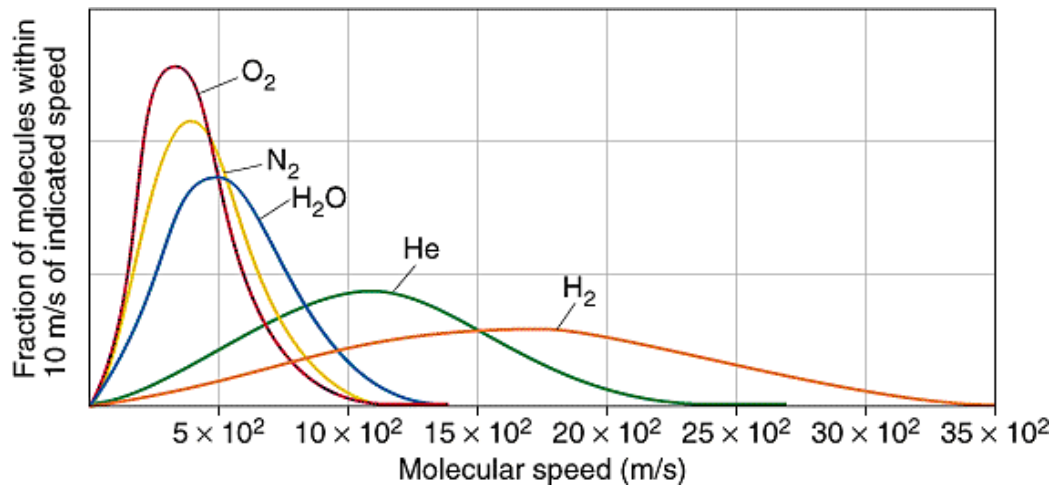


Abbildung 4: Mittlere Geschwindigkeit verschiedener Gasteilchen [7]

Gas	Wasser- dampf	CO ₂	N ₂	O ₂	H ₂	He
Mittlere freie Weglänge bei 1000 mbar [nm]	42	45	67	72	125	196

Tabelle 4: Mittlere freie Weglänge von Gasteilchen

2.1 Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit

Eine Temperaturerhöhung bewirkt vor allem eine Erhöhung der mittleren Geschwindigkeit der Teilchen. In einem konstanten Volumen und bei konstantem Druck – also bei gleichbleibender Teilchendichte – führt daher eine Temperaturerhöhung zu einer Zunahme der Wärmeleitfähigkeit. Abbildung 5 zeigt, dass die Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit für Wasserstoff, Methan und Krypton besonders stark ist. Bei höheren Temperaturen (ab ca. 500 °C) sinkt der Einfluss der Temperatur.

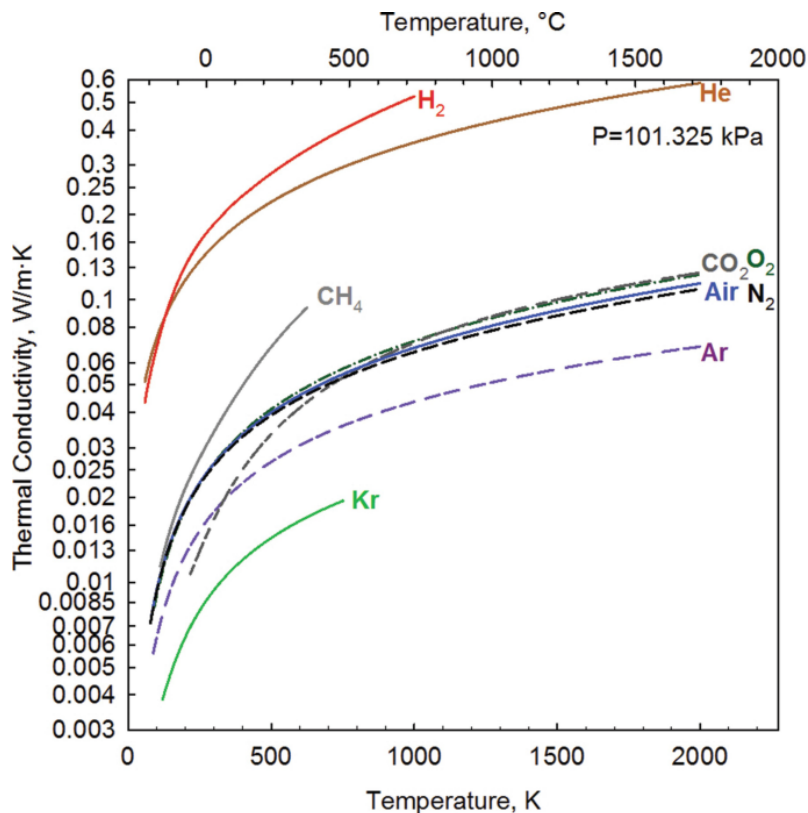


Abbildung 5: Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Temperatur [8]

Falls eine Volumenausdehnung möglich ist, führt eine Temperaturerhöhung zu einer Verringerung der Teilchendichte. Dieser Effekt wirkt der Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit entgegen, ist aber in weiten Bereichen deutlich geringer als der Einfluss der durch die Temperaturerhöhung erzeugte Geschwindigkeitserhöhung der Teilchen.

2.2 Druckabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitung erfolgt auch umso besser, je zielgerichteter die „Wärmewelle“ durch ein Gas von einem Punkt A (Wärmequelle) zu einem Punkt B (entfernt von der Wärmequelle) hindurchgehen kann. Auch dies hängt von der mittleren freien Weglänge und der Stoßfrequenz ab und davon, in welche Richtung sich die Teilchen bevorzugt bewegen können.

Bei einer Erhöhung der Teilchendichte (z. B. durch eine Druckerhöhung) wird die mittlere freie Weglänge sinken, es kommt häufiger zu Zusammenstößen. Die Zusammenstöße im Gas erfolgen jedoch ungerichtet, so dass durch die höhere Stoßfrequenz die Wärme diffuser in aller Richtungen verteilt wird. Daher ist die Wärmeleitfähigkeit für kleine und mittlere Drücke kaum druckabhängig, da sich in Formel 2 die druckbedingte Erhöhung des Wertes n (Teilchendichte) und die Verringerung des Wertes λ (mittlere freie Weglänge) gegenseitig aufheben (Abbildung 6).

Der Zusammenhang gilt jedoch nur für niedrige und mittlere Drücke, für höhere Drücke werden die verschiedenen Prozesse und deren Abhängigkeiten voneinander noch komplexer.

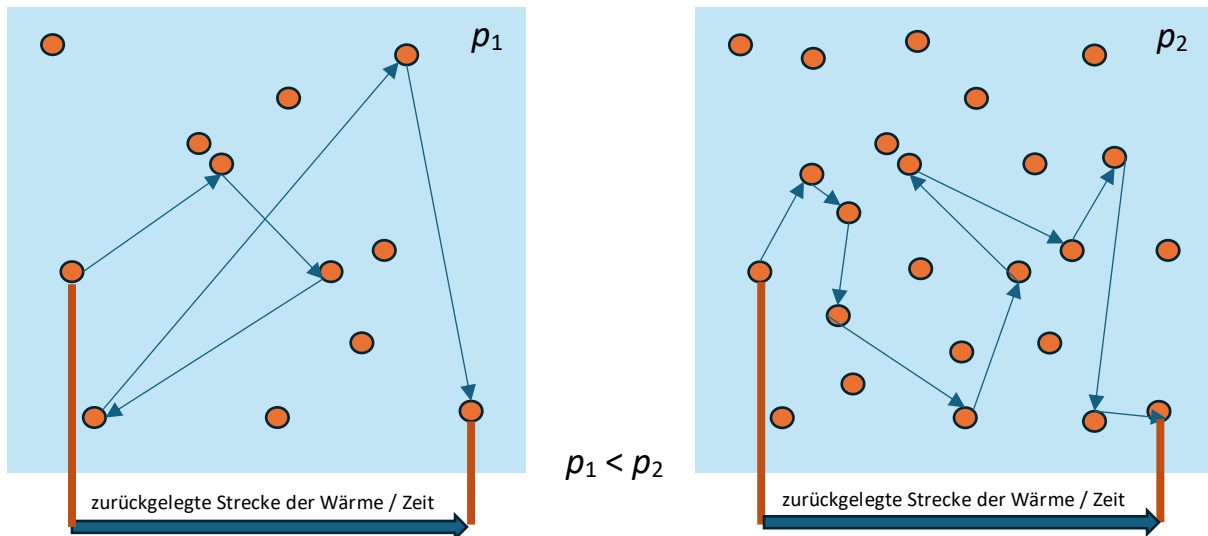


Abbildung 6: Prinzipskizze zur Erklärung der Druckunabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit bei niedrigen und mittleren Drücken.

Links: kleinere Teilchendichte $\rightarrow$ größere mittlere freie Weglänge $\rightarrow$ niedrigere Stoßfrequenz

Die Wärme braucht für die definierte Wegstrecke 5 Stöße/Zeiteinheit

Rechts: höhere Teilchendichte $\rightarrow$ kleinere mittlere freie Weglänge $\rightarrow$ höhere Stoßfrequenz

Die Wärme braucht für die definierte Wegstrecke 10 Stöße/Zeiteinheit

Für beide Fälle legt die Wärme in der gleichen Zeit die gleiche Strecke zurück, obwohl der Druck links niedriger ist als rechts. Der Effekt der Verringerung der mittleren freien Weglänge und der Erhöhung der Stoßfrequenz durch Erhöhung der Teilchendichte heben sich gegenseitig auf.

Die mittlere freie Weglänge λ in Formel 2 ist umgekehrt proportional vom Druck p abhängig [9].

Formel 3 – Berechnung der mittleren freien Weglänge

$$\lambda = \frac{k_B \cdot T}{\sqrt{2} \cdot p \cdot \pi \cdot d^2} = \frac{\bar{v}}{z} = \frac{1}{z} \cdot \sqrt{\frac{8 \cdot R_m \cdot T}{\pi \cdot M}}$$

k_B : Boltzmann-Konstante

T : Temperatur

d : Teilchendurchmesser (Stoßquerschnitt $\sigma = \pi \cdot d^2$)

$\bar{v}$: mittlere Geschwindigkeit der Gasteilchen

z : Stoßanzahl pro s (Einheit Hz)

R_m : molare Gaskonstante

M : Molgewicht

Aus der Gleichung ist weiterhin zu erkennen, dass die Stoßanzahl z proportional mit dem Druck ansteigt. Demnach müsste der Druck p_2 in Abbildung 6 doppelt so groß sein wie p_1 , wenn sich die Stoßanzahl verdoppelt. Die mittlere Geschwindigkeit der Gasteilchen $\bar{v}$ steigt $\sim \sqrt{T}$ an, es besteht keine Druckabhängigkeit.

Das Verhältnis der Wärmeleitfähigkeiten von Wasserstoff zu Luft von ca. 7 (s. Tabelle 3) kann mit den Angaben für die mittlere freie Weglänge in Tabelle 4 mit Hilfe von Formel 2 und 3 wie folgt berechnet werden (Temperatur und Druck konstant):

$$\frac{\kappa_{\text{H}_2}}{\kappa_{\text{Luft}}} = \frac{\bar{v}_{\text{H}_2}}{\bar{v}_{\text{Luft}}} \cdot \frac{\lambda_{\text{H}_2}}{\lambda_{\text{Luft}}} = \sqrt{\frac{M_{\text{Luft}}}{M_{\text{H}_2}}} \cdot \frac{\lambda_{\text{H}_2}}{\lambda_{\text{Luft}}} = \sqrt{\frac{29}{2}} \cdot \frac{125}{68} = 7$$

2.2.1 Einfluss des umgebenden Volumens auf die Druckabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit

Dass die Wärmeleitfähigkeit nicht vom Druck abhängt, gilt nur dann, **wenn die mittlere freie Weglänge sehr viel kleiner ist als das Volumen, in dem sich das Gas befindet.**

Verringert man in einem Gefäß den Druck und damit die Teilchendichte mehr und mehr und erhöht damit die mittlere freie Weglänge, dann bekommen die mittlere freie Weglänge und der Wandabstand die gleiche Größenordnung und die Teilchen stoßen immer mehr mit den umgebenden Wänden als untereinander zusammen [10]. Bei sehr kleinen Volumina wird dann die mittlere freie Weglänge zur konstanten Größe (siehe Formel 2), weil jedes Teilchen etwa den gleichen Weg bis zur Gefäßwand hat (Abbildung 7). Die Wärmeleitfähigkeit hängt dann nur noch von der Teilchendichte und damit vom Druck ab und sinkt entsprechend mit fallendem Druck. Diesen Effekt nutzt man in Isoliermaterialien durch die Integration dünner Vakuumschichten (Druckverringering, z. B. Thermoskanne) oder das Aufschäumen von Kunststoffen (Bläschen → Volumenverringering, z. B. Dämmstoffe).

Im Zusammenhang mit Sensorik spielt also auch die Sensorgeometrie eine Rolle, wenn der Einfluss des Druckes auf die Wärmeleitfähigkeit bewertet werden soll bzw. bei sehr kleinen Messkammern kommt es ggf. zu einer Beeinflussung des Sensorsignals durch die Sensorgeometrie.

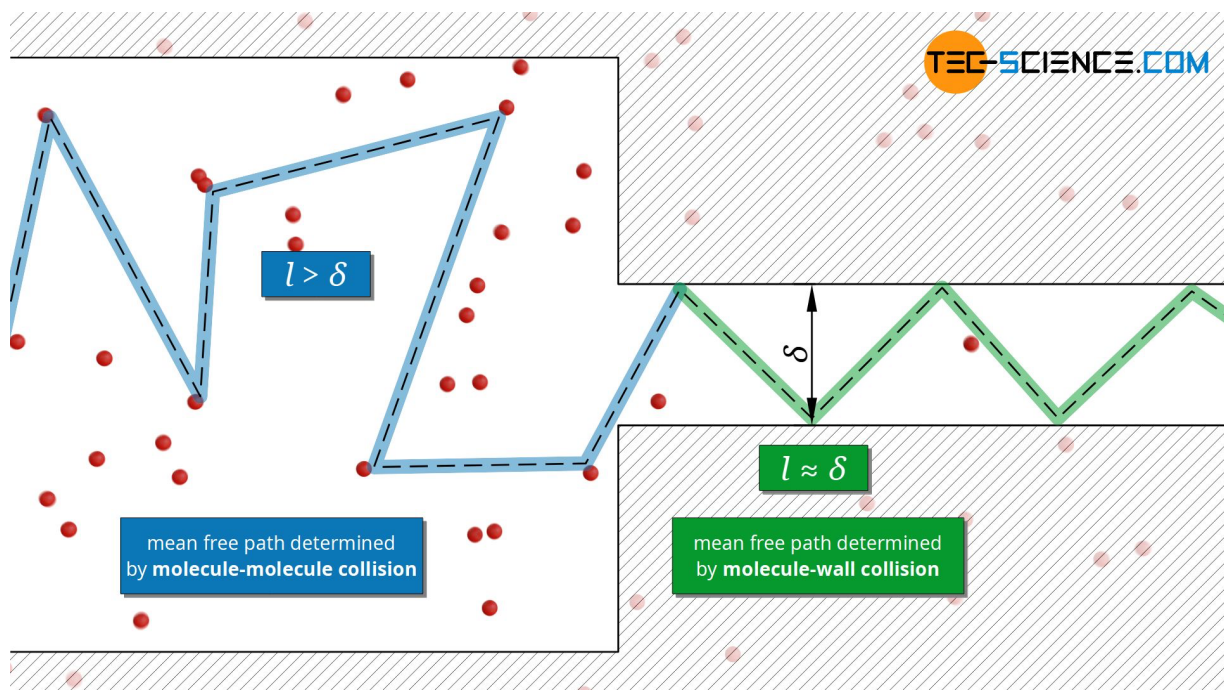


Abbildung 7: Je kleiner die Wandabstände eines Volumens sind, umso mehr nähern sich mittlere freie Weglänge und Wandabstand an [10]

2.3 Einfluss der Feuchtigkeit auf die Wärmeleitfähigkeit

2.3.1 Stand der Technik (August 2025)

Da gesättigter Wasserdampf eine niedrigere Wärmeleitfähigkeit hat als Luft (Tabelle 3) ist zu erwarten, dass die Wärmeleitfähigkeit mit steigender Luftfeuchtigkeit sinkt. Tatsächlich findet man Kurven und entsprechende Erklärungen dafür.

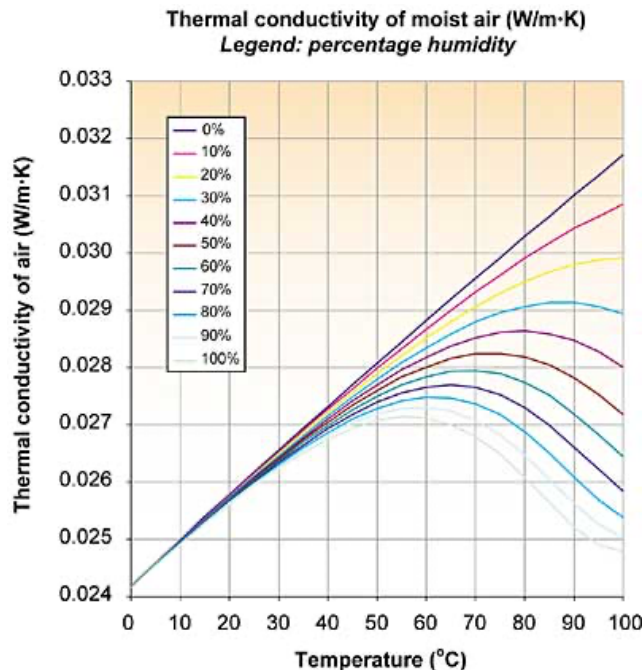


Abbildung 8a: Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Luftfeuchtigkeit [11], [12]

In anderen Publikationen findet man den Zusammenhang genau umgekehrt und auch die entsprechenden grafischen Darstellungen dazu.

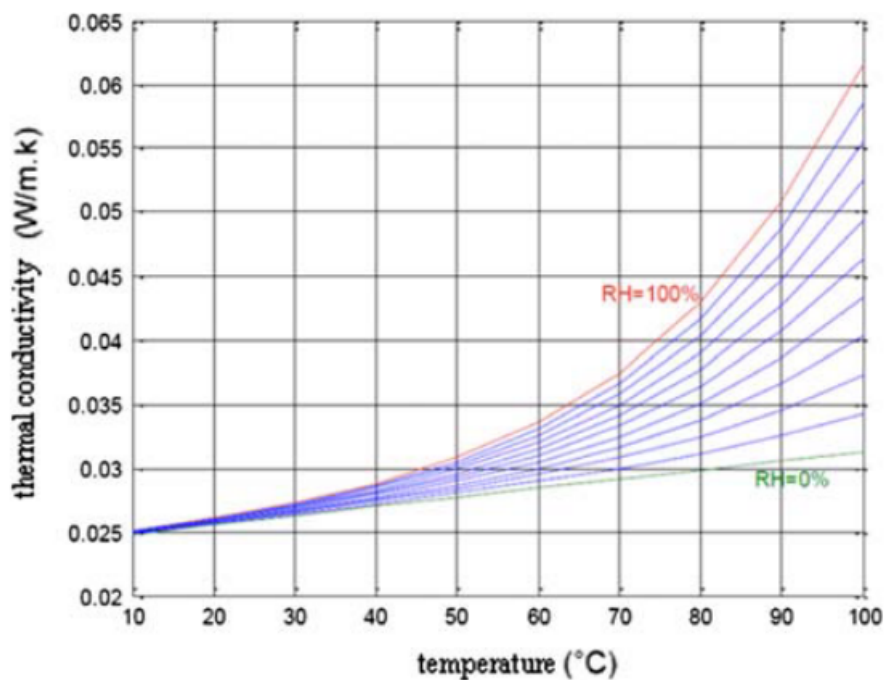


Abbildung 8b: Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Luftfeuchtigkeit [13]

Die dargestellten Kurven basieren auf verschiedenen Berechnungsmodellen. Tatsächliche experimentelle Daten gibt es kaum. Eine aktuellere Publikation von 2024 [14] weist auf dieses Dilemma hin: *„Some of the models predict a continuously decreasing thermal conductivity and some predict an increasing thermal conductivity for increasing levels of humidity.”* Diese Publikation stellt experimentelle Daten für den Einfluss von Luftfeuchtigkeit auf verschiedene Wasserstoff-Wärmeleitfähigkeitssensoren vor. Man versucht dabei, durch den Vergleich der Wärmeleitfähigkeit von Wasserstoff in Stickstoff auf die Wärmeleitfähigkeit der unterschiedlich feuchten Luft zu schließen und hat entsprechende Messungen durchgeführt, wobei die ermittelte Wasserstoffkonzentration in Luft in Wärmeleitfähigkeitsäquivalente umgerechnet wurde. Im Ergebnis fand man zunächst einen Anstieg der Wärmeleitfähigkeit bis zu etwa 40 % *rH* und danach einen relativ starken Abfall. Man fand durch die Luftfeuchtigkeit verursachte Sensorsignale von bis zu 2 Vol.-% im Wasserstoffmesswert. Das Verhalten ist stark vom Sensortyp und auch von der Temperatur des Gases abhängig. Letzteres erklärt sich aus der generellen Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit (siehe Abschnitt 2.1). Dieser Zusammenhang erschwert jedoch eine konsistente Erklärung der Ursachen der beobachteten Ergebnisse, da die Sensoren selbst mit erwärmten Messoberflächen arbeiten, wie auch in der Publikation vermerkt wird: *„The difference in the signal level can partly be explained by different heater temperatures. When the heater is activated, this creates a microclimate around the heater. This causes a temperature gradient between heater temperature and ambient temperature. This can lead to an altered ratio of the thermal conductivities of hydrogen and water vapor.”*

Zudem wird auf verschiedene Diffusionseffekte durch den unterschiedlichen räumlichen Aufbau der Sensoren hingewiesen.

2.3.2 Eigene Überlegungen

Für eigene Berechnungen wurde die Wärmeleitfähigkeit für trockene Luft und gesättigten Wasserdampf zwischen 0 °C und 100 °C auf Basis der Werte aus [15] interpoliert (Abbildung 9).

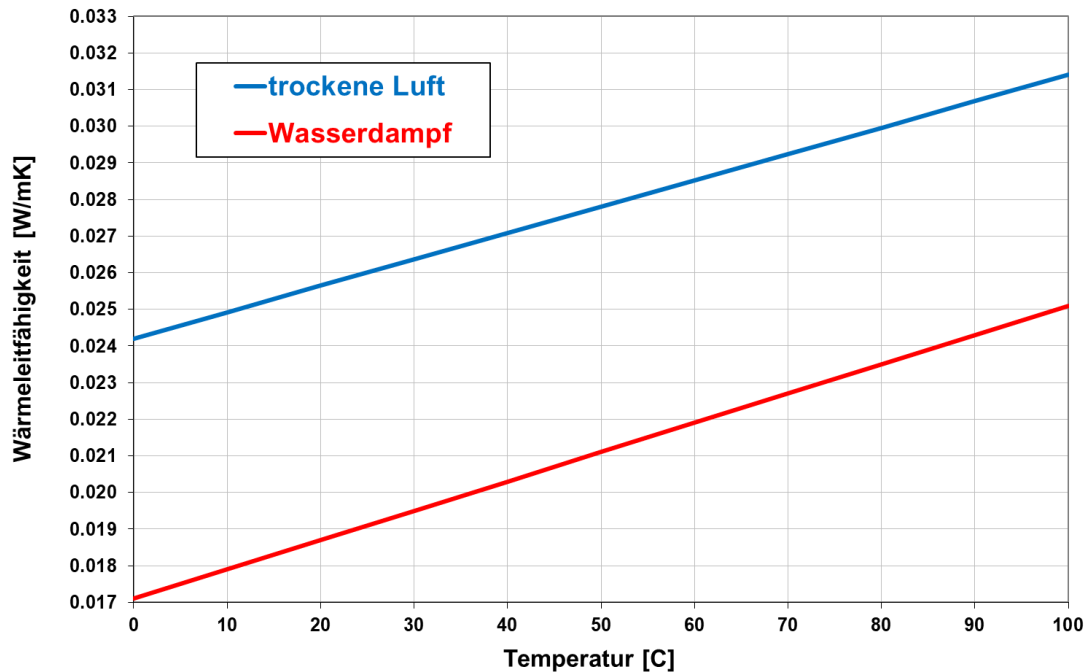


Abbildung 9: Wärmeleitfähigkeit von trockener Luft und Wasserdampf in Abhängigkeit von der Temperatur (Annahme eines linearen Verlaufs)

Die Wärmeleitfähigkeit der feuchten Luft kann für die Mischung idealer Gase aus den Raumanteilen von Wasserdampf und trockener Luft, in Abhängigkeit von der Temperatur T und der relativen Luftfeuchte φ , berechnet werden:

Formel 5 – Berechnung der Wärmeleitfähigkeit von feuchter Luft

$$\kappa_{\text{Misch}} = r_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \kappa_{\text{H}_2\text{O}} + r_{\text{Luft}} \cdot \kappa_{\text{Luft}} = \frac{\varphi \cdot p_s}{p} \cdot \kappa_{\text{H}_2\text{O}} + \left(1 - \frac{\varphi \cdot p_s}{p}\right) \cdot \kappa_{\text{Luft}}$$

Der Sättigungswasserdampfdruck p_s kann nach der Gleichung von ANTOINE berechnet werden [16]:

Formel 6 – Berechnung des Sättigungsdampfdrucks

$$\ln(p_s) = A - \frac{B}{T - C} = 23,1946 - \frac{3813,98}{T - 46,29}$$

Die ausgewählten Parameter A, B und C gelten für p_s in Pa und T in K.

Die Berechnungsergebnisse für die Wärmeleitfähigkeit der feuchten Luft (siehe Abbildung 10) haben einen ähnlichen Verlauf und Größenordnung wie in Abbildung 8a. Für $\varphi = 0$ entspricht die Wärmeleitfähigkeit der von trockener Luft, bei $\varphi = 1$ nimmt der Raumanteil des Wasserdampfs von 0.0058 bei 0 °C bis auf 1 bei 100 °C zu, d.h. bei 100 °C entspricht die Wärmeleitfähigkeit der des Wasserdampfs. Die in Abbildung 8a dargestellte Wärmeleitfähigkeit der feuchten Luft ist mit Hilfe der Mischungsregeln für ideales Gas berechenbar.

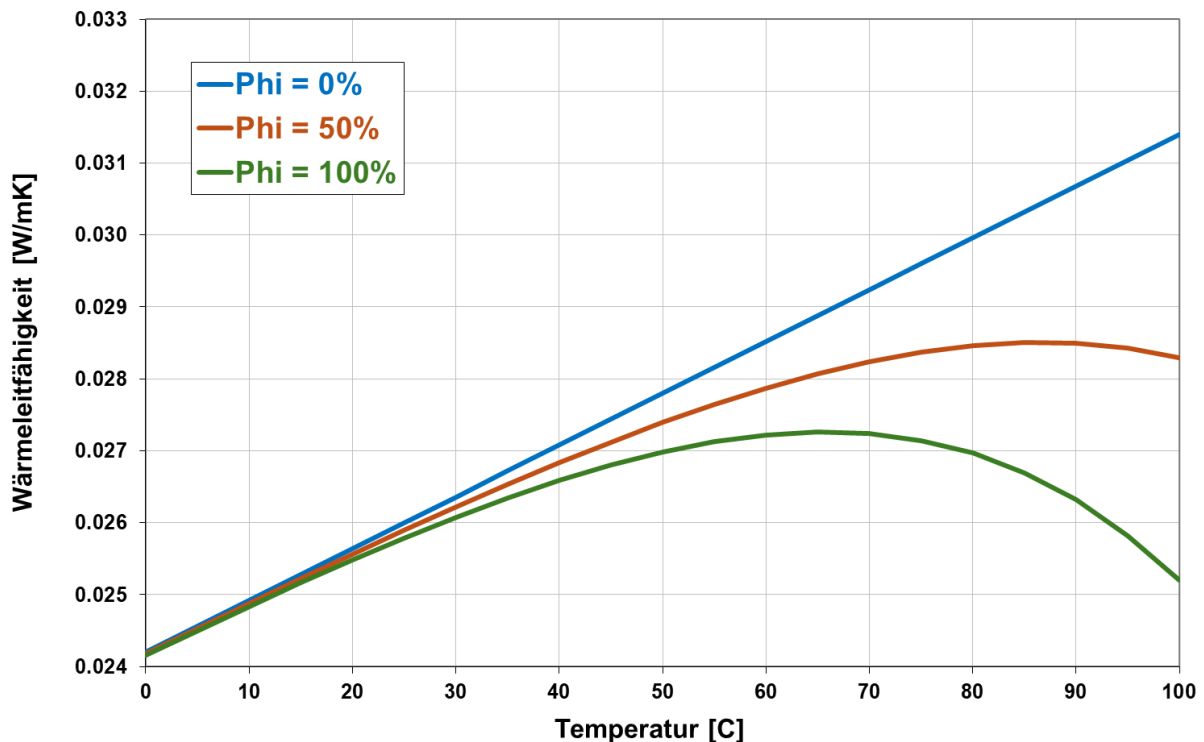


Abbildung 10: Wärmeleitfähigkeit für feuchte Luft in Abhängigkeit von der Temperatur und der relativen Luftfeuchte, berechnet mit den Raumanteilen von Wasserdampf und trockener Luft

In Abbildung 8b bzw. der zugehörigen Literaturquelle [13] wird angenommen, dass die Wärmeleitfähigkeit des Wasserdampfs, proportional zur Wärmekapazität, doppelt so groß ist wie die von trockener Luft.

Formel 7 – Zusammenhang der Wärmeleitfähigkeit von Wasser und der Wärmeleitfähigkeit von Luft

$$\kappa_{\text{H}_2\text{O}} = 2 \cdot \kappa_{\text{Luft}}$$

Mit dieser Annahme berechnet sich die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Feuchtigkeit der Luft mit Hilfe der oben angegebenen Mischungsregel für ideales Gas mit Verläufen, die näherungsweise Abbildung 8b entsprechen. Nach den vorliegenden Literaturangaben zur Wärmeleitfähigkeit ist jedoch eine Verdoppelung der Wärmeleitfähigkeit von Wasserdampf im Vergleich zu Luft nicht korrekt.

Fazit: Die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Luftfeuchtigkeit ist bisher nicht genau geklärt. Experimentelle Daten dazu gibt es kaum und wenn, dann ist deren Interpretation schwierig, da die ablaufenden Vorgänge komplex sind und, speziell bei Sensorik zur Messung der Wärmeleitfähigkeit, nicht nur der Wärmeleitfähigkeit zuzuordnen sind.

Dennoch kann zusammengefasst werden: der Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf die Wärmeleitfähigkeit ist bei mittleren Temperaturen (0–40 °C) und geringen Unterschieden der Luftfeuchten ($\Delta rH < 20\%$) gering.

3 Literatur

- [1] ISO 2533:1975-05 Normatmosphäre
- [2] Deutscher Wetterdienst „Wetterextreme in Deutschland und weltweit“, https://www.dwd.de/DE/wetter/thema_des_tages/2017/2/16.html
- [3] <https://de.wikipedia.org/wiki/Vakuum>
- [4] Marshall Lee Cranshaw: “Analysis of Vortex Tube Applications in Hydrogen Liquification”, Thesis, **2017**
- [5] <https://de.wikipedia.org/wiki/W%C3%A4rmeleitf%C3%A4higkeit>
- [6] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/thermo/thercond.html>
- [7] https://chem.libretexts.org/Courses/University_of_California_Davis/Chem_107A%3A_Physical_Chemistry_for_Life_Scientists/2%3A_Properties_of_Gases/2.7%3A_The_Maxwell_Distribution_Laws
- [8] Pioro, I.L., Mahdi, M., Popov, R. :“Heat Transfer Media and Their Properties” In: *Handbook of Thermal Science and Engineering*. Springer, Cham. **2018**, https://doi.org/10.1007/978-3-319-26695-4_23
- [9] <https://www.tec-science.com/de/thermodynamik-waermelehre/kinetische-gastheorie/mittlere-freie-weglange-stosszahl/>
- [10] [<https://www.tec-science.com/de/thermodynamik-waermelehre/waerme/waermeleitfaehigkeit-von-gasen/>]
- [11] <https://www.electronics-cooling.com/2003/11/the-thermal-conductivity-of-moist-air/#>
- [12] P.T. Tsilingiris: Thermophysical and transport properties of humid air at temperature range between 0 and 100 °C, *Energy Conversion and Management*, 49(5), **2008**, 098-1110
- [13] M. Boukhriess et al.: “Study of thermophysical properties of a solar desalination system using solar energy”, *Desalination and Water Treatment* 51, **2013**, 1290–1295
- [14] S. Emperhoff et. Al.: “On the influence of humidity on a Thermal Conductivity Sensor for the detection of Hydrogen”, *Sensors* **2024**, 24(9), 2697
- [15] https://www.schweizer-fn.de/stoff/wleit_gase/wleit_gase.php
- [16] http://public.beuth-hochschule.de/~wseifert/lmr/thermo/BilderThermo/Theorie/Antoine_Parameter.pdf

Dies ist ein Arbeitspapier. Es stellt eine Übersicht über bisher vorliegende Erklärungen zu den beschriebenen Zusammenhängen dar bzw. versucht, diese Erklärungen zu verstehen und zu analysieren sowie eigene Überlegungen beizusteuern, ohne Anspruch auf Vollständigkeit oder Korrektheit. Es soll zum Mitdenken anregen. Kommentare, Anmerkungen u. ä. sind immer willkommen unter

d.meissner@schiffssicherheit.de