

# 1 Kältemittel und Kältemaschinenöle

## 1.1 Charakteristika von Kältemitteln

Thomas Maurer

Als Kältemittel werden die in einem geschlossenen Kreislauf enthaltenen Stoffe bezeichnet, die infolge einer Wärmeaufnahme vom flüssigen in den dampfförmigen Zustand überführt werden. Die Wärmeaufnahme wird zur Kälteerzeugung genutzt. In vielen Anwendungen übernimmt das Kältemittel auch den Wärmetransport zwischen der wärmeaufnehmenden, d. h. kälteerzeugenden, und der wärmeabgebenden Seite des Prozesses (sogenannte Direktsysteme), sodass keine weiteren Kälte- und Wärmeträger-Sekundärsysteme notwendig sind. Kältemittel werden sowohl in Verdichter-Kältemaschinen als auch in Sorptionskältemaschinen eingesetzt. Die Stoffe, mit denen ohne Phasenwechsel Kälte erzeugt wird, beispielsweise Gase in Kaltgasmaschinen, magnetokalorische Materialien etc., werden üblicherweise als Arbeitsstoff, Arbeitsmittel oder Arbeitsmedium und nicht als Kältemittel bezeichnet. Sie werden in diesem Kapitel nicht behandelt.

Kältemittel können Reinstoffe oder Stoffgemische sein.

Bei den für eine Anwendung geforderten Temperaturen sind häufig mehrere Stoffe bzw. Stoffgemische mit dem gewünschten Phasenwechsel zu finden. Aufgrund von weiteren Randbedingungen muss eine passende, d. h. optimale, Auswahl getroffen werden.

Die Emission von verschiedenen halogenierten Kohlenwasserstoffen kann zu einem erheblichen Abbau der Ozonschicht in der Stratosphäre führen und einen atmosphärischen Treibhauseffekt bewirken. Durch internationale Abkommen, beispielsweise das Montrealer Protokoll von 1987 über Stoffe, die zu einem Abbau der Ozonschicht führen, forciert, ist die Verwendung von ozonschichtzerstörenden Kältemitteln weitgehend verboten. Hauptaugenmerk liegt heute auf einer Beschränkung der Treibhauswirksamkeit von Kältemitteln. Die sich fortlaufend verschärfenden Grenzwerte haben zu chemischen Neuformulierungen von Kältemitteln und der zunehmenden Verwendung sogenannter natürlicher Kältemittel (der Stoff kommt auch in der Natur vor) geführt.

### 1.1.1 Kältemitteltypen und Bezeichnungen

Als Kältemittel können organische und anorganische Stoffe verwendet werden:

organische Kältemittel (Kohlenwasserstoffe)		anorganische Kältemittel
halogeniert <sup>1</sup>	nicht halogeniert	
z. B. Difluormethan R32, Difluorchlormethan R22	z. B. Propan R290, Isobutan R600a	vor allem Ammoniak R717, Kohlendioxid R744 und Wasser R718, evtl. auch Lachgas R744A u. a.

<sup>1</sup> Das Molekül enthält mindestens ein Atom eines Halogens (Fluor, Chlor, Brom, Iod)

In Tab. 1.1 sind die heute gebräuchlichen organischen Typen zusammengestellt.

**Tab. 1.1** Organische Kältemittel-Typen

Abkürzung deutsch	Abkürzung englisch	Bezeichnung	Halogenierung	enthaltene Elemente
FCKW	CFC	Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoff	vollhalogeniert	F, Cl, C
HFCKW	HCFC	Hydrogen-Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoff	teilhalogeniert	H, F, Cl, C
FKW	PFC	Fluor-Kohlenwasserstoff	vollhalogeniert	F, C
HFKW	HFC	Hydrogen-Fluor-Kohlenwasserstoff	teilhalogeniert	H, F, C
HFCO	HCFO	Hydrogen-Fluor-Chlor-Olefin	teilhalogeniert	H, F, Cl, C
HFO	HFO	Hydrogen-Fluor-Olefin	teilhalogeniert	H, F, C
KW	HC	Kohlenwasserstoff	nichthalogeniert	H, C
HO	HO	Hydrogen-Olefin	nichthalogeniert	H, C

Bei den halogenierten Kältemitteln handelt es sich überwiegend um Derivate von Alkanen (Methan, Ethan, Propan, Butan) und von Alkenen (Ethen, Propen, Buten) sowie deren Isomere mit üblicherweise maximal vier Kohlenstoffatomen. Organische chemische Verbindungen, die Sauerstoff enthalten (wie Alkohole und Ether) sowie Amine werden heute selten als Kältemittel eingesetzt.

Als Olefine werden zyklische und azyklische Kohlenwasserstoffe mit einer oder mehreren Kohlenstoff-Kohlenstoff-Doppelbindung bezeichnet (beispielsweise Propen).

International wurden zunächst die folgenden Bezeichnungen für halogenierte Kältemittel festgelegt:

$$R(m-1)(n+1)(p)$$

R = Refrigerant (Kältemittel)

m = Anzahl der C-Atome

n = Anzahl der H-Atome

p = Anzahl der F-Atome

Die Anzahl der evtl. im Molekül vorhandenen Chloratome ergibt sich aus der Wertigkeit von Kohlenstoff (= 4).

### Beispiele

R12 (oder FCKW-12 entspricht eigentlich R012, wobei die führende Null nicht geschrieben wird):  $m = 1$ ,  $n = 0$ ,  $p = 2$  und das Molekül enthält 2 Cl-Atome. Es handelt sich um ein Derivat von Methan  $CH_4$ :  $CCl_2F_2$  (Dichlordifluormethan).

R125 (oder HFKW-125):  $m = 2$ ,  $n = 1$ ,  $p = 5$ . Es handelt sich um ein Derivat von Ethan  $C_2H_6$ :  $CHF_2CF_3$  (Pentafluorethan).

R134a (oder HFKW-134a):  $m = 2$ ,  $n = 2$ ,  $p = 4$  und das Molekül enthält kein Cl-Atom. Es handelt sich um 1,1,1,2-Tetrafluorethan  $CH_2FCF_3$ .

### 1.1.1.1 Weitere Bezeichnungen

Aufgrund von neuentwickelten Kältemitteln und der vermehrten Nutzung von Kältemittelgemischen mussten weitere Bezeichnungen eingeführt werden (vollständige Auflistung siehe [1]).

RxxxBx	das Molekül enthält Brom
RCxxx	zyklische Verbindung, z. B. RC318 Octafluorocyclobutan $C_4F_8$
Rxxxx	nachgestellte Kleinbuchstaben kennzeichnen Isomere und die Position der Elemente im Molekül, z. B. R134a
R4xx	zeotrope Gemische, fortlaufend durch ASHRAE ab 400 nummeriert, z. B. R404A; nachgestellte fortlaufende Großbuchstaben kennzeichnen Mischungsanteile
R5xx	azeotropes Gemisch, fortlaufend durch ASHRAE ab 500 nummeriert, z. B. R507; da die azeotrope Gemischzusammensetzung druckabhängig ist, können ebenfalls nachgestellte Großbuchstaben auftreten
R6xx	organische Verbindungen (auch mit Sauerstoff), durch ASHRAE ab 600 nummeriert, z. B. R600 (Butan $CH_3CH_2CH_2CH_3$ ). Die bereits früh als Kältemittel verwendeten halogenierten Kohlenwasserstoffe werden, wie beispielsweise Propan, mit R290 bezeichnet
R7xx	anorganische Kältemittel werden mit einer vorgestellten 7 und der molaren Masse gekennzeichnet, z. B. R744 (Kohlendioxid), R717 (Ammoniak), R718 (Wasser); R744A ist Lachgas ( $N_2O$ )
R1xxx	Alkene (ungesättigte organische Verbindungen mit mindestens einer Kohlenstoff-Kohlenstoff-Doppelbindung) werden mit einer vorgestellten Zahl für die Anzahl der Doppelbindungen gekennzeichnet, z. B. R1150 (Ethen $CH_2=CH_2$ ; diesem bereits früh als Kältemittel verwendeten Stoff wurde ebenfalls keine R6xx-Nummer zugeordnet)

### 1.1.1.2 Anmerkungen

Die bekannten bromhaltigen Kältemittel besitzen ein sehr großes Ozonabbaupotenzial und sind daher heute verboten.

Viele der früher eingesetzten chlorhaltigen Kältemittel besitzen zumeist ebenfalls ein großes Ozonabbaupotenzial. Organische chemische Verbindungen, die Sauerstoff enthalten, wie Alkohole und Ether, und Amine werden heute selten als Kältemittel eingesetzt.

Ein Gemisch aus 60 Masseprozenten Ammoniak (R717) und 40 Masseprozenten Dimethylether ( $CH_3OCH_3$ ) wird gelegentlich ab einer Kälteleistung von 50 kW in Verdichterkältemaschinen eingesetzt. Es wird mit R723 bezeichnet (nicht von der ASHRAE festgelegt).

Isomere besitzen zwar die gleichen molaren Massen, können aber sehr verschiedene physikalische Stoffeigenschaften aufweisen. Beispielsweise beträgt die Normalsiedetemperatur (dies ist die Siedetemperatur bei dem Normaldruck von 1013,25 mbar) von R134 ( $HCF_2-HCF_2$ )  $t_s = -23$  °C, hingegen die von R134a ( $CF_3-H_2CF$ )  $t_s = -26$  °C. Auch das Mischungsverhalten der Isomere mit anderen Stoffen, insbesondere mit Kältemaschinenölen, kann sehr unterschiedlich sein.

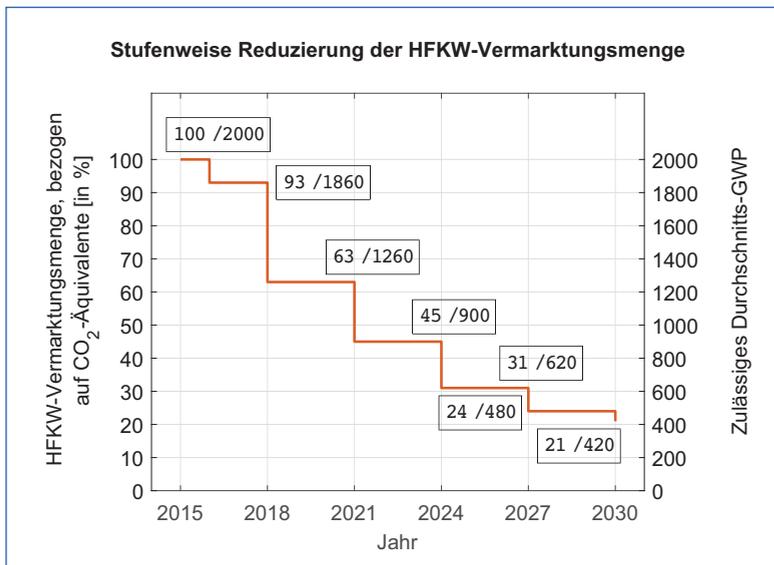
## 1.2 Propan – ein Kältemittel der Zukunft

Sylvia Schädlich, Tobias Guth

Als Kältemittel ist Propan seit langer Zeit bekannt. Die guten thermodynamischen Eigenschaften haben Kälteanlagenbauer bereits vor Jahrzehnten dazu bewogen, Propan als Kältemittel zu verwenden. Dennoch wurde Propan wegen seiner leichten Entflammbarkeit und Explosionsfähigkeit bei zeitgleich gestiegenen Sicherheitsanforderungen durch nicht brennbare Kältemittel in vielen Anwendungsbereichen verdrängt. Lediglich in Branchen mit ohnehin hohen Sicherheitsstandards wurde Propan weiterhin eingesetzt.

Nachdem in den letzten Jahren eine stufenweise Reduzierung des Inverkehrbringens von Kältemitteln mit Ozonabbaupotenzial (ODP) verfolgt wurde, wird aktuell in einem zweiten Schritt die Reduzierung der Kältemittel mit hohem Treibhauspotenzial (GWP) vorangetrieben. Mit der vom Europäischen Parlament erlassenen EU-Verordnung Nr. 517/2014 sollen die Emissionen fluorierter Treibhausgase (F-Gase) in der EU um 70 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalent auf 35 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalent bis zum Jahr 2030 gesenkt werden [11].

Dies hat zur Folge, dass die Verwendung herkömmlicher Kältemittel zunehmend beschränkt wird und alternative Kältemittel gefunden werden müssen, die weder ein ODP noch ein hohes GWP aufweisen. Im besten Fall sollen diese Kältemittel zurzeit genutzte Kältemittel in Bestandsanlagen ersetzen, ohne an den Anlagen größere Umbaumaßnahmen vornehmen zu müssen. Die Branche konzentriert sich auf natürliche Kältemittel, Kältemittelgemische und HFOs, wodurch auch Propan zunehmend wieder in den Fokus der Aufmerksamkeit rückt. Dies liegt insbesondere daran, dass Propan umweltfreundlich ist und ähnliche Eigenschaften wie zurzeit verwendete Kältemittel aufweist. Zudem ist die Brennbarkeit und Explosionsfähigkeit von Propan bekannt und durch die Einhaltung von Sicherheitsmaßnahmen nach heutigem Stand der Technik kontrollierbar.



**Abb. 1.2** Stufenweise Reduzierung der HFKW-Vermarktungsmenge, bezogen auf CO<sub>2</sub>-Äquivalente und zulässiges Durchschnitts-GWP bis 2030

### 1.2.1 Eigenschaften von Propan

Propan ( $C_3H_8$ ) ist ein natürlicher, halogenfreier Stoff mit der kältetechnischen Bezeichnung R290 und gehört zu der Gruppe der Kohlenwasserstoffe. Es besitzt kein Ozonabbau Potenzial und sein Treibhauspotenzial ist vernachlässigbar gering. Aufgrund seiner geringen Toxizität und seiner Explosionsfähigkeit wird Propan gemäß DIN EN 378-1 in die Sicherheitsklasse A3 eingestuft. Die entsprechenden Werte sind Tab. 1.5 zu entnehmen.

**Tab. 1.5** Eigenschaften von Propan

Explosionsfähigkeit		Umwelteinflüsse		
LFL/kg/m <sup>3</sup>	u./o. Ex.-grenze/V%	ODP	GWP	Toxizität (MAK)/ppm
0,038	1,7/9,5	0	3,3	1000

Für Kältemittel dieser Sicherheitsklasse müssen keine zusätzlichen Anforderungen, weder nach 1005/2009/EG ChemOzonschV noch nach 842/2006/EG ChemKlimaschutzV, erfüllt werden. Propan liegt bei Standardbedingungen gasförmig vor, ist farb- und geruchlos und besitzt daher keine Warnwirkung. Die kritische Temperatur ( $T_{krit}$ ) und der kritische Druck ( $p_{krit}$ ) sowie die Sättigungstemperatur ( $T_{sat}$ ) bei 1 bar und der Sättigungsdruck ( $p_{sat}$ ) bei 20 °C sind in Tab. 1.6 dargestellt.

**Tab. 1.6** Temperaturen und Drücke

$T_{krit}/^{\circ}C$	$p_{krit}/bar$	$T_{sat}/^{\circ}C$	$p_{sat}/bar$	$T_{Schmelz}/^{\circ}C$
96,7	42,6	-42	8,3	-188

Propan ist wenig reaktiv und daher mit den meisten in Kälteanlagen verwendeten Materialien (bspw. Dichtungen und Wärmeübertrager) kompatibel. Ausnahmen bilden Dichtungsmaterialien aus Polyethylen (PE), Polystyrol (PS) und Polyisobutylen (PIB) sowie Legierungen mit Zugabe von Zink und mehr als 2 % Magnesium. Gegenüber Kupfer und Aluminium weist Propan keine korrosive Wirkung auf.

Die hohe Löslichkeit von Propan führt in Verbindung mit Ölen zu niedrigen Viskositäten und langkettigen Kohlenwasserstoffen, die sich in Leitungen ablagern können. Daher sollten hochviskose Öle mit guten tribologischen Eigenschaften, wie z. B. die Mineralöle Shell Clavus 15, Shell Clavus 32 oder Shell Clavus 68, verwendet werden. Insgesamt ist Propan jedoch mit den meisten Ölen kompatibel, welche allerdings keine Silikone und Silikate enthalten dürfen [12, 13, 14, 15].

### 1.2.2 Vergleich mit anderen Kältemitteln

Propan hat einen niedrigen Energiebedarf bei der Verdichtung und erreicht gegenüber  $CO_2$  (R744) und Chlordifluormethan (R22) ähnlich wie R134a deutlich niedrigere Verdichtungs- endtemperaturen (vgl. Abb. 1.3).

### 2.1.2 Einfluss der Raumgeometrie und der Luftabkühlung auf die Wurfweite von Luftkühlern

Heinz Jackmann

#### 2.1.2.1 Einleitung

Für die Planung von Kühlräumen werden Angaben zur Eindringtiefe des Luftstrahls von Luftkühlern in den Raum benötigt. Diese wird im Allgemeinen als Wurfweite eines Luftkühlers bezeichnet. Die Angaben der Hersteller für die Wurfweite basieren auf Messungen und theoretischen Berechnungen unter idealen Bedingungen in großen Räumen.

Die Einflüsse der Kühleranordnung, der Raumgeometrie, der Luftabkühlung und der Raumeinbauten können in den Datenblättern der Hersteller nicht berücksichtigt werden, weil die jeweiligen spezifischen Daten nicht bekannt sind.

Die in den Datenblättern angegebenen Wurfweiten sind somit nur Anhaltswerte, die an die Kühlräume angepasst werden müssen.

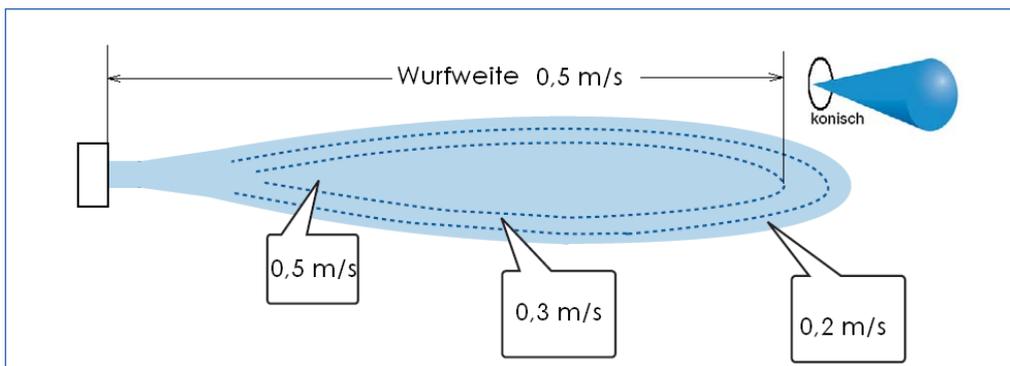
Für viele Planungen werden die Werte jedoch ohne Korrektur übernommen, was dazu führt, dass in Einzelfällen die projektierte Wurfweite des Luftkühlers in den Räumen nicht erreicht wird.

Um bei der Abschätzung der Wurfweite mehr Planungssicherheit zu erreichen, wurde ein Berechnungsmodell erstellt, welches die Einflüsse der Coanda-Effekte, der Luftabkühlung und der Raumgeometrie berücksichtigt.

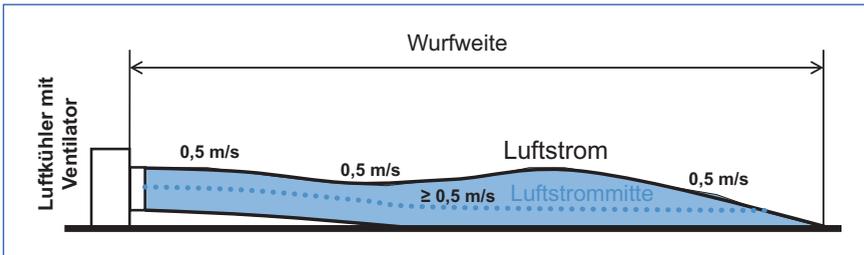
Aus dem Berechnungsmodell ist ein Berechnungsprogramm entstanden, mit dem für jeden Luftkühler die Eindringtiefe des Luftstrahls für einen definierten Raum näherungsweise bestimmt werden kann.

Nach der heutigen Definition ist die Wurfweite der Abstand zwischen dem Luftkühler und dem am weitesten entfernten Punkt, an dem im eindringenden Luftstrahl eine Strömungsgeschwindigkeit von 0,5 m/s gemessen werden kann (siehe Abb. 2.8).

Um die Wurfweite zu messen, wird der Luftkühler auf einer ebenen Fläche (auf dem Boden oder unter der Decke) montiert. Der Ventilator des Luftkühlers wird eingeschaltet und die Grenzschicht des Luftstroms mit einer Mindestgeschwindigkeit von 0,5 m/s wird bestimmt. (siehe Abb. 2.9).



**Abb. 2.8** Definition der Wurfweite eines Luftkühlers (Werkbild: Güntner GmbH & Co. KG)



**Abb. 2.9** Messung der Wurfweite mit bisherigen Verfahren (Werkbild: Güntner GmbH & Co. KG)

Um die Länge der möglichen Wurfweite zu erreichen, werden die Messungen in Räumen durchgeführt, die in jedem Fall länger sind als die maximale Wurfweite des gemessenen Luftkühlers. In diesen meist hohen und breiten Räumen treten erfahrungsgemäß auch keine Beeinflussungen des Luftstrahls durch rückströmende Luft auf. Eine Abkühlung der Luft wird ebenfalls nicht berücksichtigt. Die so ermittelte Wurfweite ist die maximal erreichbare Wurfweite nach DIN EN 378.

Die Messungen erfolgen in der Regel mit Messinstrumenten, die nur die Geschwindigkeit, aber nicht die Lufrichtung erfassen. Die so ermittelten Daten geben Anhaltspunkte für die mögliche Eindringtiefe eines Luftstrahls, sind aber sehr theoretisch und für einen Kühlraum oft nicht praxisrelevant.

In der Praxis haben Kühlräume ein sehr unterschiedliches Design:

- Der Luftstrom wird behindert durch Regale, Einbauten, Lampen oder Träger unter der Decke.
- Je nach Auslegung wird die Luft im Luftkühler zwischen 2 K und 5 K abgekühlt und erreicht vorzeitig den Ablösepunkt an der Decke.
- Durch eine niedrige Deckenhöhe oder Raumeinbauten wird der eindringende Luftstrahl durch die rückströmende Luft beeinflusst.

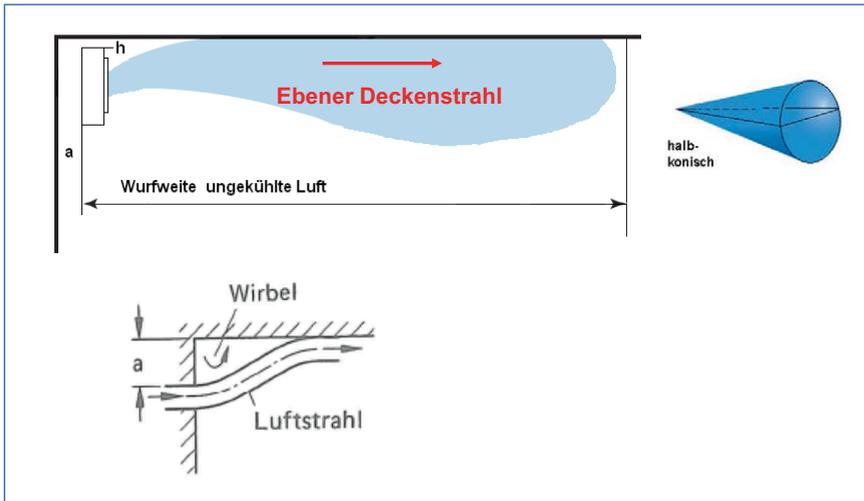
### 2.1.2.2 Das Berechnungsmodell

Das Berechnungsmodell berücksichtigt folgende Einflüsse auf die Wurfweite in der Praxis

- Einfluss des Coanda-Flächeneffekts
- Einfluss des Coanda-Parallel-Strahlen-Effekts
- Einfluss der Luftabkühlung
- Einfluss der Raumgeometrie: Querschnitt und Höhe

#### Einfluss des Coanda-Flächeneffekts

Der Coanda-Flächeneffekt entsteht, wenn ein Gerät nahe an einer ebenen Fläche, z. B. im Kühlraum unter der Decke, installiert wird. Der Luftstrom legt sich an die ebene Fläche und breitet sich nicht konisch, sondern halbkonisch aus. Dieser Effekt erhöht die Wurfweite um bis zu 40 % (siehe Abb. 2.10). Werden die Luftkühler nicht direkt unter der Decke montiert, wird der Coanda-Flächeneffekt nur teilweise oder gar nicht erreicht.



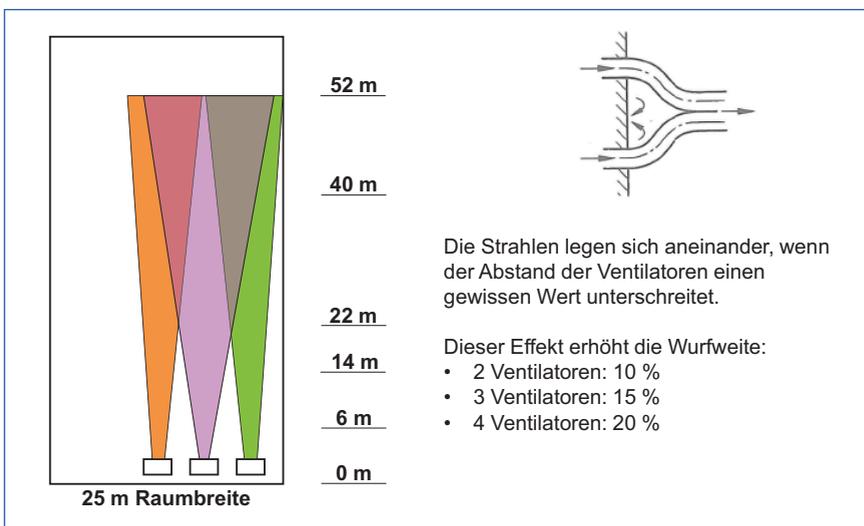
**Abb. 2.10** Einfluss des Coanda Flächeneffekts (Werkbild: Güntner GmbH & Co. KG)

### Einfluss des Coanda-Parallel-Strahlen-Effekts

Werden mehrere Luftkühler dicht nebeneinander montiert, fließt der eindringende Luftstrahl der einzelnen Ventilatoren zusammen. Dieser Effekt erhöht die Wurfweite um 10 bis 20 % (siehe Abb. 2.11).

### Einfluss der Luftabkühlung

Im Vergleich zu einer isothermen Luftumwälzung kommt es bei abgekühlter Luft zu einem vorzeitigen Ablösepunkt des Luftstrahls an der Decke. Nach dem Ablösepunkt wird aus dem halb-konischen Deckenstrahl ein nahezu konischer Freistrahler (siehe Abb. 2.12).



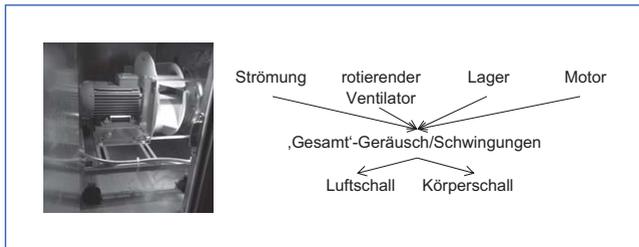
**Abb. 2.11** Einfluss des Coanda-Parallelstrahlen-Effekts (Werkbild: Güntner GmbH & Co. KG)

### 3.2.4 Schalldämpfung in der Lüftungs- und Klimatechnik

Martin Renner

Wichtige Themen bei der Auslegung von RLT-Anlagen sind Schalldämpfung, aber auch Schalldämmung, wobei für den Betrieb von RLT-Anlagen insbesondere Fragen bzgl. des Körperschalls zu klären sind.

Die wesentliche Geräuschquelle innerhalb einer RLT-Anlage ist der Ventilator. Abb. 3.33 zeigt die Situation bzgl. Geräuschen und Schwingungen an einem Ventilator.



**Abb. 3.33** Ventilator – Situation bzgl. Geräusch und Schwingungen

Beim Einsatz von Schalldämpfern in den Luftleitungen ist es das Ziel, das Schallfeld in Ausbreitungsrichtung abzuschwächen. Dies kann z. B. durch Absorption der Schallwellen und Umwandlung der Schallenergie in Wärme, aber auch durch Reflexion der Schallwellen zurück zur Quelle erfolgen.

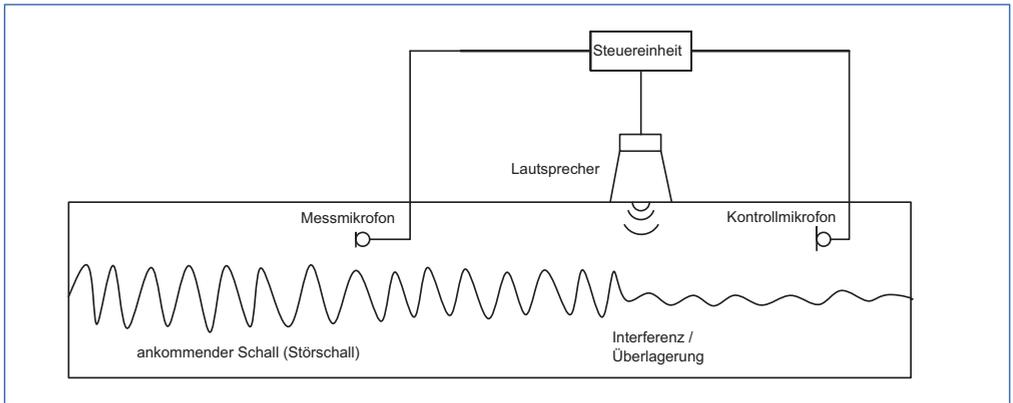
#### 3.2.4.1 Typen von Schalldämpfern

Tab. 3.10 gibt eine Übersicht der verschiedenen Arten von Schalldämpfern, wobei in passive und aktive Systeme unterschieden wird. Die Bezeichnung bei den passiven Systemen ist letztlich aus dem jeweils ausgenutzten akustischen Effekt abgeleitet. Neben den genannten Typen gibt es auch Mischtypen, die mehrere dieser Effekte verbinden und daher nicht unmittelbar einem Typ zugeordnet werden können.

**Tab. 3.10** Arten von Schalldämpfern

passive Systeme	aktive Systeme
Reflexionsschalldämpfer	System bestehend aus Lautsprecher, Mikrofon und Verstärker
Interferenzschalldämpfer	
Resonanzschalldämpfer	
Absorptionsschalldämpfer	
Relaxationsschalldämpfer	

Die Idee der aktiven Schalldämpfung ist es, die Schallausbreitung mithilfe der Interferenz zu dämpfen. Abb. 3.34 zeigt das Prinzip eines aktiven Schalldämpfers.



**Abb. 3.34** Funktionsweise eines aktiven Schalldämpfers (Prinzip des Antischalls), mit freundlicher Genehmigung der Fa. Wavescape, Wuppertal

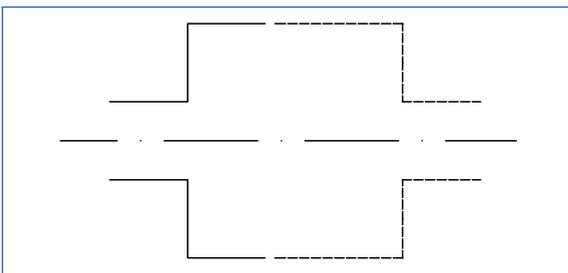
### Reflexionsschalldämpfer

Beim Reflexionsschalldämpfer werden verschieden große Kammern mit versetzt angeordneten Rohren miteinander verbunden. Die Schalldämpfung erfolgt aufgrund der Reflexionen an Umlenkungen, Querschnittsprüngen etc. Eine Kombination aus einer Querschnittsvergrößerung und einer Querschnittsverkleinerung (doppelter Querschnittsprung) führt zu einer Kammer. Im Gegensatz zu einem einfachen Querschnittsprung, dessen Dämpfungsverhalten frequenzunabhängig ist, ist die Dämpfung bei einer entsprechenden Kammer abhängig von der Frequenz bzw. Wellenlänge. Abb. 3.35 zeigt einen einfachen Querschnittsprung und eine Kammer (gestrichelt dargestellt).

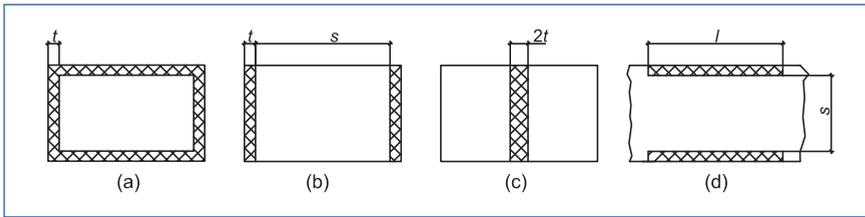
Die Abschwächung des Schallfelds in Ausbreitungsrichtung ergibt sich bei Reflexionsschalldämpfern aufgrund der Reflexion der Schallwellen zurück zur Quelle.

### Interferenzschalldämpfer

Bei Interferenzschalldämpfern, als spezielle Ausführung des Reflexionsschalldämpfers, werden zwei Schallwellen gleicher Wellenlänge in eine unterschiedliche Phasenlage zueinander gebracht (z. B. durch unterschiedliche Wegstrecken). Idealerweise beträgt der Unterschied die halbe Wellenlänge ( $\lambda/2$ ), denn dann kommt es bei der anschließenden Überlagerung der Wellen zur Auslöschung.



**Abb. 3.35** Einfacher Querschnittsprung bzw. Kammer (gestrichelt dargestellt)



**Abb. 3.36** Kanäle mit schallabsorbierendem Material an der Wandung (nach Brockmeyer [8])

Wesentlich für Interferenz- wie auch Reflexionsschalldämpfer ist, dass kein absorbierendes Material eingesetzt wird und daher Beschränkungen bzgl. Temperaturen wie auch Verschmutzungen weniger kritisch sind.

### Resonanzschalldämpfer

Die Idee bei Resonanzschalldämpfern ist, Luft in Schwingungen zu versetzen. Diese benötigen Energie, die letztlich der Schallenergie entzogen wird. Hierbei unterscheidet man verschiedene Bauformen von Resonanzschalldämpfern. Bei Plattenresonatoren wird eine Platte bzw. Membran zu Schwingungen angeregt. Die Luft, die sich in einem dahinterliegenden, abgeschlossenen Hohlraum befindet, wirkt vergleichbar einer Feder. Bei Helmholzresonatoren, auch Lochresonatoren oder Abzweigresonatoren genannt, wird die Luft in einem Loch (oder Spalt) zu Schwingungen angeregt. Wiederum wirkt die Luft in einem dahinterliegenden Hohlraum als Feder.

Allen Resonanzschalldämpfern ist gemein, dass die Dämpfung bei der Eigen- bzw. Resonanzfrequenz sehr stark ist. Sie sind daher sehr gut bei tonalen also schmalbandigen Geräuschen einzusetzen. Breitbandige Dämpfung kann durch Kombination mehrerer, unterschiedlich abgestimmter Resonanzschalldämpfer oder auch durch zusätzlichen Einbau von absorbierendem Material erzielt werden.

### Absorptionsschalldämpfer

Die Schallenergie der im Kanal fortschreitenden Welle wird durch Absorption in Wärme umgewandelt. Im einfachsten Fall wird die Kanalwand mit absorbierendem Material ausgekleidet. Abb. 3.36 zeigt verschiedene Anordnungen der Auskleidungen, wobei die beiden Varianten b und c bzgl. erzielter Dämpfung gleichwertig sind.

Abb. 3.36d zeigt einen Längsschnitt eines solchen Schalldämpfers. Die Länge  $l$  des ausgekleideten Bereichs ist zunächst proportional zur erzielten Dämpfung. Eine Bedingung für ausreichende Dämpfung ergibt sich aus dem Verhältnis zwischen Wellenlänge  $\lambda$  und Abstand des absorbierenden Materials  $s$ :

$$\lambda/2 > s.$$

Jenseits dieser Grenze, bei kleineren Wellenlängen bzw. höheren Frequenzen, tritt verstärkt die Durchstrahlung des Schalldämpfers auf, d. h., es besteht die Gefahr, dass die Schallwellen den Schalldämpfer ohne wesentliche Wechselwirkung passieren.

Wichtig hinsichtlich der Leistungsfähigkeit des Absorptionsschalldämpfers ist auch die Tiefe bzw. Dicke des absorbierenden Materials. Hierdurch wird eine untere Grenzfrequenz des Schalldämpfers festgelegt. Die in das absorbierende Material eindringenden Wellen werden an

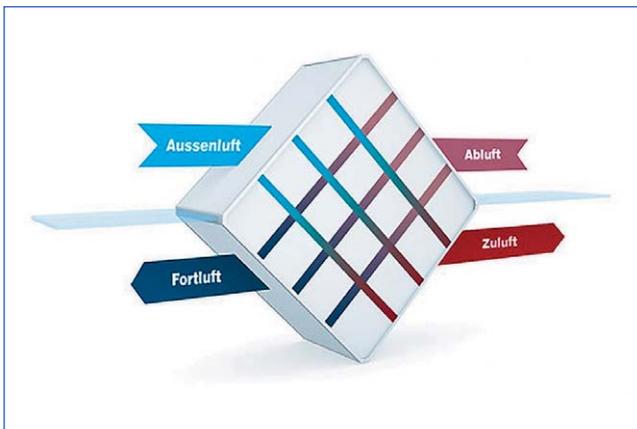
#### 3.2.5.2 Bauarten von Systemen zur Wärmerückgewinnung

Zur Wärmerückgewinnung in RLT-Geräten und -Anlagen werden im Wesentlichen folgende gängige Bauarten eingesetzt. Bei den anschließenden Erläuterungen wird beispielhaft der Betriebszustand Winter betrachtet, dass also die Abluft wärmer ist als die Außenluft und somit kühle Außenluft von warmer Abluft erwärmt wird. Umgekehrt wäre es genauso möglich, im Sommer die warme einströmende Luft durch die kühlere Abluft abzukühlen.

##### Plattenwärmeübertrager

Plattenwärmeübertrager (Rekuperatoren) bestehen aus einem Plattenpaket, durch das die Außenluft und die Abluft in gegenseitiger Richtung strömen. Aufgrund der sehr dichten Bauart des Plattenpakets ist bei dieser gegenseitigen Strömung der Außenluft und der Abluft eine Vermischung der beiden Luftvolumenströme (Überströmung) minimal. Im Plattenwärmeübertrager erfolgt die Wärmeübertragung vom wärmeren zum kälteren Luftstrom infolge des Wärmedurchgangs und der Wärmeleitung durch die Platten.

Bei Plattenwärmeübertragern unterscheidet man zwischen zwei Bauarten. Abb. 3.43 zeigt einen Kreuzstromwärmeübertrager. In diesem kreuzen sich die Luftvolumenströme Außenluft/Zuluft und Abluft/Fortluft in einem 90°-Winkel zueinander.



**Abb. 3.43** Strömung der Luft durch einen Kreuzstromwärmeübertrager (Abb.: Klingenburg)

Eine zweite Bauart ist der Gegenstromwärmeübertrager, siehe Abb. 3.42. Ein Vergleich der Abb. 3.42 und Abb. 3.43 zeigt, dass das Volumen eines Gegenstromwärmeübertragers deutlich größer ist als das eines Kreuzstromwärmeübertragers. Dadurch sind die Strömungswege der Luft durch den Gegenstromwärmeübertrager länger, sodass aufgrund der nun längeren Verweilzeit der Luft in der Wärmerückgewinnung die Wärmeübertragungsleistung (Effizienz) beim Gegenströmer größer ist als beim Kreuzströmer. Solche Gegenstromwärmeübertrager werden bevorzugt in kompakten Geräten zur zentralen Wohnungslüftung eingesetzt.

Eine Sonderbauart eines Plattenwärmeübertragers ist der Enthalpieübertrager. Bei diesem besteht das Plattenpaket nicht aus Blech- oder Kunststoffplatten, sondern aus semipermeablen Folien. Diese Spezialfolien ermöglichen es, dass Wasserdampf von der Abluft- zur Zuluftseite überströmt, ohne dass dabei Geruchs- oder Schadstoffe übertragen werden. Eine solche Feuch-



**Abb. 3.44** Luftströme durch einen Rotationswärmeübertrager. Die Außenluft-/Zuluftzone befindet sich in der Abbildung oben, die Abluft-/Fortluftzone unten. (Abb.: Klingenburg)

teübertragung ist in kalten Jahreszeiten gewünscht, wenn die ins Lüftungsgerät angesaugte Außenluft sehr trocken ist und diese in der Wärmerückgewinnung von der feuchteren Abluft ein wenig befeuchtet werden soll.

### Rotationswärmeübertrager

Rotationswärmeübertrager (Rotoren, Regeneratoren, Abb. 3.44) bestehen aus dünnen Metall- oder Aluminiumblechen und drehen sich im RLT-Gerät langsam um eine Mittelachse zwischen der Außenluft- und der Abluftzone. In der Abluftzone wird die Rotormasse von der durchströmenden warmen Abluft erwärmt. Wenn sich das so erwärmte Rotorsegment dann langsam in die Außenluftzone dreht, strömt die kühle Außenluft durch den warmen Rotor und wird dabei erwärmt.

Bei Rotoren ist zu berücksichtigen, dass durch die Rotation des Rads an der Schnittstelle kleinere Abluftmengen auf die Zuluftseite übertragen werden können. Dies kann aber zum Beispiel durch eine entsprechende Positionierung der Ventilatoren im RLT-Gerät verhindert bzw. minimiert werden. Wenn der Abluftventilator strömungsseitig hinter dem Rotor (saugend) und der Außenluftventilator vor der Wärmerückgewinnung (drückend) angeordnet wird, ergibt sich stets ein Druckgefälle von der Außenluft (Überdruck vor dem Rotor) zur Fortluft (Unterdruck hinter dem Rotor) und dadurch eine geringe Überströmung von Außenluft zur Fortluft. Zu beachten ist, dass dieser als „OACF“ (Outdoor Air Correction Factor) bezeichnete Verlustvolumenstrom bei der Planung der Nenn-Zuluftleistung der Lüftungsanlage als Aufschlag auf den Außenluftvolumenstrom zu berücksichtigen ist.

Ähnlich wie bei Plattenwärmeübertragern gibt es auch bei Rotoren die Möglichkeit der Feuchterückgewinnung aus der Abluft zur Befeuchtung der Außenluft. Dazu wird auf die Speichermasse des Rotors eine sehr dünne, hydrophile Sorptionsschicht aufgetragen (zum Beispiel Silicagel oder Zeolith). Diese Schicht sorbiert Feuchte aus der Abluft und gibt diese dann nach der Rotation an die trockene Außenluft ab. Im Sommer kann durch diesen Sorptionsprozess feuchte Außenluft durch trockene Abluft ein wenig entfeuchtet werden.