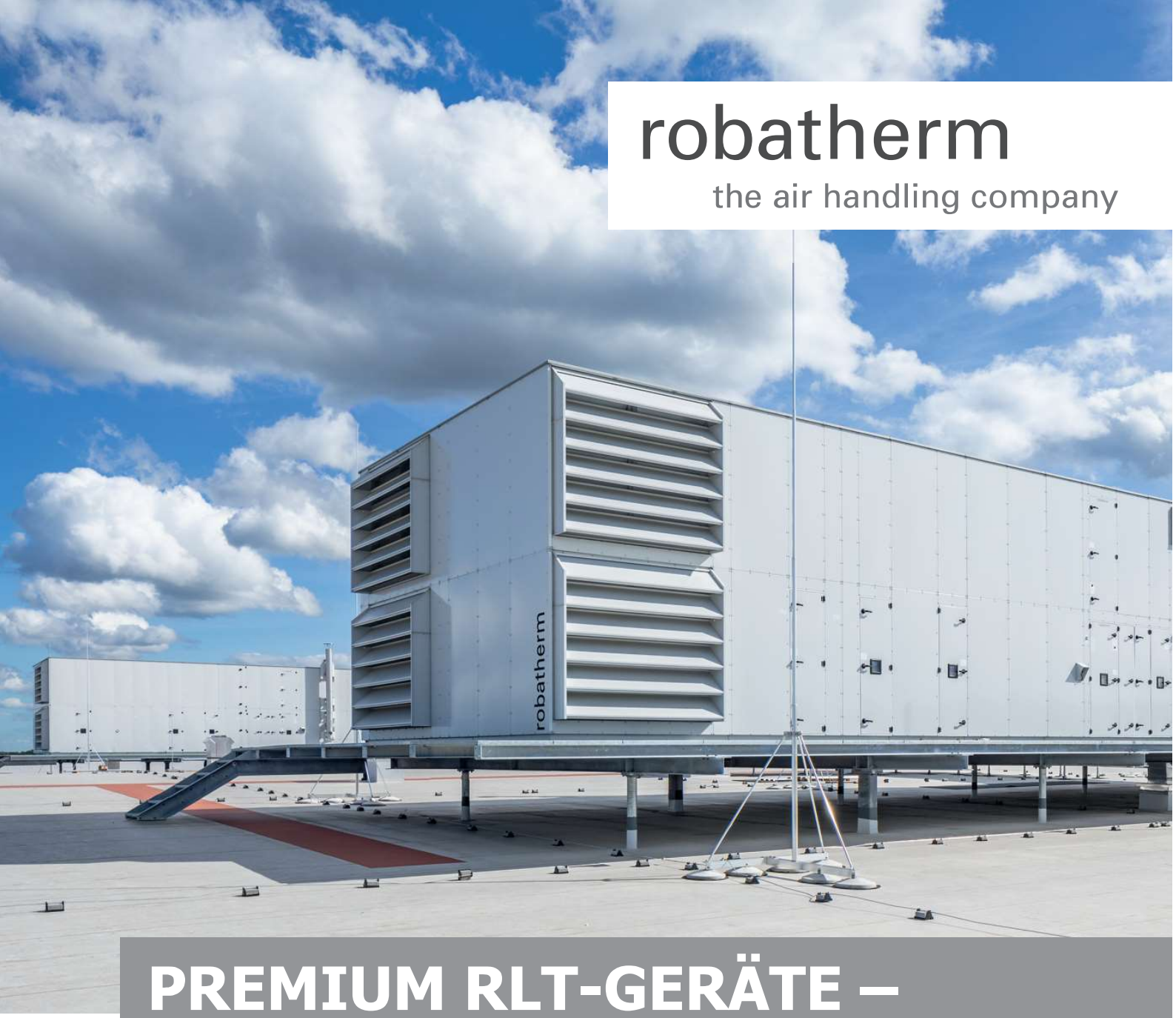
Lars Keller

Leitfaden für Lüftungs- und Klimaanlagen

5. AUFLAGE

ITM InnoTech Medien GmbH

RECK NAGEL edition



PREMIUM RLT-GERÄTE – SO INDIVIDUELL WIE IHRE PLANUNG.

- Unvergleichlich viele Geräteoptionen für die uneingeschränkte Umsetzung Ihrer Planung.
- RLT-Geräte auch in L-, T- oder U-Form und Sonderfarbtönen.
- Herausragende Gehäusekennwerte standardmäßig.

robatherm.com

ITM
InnoTech Medien GmbH

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über www.dnb.de abrufbar.

Lars Keller
Leitfaden für Lüftungs- und Klimaanlagen
5. Auflage 2021

ISBN: 978-3-96143-094-9 (Print)
ISBN: 978-3-96143-095-6 (eBook)

© 2021 ITM InnoTech Medien GmbH
Lechfeldstraße 13, 86507 Kleinaitingen
Telefon: +49 8203 950 18 45
Internet: www.innotech-medien.de, www.recknagel-online.de

Lektorat: Kirstin Sommer
Satz und Gestaltung: e-Mediateam Michael Franke, Bottrop
Druck: AC medienhaus GmbH, Wiesbaden
Titelbild: robatherm GmbH + Co. KG, Jettingen-Scheppach
Bildnachweis www-Icon: iStock.com/alexsl
Printed in Germany

Klimaneutral
Druckprodukt
ClimatePartner.com/12360-2108-1003

FSC
www.fsc.org
MIX
Papier aus verantwortungsvollen Quellen
FSC® C115407

Das Werk einschließlich aller Abbildungen ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Bearbeitung in elektronischen Systemen. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.
Das vorliegende Werk wurde sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen die Autoren, die Herausgeber und der Verlag für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler keine Haftung.

RECK NAGEL edition

Lars Keller

Leitfaden für Lüftungs- und Klimaanlagen

5. AUFLAGE

Vorwort zur 5. Auflage

„Auch die längste Reise beginnt mit dem ersten Schritt"

– Laotse –

Im Studienfach Versorgungstechnik an der FH in München unterrichtete Herr Prof. Dr. Hörner das Pflichtfach Klimatechnik. Sein Anspruch an die Studenten war hoch, was nicht bei jedem Studierenden auf großes Verständnis stieß. Unter anderem aus diesem Grunde war die Gruppe recht überschaubar, die sich dann für das Wahlpflichtfach „Akustik in der Klimatechnik" angemeldet hat. Wer dies jedoch getan hat, konnte die tiefe Leidenschaft von Herrn Prof. Dr. Hörner für dieses Thema spüren. Gerne war dieser bereit, in seinem Akustiklabor im Erdgeschoss weit über die normale Unterrichtszeit hinaus sein umfangreiches Wissen weiterzugeben.

Nach diesen positiven Erfahrungen entschloss ich mich schließlich, meine Diplomarbeit bei Prof. Dr. Hörner zu schreiben. Anfänglich war sie mit 60 bis 80 Seiten geplant, doch bei jeder Zwischenbesprechung hatte er Anmerkungen, was seiner Meinung nach unbedingt auch noch bearbeitet werden müsse und nicht fehlen dürfe. Nach rund sieben Monaten konnte ich dann meine Diplomarbeit mit 140 Seiten fertigstellen. Diese Diplomarbeit wurde dann 2005 beim damaligen Oldenbourg Industrieverlag unter dem Titel „Leitfaden für Lüftungs- und Klimaanlagen" veröffentlicht. 90 % der Bücher erleben keine zweite Auflage. 16 Jahre später erscheint das Buch bereits in der 5. Auflage mit rund 400 Seiten in der Recknagel Edition für den Bereich Lüftungs- und Klimatechnik.

Ich persönlich bin Hr. Prof. Dr. Berndt Hörner zu tiefem Dank verpflichtet. Ohne seine Unterstützung, sein großes Fachwissen und seine Art zu lehren wäre ich heute nicht als Autor tätig. Diese 5. Auflage ist Herrn Prof. Dr. Berndt Hörner gewidmet, leider verstarb er im Frühling 2021.

Die 5., erweiterte Auflage des „Leitfaden für Lüftungs- und Klimaanlagen" richtet sich an planende Ingenieure und Fachleute der TGA-Branche, die diesem Werk grundlegende Informationen zur Auslegung und Planung von Vollklimaanlagen entnehmen können. Gebäudetechniker, Service- und Instandhaltungspersonal, Facility-Manager und Betreiber haben die Möglichkeit den Leitfaden bei der täglichen Arbeit einzusetzen. Durch die kompakte und prägnante Beschreibung können

im Betrieb auftretende Fragen schnell geklärt werden, auf komplizierte Berechnungen wird bewusst verzichtet. Studenten und Diplomanden haben die Fachgebiete Klima- und Raumlufttechnik, Raumluftströmung und -qualität, Strömungslehre und -maschinen, Thermodynamik, Schallgrundlagen und Wassertechnische Grundlagen in einem Buch zusammengefasst. Durch die vielen Diagramme und farbigen Komponentenfotos wird ihnen der Einstieg in die Klimatechnik erleichtert.

Grundlegende Neuerungen sind folgende:

- Projektierung der Zuluftqualität nach DIN EN 16798-1
- Auslegung zum Schutz vor Corona-Infektion
- A2L- und HFO-Kältemittel
- Aktualisierung der Kapitel Filter, Ventilatoren, Befeuchter und Wärmerückgewinnung
- Neues Kapitel UV-C-Entkeimung
- Neues Kapitel Rooftopanlagen als Sonderform der AHU
- Aktualisierte Normen, VDI-Vorschriften und Gesetze

Im Mitgliederbereich der Homepage

www.tga-lars-keller.de

stehen dem interessierten Leser weitere Zusatzinformationen zur Verfügung. Dies können Projektberichte, Checklisten, technische Informationen oder weiterführende Produktdetails sein. Die ideale Ergänzung zum Buch stellt aber die Darstellung technischer und thermodynamischer Abläufe anhand von Animationen oder Videos dar.

Die Informationen im Mitgliederbereich werden laufend aktualisiert. Kommende Webinare, die jeweils im 60-Minuten-Format ein Teilthema der Kälte- und Klimatechnik behandeln, sind dort buchbar. Für bekannte Fachmessen der Branche sind Eintrittskartenkontingente abrufbar.

Die Kombination aus Mitgliederbereich und Buch bietet dem Leser somit einen großen Mehrwert und unterscheidet sich dadurch deutlich von anderen auf dem Markt erhältlichen Fachbüchern. Für jedes Buch oder E-Book der Leitfaden-Trilogie Klima – Kälte – Wärmepumpe, das direkt über www.tga-lars-keller.de gekauft wird, wird zum jeweiligen Jahresende 1 € an die „DKMS – WIR BESIEGEN BLUTKREBS“ gespendet.

Mein Dank gilt dem VDI Verlag für die Erlaubnis zur Veröffentlichung verschiedener Tabellen, Herrn Hueter & Team für die Unterstützung beim Kapitel Filter,

Herrn Albig & Team beim Kapitel Ventilatoren, Herrn Speiseder & Team beim Kapitel Befeuchter, Frau Kokott und Herrn Lackmann beim Kapitel Wärmerückgewinnung, Frau Sommer vom Verlag für die jahrelange Zusammenarbeit und meiner Familie, Valentina, Sofia und Carolina, für die anhaltende Geduld und Unterstützung – os quiero mucho.

Dipl. Ing. (FH) Lars Keller,
München, im Frühling 2021

Inhaltsverzeichnis

Vorwort zur 5. Auflage 4

I. Grundlagen 17

1 Physiologische Grundlagen 19
1.1 Abhängigkeit der Behaglichkeit für Personen im Raum 19
1.2 Ursachen und Auswirkungen von Unbehaglichkeit 21
1.3 Mechanismen der Wärmeabfuhr 21
1.4 Urteilskala für das Wärmeempfinden 22
1.5 Luftgeschwindigkeit und Turbulenz 23
1.6 Luftfeuchte 24
1.7 Klassifizierung der Luftarten 25
1.8 Auslegung nach der CO_2-Bilanz 27
1.9 Auslegung nach Personen und Raumfläche 30
1.10 Auslegung zum Schutz vor Corona-Infektionen 32
1.11 Geruchsemissionen nach Fanger 35
1.12 Sick Building Syndrom 38

2 Thermodynamische Grundlagen 42
2.1 Temperatur 42
2.2 Absolute Luftfeuchte 42
2.3 Relative Luftfeuchte 42
2.4 Dichte 43
2.5 Spezifische Wärmekapazität 43
2.6 Latente Wärme 44
2.7 Sensible Wärme 44
2.8 Enthalpie 44
2.9 Druck 45
2.10 Stoffstrom 46

3 Der Aufbau des h-x-Diagramms 48
3.1 Temperatur-Skala 48
3.2 Absolutfeuchte-Skala 49
3.3 Dampfdruck-Skala 49
3.4 Sättigungsdruck, Sättigungslinie 50
3.5 Taupunkttemperatur (Sättigungstemperatur) 50
3.6 Linien konstanter relativer Feuchte 51
3.7 Linien mit konstanter Enthalpie 52
3.8 Feuchtkugeltemperatur 53
3.9 Dichte 54
3.10 Beispiel für den Aufbau des h-x-Diagramms 54

4 Die Anwendung des h-x-Diagramms 56
4.1 Mischen zweier Luftmengen 56
4.2 Lufterwärmung 60
4.3 Luftkühlung 61
4.3.1 Oberflächenkühlung 62
4.3.2 Verdunstungskühlung (Nasskühlung) 69
4.4 Luftbefeuchtung 69
4.4.1 Befeuchtung mit Wasser (Wasser im Überschuss) 69
4.4.2 Befeuchtung mit Wasserdampf 75
4.5 Lufttrocknung 78
4.5.1 Unterkühlungsmethode 78
4.5.2 Adsorptionsmethode 80
4.5.3 Lufttrocknung durch Beimischung trockener Luft 81
4.6 Umrechnung Luftvolumen in Luftmasse 81
4.7 Sollwert/Behaglichkeitsfeld in Verbindung mit der h-x-geführten Regelung 83
4.7.1 Sollwert 83
4.7.2 Behaglichkeitsfeld 83
4.7.3 Verbindung von Sollwert und Behaglichkeitsfeld 84

5 Berechnungsgrundlagen zur Korrektur der Höhenlage 86
5.1 Einfluss der Höhenlage auf den Luftdruck 86
5.2 Berechnung der Korrekturfaktoren für φ und ρ 86

5.3 Konstruktion der Sättigungslinie 88
5.4 Veränderung der Luftzustandsgrößen 89

6 Kältetechnische Grundlagen 90
6.1 Aggregatszustandsänderungen 90
6.1.1 Schmelzen (fest in flüssig) und Erstarren (flüssig in fest) 90
6.1.2 Verdampfen (flüssig in gasförmig) 90
6.1.3 Verflüssigung, Kondensation (gasförmig in flüssig) 91
6.2 log-p,h-Diagramm 91
6.2.1 Verdampfungsprozess 93
6.2.2 Verdichtungsprozess 93
6.2.3 Verflüssigungsprozess 94
6.2.4 Entspannungsprozess 95
6.3 Kältemittelkreislauf 96
6.4 Kältemittel 97
6.4.1 Gesetzliche Grundlage 98
6.4.2 Definitionen und Begriffserklärungen 100
6.4.3 Eigenschaften von Kältemitteln 103
6.4.4 Dampfdrucktafeln 107

7 Wassertechnische Grundlagen 110
7.1 Grundlagen der Wasserchemie 110
7.1.1 Allgemeines 110
7.1.2 Eigenschaften des Wassers 110
7.1.3 Wichtige Begriffe für die Beurteilung einer Wasserprobe 112
7.1.3.1 pH-Wert 112
7.1.3.2 Elektrische Leitfähigkeit σ 114
7.1.3.3 Härte des Wassers 115
7.1.3.4 Mikrobiologie 116
7.2 Empfohlene Richtwerte für die Beschaffenheit von Umlaufwasser gemäß VDI 117
7.3 Verfahren der Wasseraufbereitung 119
7.3.1 Filtration 120
7.3.1.1 Vollstromfiltration 120
7.3.1.2 Teilstromfilter 121

7.3.2 Enthärtung durch Ionentausch 121
7.3.3 Umkehrosmose 126
7.3.4 Elektrodeionisation (EDI) 128
7.3.5 Vollentsalzung im Ionentausch 130
7.4 Verfahren der Wasserbehandlung 132
7.4.1 Dosierung 134
7.4.2 UV-Bestrahlung bei Wasser 137
7.5 Chemisch-wasserseitige Reinigung/Inbetriebsanierung 140

II. Bauteile einer Klimaanlage 143

1 Gerätegehäuse 146
1.1 Bauliche Grundlagen 146
1.2 Geräteausführungen 154
1.2.1 Standardausführung 154
1.2.2 Wetterfeste Ausführung 154
1.2.3 Hygieneausführungen 156
1.3 Energieeffizienzklassen 158
1.3.1 Spezifische Ventilatorleistung (SFP_V) 158
1.3.2 Die Ökodesign-Verordnung 1253/2014 für RLT-Geräte 160
1.3.3 Energieeffizienzklassen A+, A und B nach Vorgaben des Herstellerverbands Raumlufttechnische Geräte e.V. 165
1.3.4 Energieeffizienzklassen A bis E nach Eurovent Certification 168
1.3.5 Zusammenfassung: Klassifizierungen des RLT-Herstellerverbands und von Eurovent 170

2 Ansaugöffnung, Fortluftauslass, Klappen 171

3 Mischkammer 177

4 Filter 180
4.1 Grundlagen 180
4.2 Klassifizierung von Filtern 186
4.3 Energieeffizienz von Filtern 192

4.4 Bauarten von Filtern ... 194
4.4.1 Taschenfilter ... 194
4.4.2 Kompaktfilter ... 195
4.4.3 Aktivkohlefilter (Granulatfilter) ... 197
4.4.4 Rollbandfilter ... 198

5 UV-C-Entkeimung ... 200
5.1 Grundlagen zu UV-Strahlung und Desinfektion von Luftströmen mit UV-C-Strahlung ... 200
5.2 Wirkung ... 203
5.3 Leuchten und Lampen ... 204
5.4 Bestrahlungsmodelle ... 204
5.5 Berechnung ... 206
5.6 Einsatz in der Praxis ... 207
5.7 Sicherheit ... 209

6 Ventilatoren ... 210
6.1 Grundlagen ... 210
6.2 Energieeffizienz bei Motoren und Ventilatoren ... 217
6.3 Radialventilatoren mit Spiralgehäuse ... 220
6.3.1 Radialventilatoren mit vorwärts gekrümmten Laufradschaufeln ... 221
6.3.2 Radialventilatoren mit rückwärts gekrümmten Laufradschaufeln ... 222
6.4 Radialventilatoren mit freilaufendem Laufrad ... 223
6.5 Axialventilatoren ... 224
6.6 Anpassung und Regelungsmöglichkeiten ... 226
6.6.1 Regelung über EC-Technik ... 227
6.6.2 Regelung über Frequenzumformer ... 228
6.6.3 Sonstige Regel- und Anpassungsmöglichkeiten ... 229

7 Erhitzer ... 236
7.1 Lamellenrohr-Lufterhitzer ... 236
7.2 Elektrolufterhitzer ... 240
7.3 Gasbetriebene Lufterhitzer ... 241
7.3.1 Direkt befeuerte Gasbrenner ... 241
7.3.2 Indirekt befeuerte Gasbrenner ... 243

8 Kühler und Kälteerzeuger ... 244
8.1 Lamellenrohr-Luftkühler ... 245
8.2 Direktverdampfer ... 247
8.3 Indirekte adiabate Kühlung ... 248
8.4 Sorptionsgestützte Kühlung ... 249
8.5 Kompressionskälteerzeuger und deren Komponenten ... 251
8.5.1 Verdichter (Kompressor) ... 252
8.5.2 Verflüssiger und Verdampfer ... 255
8.5.3 Expansionseinrichtung ... 258
8.5.4 Kältemittelschauglas ... 259
8.5.5 Magnetventil ... 259
8.5.6 Filtertrockner ... 260
8.5.7 Temperaturschalter (Thermostate) und Druckschalter (Pressostate) ... 260
8.5.8 Kältemittelsammler ... 261
8.5.9 Kompensatoren (Anakonda) ... 261
8.5.10 4-Wege-Umschaltventil ... 261

9 Befeuchter ... 262
9.1 Sprühbefeuchter ... 265
9.2 Hochdruckdüsenbefeuchter ... 267
9.3 Winglet-Wirbel-Befeuchter ... 267
9.4 Ultraschallzerstäuber ... 268
9.5 Rieselbefeuchter/Kontaktbefeuchter/Verdunstungskühler ... 269
9.6 Hybridbefeuchter ... 270
9.7 Dampfbefeuchter ... 270
9.8 Vergleich der Befeuchtungssysteme ... 272

10 Schalldämpfer ... 274
10.1 Akustische Grundlagen ... 274
10.2 Schalldämmung des Gerätegehäuses ... 278
10.2.1 Luftschalldämmung ... 278
10.2.2 Körperschalldämmung ... 278
10.3 Luftschalldämpfung in der Luftführung ... 278
10.3.1 Kulissenschalldämpfer ... 278
10.3.2 Resonanzschalldämpfer ... 280

10.3.3 Aktive Schalldämpfer 280

11 Wärmerückgewinner 282
11.1 Allgemeine Hinweise 282
11.2 Rekuperative Systeme 288
11.2.1 Plattenwärmetauscher (PWT) 288
11.2.2 Röhrenwärmeaustauscher 291
11.3 Regenerative Systeme 291
11.3.1 Kreislaufverbundsystem (KVS) 291
11.3.2 Wärmerohr 293
11.4 Regeneratoren mit drehendem/nichtdrehendem Wärmeträger 294
11.4.1 Rotationswärmetauscher (RWT) 295
11.4.2 Umschaltspeicher (Wärme-Kälte-Akkumulator) 299
11.5 Wärmepumpe (WP) 301
11.6 Einfluss verschiedener WRG-Systeme auf Investitions- und Betriebskosten 304

III. Rooftop-Einheiten als Sonderform eines RLT-Gerätes 309

1 Funktionsprinzip und Leistungsbereiche 310

2 Einstufung nach Ecodesign-Richtlinie und Eurovent 315
2.1 Ecodesign-Richtlinie 2009/125/EG und EU-Verordnung 2016/2281 .. 315
2.2 Eurovent-Programm „Rooftop“ (RT) 320

3 Weitere Richtlinien, Normen und VDI-Richtlinien 323

4 Vor- und Nachteile eines Rooftop-Gerätes im Vergleich zum Lüftungsgerät 324
4.1 Flexibilität 324
4.2 Effizienz 325
4.3 Montage und Inbetriebnahme 325
4.4 Investitionskosten 327

IV. Steuerung und Regelung von Anlagen 329

1 Zuluftventilator 331

2 Lüftungsgerät mit Erhitzer und Mischkammer (Temperaturkaskade, Lüfter stetig) 333

3 Lüftungsgerät mit Kühler und Mischkammer (Temperaturkaskade, Lüfter stetig) 336

4 Lüftungsgerät mit Erhitzer und Kühler (Temperaturkaskade, Lüfter stetig) 339

5 Lüftungsgerät mit Erhitzer, Kühler und WRG-Plattentauscher (Temperaturkaskade, Lüfter stetig) 342

6 Lüftungsgerät mit Erhitzer, WRG-Rotor und Dampfbefeuchter (Temperaturkaskade, feuchte Zuluft, Lüfter stetig) 346

7 Lüftungsgerät mit Erhitzer, Kühler, WRG-Rotor und Dampf-befeuchter (Temperaturkaskade, feuchte Zuluft, Lüfter stetig) 350

8 Lüftungsgerät mit Erhitzer, Kühler, WRG und adiabater Abluftbefeuchtung 354

9 Lüftungsgerät mit Erhitzer und WRG-KV-System 361

V. Normen und Vorschriften 369

VI. Anhang 383

1 Quellenverzeichnis 384

2 Formelzeichen 388

3 Indizes 390

4 Umrechnungstabellen 391

Alphabetisches Firmenverzeichnis 395

Inserentenverzeichnis 399

Dieses Icon im Buch weist auf weiterführende Links zum entsprechenden Thema hin.

Größtes förderfähiges Produktportfolio!
FÖRDER FÄHIG

Neue Heizung, Kühlung oder Lüftung? Bei Modernisierung oder Neubau kräftig sparen mit dem Marktführer!

Den Spitzenplatz von DAIKIN im Wärmepumpen- und Klimatisierungs-Markt belegen Marktzahlen eindeutig. Als Innovationstreiber setzen wir branchenweit Meilensteine in puncto neue Technologien, Effizienz und Umweltverträglichkeit. Mit uns zusammen wurde die neue Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG) auf den Weg gebracht. Erhalten Sie mit unseren Systemen, je nach Anwendungsfall, **20 – 50 % Förderung vom Staat**!

www.daikin.de/foerderung
Infotelefon: 0 800 · 72 41 995 (kostenfrei aus dem deutschen Netz)

Leading Air

DAIKIN

I.
Grundlagen

Da das Außenklima, das oft als unangenehm empfunden wird, vom Menschen in keiner Weise beeinflussbar ist und sich dieses bis in Wohn- und Büroräume, Museen, Theater- und Konzertsäle, Kliniken, Gewerbe- und Produktionsstätten usw. auswirkt, wurden Geräte, Systeme und Technologien entwickelt, die es ermöglichen, in Gebäuden und Räumen angenehme, behagliche und die Gesundheit fördernde klimatische Zustände zu schaffen.

Durch den Betrieb einer Klimaanlage ist es möglich, unabhängig vom Wetter bzw. von den äußeren Bedingungen, die in das Gerät angesaugte Außenluft zu erwärmen, zu kühlen, zu befeuchten, zu entfeuchten, zu reinigen und zu fördern und so für Personen in Räumen behagliche Zustände sicherzustellen. Je nach gewünschter Veränderung des Luftzustandes – hier spricht man fachlich von der „Luftkonditionierung" – werden die einzelnen Bauteile einer Klimaanlage ausgewählt, dimensioniert und zusammengestellt.

Um die technischen und hygienischen Anforderungen an solche Anlagen zu definieren, zu vereinheitlichen und um sicherzustellen, dass die gewünschten Vorteile einer Klimatisierung nicht durch evtl. Nachteile wie Zug oder Lärm, mit Staub, Keimen oder Gerüchen belastete Zuluft begleitet oder sogar zunichte gemacht werden, wurden Normen und Richtlinien, Begriffe und Symbole eingeführt, die nationale bzw. internationale Gültigkeit besitzen und den Stand der Technik darstellen. Sie bilden die Grundlagen für Planung, Ausführung, Betrieb und Wartung einer Lüftungs- oder Klimaanlage.

Aufgrund sinkender Energieressourcen und steigendem Umwelt- und Kostenbewusstsein kommt den ökologischen und ökonomischen Aspekten bei der Anschaffung und beim Betrieb ein immer höherer Stellenwert zu. Dabei geht es bei vorgegebenen Leistungen einer Klimaanlage besonders um ein Minimieren des thermischen Aufwands (Heizen/Kühlen) und des Strombedarfs (elektrische Leistung der Ventilatoren zur Luftförderung), die im Buch noch ausführlich erläutert werden.

1 Physiologische Grundlagen

Lüftungs- und RLT-Anlagen (RLT = raumlufttechnische Anlagen) sollen ein physiologisch günstiges Raumklima und eine hygienisch einwandfreie Qualität der Innenraumluft schaffen. Dazu fordert die VDI-Richtlinie 6022 [1], dass Lüftungsanlagen nach dem Stand der Technik so zu planen, auszuführen, zu betreiben und Instand zu halten sind, dass von ihnen weder eine Gefährdung der Gesundheit noch Störungen der Befindlichkeit, der thermischen Behaglichkeit oder Geruchsbelästigungen ausgehen.

Aufgrund der steigenden Ansprüche und Forderungen in der Klimatechnik liegt ein großes Augenmerk auf der ganzjährigen Sicherstellung der Behaglichkeit der Personen im Raum. Ein angenehmes Raumklima hat aber auch positive Auswirkungen auf die Produktivität (Effizienz) der Personen und ihre Tätigkeit: Vielen Studien zufolge stellt sich bei einer Raumtemperatur von etwa 21 °C bis 22 °C die höchste Zufriedenheit ein, und eine hohe Zufriedenheitsrate zieht eine bessere Arbeitseffizienz und eine geringere Abwesenheitsrate nach sich. Die VDI 6022 legt die hygienischen Anforderungen an raumlufttechnische Anlagen und Geräte fest, und die DIN EN ISO 7730 [2] befasst sich mit der thermischen Behaglichkeit in Nichtwohngebäuden, die zum Aufenthalt von Menschen bestimmt sind.

1.1 Abhängigkeit der Behaglichkeit für Personen im Raum

Die Behaglichkeit der Personen im Raum hängt erstens von **thermischen Größen** ab, wie zum Beispiel

- Lufttemperatur,
- Temperaturen von Decken und Wänden,
- Luftfeuchte,
- Luftgeschwindigkeit und deren Turbulenz.

Diese thermischen Größen lassen sich über das Einbringen von zuvor im RLT- oder Klimagerät aufbereiteter Luft (Heizen, Kühlen, Be- und/oder Entfeuchten) sowie die Einblasgeschwindigkeiten der in den Raum einströmenden Zuluft sehr gut einstellen und regeln.

Hinzu kommen weitere **nicht-thermische Faktoren,** die die Behaglichkeit der Personen im Raum beeinflussen. Hierbei geht es besonders um die Raumluftqualität,

die sogenannte **„olfaktorische Qualität“.** Diese ist abhängig von zum Beispiel folgenden Einflussgrößen:

- geruchlose Gase und Dämpfe,
- Geruchstoffe,
- CO_2-Gehalt in der Raumluft,
- dispergierte Artikel,
- Aerosole (feine Flüssigkeitspartikel),
- Bakterien, Viren.

Diese nichtthermischen Größen lassen sich durch die Wahl der richtigen Filterklassen (Grobfilter ISO coarse, Feinfilter ISO ePM bis hin zu Hochleistungsfiltern HEPA), durch eine ausreichend dimensionierte Außenluftrate (DIN EN 16798 Teil 1 [3]) bzw. eine direkte Absaugung der Verschmutzungsquellen (zum Beispiel Küche) sehr gut einstellen.

Auch durch die Entscheidung für eine bestimmte Form der Raumluftströmung kann man im Vorfeld einer Planung schon bestimmte Faktoren ausschließen bzw. minimieren. Beim System der Quelllüftung strömt die Zuluft mit einem geringen Impuls bodennah in den Raum ein und verteilt sich dort. An den wärmeren Personen entlang strömt sie langsam aufgrund des thermischen Auftriebs vom Boden nach oben in den Atembereich und von dort aus in Richtung Decke. Eine solche gerichtete Strömung bewirkt eine gute Luftqualität im Aufenthalts- und Atembereich der Personen und kann aufgrund der sehr geringen Strömungsgeschwindigkeiten auch keine Zugerscheinungen hervorrufen. Im Gegensatz dazu wird beim Prinzip der Mischlüftung die Zuluft mit einem hohen Impuls meist von der Decke her in den Raum eingebracht. Der hohe Impuls führt dazu, dass sehr viel Raumluft in die Zuluft angesaugt (induziert) wird und sich intensive Vermischungseffekte einstellen. Man kann sagen, dass sich bei einer gut ausgeführten Mischlüftung überall im Raum die gleichen Verhältnisse einstellen – also überall die gleiche Temperatur, die gleiche Luftfeuchte und auch die gleiche Luftqualität herrscht. Der Vorteil der Mischlüftung gegenüber der Quelllüftung liegt darin, dass aufgrund der starken Vermischungen die Zuluft kühler in den Raum eingebracht werden kann und dadurch höhere Kühlleistungen erreicht werden können. Anzumerken ist, dass die Behaglichkeit eine subjektive Empfindung ist: sie ist nicht messbar und von Person zu Person verschieden. Dazu im Gegensatz steht die Raumluftqualität, die bestimmte Messgrößen wie Temperatur, Feuchte, Geschwindigkeiten und den Gehalt an luftfremden Stoffen aufweist und somit objektiv zu beurteilen ist.

1.2 Ursachen und Auswirkungen von Unbehaglichkeit

In **Tabelle I-1** ist der Zusammenhang zwischen den Beschwerden und den entsprechenden Messgrößen aufgelistet.

Tab. I-1: Beschwerden und zugehörige Messgrößen

Beschwerden	Messgrößen
Zugluft	Mittlere Luftgeschwindigkeit Turbulenzgrad der Luftbewegung
Erkältungserscheinung	Turbulenzgrad der Luftbewegung Raumlufttemperatur, Strahlungstemperatur
Trockene Schleimhäute	Relative Luftfeuchtigkeit (zu gering)
Rheumabeschwerden	Relative Luftfeuchtigkeit (zu hoch)
Übelkeit	Gehalt an Geruchsstoffen, CO_2-Gehalt
Kopfschmerzen	Gehalt an Schwebstoffen, CO_2-Gehalt
Konzentrationsschwächen	Gehalt an geruchlosen Spurengasen
Nervosität	Radon
Gefühllosigkeit der Glieder	Infraschall (Schall unter der hörbaren Frequenz, 20 Hz)

1.3 Mechanismen der Wärmeabfuhr

Jeder Mensch erzeugt sensible Wärme (Strahlung zuzüglich Konvektion) und latente Wärme (Abgabe von Wasser über die Haut und Atmung). Abhängig von der Aktivität kann die sensible Wärmeerzeugung zwischen 55 und 120 W, die Gesamtwärmeerzeugung zwischen 80 und 360 W liegen. Die vier Mechanismen der Wärmeabfuhr des Menschen sind

- Konvektion (an die umgebene Luft),
- Strahlung (an kühlere Wände und Decken),
- Verdunstung (an die umgebene Luft) und
- Wärmeleitung (an kühlere Flächen).

Bei zu hohen Luft- und Raumumschließungsflächentemperaturen sowie zu hoher Feuchte fällt es Menschen schwer, Wärme durch Strahlung oder Konvektion abzuführen. Die Folge ist dann verstärktes Verdunsten (Schwitzen) und Unwohlsein.

1.4 Urteilskala für das Wärmeempfinden

Die für die thermische Behaglichkeit weltweit gültige, wichtigste Norm ist die DIN EN ISO 7730. Diese gilt für gemäßigte Umgebungen ohne starke thermische Belastungen, z. B. Büroräume. In Abhängigkeit von den Einflussgrößen Aktivitätsstufe, Bekleidung, Lufttemperatur, Temperatur der Raumumschließungsflächen und der Luftfeuchte wird der PMV-Wert (Predicted Mean Vote) berechnet. Unter der Voraussetzung PMV = 0 wird die Gleichung zur Behaglichkeitsgleichung. Der PMV-Wert beruht auf der mittleren subjektiven Beurteilung des thermischen Raumklimas durch eine Gruppe von Personen auf einer siebenstufigen Skala (**Tabelle I-2**). Eine wie in Tabelle I-2 dargestellte Tabelle lässt sich auch für Beurteilung anderer Luftparameter, z. B. von Luftfeuchten, Zugerscheinungen, Luftqualität usw., erstellen.

Tab. I-2: Urteilsskala für das Wärmeempfinden nach DIN EN ISO 7730

+3	+2	+1	0	–1	–2	–3
heiß	warm	etwas warm	neutral	etwas kühl	kühl	kalt

Der PMV-Wert (von +3 bis –3) stellt die durchschnittliche Beurteilung eines Parameters des Raumklimas dar. Ein Teil der Personen wird zu einer abweichenden Bewertung kommen. Wichtig ist der Prozentsatz der mit dem Raumklima Unzufriedenen (–3, –2, +2, +3). Der Prozentsatz der Unzufriedenen wird durch den PPD-Wert (Predicted Percentage of Dissatisfied) ausgedrückt (**Tabelle I-3**). Anhand des PMV-Wertes lässt sich der PPD-Wert berechnen und in einem Diagramm darstellen (**Bild I-1**).

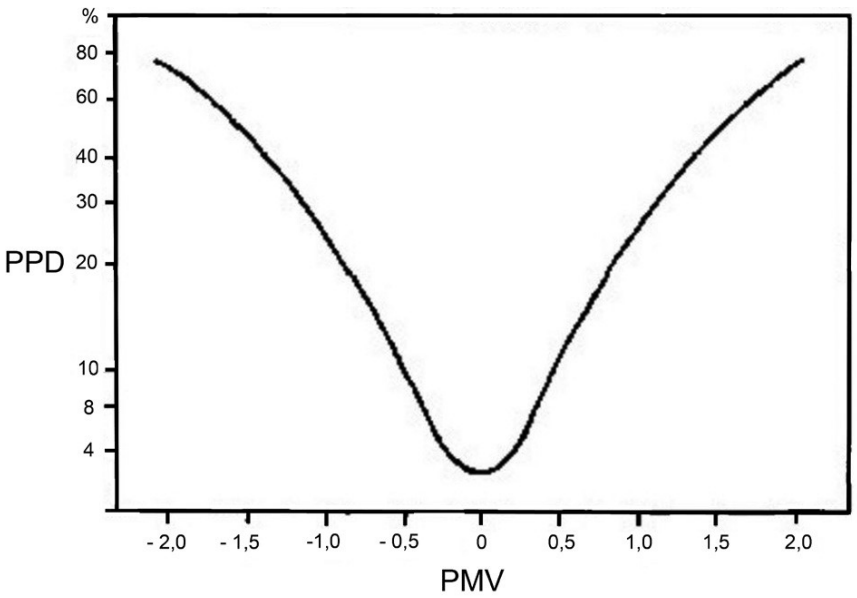


Bild I-1: Vorausgesagter Prozentsatz an Unzufriedenen (PPD) als Funktion des vorausgesagten mittleren Votums

Tab. I-3: Zusammenhang des Prozentsatzes der Unzufriedenen mit dem mittleren Votum aller Befragten nach DIN EN ISO 7730

Vorausgesagtes mittleres Votum PMV	–2	–1	0	+1	+2
Vorausgesagter Prozentsatz Unzufriedener PPD	75 %	25 %	5 %	25 %	75 %

1.5 Luftgeschwindigkeit und Turbulenz

Die Luftgeschwindigkeit ist eine weitere wichtige raumklimatische Einflussgröße, die das Behaglichkeitsempfinden des Menschen bestimmt. Ein großer Teil der Beanstandungen bei raumlufttechnischen Anlagen ist auf so genannte Zugbelästigung zurückzuführen. Konvektiver Zug kommt durch zwei Aspekte zustande: eine zu hohe Luftgeschwindigkeit und/oder eine zu kühle Luft und deren Auswirkungen auf die Haut. In beiden Fällen entzieht die an der Haut vorbeiströmende Luft dieser (zu viel) Feuchtigkeit, und das ist meist die Ursache für Zugescheinungen.

Jedoch darf die Luft auch nicht mit zu niedriger Geschwindigkeit in den Raum eingeblasen werden, da sie an dem Punkt, an dem sie sich absenkt, noch nicht genügend durchmischt wurde und somit noch zu kalt ist. Außerdem garantiert eine Mindestgeschwindigkeit die notwendige Wärmeabfuhr bzw. Lufterneuerung.

Wenn Zuluft in einen zu klimatisierenden Raum eingebracht wird, kommt es nicht nur auf die Einblasgeschwindigkeit, sondern auch auf die Temperatur an. Je höher die Temperatur ist, desto höher können auch die Einblasgeschwindigkeit und der Turbulenzgrad sein. Je höher die Turbulenz, desto höher ist der konvektive

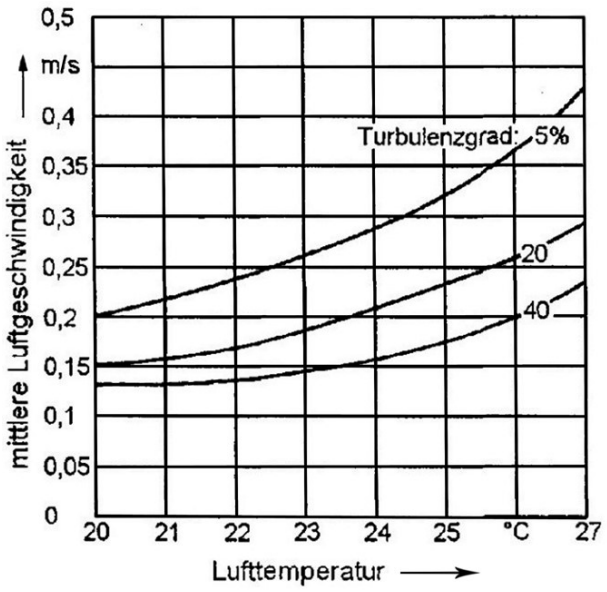


Bild I-2: Werte von mittleren Luftgeschwindigkeiten als Funktion von Temperatur und Turbulenzgrad der Luft im Behaglichkeitsbereich

Wärmeübergangskoeffizient. Zur Messung des Turbulenzgrades werden Laserdoppelrohranemometer, Hitzdrahtanemometer oder thermische Kugelsonden verwendet. Die Voraussetzung ist, dass das Messinstrument schnell reagiert.

Es ist aber nicht nur die absolute Luftgeschwindigkeit im Aufenthaltsbereich zu beachten (in m/s oder cm/s), sondern auch der zugehörige Turbulenzgrad (**Bild I-2**). Die Turbulenz einer Luftströmung kennzeichnet, vereinfacht ausgedrückt, die Konstanz der Strömung an einem Ort über die Zeit. Ist die Luftströmung an dem Ort sehr inhomogen mit oft wechselnden Geschwindigkeiten und Richtungen, ist die Turbulenz hoch, was häufig bei Mischlüftungen der Fall ist. Mathematisch ist die Turbulenz die stochastische Abweichung von einem Mittelwert (mittlere Geschwindigkeit v, Standardabweichung v′ der Messreihe), sie entsteht durch Wirbelablösung im Strömungsweg der Luft.

$$\text{Turbulenzgrad: } TU = \frac{v'}{\bar{v}} \cdot 100\ \% \qquad (1)$$

Turbulenzgrade der verschiedenen Lüftungssysteme:

Mischungslüftung:	40–100 %
Quelllüftung:	20–30 %
Laminar Flow:	0–10 %

Die Angabe des Turbulenzgrades ist sehr ungenau, da er sich aus zwei fehlerbehafteten Messgrößen berechnet. Laut DIN EN 16798, die bei diesem Punkt Bezug auf die DIN EN ISO 7730 nimmt, kann eine höhere Luftgeschwindigkeit genutzt werden, um im Sommer eine erhöhte Lufttemperatur auszugleichen, jedoch sollte diese vom Nutzer selbst regelbar sein.

1.6 Luftfeuchte

Weil ein Teil der Wärmeabgabe des Körpers durch Verdunstung auf der Hautoberfläche erfolgt, sollte die relative Luftfeuchte nicht zu hoch sein, da ansonsten der Verdunstungsvorgang erschwert wird. In der DIN EN 16798 Teil 1 wird die empfohlene absolute Feuchte nach oben mit 12 $g_W/kg_{tr.Luft}$ begrenzt. Dabei soll die relative Feuchte den Wert von 60 % nicht überschreiten (Schwülegrenze). Als Mindestwert für die relative Luftfeuchte enthält die Norm für die schlechteste Kategorie einen Wert von 20 %. Dieser ist allerdings sehr gering angesetzt: So gibt es zum Beispiel vom Fachverband Gebäude-Klima (FGK) eine Kampagne, in der aus Gesundheitsgründen ganzjährig für personenbesetzte Räume eine Luftfeuchte von

40 % (Minimum im Winter) bis 60 % (Maximum im Sommer) empfohlen bzw. gefordert wird (www.mindestfeuchte40.de). Diese Mindestfeuchte sollte eingehalten werden, da ansonsten Irritationen der Augen, Schleimhautreizungen und allergische Reaktionen auftreten können. Diese werden jedoch eher durch den Staubgehalt ausgelöst als durch die niedrige relative Feuchte. Bei niedriger Luftfeuchte nimmt die Staubkonzentration zu. Demnach kann man sagen, dass die Feuchtigkeit die Staubpartikelchen in der Luft bindet (siehe Kapitel II-9 „Befeuchter"). Die Vorgabe der Luftfeuchte ist abhängig von den Erwartungen der Personen und wird in vier verschiedene Kategorien unterteilt.

1.7 Klassifizierung der Luftarten

Im Vergleich zu den in Kapitel I-1.11 angegebenen Definitionen und Werten unterteilt die DIN EN 16798 Teil 3 [4] die verschiedenen Luftarten in mehrere Klassen (siehe **Tabelle I-4** und **Bild I-3**). Dabei erfolgt die Klassifikation der betrachteten Luft stets anhand der Verunreinigung mit Partikeln, Stäuben, Pollen und/oder Gasen. Unterschieden werden Qualitäten der Außenluft (ODA), der Ab- und Fortluft (ETA, EHA) und der Zuluft (SUP). Basis zur Einstufung einer Luftart in eine der Klassen I bis IV sind Über- oder Unterschreitungen von Grenzwerten zum Beispiel für Partikel (PM10, PM2,5) und Gase (Ozon, SO_2, NO_x), die von der Weltgesundheitsorganisation vorgegeben sind (Details dazu siehe DIN EN 16798 Teil 3). Wichtig ist eine Beurteilung oder Kenntnis der Luftklasse, um zum Beispiel bei einer schlechten Außenluftqualität ODA durch eine angepasste Luftfiltration im Lüftungsgerät eine gewünschte Zuluftqualität SUP sicherzustellen. Die Klassifizierung nach

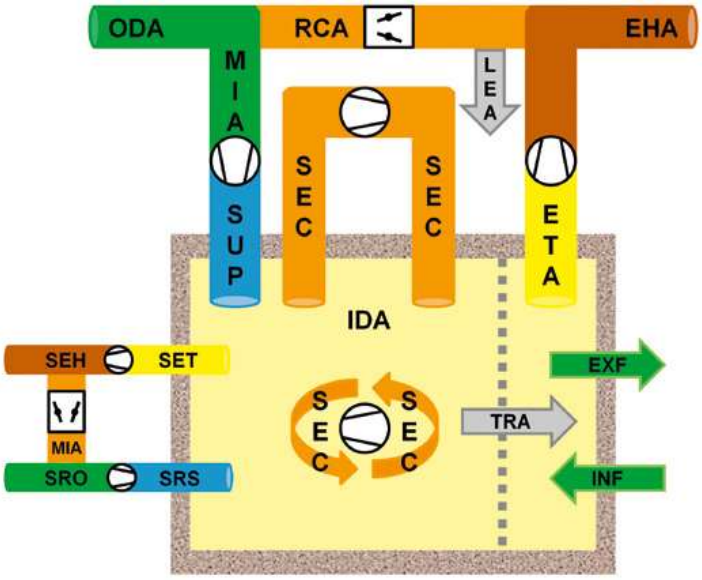


Bild I-3: Bildliche Darstellung der Luftarten