Energie-effiziente lüftungstechnische Anlagen

RAVEL

Impulsprogramm RAVEL
Bundesamt für Konjunkturfragen

Trägerschaft:

SIA Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein

Patronatsorganisationen:

SBHI Schweizerische Beratende Haustechnik- und Energie-Ingenieure

STV Schweizerischer Technischer Verband

SWKI Schweizerischer Verein von Wärme- und Klima-Ingenieuren

VSHL Verein Schweizerischer Heizungs- und Lüftungsfirmen

Projektleiter:
Urs Steinemann, Ingenieurbüro US
8832 Wollerau

Autoren:
Anton De Martin, Aicher De Martin Zweng AG
6006 Luzern

Robert Meierhans, Meierhans & Partner AG
8117 Fällanden

Urs Steinemann, Ingenieurbüro US
8832 Wollerau

Begleitende Projektgruppe:
- Thomas Baumgartner, Ingenieurbüro für Haustechnik, 8600 Dübendorf
- Fritz W. Berg, ABB Normelectric AG 8953 Dietikon
- Christoph Brunner, E + B-Concept 1113 St-Saphorin s/Morges
- Rudolf Furter, ZTL, 6048 Horw
- Heinrich Gugerli, INTEP, 8034 Zürich
- Werner Hochstrasser, Hochstrasser Consulting AG, 8152 Glattbrugg
- Miklos Kiss, Elektrowatt Ingenieurunternehmung AG, 8022 Zürich
- Jürg Nipkow, ARENA, 8006 Zürich
- Erich Schadegg, Gruenberg & Partner AG 8027 Zürich
- Bendicht Schütz, ZTL, 6048 Horw
- Heinz Villa, Amt für technische Anlagen und Lufthygiene, 8090 Zürich
- Charles Weinmann, Weinmann - Energies 1040 Echallens
- Daniel Wolfisberg, Team-Kader AG, 6304 Zug

Gestaltung
APUI, Hochfeldstrasse 113, 3000 Bern 26

Copyright Bundesamt für Konjunkturfragen
3003 Bern, September 1993.
Auszugsweiser Nachdruck mit Quellenangabe erlaubt. Zu beziehen bei der Eidg. Drucksachen- und Materialzentrale (Best.-Nr. 724.307 d)

Form. 724.307 d 9.93 2000 U13745

Vorwort

Das Aktionsprogramm «Bau und Energie» ist auf sechs Jahre befristet (1990 - 1995) und setzt sich aus den drei Impulsprogrammen (IP) zusammen:

- IP BAU - Erhaltung und Erneuerung
- RAVEL - Rationelle Verwendung von Elektrizität
- PACER - Erneuerbare Energien

Mit den Impulsprogrammen, die in enger Kooperation von Wirtschaft, Schulen und Bund durchgeführt werden, soll der qualitative Wertschöpfungsprozess unterstützt werden. Dieser ist gekennzeichnet durch geringen Aufwand an nicht erneuerbaren Rohstoffen und Energie sowie abnehmende Umweltbelastung, dafür gesteigerten Einsatz von Fähigkeitskapital.

Im Zentrum der Aktivität von RAVEL steht die Verbesserung der fachlichen Kompetenz, Strom rationell zu verwenden. Neben den bisher im Vordergrund stehenden Produktions- und Sicherheitsaspekten soll verstärkt die wirkungsgradorientierte Sicht treten. Aufgrund einer Verbrauchsmatrix hat RAVEL die zu behandelnden Themen breit abgesteckt. Neben den Stromanwendungen in Gebäuden kommen auch Prozesse in der Industrie, im Gewerbe und im Dienstleistungsbereich zum Zuge. Entsprechend vielfältig sind die angesprochenen Zielgruppen: Sie umfassen Fachleute auf allen Ausbildungsstufen wie auch die Entscheidungsträger, die über stromrelevante Abläufe und Investitionen zu befinden haben.

Kurse, Veranstaltungen, Publikationen, Videos, etc.
Umgesetzt werden sollen die Ziele von RAVEL durch Untersuchungsprojekte zur Verbreiterung der Wissensbasis und – darauf aufbauend – Aus- und Weiterbildung sowie Informationen. Die Wissensvermittlung ist auf die Verwendung in der täglichen Praxis ausgerichtet. Sie baut hauptsächlich auf Publikationen, Kursen und Veranstaltungen auf. Es ist vorgesehen, jährlich eine RAVEL-Tagung durchzuführen, an der jeweils – zu einem Leitthema – umfassend über neue Ergebnisse, Entwicklungen und Tendenzen in der jungen, faszinierenden Disziplin der rationellen Verwendung von Elektrizität informiert und diskutiert wird. Interessenten können sich über das breitgefächerte, zielgruppenorientierte Weiterbildungsangebot in der Zeitschrift IMPULS informieren. Sie erscheint zwei- bis dreimal jährlich und ist (im Abonnement) beim Bundesamt für Konjunkturfragen, 3003 Bern, gratis erhältlich. Jedem Kurs- oder Veranstaltungsteilnehmer wird jeweils eine Dokumentation abgegeben. Diese besteht zur Hauptsache auf der für den entsprechenden Anlass erarbeiteten Fachpublikation. Die Publikationen können auch unabhängig von Kursbesuchen bei der Eidg. Drucksachen- und Materialzentrale (EDMZ), 3000 Bern, bezogen werden.

Zuständigkeiten
Um das ambitiöse Bildungsprogramm bewältigen zu können, wurde ein Organisations- und Bearbeitungskonzept gewählt, das neben der kompetenten Bearbeitung durch Spezialisten auch die Beachtung der Schnittstellen im Bereich der Stromanwendung sowie die erforderliche Abstützung bei Verbänden und Schulen der beteiligten Branchen sicherstellt. Eine aus Vertretern der interessierten Verbände, Schulen und Organisationen bestehende Kommission legt die Inhalte des Programmes fest und stellt die Koordination mit den übrigen Aktivitäten, die den rationellen Einsatz der Elektrizität anstreben, sicher. Branchenorganisationen übernehmen die Durchführung der Weiterbildungs- und Informationsangebote. Für deren Vorbereitung ist das Programmleitungsteam (Dr. Roland Walthert, Werner Böhi, Dr. Eric Bush, Jean-Marc Chuard, Hans-Ruedi Gabathuler, Jürg Nipkow, Ruedi Spalinger, Dr. Daniel Spreng, Felix Walter, Dr. Charles Weinmann sowie Eric Mosimann, BfK) verantwortlich. Die Sachbearbeitung wird im Rahmen von Ressorts durch Projektgruppen erbracht, die inhaltlich, zeitlich und kostenmässig definierte Einzelaufgaben (Untersuchungs- und Umsetzungsprojekte) zu lösen haben.

Dokumentation
Die vorliegende Dokumentation behandelt die wichtigsten Aspekte, welche in der Planung, im Betrieb und beim Unterhalt von lüftungstechnischen Anlagen zu beachten sind, um die gestellten Anforderungen an das Raumklima mit möglichst kleinem Energieaufwand erreichen zu können. Besonderen Wert wurde auf die Vermittlung der neuesten Erkenntnisse und Entwicklungen gelegt. Zu erwähnen sind z.B. die im Jahr 1992 erschienenen Empfehlungen SIA V382/1–3, die Erkenntnisse aus dem Forschungsprogramm «Energierelevante Luftströmungen in Gebäuden» (ERL) und diverse zukunftsweisende neue Komponenten und Systeme.

Nach einer Vernehmlassung und dem Anwendungstest in einer pilotveranstaltung ist die vorliegende Dokumentation sorgfältig überarbeitet worden. Dennoch hatten die Autoren freie Hand, unterschiedliche Ansichten über einzelne Fragen nach eigenem Ermessen zu beurteilen und zu berücksichtigen. Sie tragen denn auch die Verantwortung für die Texte. Unzulänglichkeiten, die sich bei der praktischen Anwendung ergeben, können bei einer allfälligen Überarbeitung behoben werden. Anregungen nehmen das Bundesamt für Konjunkturfragen oder der verantwortliche Projektleiter (vgl. S. 2) entgegen.

Für die wertvolle Mitarbeit zum Gelingen der vorliegenden Publikation sei an dieser Stelle allen Beteiligten bestens gedankt.

September 1993 Dr. H. Kneubühler
Stv. Direktor des Bundesamtes
für Konjukturfragen

Inhaltsübersicht

Vorwort 3

Inhaltsübersicht 5

Zusammenfassung 7

1 Inhalt und Zweck der Dokumentation 9
1.1 Problemstellung, Anwendungsgebiet 11
1.2 Zweck der Dokumentation 11
1.3 Führer für die Anwendung der Dokumentation 11
1.4 Hinweise auf andere Unterlagen und Projekte 12
Literatur zu Abschnitt 1 15

2 Elektrizitätsverbrauch und Sparpotential 17
2.1 Endenergieverbrauch in der Schweiz 19
2.2 Elektrizitätsverbrauch nach Verbrauchsgruppen 19
2.3 Sparpotential bei lüftungstechnischen Anlagen 20
Literatur zu Abschnitt 2 20

3 Grundlagen 21
3.1 Behaglichkeit 23
3.2 Kühllastberechnung 29
3.3 Erforderlicher Luftvolumenstrom 32
3.4 Energiebedarf für die Luftförderung 34
3.5 SIA 380/4 «Elektrische Energie im Hochbau» 39
Literatur zu Abschnitt 3 42

4 Lüftungstechnische Systeme 43
4.1 Organisatorische Fragen 45
4.2 Systemwahl 47
4.3 Wärmerückgewinnung 52
4.4 Wohnungslüftung 56
4.5 Notwendigkeit einer Kühlung der Raumluft 58
4.6 Notwendigkeit einer Befeuchtung der Raumluft 58
4.7 Nachtlüftung 59
4.8 Betonkernkühlung 60
4.9 Kühldecken 62
4.10 Lufterdregister 63
4.11 Erdsonden 66
4.12 Bedarfsgerechte Steuerung und Regelung 68
4.13 Anlagen mit variablem Volumenstrom (VAV) 69
Literatur zu Abschnitt 4 70

5 Ventilatoren 73

5.1 Bauarten von Ventilatoren 76
5.2 Ventilatorkennlinien 80
5.3 Gas-, Proportionalitäts- und Affinitätsgesetze 88
5.4 Netzkennlinie und Betriebspunkt 90
5.5 Regelbarkeit 91
5.6 Verluste beim Einbau 98
Literatur zu Abschnitt 5 98

6 Antriebssysteme für Ventilatoren 99

6.1 Energieversorgung 101
6.2 Elektromotoren (Drehstrom-Asynchronmotoren) 103
6.3 Leistungsmessung 113
6.4 Transmission 114
6.5 Drehzahlsteuerung 115
6.6 Explosionsschutz 120
6.7 Akustik 120
Literatur zu Abschnitt 6 121

7 Checklisten 123

Checkliste für die Planung des Gebäudes 125
Checkliste für die Planung der lüftungstechnischen Anlage 128
Checkliste für die Planung einzelner Komponenten 130
Checkliste für die Betriebsphase 132

Publikationen des Impulsprogrammes RAVEL 135

Zusammenfassung

Eine grobe Schätzung ergibt, dass heute die gesamte Haustechnik inkl. Beleuchtung rund einen Viertel des gesamten elektrischen Energieverbrauchs in der Schweiz, also rund 12 500 von total etwa 50 000 GWh/a, verursacht. Der Elektrizitätsverbrauch der Motoren für Pumpen und Ventilatoren, Steuerantriebe und Personenlifte wird auf 8% des Gesamtverbrauchs oder rund 4000 GWh/a geschätzt.

Die vorliegende Dokumentation will dazu beitragen, dass in Zukunft der Elektrizitätsverbrauch für lüftungstechnische Anlagen in der Schweiz reduziert werden kann.

Im Sinne einer ganzheitlichen Betrachtung kann es allerdings nicht darum gehen, den Elektrizitätsverbrauch einseitig auf Kosten anderer Energieträger zu reduzieren. Es ist vielmehr anzustreben, den Gesamtenergieverbrauch zu reduzieren, wobei die Wertigkeit der verschiedenen Energieträger angemessen zu berücksichtigen ist.

Die wichtigsten Elemente dieser Strategie zur Energieeinsparung sind:

- Bauliche, betriebliche und organisatorische Voraussetzungen schaffen, zur Ermöglichung eines geringen Energieverbrauchs der Anlagen.
- Grundsätzliche Überprüfung der Notwendigkeit der vorgesehenen Anwendung.
- Dimensionierungskriterien bedarfsgerecht festlegen. Verzicht auf unnötige Funktionen, überdimensionierte Anlagen und Komponenten.
- Komponenten mit guten Wirkungsgraden im ganzen Betriebsbereich einsetzen.
- Anlagen für einen bedarfsgerechten Betrieb konzipieren und so betreiben. Bereits mit einer einfachen Schaltuhr sind wesentliche Einsparungen möglich.
- Messung der relevanten Betriebsparameter und Energieverbräuche ermöglichen und im Betrieb regelmässig vornehmen. Führen einer Energiebuchhaltung.

Das Kapitel 7 der vorliegenden Dokumentation enthält Checklisten für

- die Planung des Gebäudes,
- die Planung der lüftungstechnischen Anlage,
- die Planung einzelner Komponenten und
- die Betriebsphase.

Die Checklisten in Kapitel 7 eignen sich gut als Einstieg in die Thematik und sie sollen bei Anwendung in den verschiedenen Phasen von der Projektierung bis zum Betrieb der Anlage dazu beitragen, dass die möglichen Massnahmen zur Reduktion des Energieverbrauchs genutzt werden.

1 Inhalt und Zweck der Dokumentation

1.1 Problemstellung, Anwendungsgebiet **11**

1.2 Zweck der Dokumentation **11**

1.3 Führer für die Anwendung der Dokumentation **11**

1.4 Hinweise auf andere Unterlagen und Projekte **12**
1.4.1 Normen und Empfehlungen des SIA 12
1.4.2 Forschungsprogramm ERL 12
1.4.3 Weiterführende Literatur 13

Literatur zu Abschnitt 1 **15**

1 Inhalt und Zweck der Dokumentation

1.1 Problemstellung, Anwendungsgebiet

Verschiedene Untersuchungen zeigen, dass der Elektrizitätsverbrauch von Lüftungs- und Klimaanlagen für die Luftförderung und Luftaufbereitung nicht zu vernachlässigen ist. Insbesondere dank den Aktivitäten des Impulsprogrammes RAVEL konnten verschiedene Anlagen ausgemessen und analysiert werden. Einige dieser Arbeiten werden als Fallstudien im zweitägigen Kurs zur vorliegenden Dokumentation vorgestellt und mit separaten Unterlagen dokumentiert [1.7]. Von Interesse ist insbesondere die Feststellung, dass der Elektrizitätsverbrauch von Lüftungs- und Klimaanlagen in Gebäuden mit ähnlicher Nutzung und damit vergleichbaren Anforderungen an die lüftungstechnische Anlage sehr stark variiert. Dies weist auf ein grosses Sparpotential bei vielen bestehenden Anlagen hin. Allgemeine Anforderungen an den Elektrizitätsverbrauch je nach Nutzung werden von der Kommission SIA 380/4 "Elektrizität im Hochbau" erarbeitet. Ein erster Entwurf einer entsprechenden Empfehlung des SIA war bis Ende 1992 in Erprobung [1.1].

Die vorliegende Dokumentation will zusammen mit den verschiedenen anderen Unterlagen des Impulsprogrammes RAVEL und der künftigen Empfehlung SIA 380/4 dazu beitragen, dass in Zukunft der Elektrizitätsverbrauch von neuen und von bestehenden lüftungstechnischen Anlagen in der Schweiz reduziert werden kann. Die Dokumentation gilt in erster Linie für lüftungstechnische Anlagen in einem von Personen belegten Gebäude (Büro, Verwaltung, Versammlungsraum, Schule, Wohnraum etc.). Eine sinngemässe Anwendung für Spezialanlagen wie Industrie, Spital, Verkehr, Gaststätten, Zivilschutz etc. ist unter Berücksichtigung der besonderen Anforderungen an die jeweiligen Spezialanlagen aber weitgehend möglich und sehr erwünscht. Nicht behandelt werden die Aspekte der mechanischen Kälteerzeugung.

1.2 Zweck der Dokumentation

Die Dokumentation bezweckt eine themenübergreifende Darstellung der Aspekte, welche den Elektrizitätsverbrauch von lüftungstechnischen Anlagen beeinflussen. Sie richtet sich in erster Linie an Planer und Planerinnen auf dem Gebiet der Lüftungstechnik. Viele Angaben sind jedoch auch für Hersteller von Lüftungskomponenten, Architekten, Bauherren und Anlagenbetreiber von Interesse.

1.3 Führer für die Anwendung der Dokumentation

Am Anfang der Dokumentation, auf den Seiten 5 und 6, findet sich ein Gesamt-Inhaltsverzeichnis, welches als guter Einstieg verwendet werden kann. Jedes Hauptkapitel beginnt mit einem eigenen Inhaltsverzeichnis und enthält am Schluss eine Zusammenstellung von Literaturhinweisen zu den behandelten Themen. Am Anfang eines umfangreicheren zweistelligen Unterkapitels sind jeweils die wichtigsten Aussagen des Kapitels zusammengefasst.

In vielen Fällen kann ein Einstieg in die Thematik über die Checklisten im Kapitel 7 zweckmässig sein. Diese gelten für folgende Phasen:

- Checkliste für die Planung des Gebäudes
- Checkliste für die Planung der lüftungstechnischen Anlage
- Checkliste für die Planung einzelner Komponenten
- Checkliste für die Betriebsphase.

1.4 Hinweise auf andere Unterlagen und Projekte

1.4.1 Normen und Empfehlungen des SIA

Für die Behandlung von Fragen im Zusammenhang mit lüftungstechnischen Anlagen stellt der Schweizerische Ingenieur- und Architekten-Verein SIA drei Empfehlungen zur Verfügung:

Empfehlung SIA V382/1 «Technische Anforderungen an lüftungstechnische Anlagen» [1.2]

- Festlegung der Bezeichnungen für Luftarten und Anlagetypen
- Anforderungen an die lüftungstechnischen Anlagen unter Berücksichtigung der Aspekte Behaglichkeit, Hygiene und Energieverbrauch
- Definition der Garantiewerte und Vorgehen bei der Abnahme
- Allgemeine Hinweise zur Planung und Ausführung von lüftungstechnischen Anlagen.

Empfehlung SIA V382/2 «Kühlleistungsbedarf von Gebäuden» [1.3]

- Berechnungsgang zur Bestimmung der Anlagegrösse, um die Garantiewerte der Raumkonditionen halten zu können
- Angaben zu den massgebenden Aussenkonditionen und Aussenlasten
- Typische Werte von internen Lasten.

Empfehlung SIA V382/3 «Bedarfsermittlung für lüftungstechnische Anlagen» [1.5]

- Bedarfsermittlung für eine Luftkühlung (inkl. bauliche Anforderungen)
- Bedarfsermittlung für eine Luftbefeuchtung
- Technische Rahmenbedingungen für energetisch gute Anlagen.

Eine erste Fassung der Empfehlungen SIA V382/1 und V382/3 wurde im April 1989 publiziert und einer verlängerten Vernehmlassung bis Ende 1991 unterzogen. Die dabei gewonnenen Erfahrungen sowie die in der Zwischenzeit verfügbar gewordenen neuen Erkenntnisse sind in der aktuellen Fassung der Ausgabe 1992 berücksichtigt.

Die Empfehlung SIA V382/2 ersetzt die Dokumentation SIA D 70 «Kühlleistungsbedarf von Gebäuden» aus dem Jahr 1983. Eine ergänzende Beschreibung der in SIA V382/2 verwendeten Berechnungsmethodik findet sich in der Dokumentation D 088 des SIA [1.4].

Die Empfehlungen SIA V382/1 und V382/2, evtl. auch V382/3, werden in einigen Jahren durch europäische CEN-Normen ersetzt. Die entsprechenden Arbeiten sind unter Mitarbeit der Schweiz in CEN/TC 156 im Gang. Alle drei Empfehlungen sind darum vom SIA als V-Version (Gelbdruck) publiziert worden. Sie entsprechen aber ausdrücklich dem heutigen Wissensstand und sollen angewendet werden, bis die entsprechenden CEN-Normen in Kraft treten.

Ein grosser Beitrag für die Minimierung des Elektrizitätsverbrauchs von Gebäuden kann von der Empfehlung SIA 380/4 erwartet werden:

Empfehlung SIA 380/4 «Elektrische Energie im Hochbau» [1.1]

- Vorausbestimmung des elektrischen Energieverbrauchs
- Best- und Grenzwerte für die Beurteilung von berechneten oder gemessenen Elektrizitätsverbräuchen
- Aufstellung und Nachführung eines Energiebudgets
- Planungs- und Betriebshinweise.

Ein Entwurf der Empfehlung SIA 380/4 war bis Ende 1992 in Erprobung (Abschnitt 3.5).

1.4.2 Forschungsprogramm ERL

Das Forschungsprogramm «Energierelevante Luftströmungen in Gebäuden» (ERL) wurde 1985 im Zusammenhang mit dem Konzept für eine Energieforschungspolitik des Schweizerischen Schulrates angeregt, seine Realisierung begann 1986. Hauptthemen des Forschungsprogrammes waren der Transport von Luft und Schadstoffen innerhalb

von Gebäuden und seiner Umgebung unter besonderer Berücksichtigung der energetischen Aspekte.

Mit dem Forschungsprogramm ERL sollen den Planern von Gebäuden und haustechnischen Anlagen Instrumente zur Verfügung gestellt werden, die es erlauben, alle relevanten Parameter der Luftströmung in und um das Gebäude schon in der Planungsphase derart zu ermitteln, dass

- Wohlbefinden, Komfort und Sicherheit der Benützer gewährleistet sind,
- angepasste Systeme mit guter Wirtschaftlichkeit zur Lüftung und Heizung eingesetzt werden,
- die Sonneneinstrahlung und die freie Wärme weitgehend genutzt werden können,
- im ganzen ein optimaler Energieeinsatz erzielt wird.

Den schweizerischen Randbedingungen von Klima, Witterung und Gebäudearten wird dabei besondere Aufmerksamkeit geschenkt. Um diese Ziele zu erreichen, sind folgende Schritte ausgeführt worden:

- Mathematische Beschreibung des Luft- und Stofftransportes im Einzelraum und zwischen verschiedenen Zonen eines Gebäudes.
- Bereitstellen von Methoden zur Messung der Luftgeschwindigkeit, ihrer Schwankung, der Lufttemperatur und der Konzentration von Schadstoffen.
- Abklärungen zu Systemen für die Lüftung, Heizung und Kühlung von Gebäuden unterschiedlicher Nutzung.
- Umsetzung der Ergebnisse in Planungsunterlagen, die wenn möglich ohne Einsatz von Grossrechnern eingesetzt werden können.

Zur Umsetzung der umfangreichen Resultate des Forschungsprogramms ERL in die Praxis ist die Publikation einer siebenteiligen ERL-Dokumentationsreihe gemäss Tabelle 1.1 vorgesehen. Der Vertrieb dieser Unterlagen wird ab ca. Anfang 1994 durch den VSHL erfolgen [1.6].

1.4.3 Weiterführende Literatur

Alle Hauptkapitel enthalten am Schluss eine Zusammenstellung von Literaturhinweisen zu den behandelten Themen.

Nr.	Titel	Inhalt
ERL 1	**Gesamtübersicht ERL**	– Einleitung, Problemstellung – Zielsetzungen – Organisation und Ablauf (Koordination, Organigramm, Budget, Ablauf) – Arbeiten und Ergebnisse der Teilbereiche (Zusammenfassung) – Umsetzung, (Konzept, Zielgruppen, Veranst., Unterlagen für Praxis) – Ausblick (Dienstleistungen, zukünftige Projekte)
ERL 1A	Anhang	– Liste der Einzelprojekte – Liste der beteiligten Institutionen – Liste der Publikationen – Verzeichnis der Abkürzungen
ERL 2	**Begriffe der Lüftungstechnik**	– Lexikon wichtiger Begriffe der Lüftungstechnik – Liste der Fachausdrücke – Literatur

Nr.	Titel	Inhalt
ERL 3	**Physik der Raumluftströmung**	– Einleitung – Physik der Raumströmung (Grundgesetze) – Die Strömung im Einzelraum – Luft- und Schadstoffaustausch zwischen einzelnen Gebäudezonen und mit der Aussenluft – Thermische Kopplung mit der Gebäudehülle – Thermischer Komfort und Luftqualität – Beurteilung der Lüftung – Literatur
ERL 4	**Raumströmungsatlas**	– Einleitung – Numerische und physikalische Grundlagen – Strömungsbilder bei verschiedenen Lüftungssystemen – Struktur des Atlas – Interpolation der Resultate und Sensitivitätsstudie – Literatur
ERL 4A	Anhang	– Atlas mit Bedienungsanleitung und Katalogen für Quell- und Mischlüftungsfälle
ERL 5	**Rechenprogramme zur Bestimmung der Luftströmungen in Gebäuden**	– Einleitung – Übersicht und Wegleitung – Einzelzonenmodelle – Multizonenmodelle – Kopplung zwischen Einzelzonen- und Multizonenmodellen
ERL 5A	Anhang	– Beispiele von Berechnungen mit dem Multizonenprogramm – Beispiele zur Kopplung zwischen Einzelzonen- und Multizonenmodellen
ERL 6	**Messmethoden zur Beurteilung des Energieverbrauchs und des Komforts**	– Einleitung – Wahl der geeigneten Messmethode – Allgemeine messtechnische Hilfsmittel – Messungen zur thermischen und strömungsbedingten Behaglichkeit – Messungen zur Qualifikation eines Raumes – Messungen zur Qualifikation einer Lüftungsanlage – Messungen in und an Mehrzonengebäuden – Literatur/Index
ERL 7	**Zeitgemässe Lüftungssysteme – Aktuelles Wissen und Leitfaden für die Projektierung bei Dienstleistungsgebäuden**	– Thermischer Komfort – Raumluftqualität – Luftströmung in Räumen – Systemwahl und Anwendungsbereiche – Quellüftungen – Mischlüftungen – Kühldecken

Tabelle 1.1
Verzeichnis der ERL–Dokumentationsreihe [1.6]

Literatur zu Abschnitt 1

[1.1] Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein SIA
Elektrische Energie im Hochbau
Empfehlung SIA 380/4, Entwurf für die Erprobungsphase vom Januar bis Dezember 1992

[1.2] Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein SIA
Technische Anforderungen an lüftungstechnische Anlagen
Empfehlung SIA V382/1, Ausgabe 1992

[1.3] Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein SIA
Kühlleistungsbedarf von Gebäuden
Empfehlung SIA V382/2, Ausgabe 1992

[1.4] Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein SIA
Ergänzungen zur Berechnungsmethodik in der Empfehlung SIA V382/2
Dokumentation D 088, Ausgabe 1992

[1.5] Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein SIA
Bedarfsermittlung für lüftungstechnische Anlagen
Empfehlung SIA V382/3, Ausgabe 1992

[1.6] Verband Schweizerischer Heizungs- und Lüftungsfirmen VSHL
Dokumentationsreihe zum Forschungsprogramm «Energierelevante Luftströmungen in Gebäuden»

ERL 1 Gesamtübersicht

ERL 2 Begriffe der Lüftungstechnik

ERL 3 Physik der Raumluftströmung

ERL 4 Raumströmungsatlas

ERL 5 Rechenprogramme zur Bestimmung der Luftströmungen in Gebäuden

ERL 6 Messmethoden zur Beurteilung des Energieverbrauchs und des Komforts

ERL 7 Zeitgemässe Lüftungssysteme – Aktuelles Wissen und Leitfaden für die Projektierung bei Dienstleistungsgebäuden
In Vorbereitung, Publikation Anfang 1994

[1.7] Ch. Weinmann, Chr. Brunner
Fallstudien
Unterlagen zum RAVEL-Kurs «Energieeffiziente lüftungstechnische Anlagen»

2 Elektrizitätsverbrauch und Sparpotential

2.1 Endenergieverbrauch in der Schweiz **19**

2.2 Elektrizitätsverbrauch nach Verbrauchsgruppen **19**

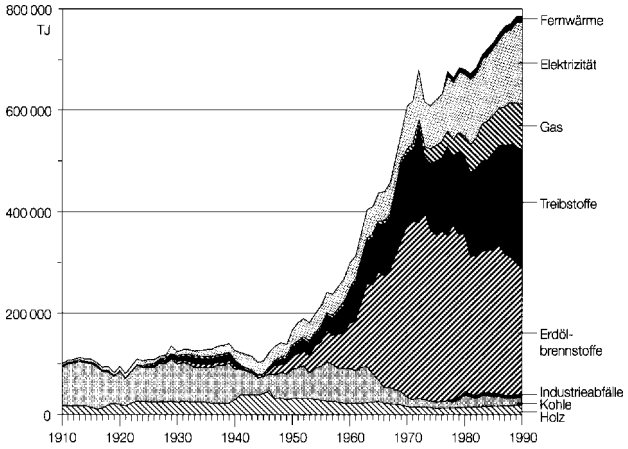
2.3 Sparpotential bei lüftungstechnischen Anlagen **20**

Literatur zu Abschnitt 2 **20**

2 Elektrizitätsverbrauch und Sparpotential

2.1 Endenergieverbrauch in der Schweiz

In Figur 2.1 ist der Endenergieverbrauch nach Energieträgern in der Schweiz für die Jahre von 1910 bis 1990 dargestellt.



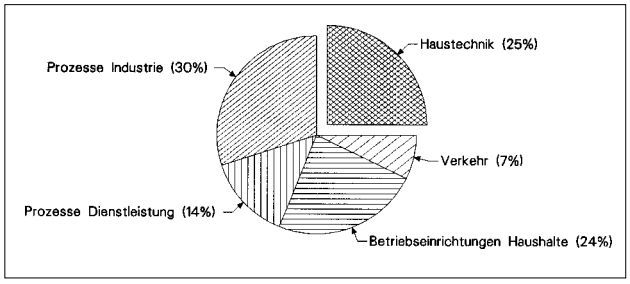
Figur 2.1
Endenergieverbrauch 1910 bis 1990 nach Energieträgern [2.1]

Seit der Mitte unseres Jahrhunderts nimmt der Endenergieverbrauch stetig zu und hat lediglich durch die Erdölkrise anfang der Siebzigerjahre einen kleinen Einbruch erlitten. Die Elektrizität gehört zu den Energieträgern mit einem ungebrochenen Wachstum von durchschnittlich fast 3% pro Jahr während der Achtzigerjahre. Auch für die Neunzigerjahre wird eine weitere, wenn möglich gedämpfte, Zunahme des Elektrizitätsverbrauchs erwartet und erst ab der Jahrhundertwende scheint eine Stabilisierung möglich.

2.2 Elektrizitätsverbrauch nach Verbrauchsgruppen

Aufgrund einer groben Schätzung wurde in [2.2] eine Verbrauchsmatrix für den Elektrizitätsverbrauch in der Schweiz erstellt. Danach verursacht die Haustechnik einen Viertel des gesamten elektrischen Energieverbrauchs in der Schweiz, also rund 12 500 von total etwa 50 000 GWh/a (Figur 2.2).

Der Elektrizitätsverbrauch der Motoren für Pumpen und Ventilatoren, Steuerantriebe und Personenlifte wird auf 8% des Gesamtverbrauchs oder rund 4000 GWh/a geschätzt.



Figur 2.2
Grobe Aufteilung des Elektrizitätsverbrauchs in der Schweiz [2.2]

2.3 Sparpotential bei lüftungstechnischen Anlagen

Beim Elektrizitätsverbrauch von lüftungstechnischen Anlagen besteht ohne Zweifel ein bedeutendes Sparpotential. Messungen des Elektrizitätsverbrauchs bestehender Anlagen für vergleichbare Nutzungen zeigen z.B. eine Variation der spezifischen Kennwerte für den Elektrizitätsverbrauch der Lüftförderung in der Grössenordnung von 1:5 und für den gesamten Elektrizitätsverbrauch in der Grössenordnung von 1:8 [2.3].

Die wichtigsten Massnahmen zur Reduktion des Elektrizitätsverbrauchs von lüftungstechnischen Anlagen sind:

- Bauliche, betriebliche und organisatorische Voraussetzungen schaffen zur Ermöglichung eines geringen Energieverbrauchs der Anlage.
- Grundsätzliche Überprüfung der Notwendigkeit der vorgesehenen Anwendung.
- Dimensionierungskriterien bedarfsgerecht festlegen. Verzicht auf unnötige Funktionen, überdimensionierte Anlagen und Komponenten.
- Komponenten mit guten Wirkungsgraden im ganzen Betriebsbereich einsetzen.
- Anlagen für einen bedarfsgerechten Betrieb konzipieren und so betreiben. Bereits mit einer einfachen Schaltuhr sind wesentliche Einsparungen möglich.
- Messung der relevanten Betriebsparameter und Energieverbräuche ermöglichen und im Betrieb regelmässig vornehmen. Führen einer Energiebuchhaltung.

Literatur zu Abschnitt 2

[2.1] Bundesamt für Konjunkturfragen
RAVEL-Handbuch
Strom rationell nutzen
ISBN 3 7281 1830 3, 1992

[2.2] Bundesamt für Konjunkturfragen
Impulsprogramm RAVEL
Konzept 89

[2.3] Ch. Weinmann, Chr. Brunner
Fallstudien
Unterlagen zum RAVEL-Kurs «Energie-effiziente lüftungstechnische Anlagen»

3 Grundlagen

3.1 Behaglichkeit 23
3.1.1 Allgemeines 23
3.1.2 Aufenthaltsbereich 23
3.1.3 Thermische Behaglichkeit 24
3.1.4 Raumluftqualität 26
3.1.5 Akustische Anforderungen 28

3.2 Kühllastberechnung 29
3.2.1 Allgemeines 29
3.2.2 Berechnungsgang 31
3.2.3 Luftvolumenstrom zur Wärmeabfuhr 31

3.3 Erforderlicher Luftvolumenstrom 32

3.4 Energiebedarf für die Luftförderung 34
3.4.1 Anforderungen gemäss SIA V382/3 34
3.4.2 Spezifischer Leistungsbedarf 34
3.4.3 Spezifischer Energiebedarf 35
3.4.4 Massnahmen zur Reduktion der Druckverluste 37

3.5 SIA 380/4 «Elektrische Energie im Hochbau» 39
3.5.1 Zielsetzung 39
3.5.2 Stand der Einführung 39
3.5.3 Grundideen 39
3.5.4 Energiebudget Licht, Kraft, Prozesse 39
3.5.5 Systemanforderung 41

Literatur zu Abschnitt 3 42

3 Grundlagen

3.1 Behaglichkeit

Grundsätze

- *Die Anforderungen an die Behaglichkeit und die Definition des Aufenthaltsbereichs sind rechtzeitig und vollständig mit dem Bauherrn zu vereinbaren. Im allgemeinen ist von den Festlegungen in SIA V382/1 auszugehen.*

- *Erhöhte Anforderungen verursachen meist einen höheren Energieaufwand und sind nur in begründeten Ausnahmefällen zu wählen.*

3.1.1 Allgemeines

Eine lüftungstechnische Anlage bestimmt massgeblich
- die thermische Behaglichkeit,
- die Raumluftqualität,
- den Schallpegel.

Das Wohlbefinden und die Leistungsfähigkeit von Personen in einem Raum hängen aber auch ab von weiteren Einflussgrössen, wie
- Art der Tätigkeit,
- Gestaltung des Arbeitsplatzes,
- Raumgrösse, Möblierung,
- Beleuchtung und Farbgebung,
- Sicht nach aussen,
- Arbeitsklima,
- persönliches Wohlbefinden.

In den Abschnitten 3.1.3 bis 3.1.5 werden die Anforderungen formuliert, welche aus heutiger Sicht im Aufenthaltsbereich gemäss Abschnitt 3.1.2 im allgemeinen eingehalten werden sollen. Diese Angaben beruhen auf der Empfehlung SIA V382/1 [3.8].

Bei ergonomisch ungünstig konzipierten Arbeitsplätzen (z.B. fixierte Arbeitshaltung) können auch bei Einhaltung der nachfolgend genannten Anforderungen Beeinträchtigungen des Komfortempfindens eintreten. In diesen Fällen ist eine Änderung der Arbeitsplätze und -abläufe anzustreben und nur in Ausnahmefällen sollen erhöhte Komfortanforderungen gestellt werden.

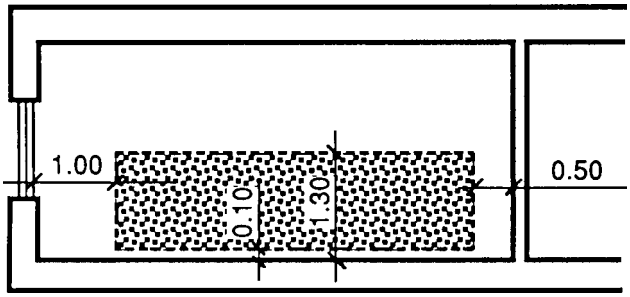
Die Anforderungen an die thermische Behaglichkeit sind in Abschnitt 3.1.3, analog der SIA V382/1, unter Anwendung einiger Vereinfachungen für einen PPD-Index von 10 % bestimmt worden. Für detailliertere Abklärungen kann auf die ISO 7730 [3.2] zurückgegriffen werden.

3.1.2 Aufenthaltsbereich

Die nachfolgend genannten Behaglichkeitsbedingungen müssen nicht im ganzen Raum, sondern nur im Aufenthaltsbereich eingehalten werden. Entsprechend sind die Abnahmemessungen innerhalb des Aufenthaltsbereichs durchzuführen.

Die Definition des Aufenthaltsbereichs richtet sich nach der Nutzung des Raums und ist von Fall zu Fall festzulegen.

Im allgemeinen kann der Aufenthaltsbereich wie folgt definiert werden (vergleiche Figur 3.1):
- 1.00 m Abstand von Fenstern
- 0.50 m Abstand von allen Innenwänden und von fensterlosen Aussenwänden
- 0.10 m Abstand vom Boden (Untergrenze)
- 1.30 m Abstand vom Boden bei vorwiegend sitzender Tätigkeit
- 1.80 m Abstand vom Boden bei vorwiegend stehender Tätigkeit.



Figur 3.1
Aufenthaltsbereich [3.8]

Folgende Raumbereiche gehören ohne besondere Abmachungen nicht zum Aufenthaltsbereich:
- Durchgangszonen
- Bereiche in der Nähe häufig benutzter oder offenstehender Türen
- Nahbereich von Luftauslässen (z.B. bei Bodenauslässen)
- Bereiche in der Nähe von Geräten mit grosser Wärmeabgabe oder Luftumwälzung (z.B. Kopiergerät)

3.1.3 Thermische Behaglichkeit

Die thermische Behaglichkeit eines Menschen in einem Raum hängt ab von

a) den Einflüssen des Raums selber:
   – der mittleren Oberflächentemperatur (Strahlungstemperatur) der umgebenden Flächen
   – den örtlichen Wärmestrahlungen

b) den Einflüssen des Menschen:
   – seiner Tätigkeit, d.h. der Wärmeabgabe des Körpers (met-Wert)
   – seiner Bekleidung, d.h. deren Wärmedämmwert (clo-Wert)

c) den Einflüssen der lüftungstechnischen Anlage:
   – der Raumlufttemperatur
   – der Luftbewegung (Geschwindigkeit, Richtung, Turbulenz)
   – der relativen Raumluftfeuchtigkeit.

Die Grundsätze der thermischen Behaglichkeit sind in der Norm SIA 180 «Wärmeschutz im Hochbau» festgelegt [3.4]. Für Räume mit lüftungstechnischen Anlagen gelten zusätzlich die nachfolgenden Festlegungen, welche der Empfehlung SIA V382/1 entnommen sind.

Für Bürotätigkeit wird im allgemeinen mit einem met-Wert von 1.2 gerechnet und für die Bekleidung wird bei Winterbetrieb ein clo-Wert von 1.0, bei Sommerbetrieb ein clo-Wert von 0.5 eingesetzt.

Als **Winterbetrieb gelten** alle Zustände mit Wärmeerzeugung für die lüftungstechnische Anlage oder die statische Heizung, sofern diese nicht nur der Erreichung eines angenehmen Fensterkomforts dient. Situationen mit alleiniger Wärmezufuhr durch die Nutzung von Abwärme oder durch den Einsatz von Wärmerückgewinnungsanlagen gelten nicht als Winterbetrieb.

Als **Sommerbetrieb** gelten alle Zustände ohne primäre Wärmezufuhr durch die lüftungstechnische Anlage mit und ohne Kühlung. Bei grossen internen Lasten ergibt sich damit auch im Winter ein Sommerbetrieb.

3.1.3.1 Raumlufttemperatur t_i und Raumtemperatur t_R

Die Wärmeabgabe des Körpers durch Strahlung wird von der Temperatur der Umgebungsflächen und die Wärmeabgabe durch Konvektion von der Lufttemperatur und Luftgeschwindigkeit bestimmt.

Als Kenngrösse zur Beurteilung des Strahlungskomforts des menschlichen Körpers unter Berücksichtigung der oben genannten Einflüsse dient die Raumtemperatur t_R gemäss SIA 180 [3.4] (nach ISO 7730 als «operative temperature» bezeichnet). Die Raumtemperatur t_R in einem Raum entspricht nicht der Raumlufttemperatur t_i und die Unterschiede zwischen t_R und t_i sind räumlich und zeitlich verschieden.

Da die Dimensionierung und Regelung der lüftungstechnischen Anlagen aufgrund der Raumlufttemperatur t_i erfolgt, gilt t_i als primäres Komfortkriterium und wird auch bei der Abnahme überprüft. Zusätzlich muss die Einhaltung des Strahlungskomforts anhand der Raumtemperatur t_R resp. der mittleren Oberflächentemperatur t_{oi} geprüft werden.

Planungswerte für die Raumlufttemperatur t_i

Bei gut wärmegedämmten Bauten und bei geeignetem Sonnenschutz gelten für normale Büroaktivität (met-Wert = 1.2) und angepasste Kleidung bei Winterbetrieb (clo-Wert = 1.0) und Sommerbetrieb (clo-Wert = 0.5) die Raumlufttemperaturen gemäss Tabelle 3.1 als Planungswerte. Alle diese Werte berücksichtigen das Wärmeempfinden des ganzen Körpers.

Bei speziellen Nutzungen mit anderen clo- und met-Werten können die Planungswerte für die Raumlufttemperatur anhand der ISO 7730 bestimmt werden, wobei die Planungswerte analog Tabelle 3.1 festzulegen sind.

Winterbetrieb clo = 1.0	Sommerbetrieb clo = 0.5
Planungswert = 20 °C Betriebsbereich = 19–24 °C	Planungswert = 26 °C Betriebsbereich = 22–28 °C*

* Während Hitzetagen ($t_{a\,max}$ > 30 °C) darf die Raumlufttemperatur während der Nutzungszeit auf über 28 °C ansteigen. Für diese Ausnahmesituationen bestehen keine Garantieansprüche.

Tabelle 3.1
Planungswerte und Betriebsbereiche der Raumlufttemperatur t_i bei Büroaktivität (met = 1.2) [3.8]

Die Planungswerte sind bei den Dimensionierungsbedingungen gemäss Empfehlung SIA V382/2 einzuhalten.

Kontrolle des Strahlungskomforts

Im Winter ist auf die Vermeidung eines Kaltluftabfalls bei Fenstern zu achten und es sind die Anforderungen der Empfehlung SIA 384/2 einzuhalten [3.12].

Zur Erreichung der gewünschten thermischen Behaglichkeit beim Sommerbetrieb müssen die Temperaturunterschiede zwischen der mittleren Temperatur der Umgebungsflächen und der Luft kleiner als 4 K sein und die Raumtemperatur t_R soll zwischen 22 und 28 °C liegen. Zusätzlich dürfen die Raumluftgeschwindigkeiten die in Abschnitt 3.1.3.2 genannten Grenzwerte nicht überschreiten. In diesen Fällen stellt die Raumtemperatur den Mittelwert zwischen der Lufttemperatur und dem Flächenmittel der inneren Oberfächentemperatur aller Raumumschliessungsflächen dar (siehe auch Norm SIA 180 [3.4]).

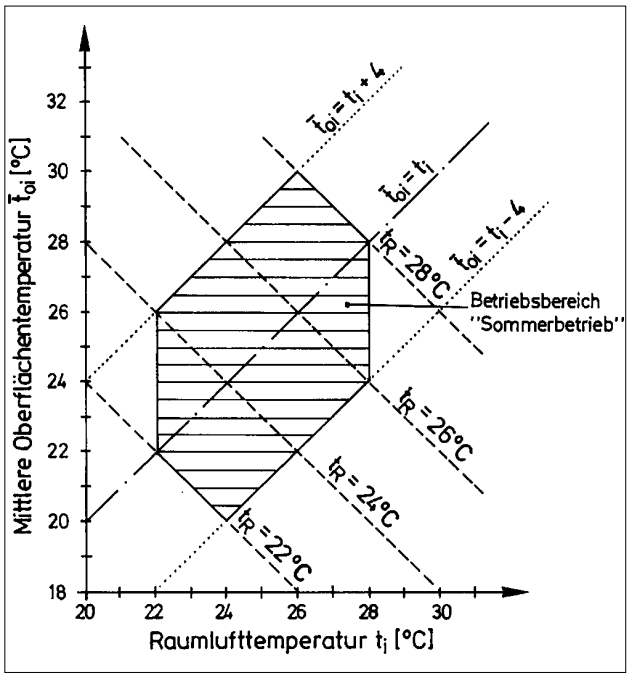
$$t_R = \frac{t_i + t_{oi}}{2}$$

t_R Raumtemperatur

t_i Raumlufttemperatur

t_{oi} Flächenmittel der inneren Oberflächentemperaturen aller Raumumschliessungsflächen

In Figur 3.2 ist der zulässige Bereich der mittleren Oberflächentemperatur t_{oi} bei Sommerbetrieb je nach der Raumlufttemperatur t_i dargestellt. Darin eingetragen ist auch die resultierende Raumtemperatur t_R.



Figur 3.2
Zulässige Bereiche der mittleren Oberflächentemperatur t_{oi} bei Sommerbetrieb je nach Raumlufttemperatur t_i [3.8]

3.1.3.2 Raumluftgeschwindigkeit

Die einem Raum durch Luftstrahlen zugeführte Zuluft induziert darin turbulente Luftbewegungen mit zeitlich variierender Geschwindigkeit. Die Turbulenz der Raumströmumg wird durch den Turbulenzgrad Tu charakterisiert.

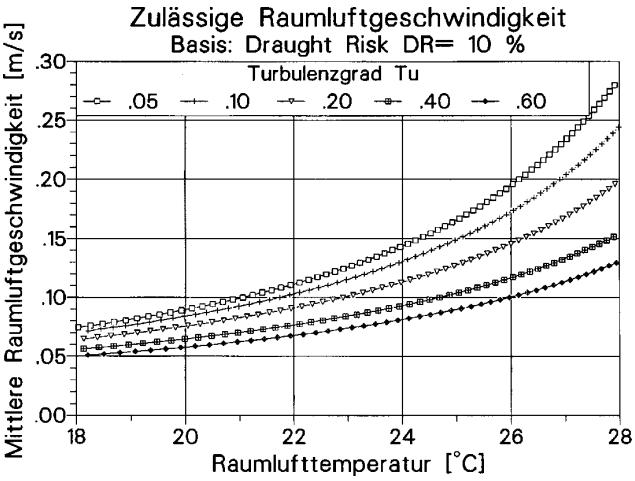
$$Tu = \frac{w_{84\%} - w_{50\%}}{w_{50\%}}$$

Tu Turbulenzgrad [–]

$w_{84\%}$ 84%-Wert der Luftgeschwindigkeit (wird während 84% der Zeit nicht überschritten)

$w_{50\%}$ 50%-Wert der Luftgeschwindigkeit (wird während 50% der Zeit nicht überschritten)

Bei turbulenzarmer Strömung (z.B. Reinräume) sind höhere Luftgeschwindigkeiten, bei sehr turbulenter Strömung geringere Luftgeschwindigkeiten zulässig. Generell sind bei höheren Raumlufttemperaturen höhere Raumluftgeschwindigkeiten zulässig als bei tieferen Temperaturen. Diese Zusammenhänge sind in Figur 3.3 dargestellt. Das verwendete Modell wurde von CEN/TC 156/ WG 6 erarbeitet und gilt für Personen, welche sich insgesamt thermisch neutral fühlen.



Figur 3.3
Zulässige Raumluftgeschwindigkeiten je nach Raumlufttemperatur und Turbulenzgrad [3.8]

In Räumen mit konventionellen lüftungstechnischen Anlagen liegt der Turbulenzgrad zwischen etwa 0.3 und 0.6. Für diese Fälle gelten die Grenzwerte der Tabelle 3.2.

Winterbetrieb clo = 1.0	Sommerbetrieb clo = 0.5
t_i = 19–24 °C 0.12 m/s	t_i = 22–28 °C 0.15 m/s

Tabelle 3.2
Zulässige 50%-Zeitwerte der Luftgeschwindigkeit bei Büroaktivität (met = 1.2) [3.8]

Bei den oben genannten zulässigen Luftgeschwindigkeiten handelt es sich um strenge Anforderungen, welche nur mit einem entsprechenden Aufwand erreicht werden können. Sie sind die Voraussetzung, dass bei den Raumlufttemperaturen nach Tabelle 3.1 angenehme Komfortbedingungen herrschen.

Bei kritischen Räumen (z.B. mit grossen Fensterflächen oder komplizierter Geometrie) empfiehlt es sich, das vorgesehene Luftauslass-System in einem Laborversuch auszutesten.

3.1.3.3 Raumluftfeuchtigkeit

Im Temperaturbereich von 19–28°C ist der Verdunstungsanteil in der menschlichen Wärmehaushalt-Regulierung gering. Der Behaglichkeitsbereich erstreckt sich daher für die relative Luftfeuchtigkeit von φ_i = 30% r.F. (im Winterbetrieb bei t_i = 19–24 °C) bis 65% r.F. (im Sommerbetrieb bei t_i = 22–28 °C). Gelegentliche Unterschreitungen an wenigen Tagen pro Jahr bis 20% r.F. und gelegentliche Überschreitungen bis 75% r.F. sind physiologisch zulässig.

Ohne besondere Anforderungen an das Raumklima ist eine Befeuchtung der Luft im allgemeinen nicht erforderlich (Empfehlung SIA V382/3 [3.11]). Die Erfahrung zeigt, dass Klagen wegen zu trockener Luft in Räumen ohne Befeuchtung häufig auf zu hohe Aussenluftraten, zu hohe Raumlufttemperaturen, einen zu hohen Staubgehalt der Luft oder auf andere Luftfremdstoffe, z.B. Formaldehyd, zurückzuführen sind. Diese Luftverunreinigungen sind durch Massnahmen an den entsprechenden Quellen zu bekämpfen.

Sofern eine Befeuchtung erforderlich ist, kann der begrenzte Einsatz örtlicher Befeuchtungseinrichtungen zweckmässiger sein als eine generelle Befeuchtung durch die lüftungstechnische Anlage.

Eine Luftkühlung kann eine Luftentfeuchtung zur Folge haben. Eine weitergehende Entfeuchtung oder eine Wiederbefeuchtung ist nur gerechtfertigt in Räumen mit besonderen Anforderungen.

3.1.4 Raumluftqualität

Die Raumluft muss so beschaffen sein, dass
- keine gesundheitlichen Störungen,
- keine Beeinträchtigung des Wohlbefindens,
- keine Schäden im Raum

entstehen. Gleichzeitig soll der Energiebedarf der lüftungstechnischen Anlage möglichst gering sein.

Die zweite Forderung verlangt, dass vermeidbare Emissionen durch Massnahmen an der Quelle so

weit reduziert werden, dass die ohnehin benötigten Aussenluftraten zur Verdünnung genügen. Dies gilt insbesondere für Emissionen von Inneneinrichtungen, Baumaterialien und Reinigungsarbeiten, sowie das Eindringen von Radon in bewohnte Räume. Bei verbleibenden markanten Einzelquellen ist eine bauliche Unterteilung oder eine lokale Absaugung anzustreben, damit die Emissionen nicht im ganzen Raum spürbar sind.

Im Aufenthaltsbereich gemäss Abschnitt 3.1.2 gelten die nachfolgend zusammengestellten Anforderungen an die Raumluftqualität.

Massgebend für die erforderliche Aussenluftzufuhr sind in Räumen, in denen nicht geraucht wird, die durch den Mensch an die Raumluft abgegebenen Körpergerüche und, je nach Region und Aussentemperatur, die Feuchtigkeit. Als Indikator für die Körpergerüche kann der durch Stoffwechselprozesse verursachte Kohlendioxid-Gehalt herangezogen werden.

Zur sensorischen Beurteilung der Luftqualität kann auch das Dezipol verwendet werden, als Masseinheit für die Emissionsraten von Raumluftverunreinigungen das Olf. Zwischen den Dezipol-Werten und der Akzeptabilität der Luftqualität besteht wie zwischen den Lüftungsraten und der Akzeptabilität eine Beziehung. Den Dezipol-Werten kann somit die für die erwünschte Luftqualität erforderliche Aussenluftmenge zugeordnet werden. Bei den Bewertungen der Luftqualität mittels Dezipol-Werten ist zu beachten, dass nur die wahrnehmbaren Belastungen der Raumluft erfasst werden und dass eine Addition von Luftverunreinigungen unterschiedlicher Art problematisch sein kann.

In Räumen, in denen geraucht wird, sind höhere Luftmengen erforderlich. Die Verwendung von Indikatoren für Tabakrauch wie zum Beispiel Kohlenmonoxid ist fraglich, da mit entsprechenden Sensoren in der Regel nur eine mittlere Konzentration im Raum erfasst werden kann und nicht die Konzentration im Umfeld der betroffenen Person, die für die Belästigung durch Tabakrauch massgebend ist.

Bei den heute üblichen lüftungstechnischen Anlagen sind für die Verdünnung und Abführung der unvermeidbaren Emissionen wie CO_2, Gerüche, Feuchtigkeit und evtl. Tabakrauch die Aussenluftraten gemäss Abschnitt 3.1.4.1 einzuhalten, wobei auch die Hinweise in 3.1.4.2 zu beachten sind. Bei Systemen mit guter Raumdurchspülung kann die geforderte Raumluftqualität im Aufenthaltsbereich eventuell auch mit kleineren Aussenluftraten erreicht werden.

3.1.4.1 Empfohlene Aussenluftraten

Die Aussenluftraten in Nichtraucherräumen richten sich nach den Komfortansprüchen. Lüftungstechnische Anlagen sind im allgemeinen auf die Einhaltung eines Kohlendioxidgehaltes der Raumluft von 0.10% (entsprechend einer Differenz von 0.06 bis 0.07% zwischen Innen- und Aussenluft) auszulegen, wozu eine Aussenluftrate von 25–30 m^3 pro Stunde und Person notwendig ist. Aus hygienischer Sicht ist auch ein Kohlendioxidgehalt von 0.15% (entsprechend einer Differenz von 0.11–0.12%) noch durchaus genügend; dazu sind 12–15 m^3 pro Stunde und Person erforderlich.

Befragungen haben ergeben, dass in einem Raum mit einem Kohlendioxidgehalt von 0.15% die Luftqualität von 85% der Anwesenden als genügend beurteilt wird.

Je grösser das verfügbare Raumvolumen ist, desto langsamer steigt bei gleichbleibender Aussenluftzufuhr der Kohlendioxidgehalt bis zur jeweiligen Gleichgewichtskonzentration an. Die empfohlenen Aussenluftmengen zur Einhaltung einer Kohlendioxidkonzentration von 0.10% bzw. 0.15% basieren auf einer konventionellen Lüftung und können durch eine Optimierung der Luftführung eventuell reduziert werden.

In Räumen, in denen geraucht wird, sind zur Vermeidung von akuten Reizwirkungen etwa 30–40 m^3 pro Stunde und Person erforderlich, zur Vermeidung von Belästigungen etwa 60–70 m^3 pro Stunde und Person. In grossen, öffentlichen Räumen und grossen Büros mit lüftungstechnischen Anlagen soll sich die Aussenluftzufuhr nach der Anzahl der pro Stunde gerauchten Zigaretten richten. Wenn jegliche Belästigung und gesundheitliche Gefährdung vermieden werden soll, ist ein Rauchverbot einzuführen. Wo es möglich ist, sollten Rauchersalons bzw. Raucherbüros geschaffen werden.

In kleinen Räumen (bis ca. 100 m^3) können auch mittels Luftreiniger die Belastungen durch Tabakrauch reduziert werden, sofern diese Geräte über wirksame Filter verfügen und das Raumvolumen mindestens 2- bis 3mal pro Stunde umwälzen.

Wenn den Grundsätzen der Emissionsverminderung nicht genügend Beachtung geschenkt wird, kann die Raumluft in den ersten 2–3 Nutzungsjahren durch störende oder sogar giftige organische Substanzen verunreinigt sein, was ein verstärktes Lüften erfordert.

Bei Einhaltung der oben genannten Aussenluftraten ist bei Wohn- und Bürobauten, welche die Anforderungen der Norm SIA 180 erfüllen, auch die Vermeidung von Feuchteschäden und Schimmelpilzen an Aussenwänden gewährleistet.

Zusammenfassend wird je nach Nutzung die Einhaltung der Aussenluftraten gemäss Tabelle 3.3 empfohlen.

Rauchen	Empfohlene Aussenluftraten pro Person
verboten	für 0.15% CO_2: v = 12–15 m^3/h.Person für 0.10% CO_2: v = 25–30 m^3/h.Person*
gestattet	v = 30–70 m^3/h.Person

** Allgemeine Basis für Nichtraucherräume*

Tabelle 3.3
Empfohlene Aussenluftraten pro Person [3.8]

Bei schwach oder nicht besetzten Räumen empfiehlt sich aus hygienischen Gründen die Einhaltung eines Aussenluftwechsels von mindestens etwa 0.3 h^{-1} oder eine ausreichende Vorspülung des Raums vor der Belegung.

3.1.4.2 Aussenluftbelastung

Die Raumluft in Wohn- und Büroräumen sollte den Anforderungen der Luftreinhalte-Verordnung (LRV) genügen. Als Leitsubstanz zur Beurteilung der Aussenluftqualität dient das Stickstoffdioxid NO_2, für welches im Anhang 7 der LRV folgende Immissionsgrenzwerte festgelegt sind.

Immissions-grenzwerte	Statistische Definition
30 µg NO_2/m^3	Jahresmittelwert (arithmetischer Mittelwert)
100 µg NO_2/m^3	95% der 1/2-h-Mittelwerte eines Jahres < 100 µg NO_2/m^3
80 µg NO_2/m^3	24-h-Mittelwert, darf höchstens einmal pro Jahr überschritten werden

Tabelle 3.4
Immissionsgrenzwerte der LRV für die Leitsubstanz NO_2 [3.13]

Die Grenzwerte der LRV gelten für die messbare Gesamtbelastung, welche durch verschiedene Quellen und die allgemeine Hintergrundbelastung verursacht wird. Angaben über die lokale Immissionssituation können meist von den kantonalen Fachstellen zur Verfügung gestellt werden.

Sofern im Raum selber keine nennenswerten Stickoxidemissionen anfallen, erreichen die NO_2-Konzentrationen in Räumen mit natürlicher Lüftung oder mit lüftungstechnischen Anlagen ohne besondere Luftreinigung etwa die Hälfte der NO_2-Konzentrationen der Aussenluft. Da in der Schweiz Belastungen der Aussenluft mit Konzentrationswerten über dem doppelten LRV-Grenzwert heute praktisch nicht mehr auftreten, ist die Notwendigkeit für den Bau einer lüftungstechnischen Anlage infolge hoher Schadstoffbelastungen der Aussenluft nur in Ausnahmesituationen, z.B. bei aussergewöhnlichen Geruchs- oder Staubbelastungen, gegeben.

3.1.5 Akustische Anforderungen

Die Anforderungen an den Schallschutz an Gebäuden (inkl. haustechnische Anlagen) mit Räumen, die eine lärmempfindliche Nutzung aufweisen, gegen Aussen- und Innenlärm, richten sich nach der Norm SIA 181 [3.5]. Räume in Wohn- und Bürobauten sind im allgemeinen der mittleren

Lärmempfindlichkeit zuzuordnen und ohne besondere Vereinbarungen gelten die Mindestanforderungen der Norm SIA 181.

Die Lärmschutz-Verordnung LSV des Bundes soll vor schädlichem und lästigem Lärm im Freien und in Gebäuden bei offenem Fenster schützen. Eine zu hohe äussere Lärmbelastung liegt vor, wenn die Immissionsgrenzwerte der LSV für die massgebende Empfindlichkeitsstufe überschritten sind; in diesem Fall kann der Einbau einer lüftungstechnischen Anlage zweckmässig sein, um die erforderliche Aussenluftzufuhr bei geschlossenen Fenstern zu gewährleisten. Für viele Planungsregionen stehen Lärmkataster zur Verfügung, denen die interessierenden Werte entnommen werden können.

3.2 Kühllastberechnung

Grundsätze

- *Vorgängig zur Kühllastberechnung ist nachzuweisen, dass eine Kühlung der Raumluft erforderlich ist. Die entsprechenden Regelungen finden sich in SIA V382/3 und den Vorschriften der Behörden.*
- *Die Grundsätze der Kühllastberechnung sind in SIA V382/2 beschrieben. Die Berechnung kann nach der Hand- oder EDV-Methode erfolgen.*
- *Zur Minimierung der Kühllast sind auch die baulichen Massnahmen zu beachten. Dies gilt insbesondere für einen wirksamen äusseren Sonnenschutz und eine hohe Wärmespeicherfähigkeit der Baukonstruktion.*
- *Die Berechnung aller Kühllastkomponenten erfolgt im 1-h-Schritt und soll insbesondere die zu erwartenden tatsächlichen internen Lasten in ihrem Tagesgang berücksichtigen.*
- *Der gesamte Kühlleistungsbedarf eines Gebäudes ist das Resultat der Addition der Kühllastprofile pro Raum und nicht etwa die Summe der Maximallasten pro Raum.*

3.2.1 Allgemeines

Die Bestimmung des Kühlleistungsbedarfs von einzelnen Räumen und ganzen Gebäuden ist eine recht komplexe Aufgabe, für welche heute verschiedene dynamische Simulationsmodelle zur Verfügung stehen. Das gleiche gilt auch für die Beurteilung der sich ohne eine Kühlung ergebenden Raumlufttemperaturen im Sommer.

Für die praktische Anwendung haben sich bei der EMPA u.a. die Computerprogramme HELIOS und DOE-2 gut bewährt.

Computerprogramm HELIOS

Das Rechenprogramm HELIOS wurde durch die EMPA, Abteilung Bauphysik, entwickelt und wird heute als PC-Version angeboten. Es handelt sich um ein dynamisches 1-Zonen-Simulationsmodell zur Erfassung des thermischen Verhaltens von

Gebäuden im 1-h-Schritt unter Berücksichtigung der kurz- und langwelligen Strahlungsvorgänge. Das Rechenmodell verwendet die Energiebilanzmethode, die instationären Speichervorgänge werden nach dem Response-Faktoren-Verfahren gelöst.

Nicht berücksichtigt werden u.a. der Feuchtigkeitshaushalt des Gebäudes, mehrdimensionale Wärmeleitungsvorgänge (Wärmebrücken), Tageslichtberechnungen, Schattenberechnungen, Systemeinflüsse.

Das Programm HELIOS ist relativ einfach und insbesondere für den weniger geübten Anwender entsprechend übersichtlich handhabbar. Es ist gut geeignet zur Berechnung der Heiz- und Kühllast einzelner Zonen sowie zur Beurteilung des sommerlichen Wärmeschutzes, resp. zur Durchführung eines Bedarfsnachweises für eine Kühlung.

Computerprogramm DOE-2

Beim DOE-2 handelt es sich um ein Gebäude- und Haustechnik-Simulationsprogramm, das die thermischen Vorgänge mit einem konstanten Zeitschritt von 1 Stunde detailliert nachbilden kann. Entwickelt wurde es durch die Simulation Research Group am Lawrence Berkeley Laboratory in Berkeley, CA, USA, in Zusammenarbeit mit weiteren Institutionen und mit finanzieller Unterstützung des US Department of Energy.

Die erste Version des Programms stammt aus dem Jahre 1978 (DOE-1). Seither wurde das Programm laufend weiterentwickelt und verbessert. Insbesondere diverse amerikanische Energieversorgungsgesellschaften unterstützen laufend Programmerweiterungen, um neuen Anforderungen begegnen zu können. Die gegenwärtig im Einsatz stehende Version DOE-2.1D existiert seit 1989.

Seit einigen Jahren wird das Programm, das im Original unter dem Betriebssystem UNIX entwikkelt wird, durch mindestens eine unabhängige Privatfirma auch für PC angeboten. Dabei ist jedoch nur die mit «Extended DOS» kompilierte Version «DX» in der Lage, alle Möglichkeiten des Programms voll auszunützen.

Das Programm steht heute vor allem in den USA sehr verbreitet im Einsatz, ist aber auch in der übrigen Welt breit gestreut. In der Schweiz ist das Programm bei der EMPA Dübendorf seit vielen Jahren im Einsatz im Rahmen von Forschungsprojekten und Rechenaufträgen. Seit einigen Jahren – vor allem seit dem Erscheinen der PC-Version – ist es in zunehmender Anzahl (Anfangs 1992 waren es ca. 30) bei Ingenieurbüros und Energieberatungsfirmen im Einsatz. Seit dieser Zeit beschränkt sich die EMPA auf die Unterstützung externer Anwender durch die Beratung bei Problemfällen und die Abgabe von schweizerischen Wetterdaten, neuer Programmversionen und Dokumentationen sowie notwendigen Programmverbesserungen.

Als Folge der sehr vielfältigen Möglichkeiten verlangt das Programm DOE-2 eine längere Einarbeitungszeit und einen nicht zu unterschätzenden Aufwand für die Aufbereitung der Inputdaten und Plausibilitätskontrolle der Resultate. Eine gewisse Vereinfachung kann von der menügeführten Version DOE-PLUS erwartet werden. Zusätzlich stellt die EMPA für typische Anwendungsfälle Standardinputs zur Verfügung.

Empfehlung SIA V382/2

In der Schweiz erfolgt die Ermittlung des Kühlleistungsbedarfs von einzelnen Räumen und ganzen Gebäuden nach der Empfehlung SIA V382/2 «Kühlleistungsbedarf von Gebäuden» [3.9]. Diese beschreibt eine Handmethode mittels Kühllasttemperaturdifferenzen und Kühllastfaktoren, welche von der EMPA für einige typische Fälle mit dem Simulationsprogramm DOE-2 berechnet worden sind. Gleichzeitig werden die Randbedingungen festgelegt, welche bei der Berechnung des Kühlleistungsbedarfs mit dem Programm DOE-2 oder anderen Simulationsprogrammen anzuwenden sind. Eine ausführliche Beschreibung der Randbedingungen und der durchgeführten Berechnungen findet sich in der SIA-Dokumentation D 088 «Ergänzungen zur Berechnungsmethodik in der Empfehlung SIA V382/2» [3.10].

Wetterdaten

Die Kühllastberechnung nach SIA V382/2 erfolgt für die Monate Juli (Sommer) und September (Herbst). Es werden synthetische Wetterdaten verwendet mit den folgenden Randbedingungen:

– **Aussenlufttemperatur**
  Sinusförmiger Tagesgang

Juli:	Mittelwert	= 22.5 °C
	Maximalwert	= 30.0 °C
September	Mittelwert	= 19.0 °C
	Maximalwert	= 26.0 °C

  Die Berechnung erfolgt für den eingeschwungenen Zustand (5. Tag).

– **Strahlung**
  Strahlung an klaren Tagen für 23. Juli (Sommer) und 23. September (Herbst). Die Empfehlung SIA V382/2 enthält diese Daten für die Station Zürich-Kloten in Tabellenform, zusätzlich steht das Programm SOLAR 1 zur Verfügung (Bezug durch SIA), mit welchem die Strahlungsdaten für beliebig orientierte Flächen und beliebige Orte in der Schweiz berechnet werden können.

Für erweiterte Fragestellungen können von der EMPA verschiedene Klimadatensätze bezogen werden.

3.2.2 Berechnungsgang

Der Kühlleistungsbedarf eines Raums setzt sich zusammen aus dem

– im Raum selbst anfallenden Wärmestrom (interne Lasten) und dem
– von aussen in den Raum eindringenden Wärmestrom (externe Lasten).

Im Beharrungszustand mit konstanter Raumlufttemperatur wird der an die Raumluft abgegebene Wärmestrom durch die Raumlüftung gerade wieder abgeführt. Interne und externe Lasten werden positiv gerechnet, wenn sie dem Raum zugeführt werden.

Der gesamte Kühlleistungsbedarf eines Gebäudes setzt sich aus einer grossen Zahl einzelner Quellen zusammen, die sorgfältig zu berechnen sind. Insbesondere ist der zeitliche Anfall der Wärmeströme und die Gleichzeitigkeit der aus den einzelnen Räumen anfallenden Wärmeströme zu berücksichtigen.

Es werden Angaben zu den folgenden Wärmequellen gemacht:

Interne Lasten (Abschnitt 6 in SIA V382/2)

Personenwärme	Q_P
Beleuchtungswärme	Q_B
Abwärme von Bürogeräten	Q_G
Transmission durch Innenflächen	Q_{IF}
Sonstige Wärmequellen	Q_{div}

Externe Lasten (Abschnitt 7 in SIA V382/2)

Transmission durch undurchsichtige Aussenflächen	$Q_{AW,D}$
Transmission durch Fenster	Q_F
Einstrahlung durch Fenster	Q_{FS}

Der durch die Lüftungs- bzw. Klimaanlage aus dem Raum bzw. dem ganzen Gebäude abzuführende sensible Wärmestrom beträgt:

$$Q = (Q_P + Q_B + Q_G + Q_{IF} + Q_{div}) + (Q_{AW} + Q_D + Q_F + Q_{FS})$$

3.2.3 Luftvolumenstrom zur Wärmeabfuhr

Zur Abführung des in Abschnitt 3.2.2 berechneten Wärmestroms Q ist der folgende Zuluftvolumenstrom erforderlich:

$$V_{ZUL} = \frac{Q \cdot 3600}{\rho \cdot c_p (t_i - t_{ZUL})}$$

V_{ZUL}	Zuluftvolumenstrom [m³/h]
Q	Sensibler Wärmestrom [W]
ρ	Luftdichte [kg/m³]
c_p	Spezifische Wärmekapazität der Luft [J/kg.K]
t_i	Raumlufttemperatur [°C]
t_{ZUL}	Temperatur der Zuluft beim Luftauslass [°C]

Vereinfacht können die folgenden Formeln verwendet werden.

Schweizerisches Mittelland: $$V_{ZUL} = \frac{Q}{0.32\,(t_i - t_{ZUL})}$$

in 1000 m ü.M. $$V_{ZUL} = \frac{Q}{0.30\,(t_i - t_{ZUL})}$$

3.3 Erforderlicher Luftvolumenstrom

Grundsätze

- *Den Luftvolumenstrom nach der erforderlichen Aussenluftrate pro Person bemessen.*
- *Im Raum anfallende Wärme-, Schadstoff- und Feuchtequellen reduzieren oder örtlich absaugen.*
- *Bei grösseren Wärmelasten den Einsatz eines Wassersystems oder einer örtlichen Umluftkühlung prüfen.*

Folgende Kriterien können den erforderlichen Luftvolumenstrom bestimmen:

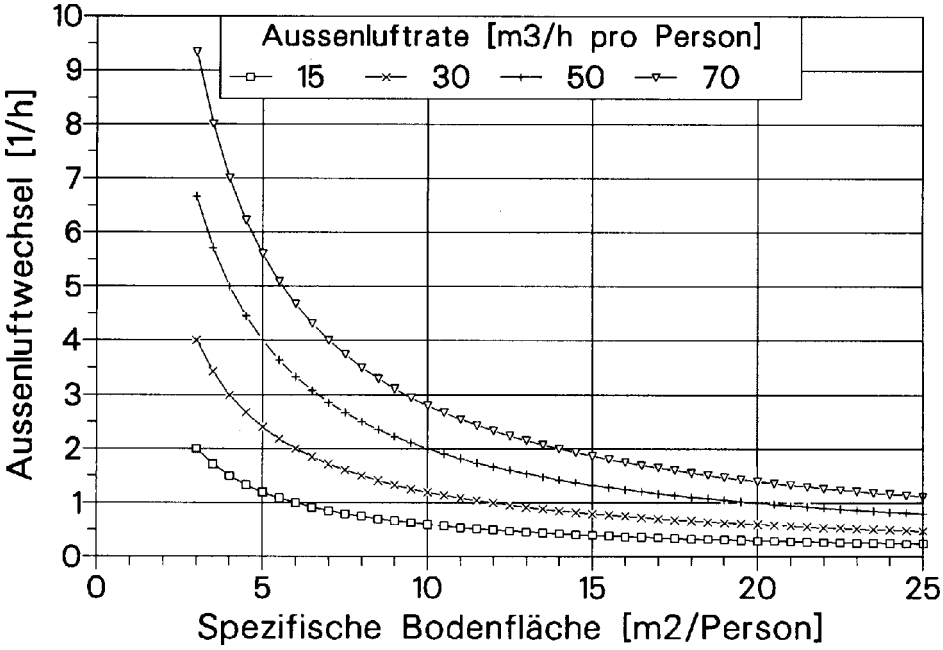
- Aussenluftrate pro Person (Abschnitt 3.1.4)
- Wärmeabfuhr mit dem Luftsystem (Abschnitt 3.2.3)
- Abfuhr von Schadstoffen und Feuchte
- Raumströmung.

Aus energetischer Sicht ist anzustreben, den Aussenluftstrom aufgrund der erforderlichen Aussenluftrate pro Person zu bemessen und auf einen Umluftbetrieb zu verzichten, d.h. Zuluftstrom = Aussenluftstrom. Wenn die anfallende Wärmelast mit diesem Zuluftstrom nicht abgeführt werden kann, ist der Einsatz eines Wassersystems oder einer örtlichen Umluftkühlung zu prüfen. Eine Erhöhung des Zuluftvolumenstroms zur Abfuhr von Schadstoffen und Feuchte oder zur Erreichung der gewünschten Raumströmung sollte bei Wohn- und Bürobauten im allgemeinen nicht notwendig sein.

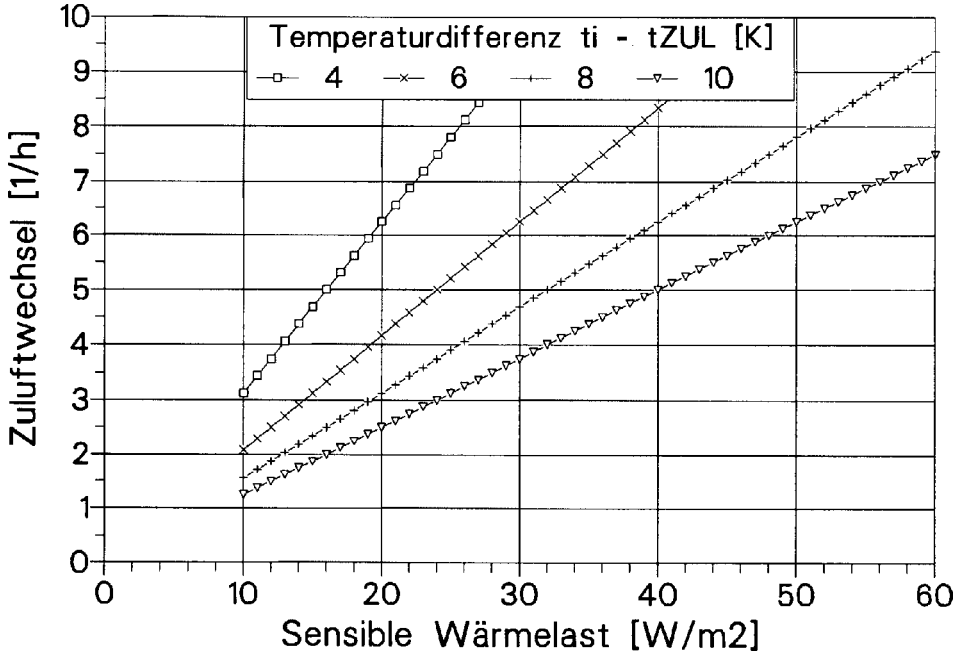
In Figur 3.4 sind die hygienisch erforderlichen Luftvolumenströme, ausgedrückt als stündlicher Luftwechsel in einem 2.5 m hohen Raum, dargestellt.

Bei einer mittleren Belegung eines Büroraums mit 10 m^2 Bodenfläche pro Person führt z.B. eine Aussenluftrate von 50 m^3/h pro Person auf einen 2fachen stündlichen Aussenluftwechsel. Bei einer Temperaturdifferenz von 10 K zwischen Zu- und Raumluft kann damit eine dauernde sensible Wärmelast von etwa 16 W/m^2 abgeführt werden.

Luftwechsel zur Aussenluftzufuhr



Luftwechsel zur Wärmeabfuhr



Aus energetischer Sicht ist anzustreben, den Aussenluftstrom aufgrund der Aussenluftrate pro Person zu bemessen und auf einen Umluftbetrieb zu verzichten. Wenn die anfallende Wärmelast damit nicht abgeführt werden kann, ist der Einsatz eines Wassersystems zu prüfen.

Figur 3.4 Bereiche typischer Luftwechsel (lichte Raumhöhe = 2.50 m)

3.4 Energiebedarf für die Luftförderung

Grundsätze

- *Die Luftförderung verursacht einen massgebenden Anteil am gesamten Elektrizitätsverbrauch von lüftungstechnischen Anlagen.*

- *Massnahmen zur Reduktion des Energieverbrauchs sind:*
  - *Betriebszeiten der Anlage minimieren.*
  - *Reduktion der Luftvolumenströme auf das tatsächlich erforderliche Mass. Dazu u.a. unnötige Schadstoff-, Wärme- und Feuchteemissionen im Raum vermeiden (siehe Abschnitt 3.3).*
  - *Bei wechselnden Anforderungen bedarfsabhängige Aussenluftzufuhr, z.B. über CO_2- oder Mischgassensor, vorsehen.*
  - *Druckverluste in der Anlage minimieren durch kleine Luftgeschwindigkeiten in Kanälen und Apparaten, kurze Wege, strömungsgünstige Ausbildung des Kanalnetzes und der Komponenten.*
  - *Ventilatoren und Motoren mit hohem Wirkungsgrad im häufigsten Betriebsbereich einsetzen.*

- *Die Luftverteilung soll die Vorgaben zur Aufteilung der Luft auf die angeschlossenen Räume möglichst zuverlässig erfüllen. Dies ist besonders wichtig bei bedarfsgerechter Festlegung der Luftmengen.*

- *Die Druckverluste müssen möglichst genau vorausberechnet werden, um auf unnötige Drosselelemente zu verzichten und die Ventilatoren und Motoren energetisch optimal dimensionieren zu können.*

3.4.1 Anforderungen gemäss SIA V382/3

In der Empfehlung SIA V382/3 [3.11] werden die folgenden allgemeinen und erhöhten Anforderungen vorgeschlagen, welche für den Leistungsbedarf der Luftförderung relevant sind:

Anforderungen gemäss SIA V382/3		
Kenngrösse	Allgemein (Ziffer 5 4)	Erhöht (Ziffer 5 2 6 2)
Gesamter Druckverlust (Summe der Zu- und Abluftanlagen)	≤ 1200 Pa	≤ 900 Pa
Aussenluftrate pro Person – Rauchen erlaubt – Rauchen verboten	 ≤ 70 m³/h.P ≤ 30 m³/h.P	 ≤ 50 m³/h.P ≤ 25 m³/h.P
Gesamtwirkungsgrad im Optimalpunkt je nach Nennluftstrom > 15 000 m³/h 10 000 m³/h 5000 m³/h	 > 65% > 60% > 55%	 > 70% > 65% > 60%

Tabelle 3.5
Anforderungen zur Reduktion des Leistungsbedarfs für die Luftförderung [3.11]

3.4.2 Spezifischer Leistungsbedarf

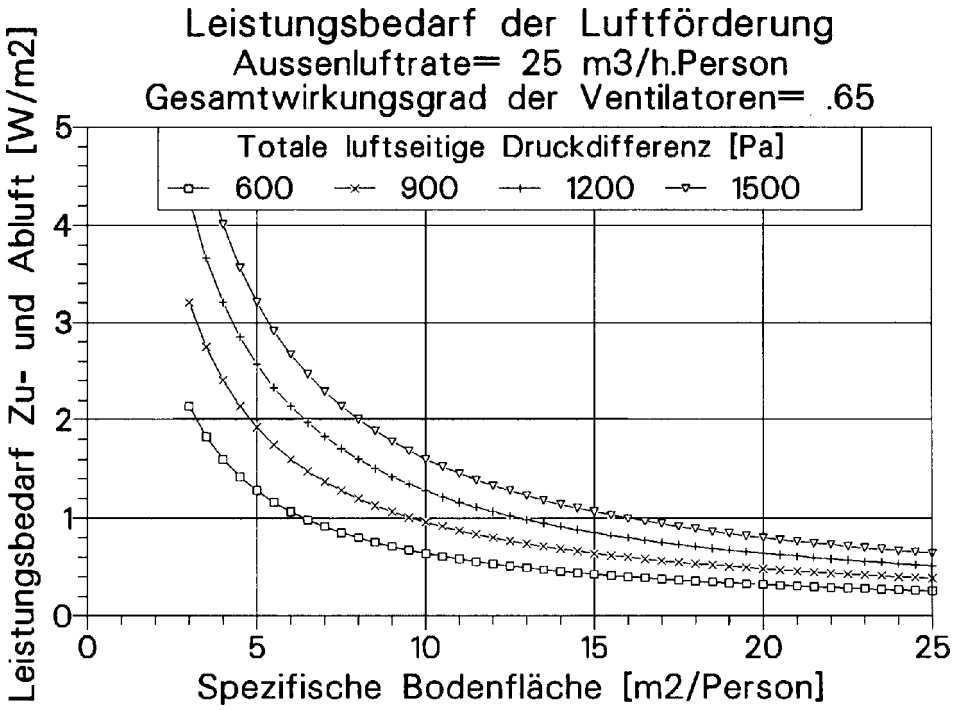
Der auf die Netto-Bodenfläche bezogene spezifische Leistungsbedarf für die Luftförderung berechnet sich zu

$$\mathbf{P_{AL}} = \frac{\mathbf{v \cdot \Delta p}}{\mathbf{Belegung \cdot \eta_{ges} \cdot 3600}}$$

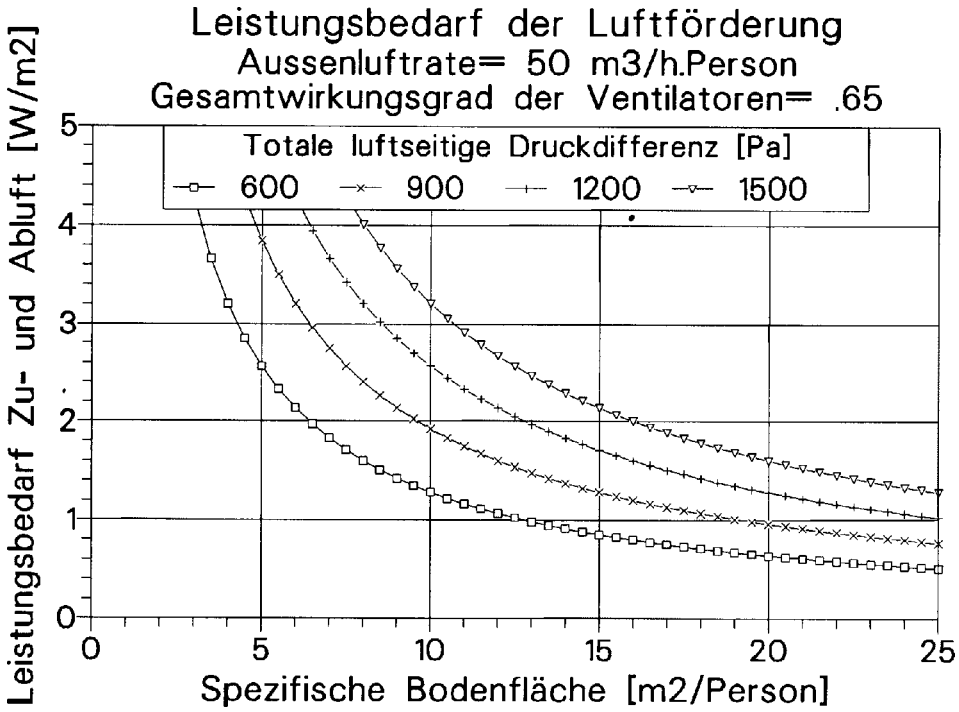
$\mathbf{P_{AL}}$	Leistungsbedarf pro m² Bodenfläche für die Luftförderung [W/m²] (Summe von Zu- und Abluft)
v	Aussenluftrate pro Person [m³/h pro Person]
Δ**p**	Druckdifferenz [Pa] (Summe von Zu- und Abluft)
Belegung	Personenbelegung [Netto-m²/Person]
η_{ges}	Mittlerer Gesamtwirkungsgrad von Ventilator, Motor und Antrieb [–] (Durchschnitt von Abluft- und Zuluftventilator)

In Figur 3.5 ist der Leistungsbedarf der Luftförderung für eine Aussenluftrate von 50 m³/h pro Person (untere Grafik, erhöhte Anforderung gemäss Tabelle 3.5 wenn Rauchen erlaubt) und von 25 m³/h pro Person (obere Grafik, erhöhte Anforderung wenn Rauchen verboten) dargestellt.

Aussenluftrate = 25 m³/h.Person



Aussenluftrate = 50 m³/h.Person



Figur 3.5
Leistungsbedarf der Luftförderung (Gesamtwirkungsgrad der Ventilatoren = .65)

3.4.3 Spezifischer Energiebedarf

Der Leistungsbedarf für die Luftförderung ist in Abschnitt 3.4.2 beschrieben worden. Bei konstantem Betrieb während der Nutzungszeit ergibt sich damit der nachfolgend genannte jährliche Energiebedarf für die Luftförderung. Dieser wird in Anlehnung an die Kennwerte der künftigen Empfehlung SIA 380/4 (Abschnitt 3.5) auf die Energiebezugsfläche (Bruttobodenfläche) bezogen.

$$\mathbf{Q_{LF}} = \frac{\mathbf{v \cdot \Delta p \cdot z}}{\mathbf{Belegung \cdot \eta_{ges} \cdot (EBF/NBF) \cdot 10^6}}$$

$\mathbf{Q_{LF}}$	Energiebedarf Luftförderung [MJ/m^2.a] (Bezogen auf Brutto-m^2)
v	Aussenluftrate pro Person [m^3/h pro Person]
Δ**p**	Druckdifferenz [Pa] (Summe von Zu- und Abluft inkl. WRG)
z	Betriebszeit der Luftförderung [h/a]
Belegung	Personenbelegung [Netto-m^2/Person]
η_{ges}	Mittlerer Gesamtwirkungsgrad von Ventilator, Motor und Antrieb [–] (Durchschnitt von Abluft- und Zuluftventilator)
EBF/NBF	Verhältnis von Brutto- zu Netto-Bodenfläche [–] (typischer Wert = 1.1)

Falls die WRG mit einer Umgehung ausgerüstet ist, kann die Druckdifferenz während der Betriebszeit ausserhalb der Heizperiode entsprechend reduziert eingesetzt werden. Diese Massnahme ist jedoch nur sinnvoll, wenn durch eine Drehzahlregulierung des Ventilators der Luftstrom bei der reduzierten Druckdifferenz konstant gehalten werden kann.

Die Betrachtung der obenstehenden Formel zeigt, dass der Energiebedarf für die Luftförderung durch die folgenden Massnahmen klein gehalten werden kann:

- Minimierung der Betriebszeit.
- Reduktion des Luftvolumenstroms auf das tatsächlich erforderliche Mass.
- Minimierung der Druckverluste.
- Wahl von Ventilatoren, Motoren und Antrieben mit hohem Wirkungsgrad im ganzen Betriebsbereich.

3.4.4 Massnahmen zur Reduktion der Druckverluste

Die Empfehlung SIA V382/3 verlangt, dass der gesamte Druckverlust (Summe der Zu- und Abluftanlagen) im allgemeinen nicht mehr als 1200 Pa, bei energetisch sehr guten Anlagen nicht mehr als 900 Pa erreicht (Abschnitt 3.4.1). Dazu sind die folgenden Hinweise zu beachten.

3.4.4.1 Standortwahl

Zur Vermeidung unnötiger Druckverluste ist auf kurze Wege zwischen Aussenluftfassung resp. Fortluftaustritt und Zentrale sowie zwischen Zentrale und Räumen zu achten.

Die Aussenluftfassung soll in der Nähe der Lüftungszentrale liegen und so plaziert werden, dass die Vorbelastung der Luft möglichst gering ist. Dabei sind die folgenden Hinweise zu beachten:

- Nicht an verkehrsreichen Fassaden ansaugen.
- Auf die Vermeidung eines Strömungskurzschlusses mit der Fortluft oder anderen Abgas- oder Geruchsemittenten achten.
- Nicht direkt über dem Boden ansaugen, sondern untere Einlasskante mindestens 1 m über Boden.
- Zugang zum Reinigen vorsehen.

Bei grösseren Anlagen kann eine Aufteilung in mehrere Zentralen und Schächte zweckmässig sein. Dabei ist auch das Brandschutzkonzept zu beachten. Je feingliedriger das Kanalnetz gewählt wird, desto besser ist eine Anpassung auf die verschiedenen Brandabschnitte möglich und desto flexibler ist das System bei späteren Änderungen.

3.4.4.2 Filtrierung

Bei Zuluftanlagen für Büro- und Verwaltungsbauten genügt im Normalfall eine Filterstufe der Klasse EU 5/6. Vorfilter (z.B. Grobstaubfilter EU 3) erhöhen den Anlagenwiderstand und bringen in der Regel keine Verlängerung der Standzeit der nachgeschalteten Filter. Filter sollten sowieso nach 1 bis $1^1/_2$ Jahren gewechselt werden, um Geruchsprobleme auszuschliessen.

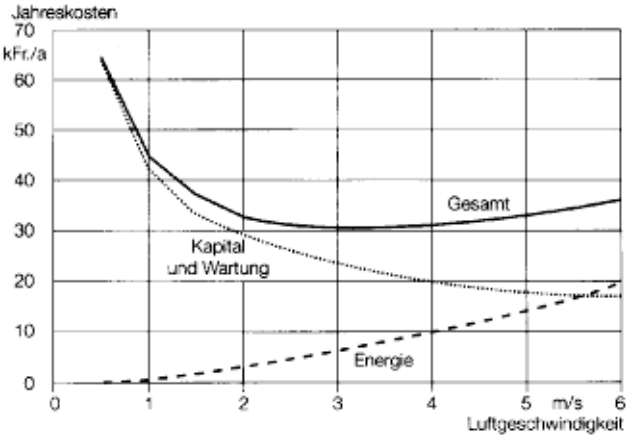
Wesentlich für eine gute Wirksamkeit der Filter ist ein dichter Einbau. Gleichzeitig müssen auch das Luftaufbereitungsgerät und das Kanalnetz dicht sein. Durch Bypass-Luft beim Filter oder zu grosse Leckverluste beim Gerät kann sich die gewünschte Filterstufe bis um zwei Klassen verschlechtern.

Bei der Festlegung des Filterwiderstandes für die Anlagendimensionierung ist von einem geringeren Endwiderstand auszugehen als der Filterfabrikant üblicherweise angibt. Empfehlenswert ist bei einem Anfangswiderstand von ca. 70 Pa bei einem Filter EU 5/6 ein Endwiderstand von 150 Pa bzw. ein Dimensionierungswiderstand von ca. 100 Pa.

3.4.4.3 Luftaufbereitungsgerät

Bei der Anordnung und Gestaltung der Luftaufbereitungsgeräte ist darauf zu achten, dass unnötige örtliche Erhöhungen der Strömungsgeschwindigkeit, Strömungswiderstände durch unnötige Versperrungen und ungünstige Anströmungen des Ventilators mit Drall vermieden werden.

Untersuchungen über die Gesamtkosten von Luftaufbereitungsgeräten je nach Strömungsgeschwindigkeit ergeben ein flaches Minimum im Bereich von 2 bis 4 m/s (siehe Beispiel Figur 3.6). Aus energetischer Sicht wird darum heute für Lüftungsanlagen in Büro- und Verwaltungsbauten im allgemeinen eine Strömungsgeschwindigkeit im Luftaufbereitungsgerät von 2 m/s (bezogen auf den Nettoquerschnitt des Monoblocs) empfohlen und im Kanton Zürich z.B. vorgeschrieben [3.3]. In Spezialfällen mit besonderen Anforderungen, z.B. aussergewöhnlich langen oder kurzen Betriebszeiten, kann die optimale Strömungsgeschwindigkeit von diesem Richtwert abweichen, was durch eine objektspezifische Optimierung zu prüfen ist.



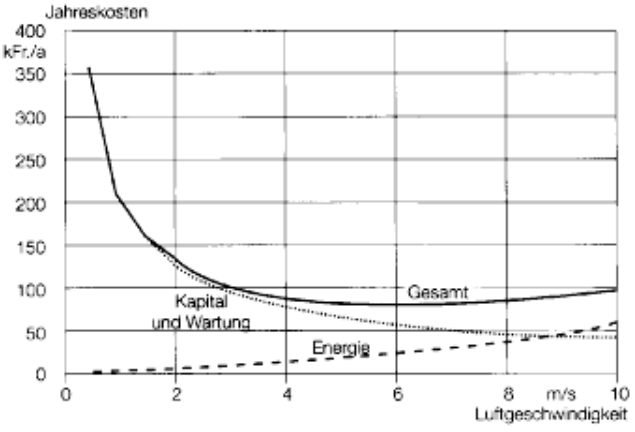
Figur 3.6
Jahreskosten in Abhängigkeit der Luftgeschwindigkeit für das Luftaufbereitungsgerät (Fallbeispiel aus [3.1])

Ansaugschalldämpfer sollten, sofern sie erforderlich sind, im Luftaufbereitungsgerät angeordnet werden, da dort die Luftgeschwindigkeiten und somit auch die Druckverluste klein sind.

3.4.4.4 Kanalnetz

Die Druckverluste im Kanalnetz können klein gehalten werden durch kurze Wege, niedrige Luftgeschwindigkeiten bzw. niedrige R-Werte und kleine Einzelwiderstände. Wichtig ist eine zuverlässige Druckverlustberechnung auch, um auf unnötige Drosselelemente zur Erreichung der gewünschten Luftmengenverteilung verzichten zu können.

Ein Beispiel für die Gesamtkosten in einem Kanalnetz je nach Luftgeschwindigkeit zeigt Figur 3.7. Wie bei den Luftaufbereitungsgeräten gilt, dass die Kurve der Gesamtkosten ein flaches Minimum aufweist und dass aus energetischer Sicht die Strömungsgeschwindigkeiten so weit reduziert werden sollen, bis sich ein massgebender Anstieg der Gesamtkosten ergibt.



Figur 3.7
Jahreskosten in Abhängigkeit der Luftgeschwindigkeit für das Kanalnetz (Fallbeispiel aus [3.1])

Im Kanton Zürich dürfen z.B. aufgrund der Besonderen Bauverordnung I [3.3], die Luftgeschwindigkeiten in Kanälen von Luft- und Klimaanlagen die folgenden Werte nicht überschreiten:

bis	1000 m^3/h	3 m/s
bis	2000 m^3/h	4 m/s
bis	4000 m^3/h	5 m/s
bis	10 000 m^3/h	6 m/s
über	10 000 m^3/h	7 m/s

Besondere Beachtung ist der strömungsgünstigen Ausbildung der Kanäle und Formstücke zu schenken.

- Bei gleicher Fläche, gleicher Strömungsgeschwindigkeit und Rauhigkeit ergeben sich mit runden Kanälen die geringsten Druckverluste. Rechteckige Kanäle werden mit zunehmendem Verhältnis von Länge zu Breite ungünstiger, Verhältnisse über 5:1 sind unbedingt zu vermeiden.

- Für Kanäle aus Eternit muss im Vergleich zu Kanälen aus verzinktem Blech mit Korrekturfaktor für die Rohrrauhigkeit von 1.5, bei innen isolierten Kanälen von 1.5 bis 2.0 gerechnet werden.

- Rechteckbogen sollten mit Radien und Leitblechen ausgeführt werden.

- Rohrbogen sollten aus möglichst vielen Segmenten bestehen.

3.5 SIA 380/4 «Elektrische Energie im Hochbau»

Grundsätze

- *Zur Zeit wird eine Empfehlung SIA 380/4 «Elektrische Energie im Hochbau» erarbeitet.*
- *Die SIA 380/4 stellt ein Instrument dar, um vereinfacht den gesamten elektrischen Energiebedarf zu ermitteln und zu beurteilen.*
- *Um einen Vergleich der Verbrauchskennwerte zu ermöglichen, werden diese für Infrastrukturfunktionen (z.B. Aussenluftzufuhr oder Raumkonditionierung) bei gleicher Nutzung (z.B. Büroräume) angegeben.*
- *Für die Beurteilung der Verbrauchskennwerte werden Grenz- und Bestwerte angegeben. Bei energetisch guten Bauten und Anlagen sollen die Grenzwerte eingehalten werden. Die Bestwerte sind nach dem heutigen Wissensstand zu erreichen, wenn die bestmögliche Kombination der besten Komponenten und Systeme realisiert wird.*

3.5.1 Zielsetzung

Die Empfehlung SIA 380/4 «Elektrische Energie im Hochbau» [3.7] hat einen rationellen Einsatz von elektrischer Energie für Licht, Kraft und Prozesse (LKP) in Hochbauten zum Ziel. Sie ergänzt die Empfehlung SIA 380/1 «Energie im Hochbau» [3.6], welche schwerpunktmässig die Nutzung der Energie für Wärme behandelt. Die Empfehlung SIA 380/4 stellt ein globales Instrument dar, um vereinfacht den gesamten elektrischen Energiebedarf zu ermitteln. Sie ersetzt aber nicht die SIA-Empfehlungen SIA V382/1–3 oder andere bestehende Normen und Empfehlungen.

3.5.2 Stand der Einführung

Ein Entwurf der Empfehlung SIA 380/4 war vom 1.1.1992 bis 31.12.1992 in Erprobung. Zur Zeit erfolgt die Überarbeitung der Empfehlung und des Berechnungsverfahrens aufgrund der Ergebnisse der Erprobungsphase.

3.5.3 Grundideen

Im Gegensatz zum Bereich Wärme wird der Elektrizitätsverbrauch von einer Vielzahl von Verbrauchern bestimmt. Die Energiekennzahl Elektrizität von verschiedenen Gebäuden ist nur dann vergleichbar, wenn die Verbraucherstruktur ähnlich ist.

Gut vergleichbar sind Werte der einzelnen Infrastrukturfunktionen gemäss Figur 3.8 bei gleicher Nutzung.

Dementsprechend sind als Systemanforderungen die mittleren Leistungen pro Infrastrukturfunktion und Betriebseinheit mit Grenz- bzw. Bestwerten zu vergleichen. Auf Stufe Energiekennzahl bestehen keine Anforderungen. Alle Kennwerte sind auf die versorgte Bruttobodenfläche bezogen.

Im folgenden werden das Energiebudget und die Systemanforderungen näher erläutert.

3.5.4 Energiebudget Licht, Kraft, Prozesse

Im Energiebudget (Tabelle 3.6) werden die absoluten Energieverbrauchswerte aufgeteilt nach Betriebseinheiten und Infrastrukturfunktionen dargestellt. Diese Darstellung zeigt grosse Beiträge des Energieverbrauchs einzelner Betriebseinheiten oder Infrastrukturfunktionen.

ENERGIEBUDGET [1000 kWh/a]								SIA 380/4
Objekt, Ort: Datum: Planer:								
Infrastrukturfunktion	Haustechnik HT				Betriebseinricht. BR		Total	
	DT	AL	KO	BL	AH	ZD	HT	HT+BR
Betriebseinheit	3	4	5	6	7	8	Σ3-6	Σ3-8
Büro								
Total								
Energiebezugsfläche:	m^2			Energiekennzahlen		E_{eht} (3-6):		MJ/m^2a
Raumheizung (1):	MWh/a					E_e (3-8):		MJ/m^2a
Warmwasser (2):	MWh/a					E_w (1-2):		MJ/m^2a

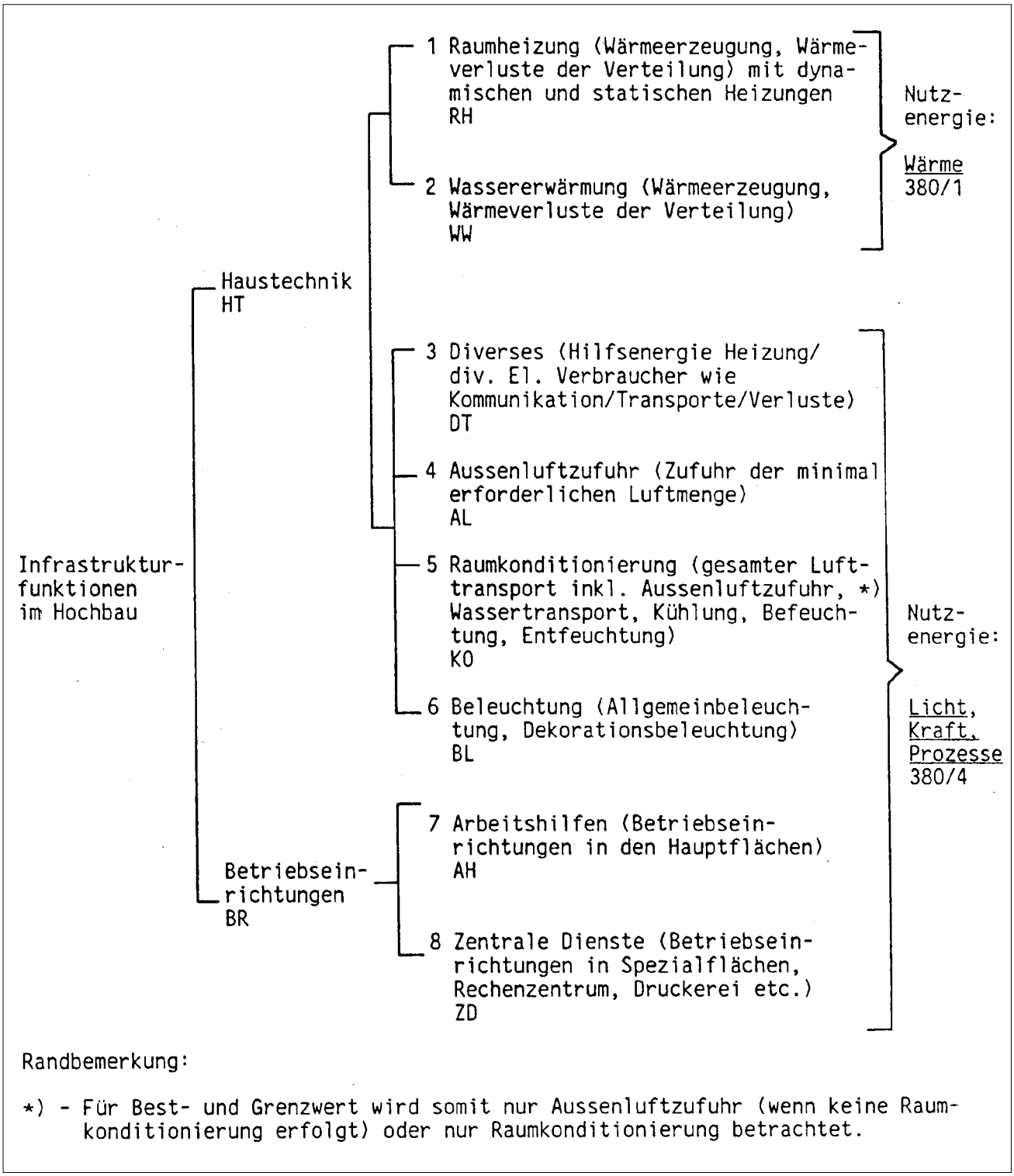
Entweder AL (4) oder KO (5) ausfüllen

Tabelle 3.6
Energiebudget nach SIA 380/4 [3.7]

3.5.4.1 Infrastrukturfunktion

Die Infrastrukturfunktion deckt mit einem technischen System einen Bedarf. Dabei entsteht ein Energieverbrauch.

Die Infrastrukturfunktionen (Verbrauchergruppen) und ihre Zuteilung zu SIA 380/1 und 380/4 sind in Figur 3.8 dargestellt.



Figur 3.8
Infrastrukturfunktionen und ihre Zuteilung zu SIA 380/1 und 380/4 [3.7]

3.5.4.2 Betriebseinheit
In einer Betriebseinheit sind Gebäudeteile mit vergleichbarer Nutzung zusammengefasst, z.B.
- Büro
- Verkauf
- Schulräume
- Restaurant
- Küche etc.

3.5.4.3 Verwendungszweck
Das Energiebudget stellt die Richtschnur für die Projektierung dar, welche in mehreren Projektphasen und bei jeder relevanten Projektänderung überprüft wird. Mit der Nachführung des Energiebudgets können Abweichungen erkannt und mit entsprechenden Massnahmen korrigiert werden.

Im Energiebudget werden Kontrollwerte festgelegt. Diese müssen messtechnisch erfassbar sein und während des Betriebes gemessen werden. Ziel der Nachkontrolle ist der Vergleich von Objektwerten gemäss Projekt sowie die Korrektur von Betriebsfehlern. Das periodische Nachführen des Energiebudgets soll erlauben, die Einflüsse von Nutzungsänderungen zu erfassen und einen Vergleich von Projektziel und Objektwert im Betrieb zu ermöglichen.

Während der Abnahme der Anlage werden in der Regel nicht Energieverbräuche gemessen, sondern Leistungen und einzelne Werte, wie z.B. Druckverluste und Luftvolumenströme, welche zur Berechnung des Energieverbrauchs verwendet worden sind.

3.5.5 Systemanforderung

Mit der Systemanforderung wird die maximal zulässige mittlere Leistung der Betriebseinheit bezogen auf deren Standardnutzungszeit festgelegt. Einheit = W/m^2.

Intensive Energieverbraucher (spezifische Werte) sind aus der Zusammenstellung der mittleren Leistungen in W/m^2 ersichtlich. Zur einheitlichen Erfassung und Darstellung dieser Kenngrössen werden in der SIA 380/4 Formulare zur Verfügung gestellt.

3.5.5.1 Klassen
Als Grundlage für die Festlegung von Systemanforderungen werden in der SIA 380/4 Klassen festgelegt. Für die Raumkonditionierung (KO) in Büroräumen wird z.B. folgende Klasseneinteilung vorgeschlagen:

Raumkonditionierung in Büroräumen	
Klasse	Freie Wärme
KO 1 KO 2	0–20 W/m^2 20–30 W/m^2

Tabelle 3.7
Klasseneinteilung für freie Wärme in Büroräumen [3.7]

3.5.5.2 Grenz- und Bestwert

Grenzwert

Wert für energetisch gute Bauten und Anlagen, welche die Anforderungen des Bauherrn erfüllen sowie wirtschaftlich erstellt und betrieben werden können. Der Grenzwert muss bei der Anwendung der Systemanforderungen eingehalten werden.

Bestwert

Wert, welcher durch die bestmögliche Kombination der besten, technisch ausgereiften Einzelkomponenten, resp. Systeme erreicht werden kann. Eine Mehrinvestition im Vergleich zum wirtschaftlichen Optimum kann erforderlich sein. Die Machbarkeit muss von Fall zu Fall überprüft werden. Der Begriff Bestwert entspricht nicht dem Begriff Zielwert der SIA 380/1.

Objektwert

Wert, welcher während der Projektierung bestimmt oder während des Betriebes gemessen wird. In der Regel liegt er zwischen Grenz- und Bestwert.

3.5.5.3 Verwendungszweck
Die Objektwerte gemäss Projekt werden Vergleichswerten gegenübergestellt. Als Mindestanforderung muss der Grenzwert eingehalten werden. Der Massstab für die energetische Qualität der Planung wird mit der Lage des Projektwertes zwischen dem Grenz- und dem Bestwert sowie mit der Klasse gegeben.

Literatur zu Abschnitt 3

[3.1] Bundesamt für Konjunkturfragen
RAVEL Handbuch
Strom rationell nutzen
ISBN 3 7281 1830 3, 1992

[3.2] ISO/IS 7730
Moderate thermal environments – determination of the PMV und PPD indices and specifications of the conditions for thermal comfort.
Zu beziehen bei: Schweizerische Normen-Vereinigung SNV, 8032 Zürich

[3.3] Regierungsrat des Kantons Zürich
Besondere Bauverordnung I
Ausgabe März 1991

[3.4] Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein SIA
Wärmeschutz im Hochbau
Norm SIA 180, Ausgabe 1988

[3.5] Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein SIA
Schallschutz im Hochbau
Norm SIA 181, Ausgabe 1988

[3.6] Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein SIA
Energie im Hochbau
Empfehlung SIA 380/1, Ausgabe 1988

[3.7] Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein SIA
Entwurf SIA 380/4, Entwurf für die Erprobungsphase von Januar 1992 bis Dezember 1992

[3.8] Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein SIA
Technische Anforderungen an lüftungstechnische Anlagen
Empfehlung SIA V382/1, Ausgabe 1992

[3.9] Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein SIA
Kühlleistungsbedarf von Gebäuden
Empfehlung SIA V382/2, Ausgabe 1992

[3.10] Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein SIA
Ergänzungen zur Berechnungsmethodik in der Empfehlung SIA V382/2
Dokumentation D 088, Ausgabe 1992

[3.11] Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein SIA
Bedarfsermittlung für lüftungstechnische Anlagen
Empfehlung SIA V382/3, Ausgabe 1992

[3.12] Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein SIA
Wärmeleistungsbedarf von Gebäuden
Empfehlung SIA 384/2, Ausgabe 1982

[3.13] Schweizerischer Bundesrat
Luftreinhalte-Verordnung vom 16. Dezember 1985 mit Änderung vom 20. November 1991

4 Lüftungstechnische Systeme

4.1 Organisatorische Fragen 45
4.1.1 Wettbewerbsrecht 45
4.1.2 Konzeptionelle Vorarbeiten 45
4.1.3 Planung energetisch guter Anlagen 46
4.1.4 Inbetriebnahme, Abnahme, Nachkontrolle 46

4.2 Systemwahl 47
4.2.1 Möglichkeiten und Grenzen der Fensterlüftung 49
4.2.2 Mechanische Abluftanlagen 50
4.2.3 Lüftungstechnische Anlagen mit Zu- und Abluft 50
4.2.4 Abführen von Wärme und Schadstoffen 50

4.3 Wärmerückgewinnung 52

4.4 Wohnungslüftung 56

4.5 Notwendigkeit einer Kühlung der Raumluft 58

4.6 Notwendigkeit einer Befeuchtung der Raumluft 58

4.7 Nachtlüftung 59

4.8 Betonkernkühlung 60

4.9 Kühldecken 62

4.10 Lufterdregister 63

4.11 Erdsonden 66
4.11.1 Heizung im Winter 66
4.11.2 Kühlung im Sommer 67

4.12 Bedarfsgerechte Steuerung und Regelung 68

4.13 Anlagen mit variablem Volumenstrom (VAV) 69

Literatur zu Abschnitt 4 70

4 Lüftungstechnische Systeme

4.1 Organisatorische Fragen

Grundsätze

- *Bei einer gesamtheitlichen Betrachtung der energetischen Aspekte ist das Zusammenspiel von Gebäude und Haustechnik von entscheidender Bedeutung.*
- *Da viele energierelevante Grundsatzfragen bereits in einer sehr frühen Planungsphase zu entscheiden sind, ist eine möglichst frühe Zusammenarbeit zwischen Architekt und Haustechnikplaner anzustreben.*
- *In allen Planungsphasen müssen gute und aufwendige Planungsarbeiten angemessen honoriert werden. Eine Honorierung allein aufgrund der Bausumme bietet oft wenig Anreiz für die Planung energetisch guter Anlagen.*
- *Damit die Anlagen wie geplant arbeiten, ist der Inbetriebnahme, Abnahme und Nachkontrolle die notwendige Aufmerksamkeit zu schenken.*

4.1.1 Wettbewerbsrecht

Bei der Durchführung von Wettbewerben ist anzustreben, dass die Veranstalter auch die energetisch relevanten Vorgaben bezeichnen und dass bei der Bewertung der Projekte die Aspekte Energieverbrauch und Umweltbelastung gebührend berücksichtigt werden. Dabei geht es nicht um die Erstellung detaillierter Haustechnikkonzepte sondern um die Festlegung und Überprüfung der massgebenden Grundsätze. Gut bewährt hat sich die Beurteilung der Wettbewerbsprojekte nach den folgenden Kriterien:

- Energiekonzept (vorgesehene Technologien, Einsatz erneuerbarer Energiequellen, Machbarkeit, Komplexität). Gute Tageslichtkonzepte führen auch zu günstigen Lösungsmöglichkeiten für die Anlagen, die für das Raumklima verantwortlich sind. Gute Energiekonzepte nutzen mit den Anlagen für das Raumklima (Heizung, Lüftung, evtl. Kühlung) das dynamische Speicherverhalten des Gebäudes.
- Zonierung nach Raumtypen resp. Nutzungen (Aufteilung in natürlich und mechanisch belüftete Zonen mit unterschiedlichen Anforderungen).
- Zentralen- und Schachtkonzept (horizontale und vertikale Erschliessung). Dieses soll möglichst kurze Verbindungen zwischen Aussenluftfassung, Zentrale und Räumen ermöglichen.
- Flexibilität bezüglich Erst- und Nachinstallationen.
- Investitionen und Wirtschaftlichkeit.

Zur Erreichung dieser Zielsetzung sollte bei der Abfassung der Wettbewerbsgrundlagen ein Experte für Energie- und Haustechnikfragen mitarbeiten und in der Jury vertreten sein.

4.1.2 Konzeptionelle Vorarbeiten

Vorabklärungen bezüglich Notwendigkeit und Art einer Lüftungs- oder Klimaanlage sowie übrige konzeptionelle Vorarbeiten im Bereich Haustechnik, insbesondere auch Abklärungen über den Zusammenhang zwischen Haustechnik und Gebäude (Gesamtkonzept), werden auch heute bei vielen Bauvorhaben gar nicht oder nur sehr rudimentär durchgeführt. Ein Grund für diesen Zustand mag sein, dass heute oft die Honorierung solcher konzeptioneller Vorarbeiten nicht zufriedenstellend geregelt ist und dass als Folge davon gar kein Haustechnikplaner resp. -berater beigezogen wird.

Das Problem der angemessenen Honorierung konzeptioneller Vorarbeiten kann im Rahmen der bestehenden Honorarordnung SIA 108 [4.16] gelöst werden, indem diese Aufwendungen der Phase 0 (Vorstudienphase) zugeordnet und separat entschädigt werden.

Die Bedeutung dieser Vorabklärungen wird heute von Bauherren, Architekten und auch Haustechnikplanern noch häufig zu wenig erkannt. Entsprechend fehlt die Bereitschaft zum rechtzeitigen Beizug des Haustechnikfachmannes und zur separaten Entschädigung dieser Aufwendungen. Im allgemeinen nicht zu befriedigen vermag eine Lösung, wonach die Arbeiten in der Phase 0 als Vorarbeiten für die späteren Phasen betrachtet werden mit entsprechenden Honorarabzügen in den späteren Phasen. Mit einer solchen Regelung würden neutrale und sachgerechte Abklärungen in der Phase 0 stark erschwert und im Falle des Beizugs

eines externen Beraters für die Phase 0 würden sich unnötige Konflikte mit dem Planer für die späteren Phasen ergeben.

4.1.3 Planung energetisch guter Anlagen

Eine energiesparend konzipierte und knapp dimensionierte Anlage verursacht häufig kleinere Investitionskosten, ist aber unter Umständen mit einem höheren Planungsaufwand und auch mit einem höheren Risiko für den Planer verbunden. Das Interesse vieler Planer an energiesparend konzipierten Anlagen ist darum eher gering, da sie mehr Aufwand bei geringerem Honorar befürchten.

Längerfristig sollte wohl die Honorarordnung unter Berücksichtigung dieser Problematik überarbeitet werden. Eine Lösung innerhalb der bestehenden Honorarordnung besteht darin, dass einerseits die Auftraggeber überzeugt werden, dass einfachere oder kleinere Anlagen eher einem höheren Schwierigkeitsgrad zuzuordnen sind als grosszügig dimensionierte konventionelle Anlagen und anderseits die Planer selbstsicher genug werden, auch einfachere Anlagen mit einem technisch hohen Standard zu planen. Gemeint ist aber ausdrücklich ein technisch hoher Planungsstandard und nicht in erster Linie ein technisch hoher Standard der geplanten Anlage. Allenfalls müssen für besondere Abklärungen Zusatzaufträge verlangt werden.

4.1.4 Inbetriebnahme, Abnahme, Nachkontrolle

Die Grundsätze der Abnahme von lüftungstechnischen Anlagen sind in Kapitel 4 der Empfehlung SIA V382/1 [4.17] festgelegt.

Messungen an bestehenden, auch konventionellen, Anlagen zeigen häufig, dass diese nicht wie geplant arbeiten. Aufgrund der wenigen ausführlichen Messungen muss vermutet werden, dass Mängel vielfach unerkannt bleiben, weil gar keine aussagefähigen Abnahmemessungen durchgeführt werden.

Die Honorarordnung SIA 108 enthält für den Bereich Lüftung, Klima, Kälte für die Teilleistung 12 «Fachbauleitung» einen Honoraranteil von 10% und in der Abschlussphase inkl. der Teilleistung 15 «Garantiearbeiten» einen Honoraranteil von 10%. Diese Honorare sollten eine zuverlässige Abnahme und Überwachung der Mängelbehebung ermöglichen. Vielleicht besteht die Problematik eher darin, dass sich mit dem Planer und Installateur zwei direkt beteiligte und aufeinander angewiesene Parteien gegenseitig kontrollieren sollten.

Zur Verbesserung dieser Situation sind die folgenden zwei Massnahmen zu beachten:

– Konsequentere Durchsetzung der bekannten Abnahmeprozeduren, d.h. vollständiges Ausfüllen des SWKI-Abnahmeprotokolls 88-1 Lüftung [4.20] und Durchführung der dazu notwendigen Messungen und Feststellungen bei den einzelnen lüftungstechnischen Anlagen.

– Durchführung einer Nachkontrolle. Diese kann durch den Bauherrn, den Planer oder einen unabhängigen Dritten erfolgen. Im letztgenannten Fall wäre es vorteilhaft, wenn dieser, z.B. aus der Mitarbeit in der Phase 0, die Anlage bereits kennt. Die Entschädigung dieser Aufwendungen kann z.B. so erfolgen, dass die erste Nachkontrolle als Zusatzaufwand zu Lasten des Bauherrn geht. Falls aufgrund von Mängeln Wiederholungen notwendig sind, gehen diese zu Lasten des Verursachers.

4.2 Systemwahl

Grundsätze

- *Mit neuen Energiegesetzen und den Empfehlungen SIA V382/1–3 soll erreicht werden, dass in Zukunft energieeffiziente lüftungstechnische Anlagen geplant werden und dass die Notwendigkeit einer Kühlung oder Befeuchtung der Raumluft kritisch geprüft wird.*

- *Änderungen in der Planungsweise ergeben sich vor allem für die bisher eher sorglosen Planer. Empfehlungen bezüglich höchste zulässige Strömungsgeschwindigkeiten oder Druckverluste sind für eine Mehrheit der Anlagen zweckmässige Vorgaben (Abschnitt 3.4.4). In Einzelfällen sind begründete Abweichungen nach oben oder unten jedoch möglich.*

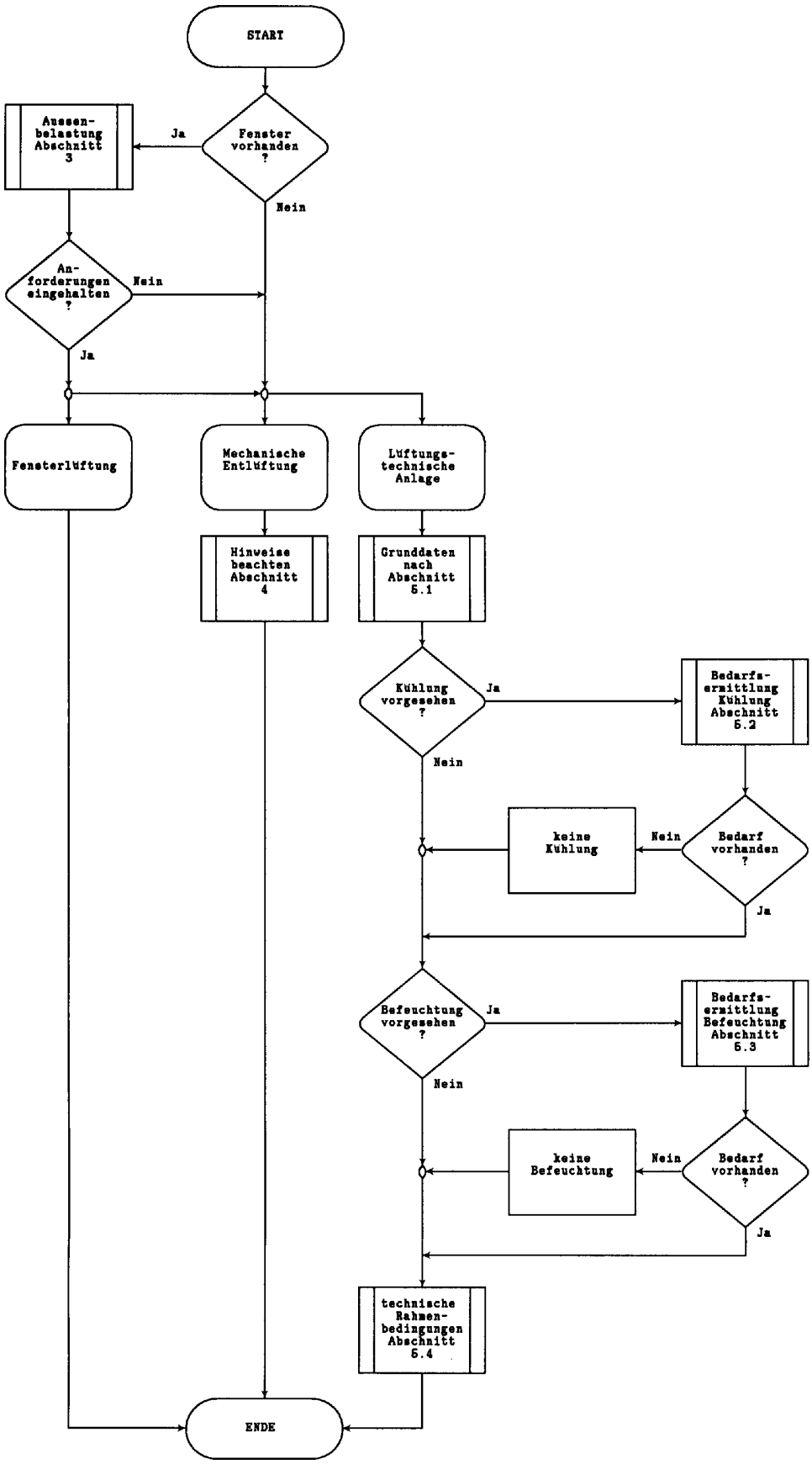
- *Bei einer Beurteilung des Gesamtenergiebedarfs ist die höhere Wertigkeit der elektrischen Energie zu berücksichtigen. Als allgemeine Empfehlung gilt, dass der elektrische Energiebedarf (z.B. für die Luftförderung) mit einer Wertigkeit von 3, der thermische Energiebedarf für Heizen und Kühlen mit einer Wertigkeit von 1 zu gewichten ist.*

- *Es ist anzustreben, dass der Zuluftstrom der Anlagen dem hygienisch erforderlichen Aussenluftstrom entspricht. Die Möglichkeiten zur Reduktion der im Raum anfallenden Wärme- und Schadstoffemissionen sind unbedingt auszuschöpfen (Quellenbekämpfung). Falls zur Abführung höherer Wärmelasten ein grösserer Zuluftstrom erforderlich wäre, ist eine Strahlungskühlung oder eine örtliche Umluftkühlung vorzusehen (Abschnitt 3.3).*

Die Figur 4.1 gibt eine Übersicht über das allgemeine Vorgehen bei der Planung gemäss SIA V382/3 [4.19].

Alle drei Lüftungsstrategien – Fensterlüftung, mechanische Abluftanlage, lüftungstechnische Anlage mit Zu- und Abluft – sind grundsätzlich möglich, wenn Fenster vorhanden sind und wenn die Aussenbelastung (massgebend ist gemäss Abschnitt 3.1.4 der vorliegenden Dokumentation resp. Abschnitt 3 der SIA V382/3 vor allem die Lärmbelastung) ein Oeffnen der Fenster erlaubt.

Bei hohen Aussenbelastungen, bei fensterlosen Räumen oder bei erhöhten Anforderungen an die Nutzung ist der Bau von lüftungstechnischen Anlagen oder von mechanischen Abluftanlagen zweckmässig. Diese Argumente begründen noch nicht die Notwendigkeit einer Kühlung oder Befeuchtung der Raumluft; diese ist nach den Vorgaben von SIA V382/3 separat zu prüfen (Abschnitte 4.5 und 4.6).



Figur 4.1
Übersicht über das Vorgehen bei der Planung gemäss SIA V382/3 [4.19]
(Die Abschnittsbezeichnungen beziehen sich auf die SIA V382/3)

4.2.1 Möglichkeiten und Grenzen der Fensterlüftung

Bei der Fensterlüftung erfolgt die Lufterneuerung durch das Öffnen von Fenstern als Stosslüftung.

Im Winter, wenn die Luft aussen kälter ist als innen, strömt bei Windstille die kalte Aussenluft durch den unteren Teil der Öffnung ein und durch den oberen Teil strömt die warme Raumluft aus. Dabei sind im Raum, auch mit Heizkörpern unter den Fenstern, Zugserscheinungen unvermeidlich, so dass die Fensterlüftung im Winter nur zur kurzzeitigen, schnellen Lufterneuerung und nicht zur Dauerlüftung geeignet ist. Kurzes intensives Lüften ist im Winter aber auch aus energetischen Gründen zweckmässig, da damit eine zu starke Abkühlung der Bauteile vermieden wird.

Im Sommer hängt die Intensität der Fensterlüftung bei gegebenen Fensteröffnungen im wesentlichen vom Windanfall ab, zu einem Teil auch von den durch die Sonnenstrahlung bewirkten Temperaturunterschieden zwischen den verschiedenen Seiten des Gebäudes.

Bei Querlüftung, d.h. bei der gleichzeitigen Öffnung von Fenstern auf zwei oder mehr Fassadenseiten, ist die Lufterneuerung besonders gross und es kann in wenigen Minuten ein vollständiger Luftaustausch im Raum erreicht werden.

Die Tabelle 4.1 enthält grobe Richtwerte der stündlichen Luftwechsel, welche im Mittel mit der Fensterlüftung erreicht werden.

Die günstigste Lüftung erhält man mit Schiebefenstern oder anderen Lösungen, welche eine bedarfsgerechte Einstellung der Öffnungsgrösse erlauben. Allerdings lässt sich auch bei dieser Lüftungsart (Dauerlüftung) kein kontrollierter Luftaustausch gewährleisten.

Zustand der Fenster	Luftwechsel
Fenster, Türen geschlossen *	0–0.5 h^{-1}
Fenster gekippt, kein Rolladen	0.3–1.5 h^{-1}
Fenster halb offen	5–10 h^{-1}
Fenster ganz offen	10–15 h^{-1}
Fenster, gegenüberliegend offen	bis 40 h^{-1}

** Fugenlüftung*

Tabelle 4.1
Grobe Richtwerte für Aussenluftwechsel bei Fensterlüftung [4.13]

Vorteile der Fensterlüftung
- Einfachste und kostengünstigste Lufterneuerung
- Kein Energiebedarf für eine Luftförderung
- Gute Akzeptanz bei den Benutzern
- Im Sommer Nachtlüftung und intensive Lüftung am Morgen möglich.

Nachteile der Fensterlüftung
- Kein kontrollierter Luftaustausch
- Zugserscheinungen im Winter
- Evtl. Konflikte in grösseren Gruppenbüros
- Keine Wärmerückgewinnung
- Keine Luftbehandlung
- Evtl. Belastung durch Lärm und Abgase
- Evtl. Sicherheitsprobleme (Nachtlüftung).

Aus energetischer Sicht ist bei der Frage, ob anstelle einer Fensterlüftung eine mechanische Lüftung eingebaut werden soll, die Energieeinsparung durch die Wärmerückgewinnung im Winter dem Energiebedarf für die Luftförderung gegenüberzustellen. Dabei sollte entsprechend den Vorgaben in Ziffer 5 2 6 der Empfehlung SIA V382/3 zur Definition energetisch guter Anlagen, der elektrische Energiebedarf für die Medienförderung (Luft und Wasser) mit einer Wertigkeit von 3, der thermische Energiebedarf für Heizen und allenfalls Kühlen mit einer Wertigkeit von 1 gewichtet werden.

Aus energetischer Sicht sind die Grenzen der Fensterlüftung im allgemeinen erreicht, wenn infolge dichter Personenbelegung (weniger als etwa 15 m^2/Person) oder hoher Schadstoffemissionen (wenn z.B. bei einer spezifischen Bodenfläche von weniger als etwa 30 m^2/Person geraucht wird) ein mittlerer Aussenluftstrom während der Nutzungszeit von über etwa 1.7 $m^3/h\ m^2$ (entspricht einem mittleren Aussenluftwechsel von ca. 0.7 h^{-1} bei

einer lichten Raumhöhe von 2.50 m) benötigt wird. Einige Beispielrechnungen zu dieser Fragestellung finden sich in [4.22].

Bei aussenliegenden Einzelbüros und kleineren Gruppenbüros stellt häufig die Fensterlüftung die von den Benutzern am besten akzeptierte Lösung dar. Müssen sich allerdings zu viele Personen über das Öffnen der Fenster einigen, kann dies zu Konflikten führen.

4.2.2 Mechanische Abluftanlagen

Mechanische Abluftanlagen sind mit Ventilatoren betriebene Zwangsentlüftungen (mechanische Entlüftungen). Die Luft wird mit einem Ventilator aus dem Raum ins Freie geblasen, während gleichzeitig als Folge des erzeugten Unterdrucks durch zufällige oder bewusst angeordnete Öffnungen aus den benachbarten Räumen oder aus dem Freien Luft nachströmt. Wird dafür gesorgt, dass die Luft auf geeigneten Wegen nachströmen kann, so sind mechanische Abluftanlagen das einfachste Mittel zur Luftverbesserung.

Für diese Lüftungsanlagen ohne Luftbehandlung und ohne mechanische Aussenluftzufuhr gelten gemäss Abschnitt 4 der SIA V382/3 [4.19] die folgenden Grundsätze:

- Mechanische Abluftanlagen sollen so ausgelegt werden, dass für die angeschlossenen Räume der Abluftstrom benutzungsabhängig gesteuert werden kann.

- Bei der Dimensionierung zentraler Ventilatoren soll die Gleichzeitigkeit der Benützung berücksichtigt werden. Zur Anpassung des Betriebes an den jeweiligen Bedarf ist die Wahl mehrstufig oder stufenlos regulierbarer Antriebe zweckmässig.

- Bei Abluftströmen über etwa 2500 m^3/h aus beheizten Räumen ist eine kontrollierte Zuführung der Ersatzluft mit Wärmerückgewinnung anzustreben.

- Es dürfen keine baulichen Brandabschnitte ungeschützt miteinander verbunden werden.

4.2.3 Lüftungstechnische Anlagen mit Zu- und Abluft

Lüftungstechnische Anlagen enthalten im Sinne von SIA V382/1 ein Zuluft- und ein Abluftsystem. Je nach Luftbehandlung werden die vier Anlagetypen gemäss Tabelle 4.2 unterschieden.

Lüftungstechnische Anlagen	Zuluftbehandlung *			
	F	H	B	K
Lüftungsanlage	●	●		
Lüftungsanlage mit Befeuchtung	●	●	●	
Lüftungsanlage mit Kühlung	●	●		●
Klimaanlage	●	●	●	●

** F = Filtern*
H = Heizen
B = Befeuchten
K = Kühlen, Entfeuchten (geregelt oder mit Kühlung)

Tabelle 4.2
Bezeichnung der lüftungstechnischen Anlagen [4.17]

Eine Kühlung oder Befeuchtung der Raumluft soll nur vorgenommen werden, wenn dies erforderlich ist. Hinweise dazu finden sich in den Abschnitten 4.5 und 4.6.

4.2.4 Abführen von Wärme und Schadstoffen

Als wesentlicher Grundsatz für energieeffiziente lüftungstechnische Anlagen gilt, dass die Möglichkeiten zur Reduktion der im Raum anfallenden Wärme- und Schadstoffemissionen unbedingt auszuschöpfen sind (Quellenbekämpfung). Vermeidbare Emissionen sollen nicht durch einen erhöhten Luftstrom verdünnt und abgeführt werden müssen.

Massnahmen zur Reduktion der Wärmelasten im Raum:

- Sämtliche Fensterflächen von gekühlten Räumen sollen über einen wirksamen Sonnen-

schutz oder eine entsprechende Beschattungseinrichtung verfügen. Im allgemeinen soll ein Gesamtenergiedurchlassgrad für die Sonnenstrahlung durch die Verglasung inkl. Sonnenschutz von g = 0.15 oder kleiner erreicht werden. Richtwerte typischer Konstruktionen finden sich in Ziffer 7 3 2 der Empfehlung SIA V382/2 (siehe auch Abschnitt 4.5).

– Wahl von stromsparenden Maschinen und Apparaten sowie eines geeigneten Beleuchtungskonzepts. Betrieb nur bei Bedarf.

– Bei grösseren Einzelquellen ist eine Wasserkühlung oder eine direkte Abführung der Wärme in einem geschlossenen Luftsystem oder mit Absaughauben anzustreben, damit die Abwärme nicht im ganzen Raum spürbar wird. Eventuell ist auch ein Aufstellen von Geräten mit hoher Wärmeproduktion in Nebenräumen mit höheren zulässigen Raumlufttemperaturen möglich.

Massnahmen zur Reduktion der Schadstoffemissionen im Raum:

– Auf die Wahl emissionsarmer Baustoffe und Inneneinrichtungen achten. Informationen über die Emissionen der wichtigsten Baustoffe werden zur Zeit erarbeitet und durch den SIA veröffentlicht.

– Bei unvermeidbaren grösseren Einzelquellen ist eine direkte Abführung der Schadstoffe in einem geschlossenen Luftsystem oder mit Absaughauben anzustreben. Eventuell ist auch ein Aufstellen solcher Quellen in Nebenräumen zweckmässig.

– Bei Nutzungen mit unterschiedlichen Schadstoffemissionen (z.B. mit und ohne Raucher) ist eine bauliche Trennung anzustreben.

Wenn zur Abführung der vorhandenen Wärmelasten der hygienisch erforderliche Luftstrom erhöht werden sollte, empfiehlt sich aus energetischer Sicht die Anwendung von örtlichen Umluftkühlgeräten oder einer Strahlungskühlung mit Wasser als Wärmeträger.

Die Lage und Wirkungsweise der Zuluft- und Abluftöffnungen, die Art und Anordnung von Wärmequellen sowie die Temperaturen der Raumumschliessungsflächen bestimmen die Raumströmung und damit die Effizienz einer Lüftung im Raum. Aus energetischer Sicht sind Systeme zu wählen, welche ohne Erhöhung der hygienisch erforderlichen Aussenluftraten eine gute Lüftungseffizienz ergeben. Dies kann sowohl mit den klassischen Mischlüftungssystemen als auch mit den heute stark aufkommenden Quellüftungen erreicht werden. Zu vermeiden sind Kurzschlussströmungen, bei denen Zuluft in die Abluftöffnungen gelangt, ohne vorher die Aufenthaltszone gelüftet zu haben.

Bei der Quellüftung wird die Raumströmung beim Vorhandensein von Wärmequellen durch die Auftriebsströmungen dominiert. Ohne Wärmequellen im Raum ergibt sich mit der Quellüftung eine Verdrängungslüftung, indem die kühlere und damit schwerere Zuluft in Bodennähe sanft einströmt und die wärmere Raumluft nach oben zu den gut verteilten Abluftöffnungen drängt. Diese Verdrängungslüftung ist aber nicht zu verwechseln mit der aus der Verfahrens- und Medizintechnik bekannten turbulenzarmen Verdrängungslüftung, wo mit sehr grossen Luftraten immer eine kolbenartige Strömung durch genau definierte Raumbereiche erzwungen wird.

Ausgelöst durch norwegische und dänische Forschungsarbeiten [4.10] hat man in der Schweiz in den letzten Jahren grosse Anstrengungen unternommen, um die Strömungsvorgänge in belüfteten Räumen und die Wirkung neuartiger Systeme wie Quellüftungen und Kühldecken besser zu verstehen. Die Resultate dieses Forschungsprojektes «Energierelevante Luftströmungen in Gebäuden» werden für die Praxis in einer siebenbändigen Dokumentationsreihe publiziert (siehe Abschnitt 1.4.2, insbesondere ERL 7).

4.3 Wärmerückgewinnung

Grundsätze

- *Von wenigen Ausnahmen abgesehen sind Lüftungsanlagen immer mit einer Wärmerückgewinnung auszurüsten.*
- *Die Systemwahl richtet sich nach den objektspezifischen Randbedingungen. Es gibt kein herausragendes System.*
- *Die Wärmerückgewinnung in der Lüftungstechnik steht und fällt mit der sorgfältigen Dimensionierung, wobei der jährliche Netto-Energiegewinn massgebend ist. Dabei ist ein allfälliger Elektrizitätsbedarf mit einer Wertigkeit von etwa 3 gegenüber der thermischen Energie zu gewichten.*
- *Nach ökonomischen Gesichtspunkten gehören gut ausgelegte WRG-Anlagen selbst bei den heutigen (zu tiefen) Energiepreisen in den allermeisten Anwendungsfällen zu den rentablen Investitionen.*

Bei Wärmerückgewinnungsanlagen sind aus energetischer Sicht die folgenden Effekte zu beachten:

- Der Energiebedarf zur Erwärmung und evtl. Befeuchtung der Aussenluft wird reduziert.
- Der Energiebedarf für die Luftförderung wird infolge des Druckverlustes des WRG-Systems (evtl. inkl. zusätzlichem Abluftfilter) erhöht und evtl. ergibt sich ein zusätzlicher Energiebedarf für Hilfsbetriebe (z.B. für einen Wasser-Glykol-Zwischenkreislauf).

Wärmerückgewinnungsanlagen sparen Heizenergie und führen zusätzlich bei geeigneter Dimensionierung auch zu einer günstigeren Bemessung weiterer Anlagekomponenten, indem die WRG-Systeme ihre grössten Leistungen bei den Extrembedingungen (grösste Temperatur- resp. Enthalpiedifferenz) abgeben und damit Spitzen brechen.

Um Wärmerückgewinnungsanlagen richtig zu planen, muss man nicht nur die Wirkungsgrade der Komponenten im idealen Betriebspunkt kennen, sondern ihr Verhalten unter verschiedenen Betriebsbedingungen verstehen. Da Wärmerückgewinnungsanlagen auch Energie benötigen, interessiert letztlich der Nettoertrag. Wärmerückgewinnungsanlagen sollen darum nicht für die tiefste (oder höchste) Aussentemperatur ausgelegt werden, für welche die Lüftungsanlage noch genügen muss, sondern für den besten Jahresnutzungsgrad.

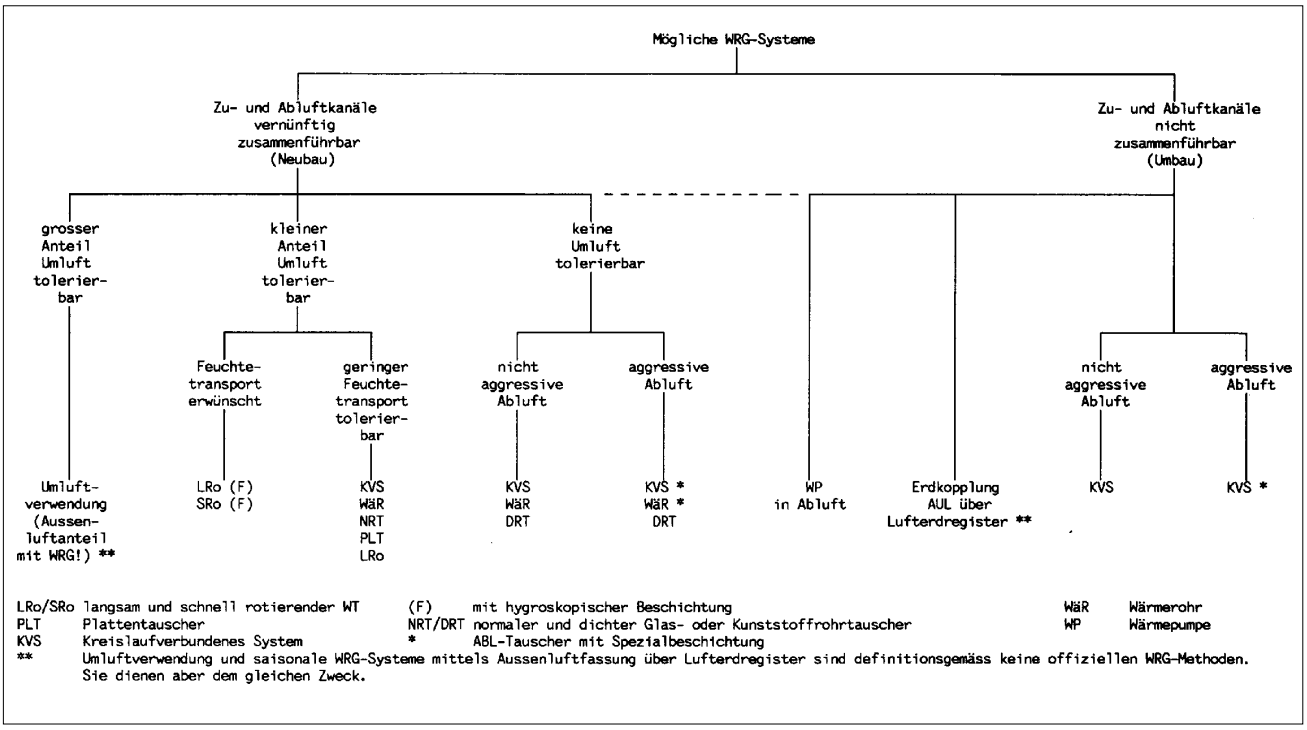
Man unterscheidet zwischen einem maximal möglichen und einem optimalen Energierückgewinn. In einer Lüftungsanlage mit hohem Fremdwärmeanfall wird die optimale Wärmerückgewinnungs-Einrichtung anders aussehen als in einer anderen, wo nur wenig Fremdwärme vorhanden ist.

Bei der Auslegung müssen aber auch viele nichttechnische Voraussetzungen berücksichtigt werden. Dazu gehören die in Rechnung zu setzenden Preise für fossile Brennstoffe und Strom, die entsprechenden Teuerungsraten, der momentane und der künftige Kapitalzins, die Amortisationsdauer und die generelle Zielsetzung der Sparbemühung. Die optimale Wärmerückgewinnungsanlage wird also nicht nur aufgrund von technischen Daten, sondern auch unter Berücksichtigung von vielen wirtschaftlichen und umweltpolitischen Annahmen gefunden.

Voraussetzung für die Planung der WRG-Anlage und der ganzen lüftungstechnischen Anlage muss eine vorangegangene Bedarfsminimierung sein. Weiter sind eine vernünftige Aufteilung der Anlagen und geeignete Regel- und Steuermöglichkeiten wichtige Voraussetzungen für eine sparsame und bedarfsgerechte Betriebsweise.

Für die Vorstudien kann sich der Planer auf verschiedene neuere Publikationen abstützen. Nützliche Grundlagen vermittelt das Heft «Wärmerückgewinnung in Lüftungs- und Klimaanlagen» aus dem Impulsprogramm Haustechnik 1987 [4.8]. Die SWKI-Richtlinie 89-1 gehört ebenso zum Grundlagenwissen des Planers [4.21].

Eine erste Übersicht über die je nach Situation möglichen WRG-Systeme gibt Figur 4.2.

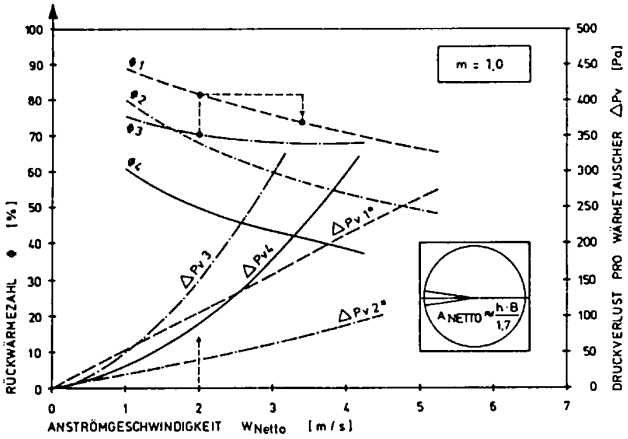


Figur 4.2
Entscheidungsbaum als erste Eingrenzung der Lösungsmöglichkeiten [4.8 ergänzt]

Aufgrund der örtlichen und der anwendungstechnischen Randbedingungen sollten die in Frage kommenden Systeme anhand von Auswahlgraphiken der Hersteller dimensioniert und optimiert werden.

Leider ist es bis heute aber so, dass sich nur die Kreislaufverbundsysteme rechnerisch zuverlässig optimieren lassen. Für die anderen Systeme (insbesondere für die regenerativen Rotoren) fehlen die Grundlagen dazu noch weitgehend resp. werden zur Zeit noch erarbeitet.

In Figur 4.3 wird dargestellt, dass die Rückwärmzahlen und die Druckverluste verschiedener WRG-Komponenten unter gleichen Anströmverhältnissen verglichen werden müssen.



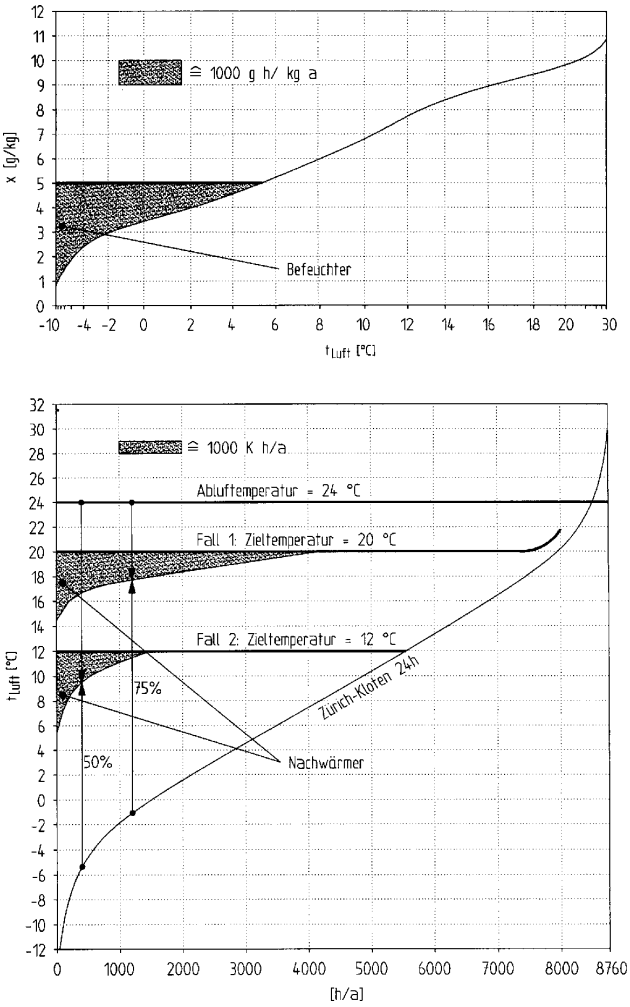
1 Rotationstauscher ET12, RT10, PT10
2 Rotationstauscher ET7, PT5
3 Glykoltauscher 10RR / 2.5 mm, A (netto) = h•B
4 Wärmerohr 6RR / 3.2 mm, gerade
** Prospektangabe unwahrscheinlich*

Figur 4.3
Beispiel für einen Leistungsvergleich [4.8]

In der Praxis setzen oft die Platzverhältnisse klare Grenzen. Die realen räumlichen Einschränkungen führen dazu, dass der Vergleich relativiert werden muss. Soll beispielsweise die Kreislaufvariante mit der Rotorvariante verglichen werden, so muss zuerst gefragt werden, bei welchen Anströmgeschwindigkeiten der Betrieb erfolgt. In einem Lüftungsgerät liegt die Anströmgeschwindigkeit für den Rotor ca. 1,5- bis 1,7mal höher als bei einem Glykolwärmetauscher, wo der zur Verfügung stehende Platz besser ausgenutzt wird. Diese Geschwindigkeitserhöhung bewirkt eine platzbedingte Minderleistung des Rotors um 5 bis 10%. Solche, im Routine-Planungsbetrieb nicht sofort erkennbaren Zusammenhänge, lassen es dringend ratsam erscheinen, jeweils konkrete Varianten offerieren zu lassen.

Bei kleinen Anlagen bietet sich aus wirtschaftlichen Gründen praktisch nur der Plattenwärmetauscher an. Aber auch über diese Komponente fehlen bis heute zufriedenstellende Planungsunterlagen. Vor allem müsste über Einfriervorgänge und die entsprechenden Gegenmassnahmen durch die Hersteller noch Genaueres publiziert werden [4.2].

Im praktischen Planungsbetrieb geht der HLK-Ingenieur in der Regel schrittweise vor. Als hilfreiches Instrument erweist sich für die ersten Systemstudien die Temperatur-Summenhäufigkeitskurve des vorgesehenen Einsatzortes (siehe Figur 4.4). Wenn Be- und Entfeuchtungsvorgänge mitspielen, eignet sich zusätzlich die Summenhäufigkeitskurve für die absolute Feuchte, die aus dem wahrscheinlichen Zusammenhang zwischen Temperatur und Feuchte hervorgeht. Im Gegensatz zur Anwendung der Enthalpie-Summenhäufigkeitskurve können damit die Vorgänge bei Temperatur- und bei Feuchte-Zustandsänderungen getrennt dargestellt und beurteilt werden. Angaben zu den Meteodaten für verschiedene Orte in der Schweiz finden sich in [4.14].



Figur 4.4
Beispiel für die Auslegung eines WRG-Systems mit Temperatur- und Feuchtesummenhäufigkeitskurven

Im Fall 2 des Beispiels von Figur 4.4 (Zieltemperatur 12 °C) genügt eine WRG mit 50% genausogut (oder sogar leicht besser) als eine WRG mit 75% im Fall 1, wo die Luft auf eine Zieltemperatur von 20 °C erwärmt werden muss.

Die Wirkungsgrade der Komponenten können in diesem Stadium mit genügender Genauigkeit als Schätzungen eingesetzt werden. Nicht selten führt diese Projektierungsarbeit zu einer Überarbeitung des Gesamtsystems und damit zur Verbesserung der Randbedingungen für die WRG – unter Umständen mit Auswirkungen bis hin zum architektonischen Entwurf.

Ein Vorteil dieser Planungstechnik liegt darin, dass sie einen graphischen Vergleich der resultierenden Gradstunden pro Jahr für verschiedene Lösungsmöglichkeiten zulässt. Multipliziert mit dem Massenstrom und der mittleren spezifischen Wärmekapazität, lässt sich aus der Temperaturgraphik die Jahreswärmearbeit ermitteln. Wenn Be- und Entfeuchtung auch eine Rolle spielen, wird zusätzlich die entsprechende Summenhäufigkeitskurve für die absolute Feuchte verwendet, wobei dann Grammstunden pro Jahr das Flächenäquivalent darstellen.

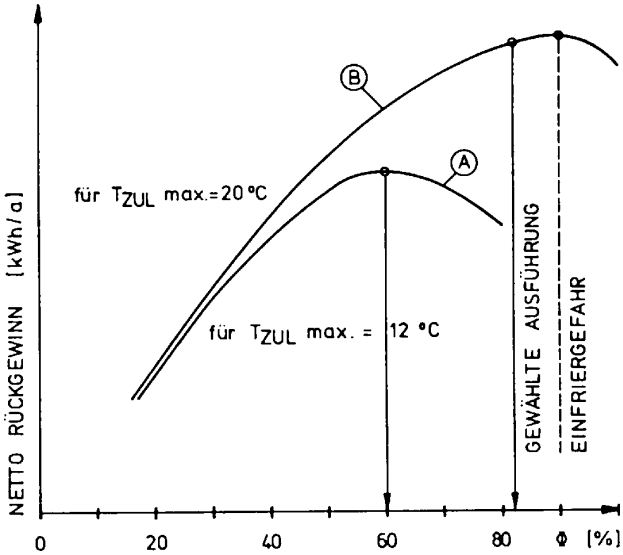
Wenn diese Studien vorliegen, wird es sinnvoll, mit den Lieferanten der einzelnen Komponenten Kontakt aufzunehmen. Je nachdem, über welche Kenntnisse und technische Möglichkeiten diese verfügen, können sie mit einer mehr oder weniger vertrauenswürdigen Optimierung aufwarten. Spätestens jetzt muss der Planer deutlich machen, dass im zweiten Planungsschritt, der Ausführungsplanung, nur Komponenten in Betracht gezogen werden, deren Hersteller in der Lage sind, ganz bestimmte Fragen zu beantworten:

- Dazu gehört bei mittleren und grösseren Anlagen eine detaillierte, nachvollziehbare Optimierung innerhalb der möglichen Ausführungsvarianten nach wählbaren Optimierungskriterien. In diesen Bereich fallen beispielsweise geometrische Variationen von Lamellen, Plattenformen, Wellungen, hydraulische Schaltungen der Medienwege, Widerstände, Hilfsenergieverbrauch, Amortisationen, usw.

- Dazu gehören Angaben über den Korrosionsschutz und die zu erwartende Lebensdauer mit der entsprechenden Beeinflussung der Leistung und der Anschaffungskosten.

- Dazu gehören Angaben über den Energiebedarf und die Umweltbelastung bei der Herstellung und der Entsorgung der Komponenten.

Die Figur 4.5 zeigt den Verlauf des Netto-Energierückgewinns in Abhängigkeit der Rückwärmzahl für zwei verschiedene Grenztemperaturen. Bei der Anlage A kann die Wärme nur bis zu einer Temperatur von 12 °C ausgenützt werden, weil z.B. der behandelten Aussenluft noch Umluft beigemischt wird. Dies bedeutet, dass die WRG-Anlage nur bei Aussenlufttemperaturen unter ca. 11 °C in Betrieb ist. Die optimale Rückwärmzahl beträgt darum ϕ = 60%. Bei der Anlage B jedoch kann die Wärme bis zu einer Temperatur von 20 °C ausgenutzt werden. Dies ergibt eine optimale Rückwärmzahl von ϕ = 82%, die dadurch begrenzt ist, dass die Fortluft wegen der Vereisungsgefahr nicht weiter abgekühlt werden darf.



Figur 4.5
Abhängigkeit der optimalen Ausführung von den Einsatzgebieten [4.8]

Eine WRG-Anlage sollte deshalb nie nur mit einer Leistung oder einem Wirkungsgrad bei nur einem Betriebspunkt, sondern durch den jährlichen Netto-Energierückgewinn definiert werden. Bei Ausschreibungen ist dem Rechnung zu tragen (siehe [4.21]).

4.4 Wohnungslüftung

Grundsätze

- *Die Wohnungslüftung erfolgt in der Schweiz traditionsgemäss durch mehr oder weniger sinnvolles Fensterlüften und durch bauliche Undichtigkeiten. Eine Wärmerückgewinnung ist bei dieser Lüftungsart nicht möglich.*

- *In Ländern mit langen Heizperioden erfolgt die Grundlüftung der Wohnungen meist durch einfache mechanische Anlagen mit WRG.*

- *Wenn man in der Schweiz aufgrund besonderer Randbedingungen (Lärm, Schmutz, Sicherheit, niedriger Gesamtenergiebedarf) den Einsatz mechanischer Wohnungslüftungen prüft, so muss die Hilfsenergie Strom entsprechend ihrem Stellenwert berücksichtigt werden (siehe Kasten am Ende des Kapitels).*

- *Nach rein ökonomischen Gesichtspunkten gehören mechanische Wohnungslüftungen bei den heutigen Energiepreisen eher zu den weniger rentablen Investitionen. Sie können jedoch bei geeigneter Dimensionierung einen Beitrag leisten zur Reduktion des Energieverbrauchs von Gebäuden.*

Die Vermeidung von Wärmebrücken und sonstwie ungenügender Aussendämmung führt nicht nur zu einer Reduktion des Energieverbrauchs und der Umweltbelastung, sondern steigert auch den Wohnkomfort in verschiedener Hinsicht:

- Höhere Temperaturen der inneren Oberflächen erlauben behagliche Bedingungen bei tieferen Raumlufttemperaturen.

- Dank kleinerer Wärmeleistungen der Heizkörper ergeben sich weniger Luft- und Feinstaubaufwirbelungen.

- Tiefere Raumlufttemperaturen und geringere Feinstaubbelastungen lassen wesentlich tiefere Raumluftfeuchtigkeiten als komfortabel genug erscheinen.

- Tiefere Heizkörpertemperaturen erlauben die Verwendung von Wärmeerzeugern mit tieferem Temperaturniveau und damit die Nutzung von Umwelt- und Abwärme mit Wärmepumpen.

Wenn das Fenster mit seinem Rahmen noch so gestaltet ist, dass es zusammen mit flexiblen Isolations- und Beschattungsmöglichkeiten optimiert wird, so werden auch hier mit den Energiesparmassnahmen Komfortverbesserungen und technische Vereinfachungen erzielt:

- Das energetisch gute Fenster gewinnt während der Heizperiode Sonnenwärme im erwünschten Mass und vermeidet zu hohe Einstrahlungen im Sommer.

- Das gut dämmende und dichte Fenster lässt es zu, dass die Heizkörper nicht nur in ihrer Grösse reduziert werden, sondern dass sie auch nicht mehr über die ganze Fassade verteilt unter jedem Fenster aufgestellt werden müssen.

Unter diesen Voraussetzungen kann sogar die Bodenheizung wieder ein durchaus vernünftiges Heizsystem werden, weil die Bodentemperatur nur 1–2 K über der Raumlufttemperatur liegen muss. Bei begrenzter Vorlauftemperatur würde sich zudem ein Wärmeaustausch von Räumen mit höherem Wärmeanfall zu Räumen mit kühleren Bedingungen ergeben.

Wie die notwendige Aussenluft möglichst bedarfsangepasst in das Gebäudeinnere und von da unter Mitnahme möglichst sämtlicher Emissionen wieder ins Freie gelangt, hängt von etlichen Randbedingungen ab. Bei der Wohnungslüftung muss zwischen den verschiedenen Haustypen und zwischen Miet- und Eigentümerverhältnissen unterschieden werden. Ein weiterer, nicht zu unterschätzender Parameter ist die Frage, ob eine Wohneinheit mehr oder weniger ständig bewohnt und beaufsichtigt ist, oder ob alle Nutzer berufsbedingt tagsüber länger abwesend sind.

Der im Einfamilienhausbau engagierte Architekt kombiniert die notwendige Aussenluftversorgung oft mit passiver Solarnutzung, indem die Luft über strahlungserwärmte Aussenhautelemente angesaugt und vorgewärmt wird. Meistens sind die zur Verfügung stehenden «Kollektorflächen» und der Platz für grosszügig dimensionierte Luftwege gross genug, um ohne elektrisch angetriebene Ventilatoren auszukommen. Die grössere Bauhöhe und die internen Verbindungen über mehrere Stockwerke gestatten es, natürliche Auftriebskräf-

te auszunutzen. Die damit verbundenen Bemühungen sind aber durchaus angebracht, da der freistehende Einfamilienhaustyp im Vergleich zu verdichteteren Bauformen ohnehin energetisch ungünstiger ist. Ventilatoren irgendwelcher Art sollten nur dann zur Anwendung gelangen, wenn ein guter thermoelektrischer Verstärkungsfaktor nachgewiesen wird (siehe Kasten am Schluss dieses Abschnitts).

Im Mehrfamilienhaus zwingen die engeren Platzverhältnisse und die wesentlich intensivere Belegungsdichte meistens zu mechanisch unterstützten Lüftungssystemen. Hier muss sich der Planer entweder für eine mehr oder weniger dezentrale oder aber für eine zentrale Lösung entscheiden. Selbstverständlich soll auch hier mit minimierten Zuluftraten gearbeitet werden. Die Abluftfassung konzentriert sich auf die Räume mit höherem Luftwechselbedarf, nämlich auf Küche, Bad und WC.

Abgesehen vom höheren Aufwand für die Planung und für die Bauführung, haben vernünftig zentralisierte Lüftungssysteme im Vergleich zu dezentralen Lösungen ganz erhebliche Vorteile:

- Die Aussenluftfassung und die Fortluftöffnungen sind lufthygienisch besser kontrollierbar.
- Saisonal- und Tag/Nacht-bedingte Zyklen lassen sich zur Wärmerückgewinnung nutzen (z.B. Erdkoppelung).
- Grössere WRG-Systeme sind effizienter als kleine Einzelsysteme.
- Grössere Ventilatoren und Antriebe haben deutlich bessere Wirkungsgrade als Kleinventilatoren.
- Die etwas höheren Druckverluste für die Luftführung haben den Vorteil, dass die Luftverteilung von äusseren Einflüssen wie Wind und Auftriebskräften nur wenig gestört werden kann.
- Der Filtrierung der Luft kann grössere Beachtung geschenkt werden.
- Aufwand und Ertrag von zentralen Systemen können einfacher messtechnisch erfasst und beurteilt werden.

In Bezug auf den ökonomisch/ökologischen Sinngehalt sollte ein Wohnungslüftungssystem pro jährlich einsparbare Megawattstunde nicht mehr als etwa 450 Franken kosten (Erfahrungszahl der Energiefachstelle des Kantons Zürich, Stand 1992).

In Bezug auf die rationelle Anwendung von elektrischer Energie muss das geplante System auf jeden Fall auf seinen elektrothermischen Verstärkungsfaktor hin überprüft und notfalls korrigiert werden!

Der Begriff des Elektro-Thermo-Verstärkers wurde in [4.4] eingeführt und definiert. Er bezeichnet das Verhältnis der erzeugten Wärme oder der entsprechenden Einsparung an fossiler Energie zur eingesetzten Elektrizität. Typische Werte für Elektro-Thermo-Verstärkungen sind:

ETV = ca. 3	*für Elektromotor-Wärmepumpen*
ETV = ca. 7–25	*für Wärmerückgewinnung oder Abwärmenutzung mit als Hilfsenergie eingesetzter Elektrizität*
ETV = ca. 5–10	*für moderne Ersatzluftanlagen im Vergleich zu konventionellen Anlagen*
ETV = ca. 7.5–15	*für Elektro-Leichtfahrzeuge im Vergleich zu konventionellen Autos mit Benzinmotor*

Um der hohen Wertigkeit der elektrischen Energie und den Risiken bei deren Bereitstellung Rechnung zu tragen, sollte der mittlere ETV rationeller Systeme über 3 liegen.

4.5 Notwendigkeit einer Kühlung der Raumluft

Grundsätze

- *Die Kriterien zur Beurteilung der Notwendigkeit einer Kühlung der Raumluft finden sich in Ziffer 5.2 der SIA V 382/3 [4.19]. Zusätzlich sind auch die Vorschriften der Behörden zu beachten.*

- *Grundvoraussetzung zur Erbringung des Bedarfsnachweises für eine Kühlung der Raumluft ist die Einhaltung minimaler baulicher Anforderungen. Dies gilt insbesondere für einen wirksamen äusseren Sonnenschutz und eine genügende Wärmespeicherfähigkeit der Baukonstruktion.*

- *Der Bedarf für eine Kühlung der Raumluft ist gegeben, wenn eines der folgenden Kriterien erfüllt ist:*
  - *Spezialfall mit besonderen Anforderungen an das Raumklima*
  - *Hohe interne Lasten*
  - *Maximale sommerliche Raumlufttemperatur ohne Kühlung zu hoch (vergleiche Abschnitt 3.1.3.1)*
  - *Energetisch sehr gute Anlage auch mit Kühlung. Vor allem bei Anwendung der neuen Technologien mit Strahlungskühlung und mit Gebäudemassenkühlung kann eine Kühlung häufig ohne erhöhten Gesamtenergieverbrauch realisiert werden.*

- *Der Energiebedarf für eine mechanische Kühlung kann reduziert werden oder ganz entfallen bei Anwendung der folgenden Techniken:*
  - *Nachtlüftung (Abschnitt 4.7)*
  - *Betonkernkühlung (Abschnitt 4.8)*
  - *Kühldecken (4.9)*
  - *Lufterdregister (Abschnitt 4.10)*
  - *Erdsonden (Abschnitt 4.11)*

4.6 Notwendigkeit einer Befeuchtung der Raumluft

Grundsätze

- *Die Kriterien zur Beurteilung der Notwendigkeit einer Befeuchtung der Raumluft finden sich in Ziffer 5.3 der SIA V 382/3 [4.19]. Zusätzlich sind auch die Vorschriften der Behörden zu beachten.*

- *Der Bedarfsnachweis für eine Befeuchtung der Raumluft ist gegeben, wenn eines der folgenden Kriterien erfüllt ist:*
  - *Spezialfall mit besonderen Anforderungen an das Raumklima*
  - *Minimale Feuchte der Raumluft ohne Befeuchtung zu tief (vergleiche Abschnitt 3.1.3.3).*

- *In Büro- und Wohnbauten ist im allgemeinen keine Befeuchtung der Raumluft erforderlich. Klagen wegen zu trockener Luft sind häufig auf zu hohe Raumlufttemperaturen, zu hohe Aussenluftraten, einen zu hohen Staubgehalt der Luft oder auf andere Luftfremdstoffe zurückzuführen.*

4.7 Nachtlüftung

Grundsätze

- *Im Sommer kann mit Hilfe einer geeigneten Nachtlüftung die Wärmespeicherfähigkeit der Raumumschliessungsflächen und des Mobiliars aktiviert werden, womit eine spürbare Reduktion der maximalen sommerlichen Raumlufttemperaturen möglich ist.*

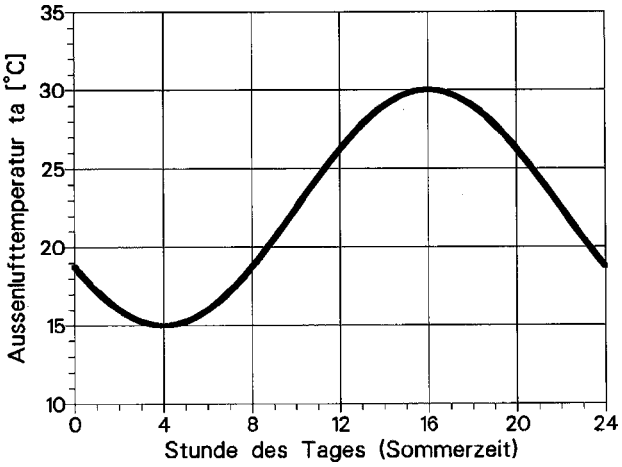
- *Für eine wirksame Nachtlüftung müssen die Raumumschliessungsflächen eine genügende Wärmespeicherfähigkeit aufweisen und während der Nachtstunden muss mit der Fensterlüftung oder einer lüftungstechnischen Anlage ein Aussenluftwechsel von mindestens etwa 3 h^{-1} erreicht werden.*

- *Im Falle einer mechanischen Lüftung ist bei der Beurteilung der Zweckmässigkeit einer Nachtlüftung der erhöhte Energiebedarf für die Luftförderung zu berücksichtigen.*

Leistungsfähige Lüftungsanlagen mit Kühlung oder Klimaanlagen wurden bis vor kurzem mehr oder weniger bedenkenlos eingebaut. Heute versucht man auf intelligentere und sanftere Art dafür zu sorgen, dass unkomfortabel hohe Raumlufttemperaturen auch ohne eine mechanische Kühlung vermieden werden können. Eine davon ist die Nachtlüftung.

Wer an warmen Sommertagen das Glück hat, seine Fenster nachtsüber offenstehen lassen zu können, kennt den hohen Nutzen der kühlenden Nachtluft. Die Gebäudemasse im Rauminnern und das Mobiliar geben ihre tagsüber gespeicherte Wärme an die Nachtluft ab. Am Morgen startet der Nutzer mit einer abgekühlten Speichermasse, die tagsüber wieder Wärme aufnehmen kann, ohne dass die Raumlufttemperatur zu hohe Werte annehmen muss.

Die Figur 4.6 zeigt einen typischen Tagesgang der Aussenlufttemperatur an einem warmen Sommertag mit einer Maximaltemperatur von 30 °C und einer Amplitude von 7.5 K [4.18]. Das Maximum der Aussenlufttemperatur tritt etwa um 16 Uhr, das Minimum um 4 Uhr auf (Sommerzeit).



Figur 4.6
Tagesgang der Aussenlufttemperatur an einem warmen Sommertag [4.18]

Für eine wirksame Nachtlüftung müssen die folgenden Bedingungen erfüllt sein:

- Die Aussenluft muss mindestens um etwa 2 K kühler sein als die Raumluft. Gemäss Figur 4.6 sind gute Voraussetzungen für eine wirksame Nachtlüftung meist in der Zeit von etwa 23 Uhr bis Arbeitsbeginn gegeben.
- Die Bauweise muss mindestens mittelschwer sein mit einer speicherwirksamen Masse pro Raum von $m > 350$ kg/m^2 gemäss SIA V382/2 Ziffer 5.2. Besonders günstig sind Sichtbetondecken und massive Wände, ungünstig sind thermische oder akustische Verkleidungen auf der Innenseite der Bauteile.
- Die kühle Nachtluft muss möglichst direkt entlang der speichernden Bauteile strömen. Für eine wirksame Nachtlüftung ist während dieser begrenzten Zeit ein Aussenluftwechsel von mindestens etwa 3 h^{-1} erforderlich. Die Nachtlüftung kann mit einer Fensterlüftung (Querlüftung) oder mit einer lüftungstechnischen Anlage realisiert werden. Bei der Fensterlüftung sind die Aspekte Sicherheit, Wetterschutz, Lärm- und Schmutzbelastung zu berücksichtigen. Im Falle einer mechanischen Lüftung ist der Energiebedarf für die Luftförderung in Rechnung zu setzen. Zu dessen Reduktion ist im Nachtlüftungsbetrieb eine Umgehung der Luftaufbereitungskomponenten empfehlenswert. Eventuell ist auch der Betrieb des Abluftsystems allein zweckmässig. Auch hier ist der elektrothermische Verstärkungsfaktor (Abschnitt 4.4) ein brauchbares Beurteilungsinstrument.

4.8 Betonkernkühlung

Grundsätze

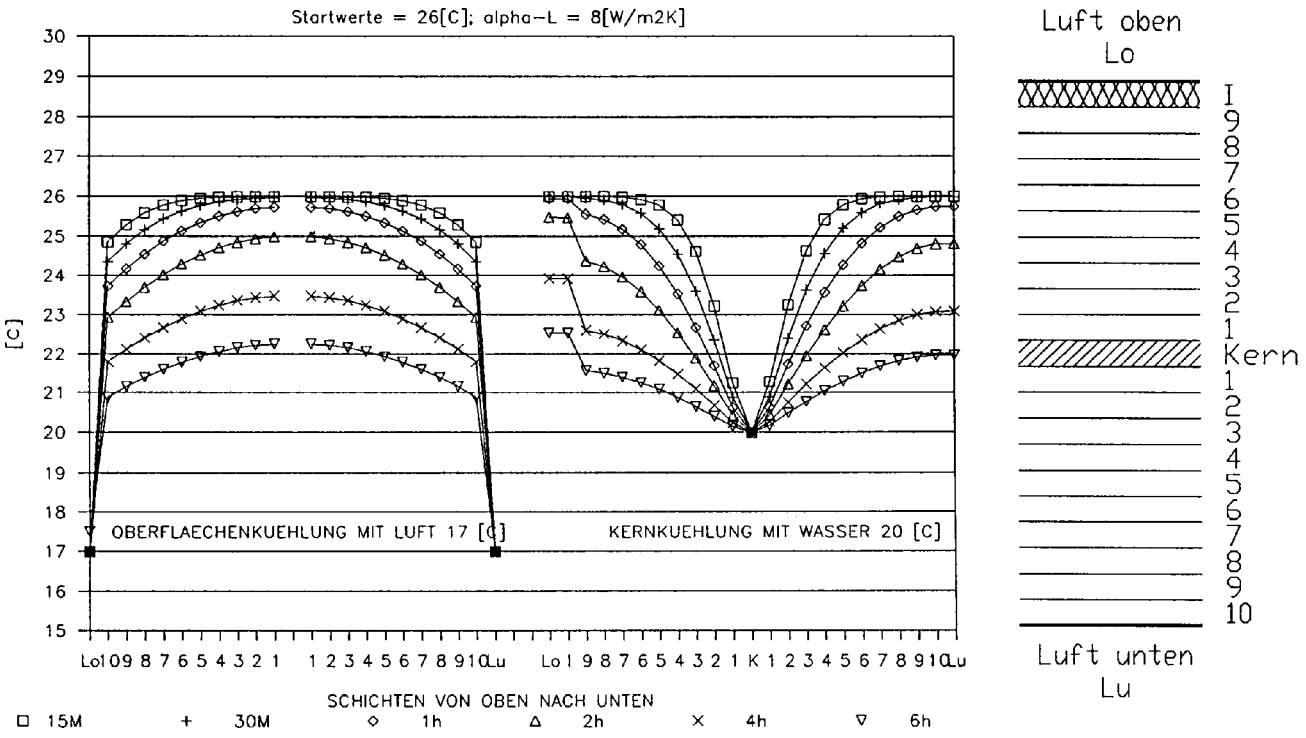
- *Eine gegenüber der Nachtlüftung (Abschnitt 4.7) noch wesentlich bessere Aktivierung der Wärmespeicherfähigkeit ist möglich mit der Kernkühlung von Sichtbetondecken mit wasserdurchströmten einbetonierten Rohren. Diese Lösung hat zwei entscheidende Vorteile:*
  - *Der Wärmetransport erfolgt mittels Wasser und ist damit wesentlich effizienter als mit Luft.*
  - *Der Abtransport der Wärme erfolgt nicht am Tag, denn dann wird gespeichert, sondern nachts, wenn kühle Nachtluft für Freecoolingbetrieb zur Verfügung steht.*

- *Im Gegensatz zu den stark in Mode gekommenen direkten Strahlungskühldecken (Abschnitt 4.9), verbietet die phasenverschobene Betonkernkühlung sorgloses Nutzerverhalten, weil tagsüber keine Kältemaschine zur Verfügung steht, die jede Last abführt.*

Bei Neubauten und bei Umbauten mit neuen Betondecken kann mit der Betonkernkühlung die grosse Wärmespeicherfähigkeit des Betons noch wesentlich besser aktiviert werden als mit der Nachtlüftung von Abschnitt 4.7.

Bei der Betonkernkühlung wird über einbetonierte Kühlrohre die tagsüber eingespeicherte Wärme aus dem Beton abtransportiert. Als Transportmedium wird Wasser verwendet, was zu einem wesentlich effizienteren Wärmetransport als mit Luft führt und zudem auch eine höhere Leistungsfähigkeit ermöglicht. Die vom Wasser aufgenommene Wärme kann beispielsweise über ventilatorgetriebene Luftkühler an die Nachtluft abgegeben werden. Oft reicht auch das Temperaturniveau des Untergrundes, um das zirkulierende Wasser auf die gewünschte Temperatur von ca. 19 °C abzukühlen. In diesem Fall wird der thermoelektrische Verstärkungsfaktor noch günstiger ausfallen als mit Luftkühlern.

Die Figur 4.7 zeigt den Vergleich einer eindimensionalen dynamischen Simulation für die Kühlung einer Betondecke mit Luft an den Oberflächen und mit Wasserrohren im Kern. Unter der Annahme, dass das Kühlmedium Luft mit 17 °C und das Wasser aufgrund der Verluste im Wärmetauscher mit 19 °C zur Verfügung stehen, wird die Überlegenheit der Betonkernkühlung gegenüber einer konventionellen Nachtlüftung deutlich sichtbar.



Figur 4.7
Vergleich der Kühlung einer Betondecke mit Luft an den Oberflächen und mit Wasserrohren im Kern für verschiedene Zeitschritte [4.11] (M = Minuten, h = Stunden)

4.9 Kühldecken

Grundsätze

- *Kühldecken bestehen aus Wasser- oder luftdurchströmten Elementen, welche unter der Decke angeordnet werden. Sie sind in ihrer Erscheinung sanfte aber wirksame Mittel zur Raumkühlung.*
- *Bei der Auslegung der Kühldecken ist darauf zu achten, dass eine Schwitzwasserbildung vermieden wird.*
- *Die komfortablen und leistungsstarken Kühldecken verleiten zu höheren Komfortansprüchen und zu sorgloserem Nutzerverhalten. Die Begrenzung der Kühlleistung auf das tatsächlich erforderliche Mass ist darum eine wichtige Massnahme zur Vermeidung eines unnötigen Energieverbrauchs.*

Vor zehn oder fünfzehn Jahren kam die gelochte Lüftungsdecke vor allem aus hygienischen Gründen aus der Mode. Sie wurde ersetzt durch Systeme, bei denen die Zuluft in Kanälen oder Rohren zu den Zuluft-Durchlässen geführt wurde. Kaum jemandem fiel es auf, dass dadurch auch eine wirksame Kühlfläche an der Decke verloren ging. Die Zuluft wurde nämlich mit 16 °C durch das Deckenplenum geblasen, so dass die Decke ganz nebenbei als Strahlungsfläche ihren guten Dienst versah.

Nachdem man diese «Kühldecke» einige Jahre vergessen hatte, wurde sie in einer anderen Form neu entdeckt. Anstelle der Luftkühlung erhielt sie vor allem für höhere Lasten eine wesentlich effizientere Wasserkühlung. Ein weiterer, vielleicht noch grösserer «Vorteil» liegt darin, dass das mühsame Berechnen der meist schachbrettartig angeordneten Perforationen entfällt. Im Gegenteil, die heutigen Hersteller von Kühldecken greifen den begeisterten Planern mit Rat und Tat unter die Arme!

Es ist natürlich richtig, dass die Wärme mit einer wassergekühlten Strahlungsdecke wesentlich günstiger aus einem Raum abtransportiert werden kann als mit einem reinen Luftsystem.

Dabei wird aber häufig nicht beachtet, dass die sehr komfortable und leistungsstarke Kühldecke unbemerkt zu höheren Komfortansprüchen und zu sorglosem Nutzerverhalten verleitet. Zu spät gezogene Sonnenschutzlamellen führen nicht mehr unverzüglich zu Diskomfort!

Zu beachten ist, dass die direkt gekühlten Strahlungsdecken ihr Kühlmedium immer dann benötigen, wenn es am wärmsten ist und wenn die Kälteerzeugung spezifisch am meisten Strom braucht.

Zur Bewältigung von schwierigen Kühlaufgaben sind die modernen, wassergekühlten Decken sehr willkommen. Allerdings muss darauf geachtet werden, dass diese bedarfsgerecht dimensioniert werden und dass der darüberliegende Beton ungehindert am dynamischen Spiel der Speicherpufferung teilnehmen kann.

4.10 Lufterdregister

Grundsätze

- *Mit Lufterdregistern wird die Aussenluft über ein erdverlegtes Rohrsystem angesaugt. Dadurch wird die Aussenluft im Winter erwärmt, im Sommer gekühlt.*
- *Das energetische Potential der Lufterdregister ist sehr hoch, weil der Zusatz-Aufwand an Hilfsenergie (Strom) relativ klein ist.*
- *Um eine Beeinträchtigung der hygienischen Qualität der Zuluft zu vermeiden, müssen Kondensationsreservoire im Lufterdregister vermieden und gute Kontroll- und Reinigungsmöglichkeiten sichergestellt werden.*

In Ersatzluftanlagen mit Lufterdregistern wird die Aussenluft über Rohre angesaugt, die im Erdreich, z.B. unterhalb der Bodenplatte verlegt sind. Die Aussenluft wird dabei im Sommer gekühlt und im Winter erwärmt. Die Erdreichtemperatur um die Rohre und damit die Leistung des Lufterdregisters wird sehr stark von der Bodenbeschaffenheit (Wassergehalt) und von der Temperatur des darüberliegenden Raumes (unbeheizte Keller oder Garagen) beeinflusst. Lufterdregister eignen sich sehr gut, um die im Sommer und Winter kurzfristig auftretenden Spitzenleistungen zu reduzieren.

In Figur 4.8 ist ein Beispiel eines Lufterdregisters mit 43 im Grundwasser verlegten Rohren in der Bauphase dargestellt. Die 23 m langen Kunststoffrohre mit einem Rohrinnendurchmesser von 23 cm sind mit einem Abstand von 1.15 m quer zum Gebäude 0.8 m unterhalb der Bodenplatte im Gefälle verlegt.

Mit diesem Lufterdregister sind folgende Leistungen erreicht worden (Messwerte):

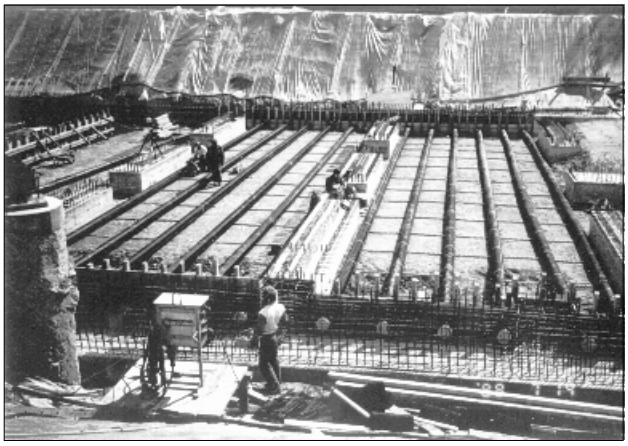
- Sommer (Aussenlufttemperatur = 32 °C):
  Austrittstemperatur Lufterdregister = 22 °C
  Kühlleistung = 55 kW (17 150 m^3/h)
- Winter (Aussenlufttemperatur = -11 °C):
  Austrittstemperatur Lufterdregister = 6 °C
  Wärmeleistung = 65 kW (12 000 m^3/h)

In Gebäuden mit Ersatzluftanlagen ist der Einsatz eines Lufterdregisters dann wirtschaftlich, wenn in Kombination mit einer Nachtlüftung auf eine mechanische Kälteanlage verzichtet werden kann. Mit geringem technischen Aufwand können energiesparende Gebäude mit hohem Nutzungskomfort erstellt werden, wie z.B.:

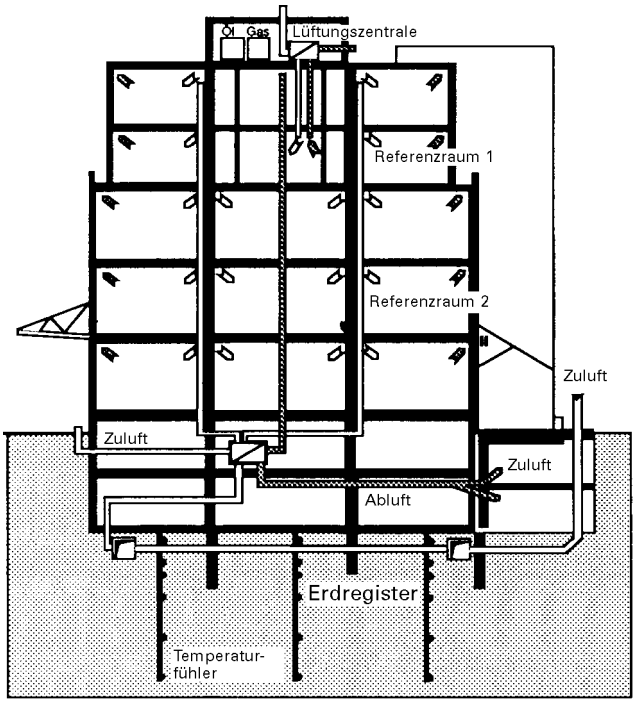
- Bürogebäude
- Industrie- und Gewerbebauten
- Schulen
- Ein- und Mehrfamilienhäuser.

Das Lufterdregister wird im Sommer und Winter betrieben. In der Übergangszeit mit Aussenlufttemperaturen zwischen etwa 6 und 21 °C ist das Lufterdregister nicht in Betrieb, da die Wärmerückgewinnung ausreicht, um die notwendigen Zulufttemperaturen zu gewährleisten. Im Sommer wird das Lufterdregister erst in Betrieb genommen, wenn die Raumlufttemperatur eine gewisse Grenze (z.B. 24 °C) überschreitet.

Im Winter erfolgt die Regelung der Zulufttemperatur in Kaskade von Wärmerückgewinnung, Zuschaltung des Lufterdregisters (stufenlose Klappenregelung), allfälliges Zuschalten des Nachwärmers. Sind Zulufttemperaturen <= 16 °C ausreichend, kann bei korrekter Dimensionierung des Lufterdregisters auf den Nachwärmer verzichtet werden.



Figur 4.8
Ansicht eines Lufterdregisters während der Erstellung



Figur 4.9
Luftführung in einem Büro- und Gewerbegebäude mit einem Lufterdregister

Mit Hilfe des Lufterdregisters kann die Zulufttemperatur immer unterhalb der Raumlufttemperatur gehalten werden (Voraussetzung für Quelluftsysteme).

Die nachfolgend zusammengestellten einfachen Dimensionierungshinweise sollten bei einer Vordimensionierung für eine erste Kostenschätzung beachtet werden.

– Max. Luftgeschwindigkeit:
  < 4 m/s

– Rohrmaterial:
  Abwasser-Zementrohre (trockenes Erdreich)
  HDPE-Kunststoffrohre (nasses Erdreich)

– Minimale Rohrlänge:
  trockenes Erdreich > 30 m
  nasses Erdreich > 20 m

– Optimaler Rohrdurchmesser:
  trockenes Erdreich ≥ 30 cm
  nasses Erdreich < 25 cm

– Rohrabstände seitlich:
  minimal: 1 m
  optimal: > 2 m
– Rohrabstand von der Bodenplatte so gross wie möglich (mindestens 0.6 m).

Es gilt weiterhin folgendes zu beachten:

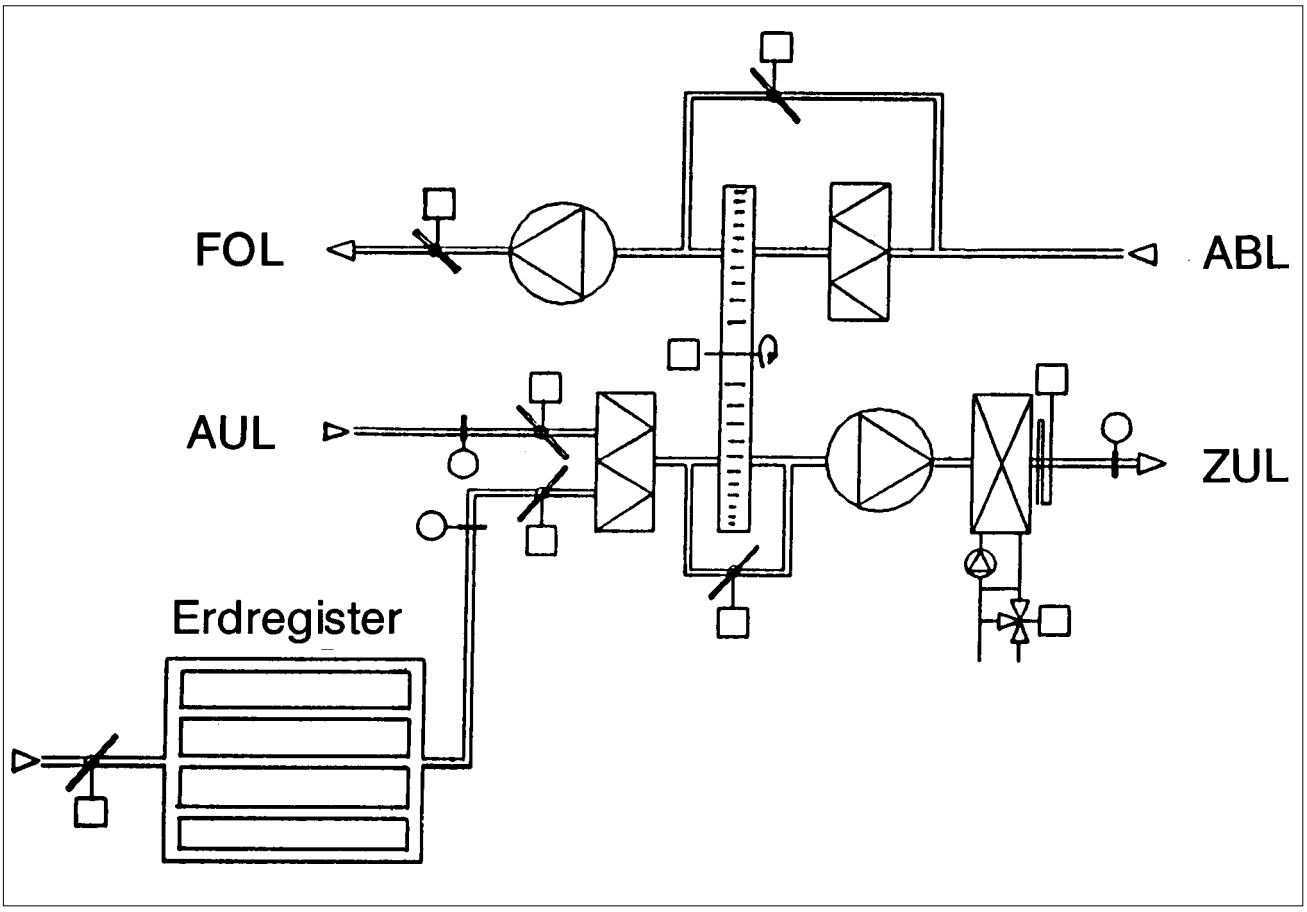
– Die Rohre und die Querkanäle sind mit Gefälle zu verlegen, um allfälliges Kondensat abführen zu können.

– Die Querkanäle müssen für eine optische Kontrolle der Rohre und Rohreinführungen bekriechbar sein.

– Die Rohreinführungen in den Querkanal sind im nassen Erdreich mit 2 aussenliegenden Dichtungsmanschetten auszuführen.

Im Rahmen von Forschungsprojekten ist geplant, den Planern ein PC-Programm zur Dimensionierung von Lufterdregistern für trockenes und nasses Erdreich zur Verfügung zu stellen. Das Programm wird es ermöglichen, den stündlichen Verlauf der Erdregisterleistungen mit Berücksichtigung der wichtigsten Randbedingungen (Luftsystem, Erdreich, Gebäude) zu berechnen.

Lufterdregister weisen eine optimale Elektro-Thermo-Verstärkung auf (Definition in Abschnitt 4.4). Im Vergleich mit konventionellen Systemen erreichen Lufterdregister im Sommer und Winter Elektro-Thermo-Verstärkungen von 60–80 (Arbeitszahl von Wärmepumpen < 3 und Kältemaschinen < 4).



Figur 4.10
Prinzipschema einer Ersatzluftanlage mit Lufterdregister

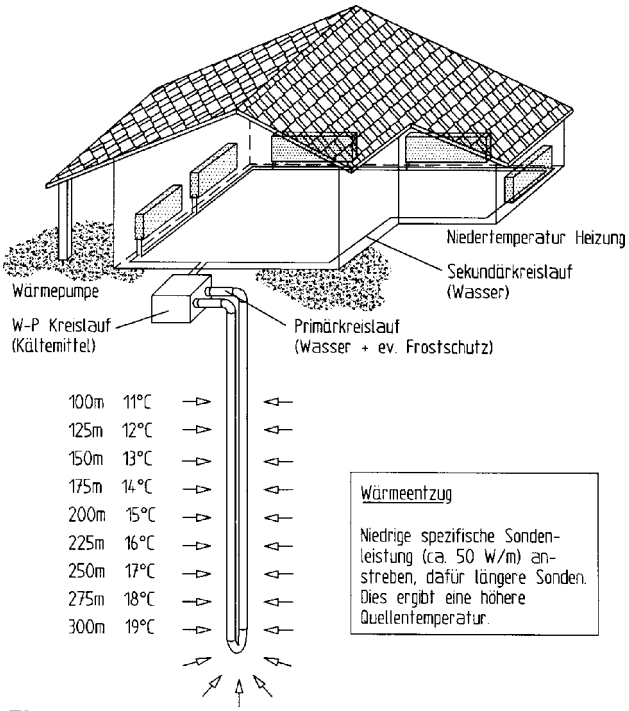
4.11 Erdsonden

Grundsätze

- *Erdsonden sind vertikale Sonden über welche die relativ konstante Bodentemperatur in Tiefen von einigen dutzend bis wenigen hundert Metern genutzt wird.*

- *Dem Boden kann so im Winter Wärme entzogen, im Sommer Wärme zugeführt werden. Für die Erreichung der erforderlichen Temperaturniveaus wird im Winter eine Wärmepumpe eingesetzt. Im Sommer kann das in den Erdsonden zirkulierende Wasser/Glykol-Gemisch direkt über einen Wärmetauscher zur Kühlung eingesetzt werden.*

- *Bei der Beurteilung der Zweckmässigkeit einer Erdsondenanlage ist der Energiebedarf für die Medienförderung zu berücksichtigen.*



Figur 4.11
Prinzipskizze einer Erdsondenanlage

4.11.1 Heizung im Winter

Für die Nutzung von Erdwärme aus Tiefen von einigen dutzend bis wenigen hundert Metern («Untiefe Geothermie») werden vertikale Erdwärmesonden (EWS) eingesetzt. In diesem Bereich ist nutzbare Energie in Form von Wärme von meist weniger als 20 °C vorhanden. Diese Wärme wird dem im allgemeinen trockenen, d.h. grundwasserfreien Erdreich entzogen. Eine Erdwärmesonde besteht im wesentlichen aus einem geschlossenen Wasserkreislauf, dem sogenannten Wärmequellenkreislauf. Das dazu benötigte Rohrsystem wird mittels einer oder mehrerer, meist vertikaler Bohrungen in die Tiefe gebracht. Der Wärmeträger, Wasser mit einem Zusatz von ca. 25 Vol-% Frostschutz, wird zur Wärmeaufnahme aus dem Erdreich durch das System gepumpt. Das Wasser-Frostschutz-Gemisch gibt die so aufgenommene Wärme über einen Wärmetauscher an eine Wärmepumpe ab. Dabei kommt es zu keinem direkten Kontakt zwischen dem Arbeitsmittel in der Wärmepumpe und dem Wärmeträgermedium aus der Erdwärmesonde. Die auf diese Art dem Wärmequellenkreislauf entzogene Energie wird in der Wärmepumpe auf ein für ein Heizungs- bzw. Lüftungssystem brauchbares Temperaturniveau angehoben. Mit diesem System sind mittlere Anlageleistungsziffern von über 3 machbar [4.3, 4.15].

Kritische Auslegungsgrössen

Die täglich und auch langfristig variierende Temperaturverteilung des Erdreichs, und damit des eigentlichen Energielieferanten, erschweren die optimale Auslegung einer Erdwärmesondenanlage. Bei der Planung einer Anlage sind deshalb die folgenden Grössen zu berücksichtigen:

- Der Energiebedarf des Hauses. Er wird bestimmt durch Grösse, Bauart sowie Orientierung und klimatische Lage des Gebäudes.

- Die vom Heizkreislauf verlangte höchste Vorlauftemperatur. Sie wird beeinflusst durch die Wahl des Heizsystems (z.B. Niedertemperaturheizung) und dessen Dimensionierung.

- Die zu erzielende Energieersparnis. Je weniger Fremdenergieverbrauch erwünscht ist, desto höher sind die Anlagekosten.

- Die Temperatur im Wärmequellenkreislauf. Sie wird im wesentlichen bestimmt durch die Geo-

metrie der Erdwärmesonde, durch den Flüssigkeitsdurchsatz im Wärmequellenkreislauf sowie durch die Bodenbeschaffenheit. Faustformel: Bei einer Betriebszeit der Wärmepumpe von ca. 2000 h/a muss pro kW erforderliche Wärmeleistung mit ca. 20 m Sondenlänge gerechnet werden (50 W/m).

Heizleistung der Wärmepumpe

Die Heizleistung der Wärmepumpe darf nicht zu knapp gewählt werden. Zu klein dimensionierte Wärmepumpen verursachen lange Betriebszeiten und überlasten die Erdwärmesondenanlage. Infolge fehlender «Erholungszeiten» (Wärmezufluss) sinkt die Nutzungstemperatur der Wärmequelle und damit die Heizleistung. Die Wirtschaftlichkeit wird beeinträchtigt, und die gewünschten Raumtemperaturen können nicht mehr erreicht werden.

Die Wahl der richtig dimensionierten Wärmepumpe aus einer bestehenden Baureihe bildet deshalb die erste wichtige Bedingung für die Planung und Realisierung einer funktionstüchtigen Wärmepumpenheizungsanlage. Die Betriebssicherheit wird damit für ein breites Spektrum von Auslegungsvarianten der Erdwärmesonde(n) gewährleistet. Eine Wärmepumpe ist aber nur dann ökonomisch interessant und energiewirtschaftlich sinnvoll, wenn sie effizient arbeiten kann. Je kleiner die Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Wärmenutzung ist, desto grösser wird der Anteil der von der Wärmequelle gelieferten Wärme, desto kleiner ist der Anteil der Fremdenergie und desto positiver zeigt sich die Energiebilanz.

4.11.2 Kühlung im Sommer

Die Erdsonden, die für die Wärmepumpe während der Heizperiode als Wärmequelle benutzt werden, können im Sommer für die Kühlung der Aussenluft eingesetzt werden. Dazu wird das in den Erdsonden zirkulierende Wasser/Glykol-Gemisch während den Sommermonaten, d.h. bei Aussentemperaturen grösser als etwa 24 °C, auf ein Kühlnetz geführt. Gesicherte Angaben über die zu erwartenden Kälteleistungen liegen nicht vor, da bisher keine systematischen Messungen durchgeführt worden sind. Schätzungsweise kann bei etwa 1000 Betriebsstunden im Sommerbetrieb eine Kälteleistung von etwa 50% der Wärmeleistung im Winterbetrieb bezogen werden, also ca. 25 W/m.

Durch diese Kombination von Wärmeentzug im Winter für Heizzwecke und Wärmeeintrag zu Kühlzwecken im Sommer wird der Wirkungsgrad der Wärmepumpe verbessert.

Der Leistungsbedarf für den Antrieb von Umwälzpumpen und Ventilator (erhöhter Widerstand des Kühlers wegen grösserer Austauschfläche bei höheren Kühlwassertemperaturen) beträgt gegenüber einer konventionellen Kälteanlage ca. 10–15%.

4.12 Bedarfsgerechte Steuerung und Regelung

Grundsätze

- *Durch geeignete Massnahmen ist zunächst sicherzustellen, dass die lüftungstechnischen Anlagen nur in Betrieb sind, wenn dies erforderlich ist.*
- *Beim Betrieb der Anlagen ist darauf zu achten, dass diese möglichst bedarfsgerecht arbeiten und ihre Aufgabe mit möglichst geringem Energieaufwand erfüllen.*
- *Häufig sind die einfachsten Massnahmen wie Handschalter und Zeitschaltuhr die wirksamsten. Bei bedarfsgerechter Dimensionierung der Anlagen haben aufwendige Lösungen mit variablem Volumenstrom eine weniger grosse Bedeutung als noch vor wenigen Jahren postuliert wurde.*

Die einfachste Art der Anpassung des Lüftungsbetriebs an den Bedarf ist die Ein- und Ausschaltung. Dies kann wie folgt erfolgen:

- **Handschalter**
  Wird betätigt beim Betreten oder Verlassen des Raumes oder bei Lüftung via Fenster. Die Wirksamkeit des Handschalters steht und fällt mit der Disziplin der Benützer.
- **Zeitschaltuhr**
  Bei Nutzungen mit definiertem Tages- und Wochengang leistet eine Zeitschaltuhr mit wenig Aufwand sehr wertvolle Dienste.
- **Fensterkontakt**
  Bei geöffneten Fenstern stellt der Betrieb einer Lüftungsanlage eine Energieverschwendung dar. Mit Fensterkontakten kann ein automatisches Ausschalten der Lüftungsanlage beim Öffnen der Fenster erreicht werden.
- **Bewegungsmelder**
  Die Anwesenheit von Personen in einem Raum kann mit Bewegungsmeldern (Infrarotmelder) zuverlässig erfasst werden. Dieses Signal kann gut zur Steuerung (Ein- und Ausschalten) der Lüftungsanlage verwendet werden.

Bei variabler Nutzung kann die Luftmenge aufgrund eines Schadstoffmelders so reguliert werden, dass bestimmte Grenzwerte eingehalten werden können. Als Schadstoffmelder können eingesetzt werden:

- **CO_2-Sensoren**
  CO_2-Melder eignen sich für Räume, in denen nicht geraucht wird (bewährter Grenzwert = 800 ppm CO_2 + zusätzlicher Spülbetrieb vor Nutzungsbeginn).
- **Mischgas-Sensoren**
  Mischgas-Sensoren sind geeignet für Räume, in denen geraucht wird.

4.13 Anlagen mit variablem Volumenstrom (VAV)

Grundsätze

- *VAV-Anlagen eignen sich bei stark variierenden Nutzungen zur Erreichung eines bedarfsgerechten Betriebs. Bei bedarfsgerechter Dimensionierung ist die Notwendigkeit von VAV-Anlagen nur in diesen Ausnahmefällen gegeben.*
- *Bei VAV-Anlagen sind alle Komponenten auf den variablen Luftstrom zu dimensionieren. Mechanische VAV-Regler sind infolge des hohen Druckverlustes zu vermeiden.*

Variablen Volumenstrom hat man schon angewendet, als mit der Zuluft noch leistungsstark gekühlt wurde. Wenn eine konstante Zulufttemperaturregelung erwünscht war, so musste man die Leistungsanpassung notgedrungenerweise mit dem variablen Volumenstrom vornehmen.

Bei einer bedarfsgerechten Dimensionierung werden die maximalen Luftvolumenströme auf das vertretbare Minimum reduziert (Abschnitte 3.3 und 4.2.4). Dabei soll der bei früheren Auslegungen mit grösseren Volumenströmen übliche Platzbedarf durchaus beibehalten werden. Es können so die Massnahmen zur Reduktion der Druckverluste gemäss Abschnitt 3.4.4 leicht erfüllt werden.

Der Bau von Anlagen mit variablem Volumenstrom (VAV) ist zweckmässig, um bei stark variierenden Nutzungen einen bedarfsgerechten Betrieb zu ermöglichen. Bei der oben erwähnten bedarfsgerechten Dimensionierung der Anlagen ist die Notwendigkeit von VAV-Anlagen nur noch in diesen Ausnahmefällen gegeben.

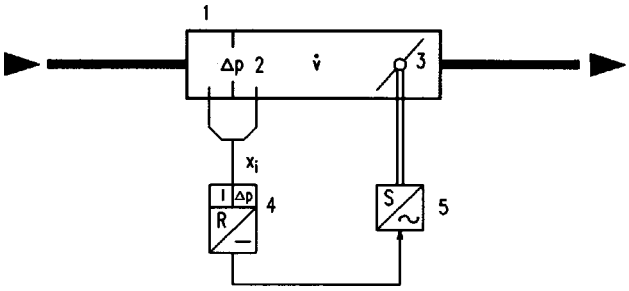
An eine VAV-Anlage wird die Forderung gestellt, dass sie unabhängig vom jeweiligen Betriebszustand der Anlage die verschiedenen Räume individuell mit dem jeweils benötigten Luftstrom versorgt. Dazu sind alle Komponenten auf den variablen Luftstrom zu dimensionieren.

Volumenstromregler

Die Volumenstromregler müssen gewährleisten, dass den Räumen die notwendigen Luftvolumenströme unabhängig vom jeweiligen Druck im Kanalnetz zugeführt werden.

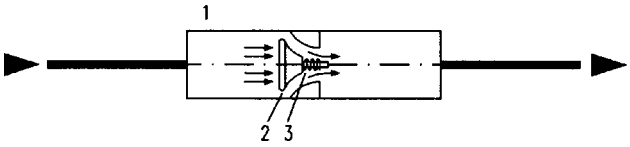
Die Figur 4.12 zeigt das Prinzip eines Volumenstromreglers mit Messung des Volumenstroms (z.B. über eine Blende) und entsprechend geregelter Klappe. In Figur 4.13 ist das Prinzip eines mechanischen Volumenstromreglers mit selbsttätiger Regelung mit Hilfe des Kanaldruckes dargestellt.

Bei der Auswahl der Volumenstromregler ist darauf zu achten, dass der zur Regelung erforderliche minimale Vordruck möglichst gering bleibt. Da dieser bei mechanischen VAV-Reglern deutlich grösser ist als bei VAV-Reglern mit Messung, sind mechanische VAV-Regler aus energetischen Gründen zu vermeiden.



1 Volumenstromregler
2 Messung (Blende, Messkreuz etc.)
3 Klappe
4 Regler
5 Klappenmotor

Figur 4.12
VAV-Regler mit Messung (Δp_{min} = ca. 20 Pa)



1 Volumenstromregler
2 Regulierkegel
3 Feder

Figur 4.13
VAV-Regler mechanisch (Δp_{min} = ca. 80 Pa bei kleinster Luftmenge)

Ventilator

Auch der Ventilator muss sich dem Bedarf anpassen können.

Wichtig ist, dass im gesamten Kanalnetz genügend Druck vorhanden ist, damit die Volumenstromregler funktionieren. Evtl. sind mehrere Druckmessstellen notwendig.

Zuluftdurchlässe

Bei der Wahl des Zuluftdurchlasses und bei dessen Dimensionierung ist zu beachten, dass er für variable Volumenströme geeignet ist (100%–30%), um auch im Teillastbereich eine genügende Raumdurchspülung zu erhalten. Hoch induzierende System- und Quellüftungen erfüllen diese Aufgabe ohne besondere mechanische Hilfen.

Literatur zu Abschnitt 4

[4.1] Arbeitsgemeinschaft Wärmepumpen AWP
Technische Dokumentation der TK über Wärmepumpenheizungsanlagen
AWP Zürich, Oktober 1991

[4.2] E. Beck
Über das Einfrieren von Plattenwärmetauschern
HLH Band 43 (1992) Nr. 7, Seiten 370–374

[4.3] Bundesamt für Energiewirtschaft BEW
Erdwärmesonden-Heizanlagen
Studie Nr. 46, September 1989

[4.4] Bundesamt für Konjunkturfragen
RAVEL im Wärmesektor – Heft 1
Elektrizität und Wärme
Bestell-Nr. 724.357-d

[4.5] Bundesamt für Konjunkturfragen
RAVEL im Wärmesektor – Heft 2
Wärmerückgewinnung und Abwärmenutzung
Bestell-Nr. 724.355-d

[4.6] Bundesamt für Konjunkturfragen
RAVEL im Wärmesektor – Heft 3
Wärmepumpen
Bestell-Nr. 724.356-d

[4.7] Bundesamt für Konjunkturfragen
RAVEL im Wärmesektor – Heft 4
Wärmekraftkopplung
Bestell-Nr. 724.358-d

[4.8] Bundesamt für Konjunkturfragen
Impulsprogramm Haustechnik 1987
Wärmerückgewinnung in Lüftungs- und Klimaanlagen
Form. 724.709d 12.87 1000 41945

[4.9] F. Haberda, V. Meyringer, L. Trepte
Bestandesaufnahme zur Ausführung von Lüftungsanlagen im Wohnungsbau
Bundesministerium für Forschung und Technologie BMFT-FB-T 86-230

[4.10] Hans Martin Mathisen
Analysis and Evaluation of Displacement Ventilation
Dissertation NTH Trondheim
VVS-rapport 1989:2

[4.11] R. Meierhans, D. Brühwiler
Intensive Nutzung der Gebäudespeichermasse zur nächtlichen Kühlung
7. Schweizerisches Statusseminar 1992
Energieforschung im Hochbau

[4.12] V. Meyringer
Voraussetzungen für den energiewirtschaftlich sinnvollen Einsatz von Lüftungsanlagen im Wohnungsbau
Bundesministerium für Forschung und Technologie BMFT-FB-T 86-240

[4.13] Recknagel, Sprenger, Hönmann
Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik
Verlag Oldenbourg, Ausgabe 1992/93
ISBN 3-486-26212-2

[4.14] Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein SIA
Meteodaten für die Haustechnik
Dokumentation D 012, Januar 1987

[4.15] Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein SIA und Bundesamt für Energiewirtschaft BEW
Base de dimensionnement des systèmes exploitant la chaleur du sol à base température
Dokumentation D 025, Mai 1988

[4.16] Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein SIA
Ordnung für Leistungen und Honorare der Maschinen- und Elektroingenieure sowie der Fachingenieure für Gebäudeinstallationen, Ordnung SIA 108, Ausgabe 1984

[4.17] Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein SIA
Technische Anforderungen an lüftungstechnische Anlagen
Empfehlung SIA V382/1, Ausgabe 1992

[4.18] Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein SIA
Kühlleistungsbedarf von Gebäuden
Empfehlung SIA V382/2, Ausgabe 1992

[4.19] Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein SIA
Bedarfsermittlung für lüftungstechnische Anlagen
Empfehlung SIA V382/3, Ausgabe 1992

[4.20] Schweizerischer Verein von Wärme- und Klima-Ingenieuren SWKI
Abnahmeprotokoll für Heizungs-, Lüftungs-, Kälte- und Wärmepumpenanlagen
Richtlinie SWKI 88-1

[4.21] Schweizerischer Verein von Wärme- und Klima-Ingenieuren SWKI
Wärmerückgewinnungsanlagen in lufttechnischen Anlagen
SWKI-Richtlinie 89-1

[4.22] Urs Steinemann
Arbeitsbericht zur Definition energetisch guter lüftungstechnischer Anlagen
Bericht US 92-14-01 vom Dezember 1992
im Auftrag des SIA und des BEW

[4.23] TüV Rheinland
Lüftung im Wohnungsbau
Bericht Statusseminar, ISBN 3-88585-172-5
Dokumentation D 025, Mai 1988

[4.24] Carl-Georg Ungerland
Die Lüftung als notwendige Voraussetzung für ein gesundes Wohnklima
Buchenweg 7, D-8200 Rosenheim

[4.25] H. Werner, W. Fies
Fortschrittliche Systeme für die Wohnungslüftung, Teil B
IPB-Bericht EB-21, 1989
Fraunhoferinstitut für Bauphysik, Stuttgart

5 Ventilatoren

5.1 Bauarten von Ventilatoren 76
5.1.1 Typisierung 76
5.1.2 Druck-, Volumenstrom- und Wirkungsgradbereiche 77
5.1.3 Geräuscherzeugung 79

5.2 Ventilatorkennlinien 80
5.2.1 Radialventilatoren 80
5.2.2 Axialventilatoren 85
5.2.3 Querstromventilatoren 87

5.3 Gas-, Proportionalitäts- und Affinitätsgesetze 88
5.3.1 Einfluss der Luftdichte 88
5.3.2 Proportionalitätsgesetze 89
5.3.3 Affinitätsgesetze 90

5.4 Netzkennlinie und Betriebspunkt 90

5.5 Regelbarkeit 91

5.6 Verluste beim Einbau 98

Literatur zu Abschnitt 5 98

5 Ventilatoren

Die in der Lüftungstechnik zur Anwendung kommenden Strömungsmaschinen haben die Aufgabe, elektrische Energie möglichst geräuscharm und verlustfrei in Druck- und Bewegungsenergie eines Luftvolumenstroms umzusetzen. Im Druckbereich bis zu etwa 25 kPa bezeichnet man diese als Ventilatoren, bei höheren Drücken als Gebläse.

Durch die Verbesserungen beim sommerlichen und winterlichen Wärmeschutz der Gebäude hat der Energieverbrauch für Heizen und Kühlen in den letzten Jahren stark abgenommen. Damit steht der Verbrauch von elektrischer Energie für die Luftförderung zunehmend im Mittelpunkt der Sparbemühungen.

Heute ist der Energieverbrauch für die Lüftförderung häufig viel zu hoch. Um diese Verhältnisse zu verbessern, müssen die Ventilatoren besser ausgewählt, unter Umständen vernünftig kombiniert, richtig angetrieben und verlustarm geregelt werden. Vor allem bei kleineren Ventilatoren und Motoren sind Gesamtwirkungsgrade im Bereich von 25% noch weit verbreitet. Wesentliche Grundvoraussetzung für einen energie-effizienten Betrieb ist, dass die Luftvolumenströme ohnehin schon den Bedürfnissen entsprechend minimiert, gesteuert oder reguliert werden und dass die Druckverluste bei der Luftaufbereitung und Verteilung so klein wie wirtschaftlich gerade noch vertretbar geplant sind. Zu beachten ist auch, dass Ventilatoren und Motoren nur dann richtig gewählt werden können, wenn eine zuverlässige Druckverlustberechnung durchgeführt worden ist.

5.1 Bauarten von Ventilatoren

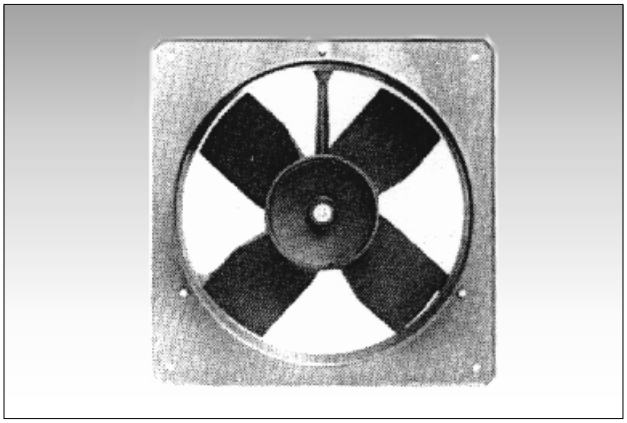
5.1.1 Typisierung

Obschon die einzelnen Bauarten der Ventilatoren ineinander übergehen, unterscheidet man grob zwischen Axialventilatoren und Radialventilatoren.

Axialventilatoren

Die Bauart der Axialventilatoren erstreckt sich vom langsam laufenden Deckenventilator über den grossflächigen Propeller bis zum hochtourigen Axialläufer mit verstellbarem Schaufelwinkel und Leitapparaten.

Figur 5.1
Langsam laufender Deckenventilator

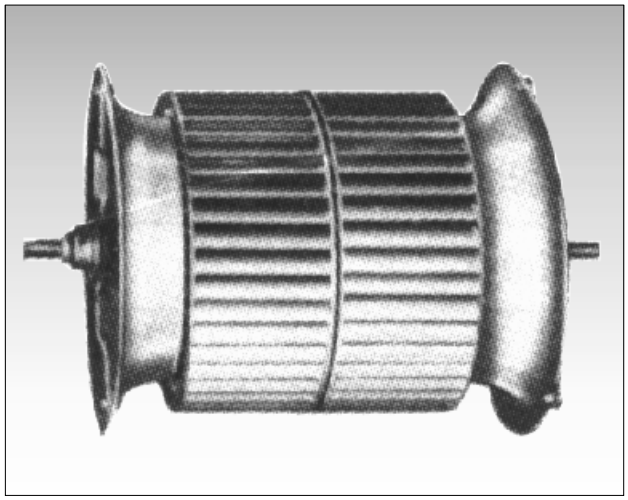


Figur 5.2
Grossflächiger Propeller

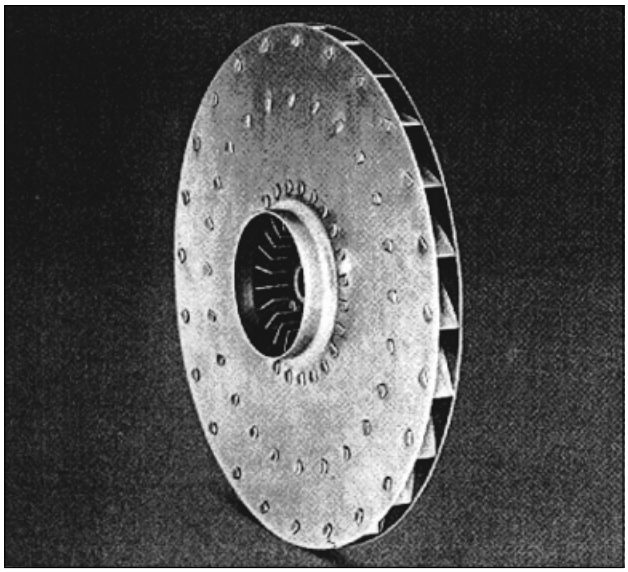
Figur 5.3
Hochtouriger, zweistufiger Axialventilator mit wählbarem Schaufelwinkel

Radialventilatoren

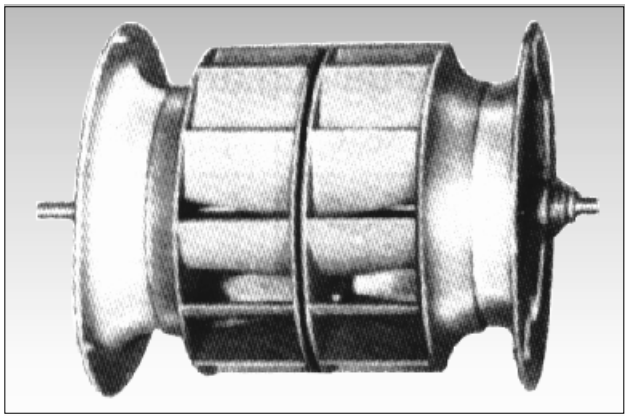
Die Bauart der Radialventilatoren reicht vom relativ leicht gebauten Trommelläufer über Hochleistungs-Radialventilatoren mit rückwärtsgekrümmten Schaufeln und Leitapparaten bis zu den hochtourigen Hochdruck-Radialventilatoren.



Figur 5.4
Trommelläufer – Radialventilator

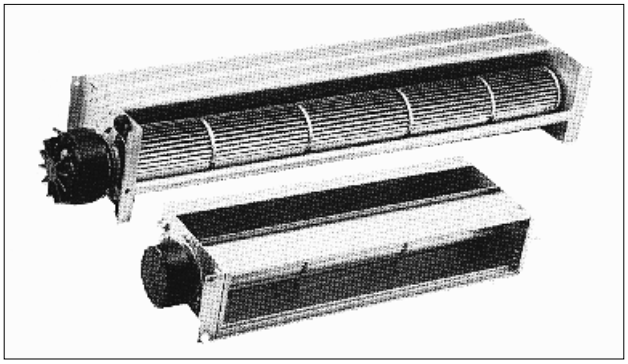


Figur 5.5
Hochdruck-Radialventilator



Figur 5.6
Hochleistungs-Radialventilator
(Schaufeln profiliert oder unprofiliert)

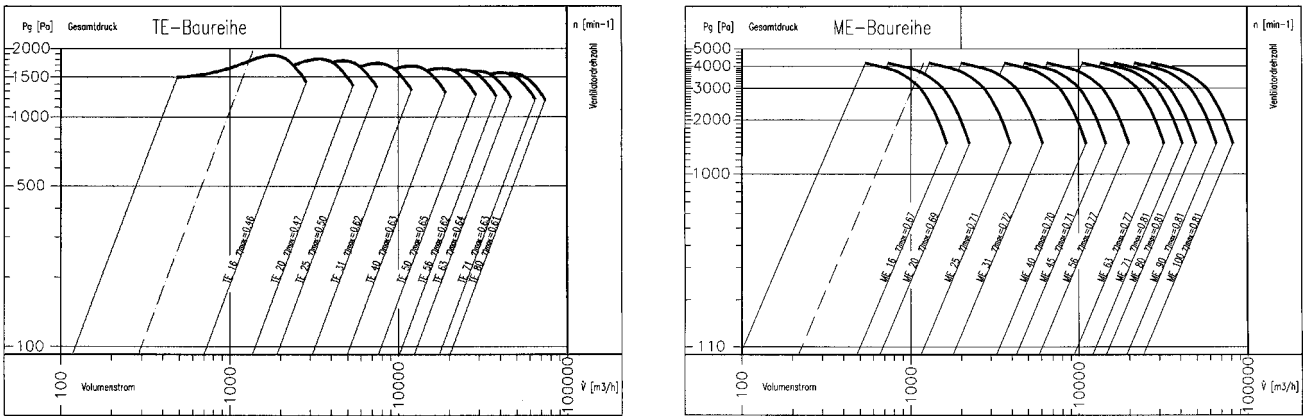
Als weitere Variante der Radialventilatoren wird hauptsächlich zur Anwendung mit Wärmetauschern zusammen oder zur Apparatekühlung der Querstromventilator verwendet.



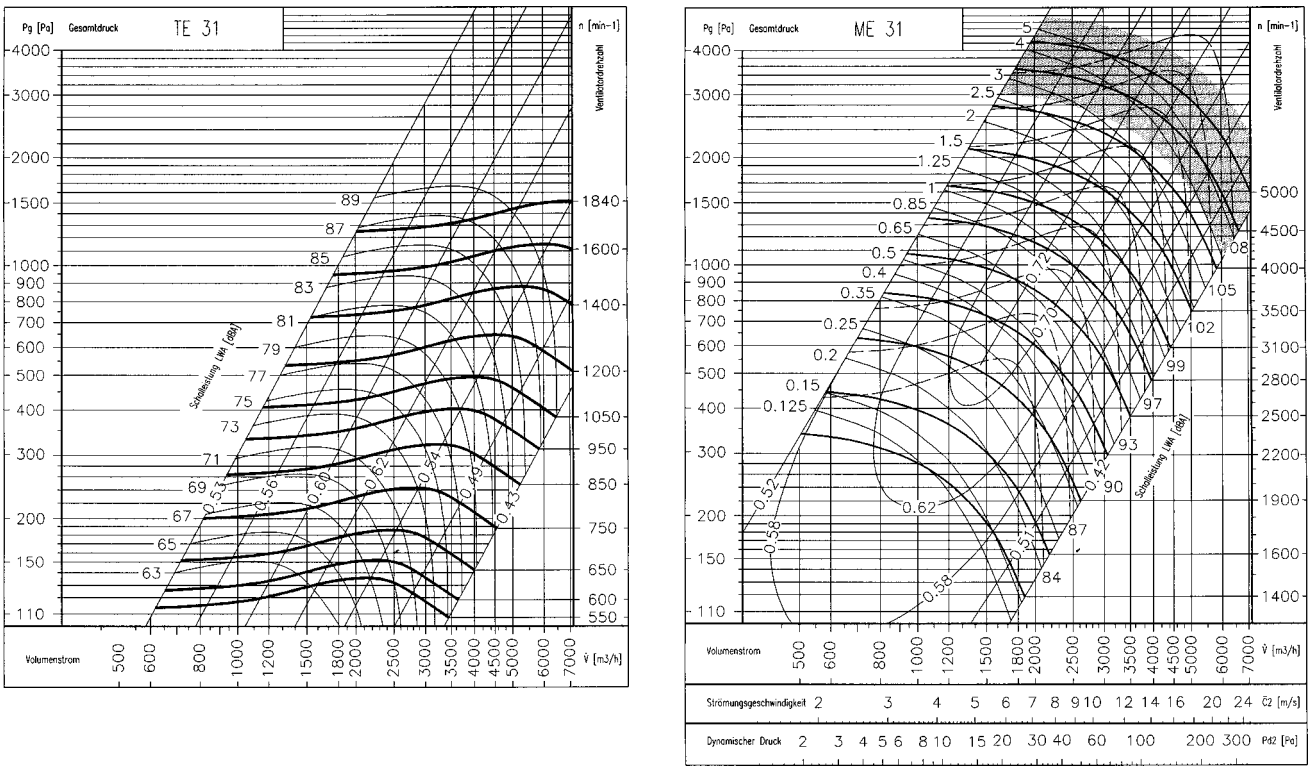
Figur 5.7
Querstromventilator

5.1.2 Druck-, Volumenstrom- und Wirkungsgradbereiche

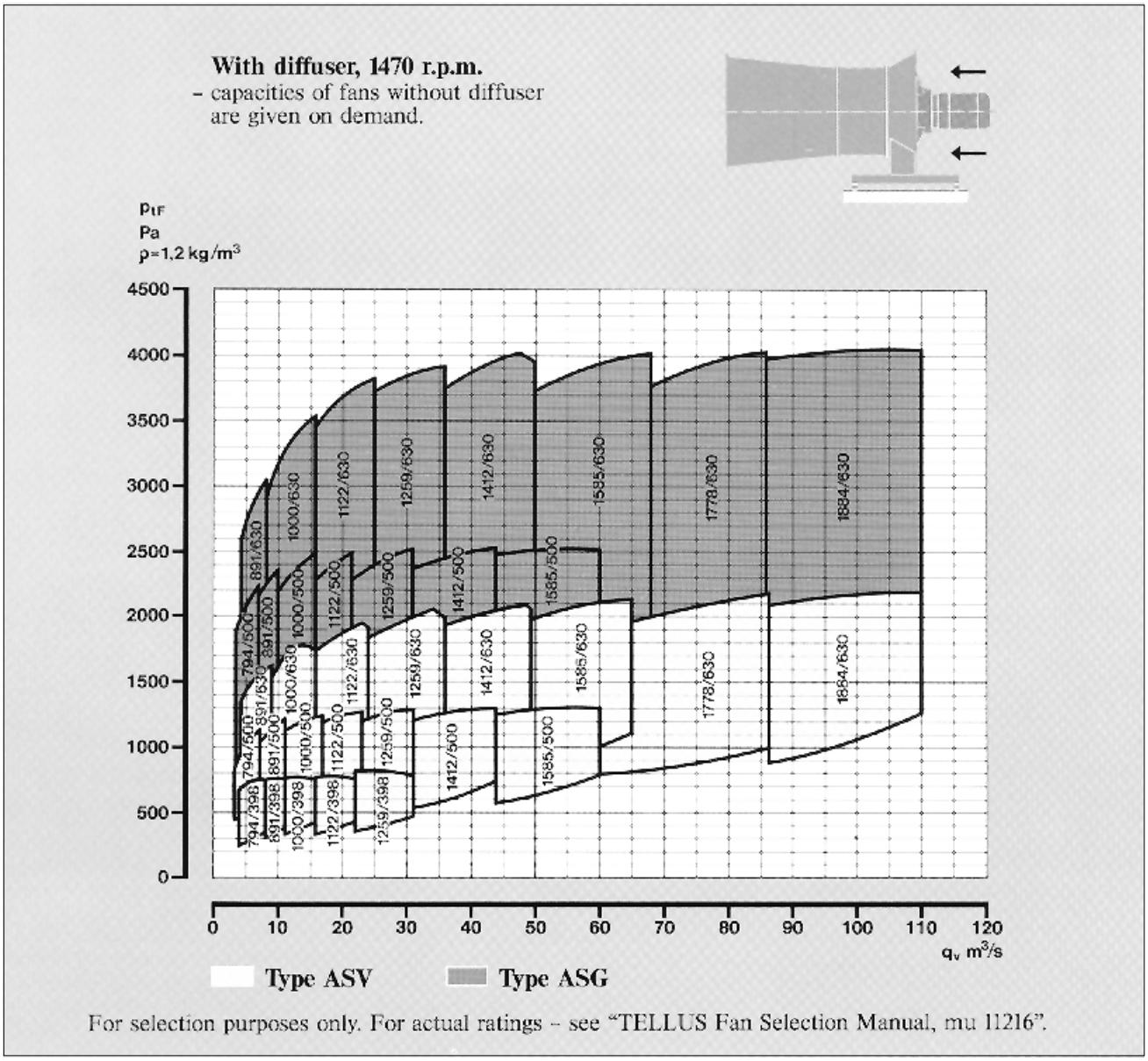
Die Hochleistungs-Radialventilatoren mit den rückwärtsgekrümmten Schaufeln (unprofiliert oder profiliert) zeichnen sich gegenüber den anderen Bauarten von Radialventilatoren durch ihre deutlich besseren Wirkungsgrade und durch ihre steileren Kennlinien aus. Zudem decken die Hochleistungs-Radialventilatoren einen grösseren Druckbereich ab. Die Trommelläufer liefern hingegen bei gleicher Baugrösse nahezu zweimal soviel Volumenstrom wie die Hochleistungsläufer [5.3].



Figur 5.8
Einsatzbereiche und maximale Wirkungsgrade von Trommelläufern (TE-Baureihe, links) und Hochleistungs-Radialventilatoren (ME-Baureihe, rechts) [5.5]



Figur 5.9
Kennlinienfelder eines Trommelläufers (TE 31, links) und eines Hochleistungs-Radialventilators (ME 31, rechts) im direktem Vergleich [5.5]



Figur 5.10
Einsatzbereiche von Axialventilatoren [5.4]

5.1.3 Geräuscherzeugung

Vergleicht man die Geräuschentwicklung einzelner Ventilatoren von unterschiedlicher Bauart in ihren jeweils besten Wirkungsgradbereichen, so sind nahezu keine systematischen Unterschiede auszumachen. Trotzdem, oder um so mehr, ist man auf die Herstellerangaben angewiesen, weil Ausführungsdetails und Herstellungstoleranzen zu deutlichen Unterschieden führen können.

In kritischen Fällen lohnt es sich, einen Reserveplatz vorzusehen, um bei Bedarf später gegenüber der Berechnung resp. Ausschreibung verlängerte Schalldämpfer einbauen zu können. Generell gilt, dass das zusätzliche Geräusch, das durch den Einfügungswiderstand eines Schalldämpfers am Ventilator erzeugt wird, etwa zehnmal kleiner ist als die gewonnene Einfügungsdämpfung.

5.2 Ventilatorkennlinien

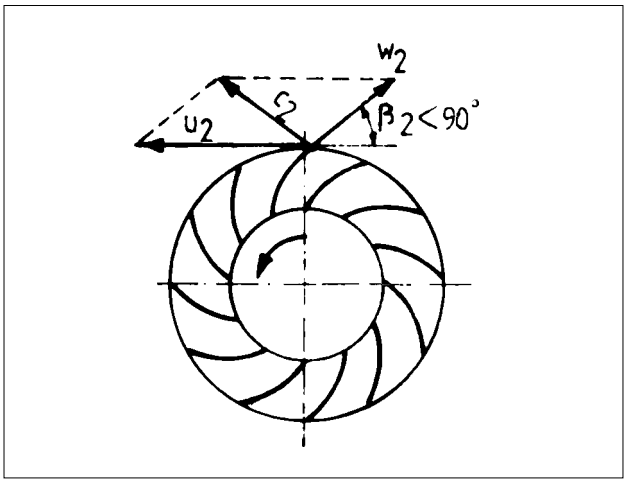
Grundsätze

- *Richtig ausgewählte Hochleistungs-Radialventilatoren mit rückwärtsgekrümmten Schaufeln sind energiesparender und leiser als die billigeren Trommelläufer.*
- *Bei den in der Lüftungstechnik üblichen Anwendungen sind auch die Axialventilatoren im Wirkungsgrad den Hochleistungs-Radialventilatoren meistens unterlegen.*

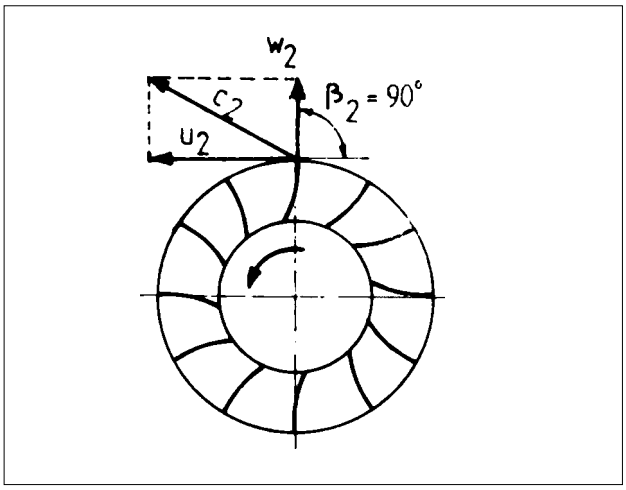
Wenn der Planer die spezifischen Eigenschaften der verschiedenen Ventilatoren richtig beurteilen und einsetzen will, so braucht er die wichtigsten strömungstechnischen Grundkenntnisse. Um hier aber auf dem Boden der praxisnahen Hilfestellung zu bleiben, wird auf die Herleitungen der Hauptgleichungen, die in jedem Fachbuch nachlesbar sind, verzichtet. Das Gleiche gilt für die dimensionslosen Kennlinien, die vom Praktiker weniger verwendet werden.

5.2.1 Radialventilatoren

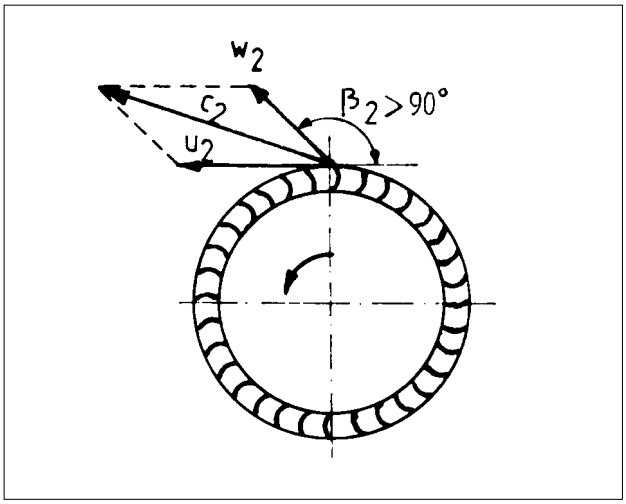
Bei den Radialventilatoren unterscheidet man vorerst zwischen unterschiedlichen Schaufelwinkeln am Laufradaustritt.



Figur 5.11
Laufrad mit rückwärts gekrümmten Schaufeln [5.3] (Wirkungsgrad 70–85 %)



Figur 5.12
Laufrad mit radial endenden Schaufeln [5.3] (für die Fördertechnik)



Figur 5.13
Laufrad mit vorwärts gekrümmten Schaufeln [5.3] (Trommelläufer, Wirkungsgrad 50–70 %)

Während das Laufrad mit rückwärts gekrümmten Schaufeln den besten Wirkungsgrad erreicht, erzeugt das Trommel-Laufrad mit seinen vorwärts gekrümmten Schaufeln den gleichen statischen Druck bei einer kleineren Umfangsgeschwindigkeit. Das Trommel-Laufrad erzeugt damit bei gleicher Baugrösse und Leistung weniger Geräusche, obschon sein Wirkungsgrad schlechter und seine Leistungsaufnahme höher ist als beim Laufrad mit rückwärts gekrümmten Schaufeln. Dieser Ver-

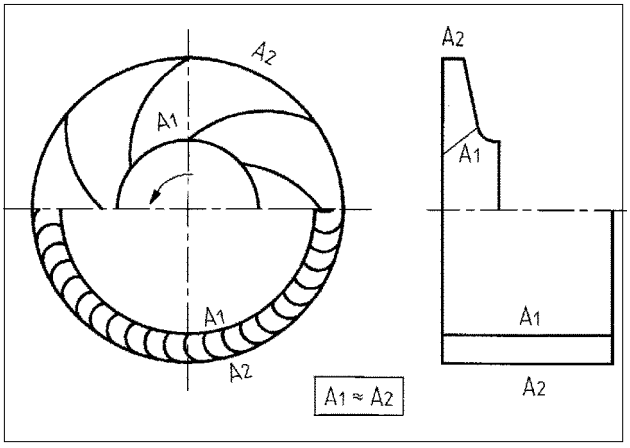
gleich ist zwar gebräuchlich, darf aber nicht so im Raum stehen gelassen werden (siehe Figuren 5.20 und 5.21).

Die radial endenden Schaufeln werden wegen ihrer Resistenz gegenüber Verschmutzungen hauptsächlich in der Fördertechnik eingesetzt. Auf ihre weitere Erwähnung wird im vorliegenden Dokument verzichtet.

Die Luftströmung im Laufrad

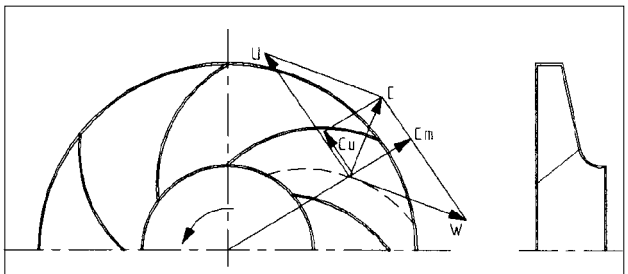
Da es im Radialventilator darum geht, den Luftstrom mit dem Laufrad zu beschleunigen und seine gewonnene kinetische Energie im anschliessenden Spiralgehäuse in Druckenergie umzuwandeln, könnte die relative Strömungsgeschwindigkeit im Schaufelkanal bereits heruntergesetzt und dynamische Energie in Druckenergie umgewandelt werden. Dem sind aber klare Grenzen gesetzt, weil der Diffusoröffnungswinkel eng begrenzt ist.

Aus diesem Grund wird bei grösseren Durchmesserverhältnissen durch Verjüngung der Laufradbreite für einen nahezu gleichbleibenden Strömungsquerschnitt gesorgt. Bei den Trommelläufern ist dies aufgrund des geringen Unterschiedes in der Ein- und Austrittsfläche der Schaufelkanäle bedeutungslos.



Figur 5.14
Ausführung von Laufrädern mit und ohne Verjüngung

Der Schaufelwinkel am Laufradeintritt unterliegt bei allen Laufradtypen den gleichen Anforderungen. Da der ungestörte Lufteintritt radial erfolgt, richtet sich der Schaufelwinkel nach dem Volumenstrom (d.h. nach der radialen Eintrittsgeschwindigkeit, die sich aus dem Volumenstrom und der Eintrittsfläche aller Schaufelkanäle ergibt) und der Umfangsgeschwindigkeit der Schaufelinnenkanten. Er beträgt bei den meisten Konstruktionen ca. 35°. Der Luftstrom hat dann mit den Bezeichnungen von Figur 5.15 in Bezug auf die Umgebung am Schaufelkanaleintritt die absolute Geschwindigkeit c_1 und in Bezug auf das Laufrad die relative Geschwindigkeit w_1.



u	Umfangsgeschwindigkeit des Rades
w	Relativgeschwindigkeit in Richtung der Schaufelkrümmung
c	Resultierende Absolutgeschwindigkeit aus w und u
c_u	Umfangskomponente von c
c_m	Radialkomponente von c

Bei allen Grössen bezeichnet der Index 1 den Beginn, der Index 2 das Ende des Schaufelkanals

Figur 5.15
Geschwindigkeitsdreieck am Laufrad

Es leuchtet ohne weiteres ein, dass die stärker gekrümmten Schaufeln beim Trommelläufer zu einer relativ höheren absoluten Austrittsgeschwindigkeit c_2 führen, als die weniger stark gebogenen Schaufeln eines rückwärts gekrümmten Laufrades, das mit gleicher Umfangsgeschwindigkeit läuft (Figuren 5.11 und 5.13). Gleichzeitig wird aber klar, dass beim Trommelläufer durch die rigorosere Luftumlenkung auf kurzem Weg die Stossverluste grösser sind und damit der Wirkungsgrad kleiner sein muss. Dass der Trommelläufer trotzdem den Ruf hat, bei gleicher Baugrösse geräuscharmer zu laufen, ergibt sich aus der deutlich niedrigeren Drehzahl.

Theoretische und wirkliche Kennlinie

Die bei unendlicher Schaufelzahl und ohne Berücksichtigung von Stossverlusten theoretisch erzielbare Druckerhöhung setzt sich aus drei Anteilen zusammen:

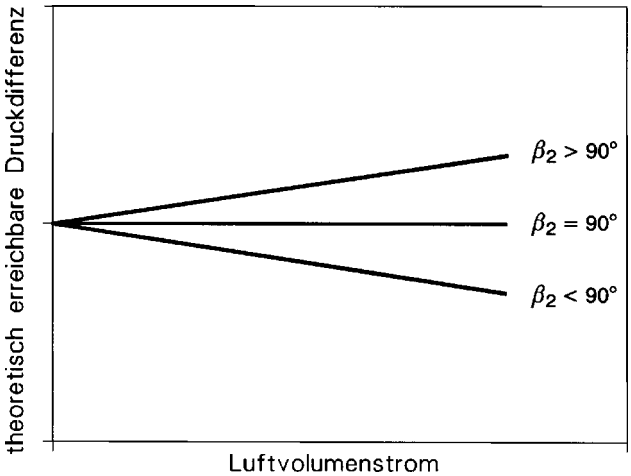
- **Statische Druckerhöhung**
  Sie ergibt sich aus der Differenz von $u_2^2 - u_1^2$ und ist somit vom Durchmesserverhältnis und von der Drehzahl abhängig.

- **Dynamische Druckerhöhung**
  Sie ergibt sich aus der Differenz von $c_2^2 - c_1^2$ und ist abhängig vom Schaufelwinkel β_2, vom Durchmesserverhältnis und von der Drehzahl.

- **Statischer Druckrückgewinn**
  Dieser ergäbe sich aus der Differenz der relativen Strömungsgeschwindigkeit der Luft im Schaufelkanal w_1^2-w_2^2. Der Betrag ist allerdings gering, weil die Geschwindigkeitsdifferenz aus den früher erläuterten Gründen konstruktiv klein gehalten wird.

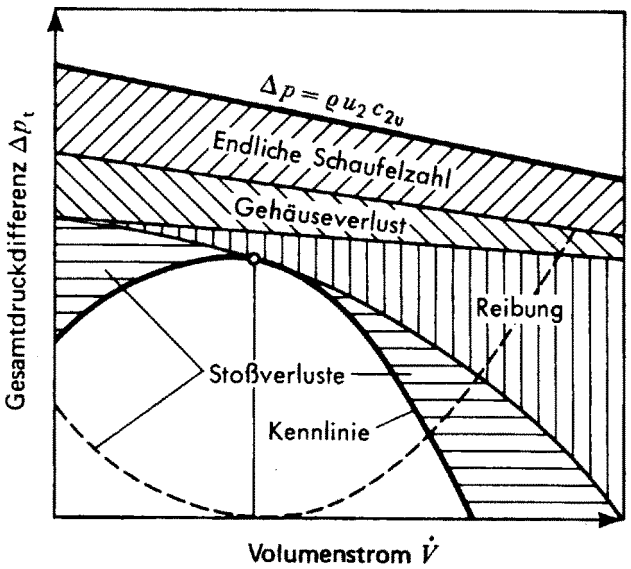
$$\Delta p_{th\infty} = \frac{\rho}{2}[(u_2^2 - u_1^2) + (c_2^2 - c_1^2) + (w_1^2 - w_2^2)]$$

Aufgrund der geometrischen Haupteinflussfaktoren ergibt sich für die verschiedenen Laufradtypen ein typischer Verlauf der theoretisch erreichbaren Druckdifferenz Δp_{th} in Funktion des Volumendurchsatzes V gemäss Figur 5.16. Vollständigkeitshalber sei hier das Laufrad mit radialem Schaufelende doch noch einmal erwähnt.



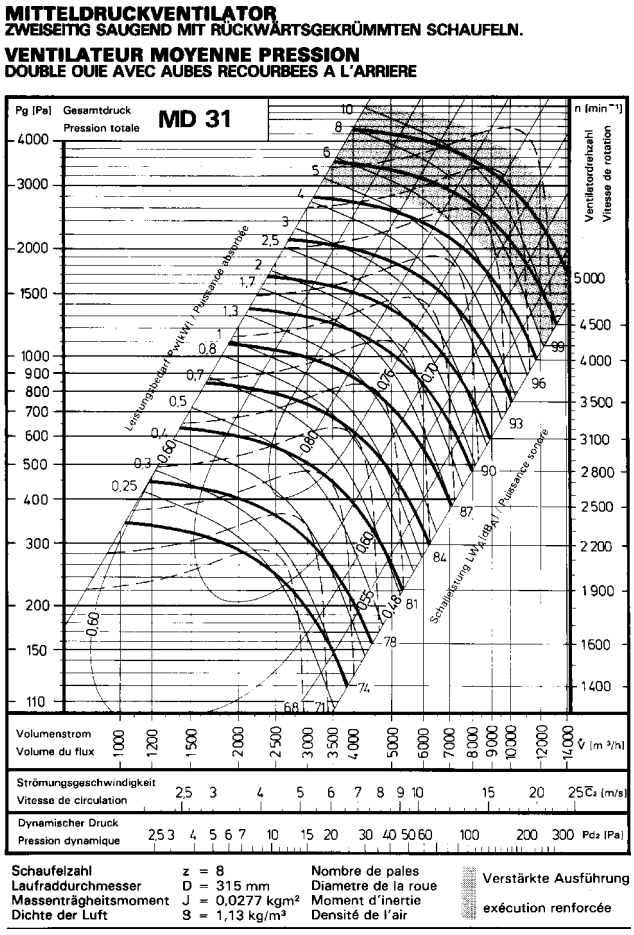
Figur 5.16
Typischer Verlauf von Δp_{th}

Bei der wirklichen Strömung im Ventilator ergibt sich infolge verschiedener Verluste eine wesentliche Änderung der theoretischen Kennlinie. Die tatsächliche Kennlinie eines Ventilators kann stetig fallend sein oder auch einen Scheitel- oder Wendepunkt aufweisen.



Figur 5.17
Änderung der theoretischen Kennlinie durch Verluste [5.6]

Da die Einsatzgebiete einzelner Ventilatortypen beachtlich gross sind, werden die Kennlinien in der Regel aus Platzgründen auf doppelt logarithmisches Papier aufgetragen. Für die in Frage kommenden Drehzahlen werden die Kurven im Bereich der optimalen Wirkungsgrade und Betriebspunkte dargestellt. Kurven zur Bestimmung von Leistungsbedarf, Wirkungsgrad und Schalleistung sind in der Regel ebenfalls in den Kennlinienfeldern eingetragen. Ein Beispiel für ein vollständiges Kennlinienfeld eines Radialventilators zeigt Figur 5.18.



Figur 5.18
Beispiel eines Kennlinienfeldes [5.5]

Aus dem Volumenstrom, dem aufzubringenden Gesamtdruck und dem Wirkungsgrad kann die Wellenleistung P des Ventilators berechnet werden.

$$\mathbf{P} = \frac{\Delta \mathbf{p_{ges}} \cdot \mathbf{V}}{\eta_{\mathbf{v}} \cdot \mathbf{3600}}$$

P Wellenleistung des Ventilator [W]

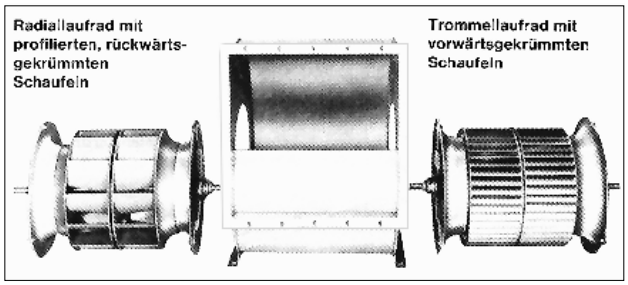
$\Delta \mathbf{p_{ges}}$ Gesamtdruckdifferenz [Pa]

V Volumenstrom [m³/h]

$\eta_{\mathbf{v}}$ Wirkungsgrad des Ventilators [–]

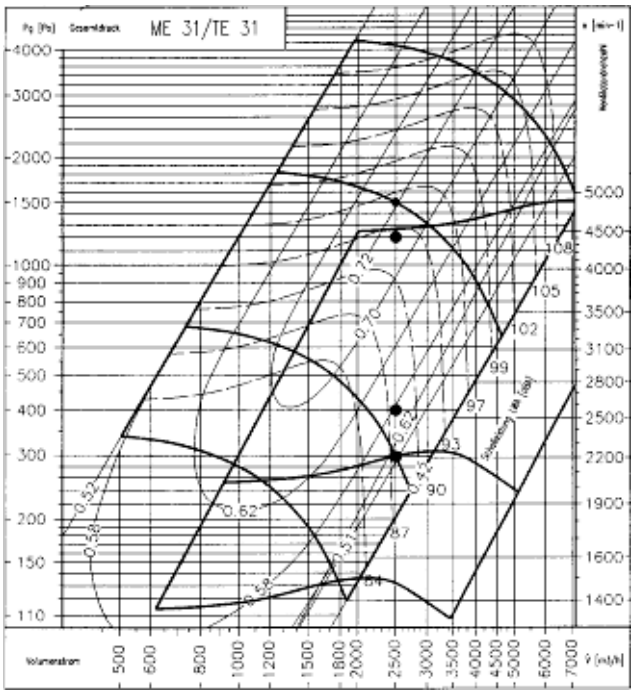
Wirkliche Kennlinien im Vergleich

Zum besseren Verständnis der spezifischen Ventilatoreigenschaften folgen einige praxisnahe Gegenüberstellungen.



Figur 5.19
Trommelläufer und Hochleistungslaufrad [5.3]

Nehmen wir an, ein Spiralgehäuse für ein einseitig saugendes Laufrad der Grösse ME 31 sei gegeben. Wir vergleichen die Ventilatoreigenschaften, wenn wahlweise ein Trommelläufer oder ein Hochleistungslaufrad eingesetzt wird.



Figur 5.20
Kennlinienfelder von Trommelläufer und Hochleistungs-Radialventilator gleicher Baugrösse [5.5]

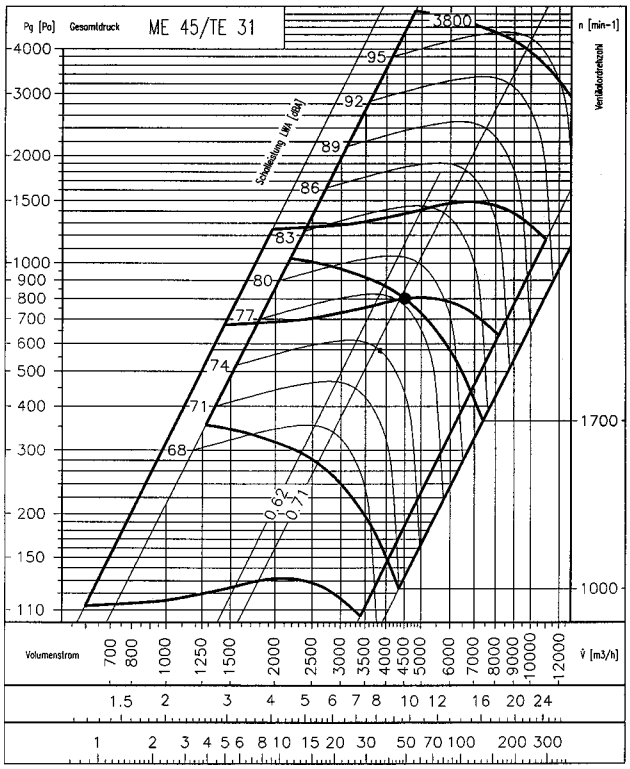
Die Tatsache, dass die Eigenschaften der zwei Laufräder in den meisten Lehrbüchern bei gleicher Baugrösse verglichen werden, führt oft zu Verständnisproblemen und zu Fehleinschätzungen. In der Figur 5.20 ist klar ersichtlich, dass die besten Wirkungsgrade der beiden Laufräder weit voneinander entfernt sind. Demnach können sie sich auch nicht für den gleichen Betriebspunkt eignen! Wenn aber beispielsweise eine Anlage mit einem bestimmten Volumenstrom durch den Einbau besserer Filter und einer WRG mehr Druckverlust aufweist, so kann sich ein Hochleistungslaufrad gleicher Baugrösse im gleichen Gehäuse aufdrängen.

Beispiel:
Nehmen wir an, dass der alte Betriebspunkt bei einem Volumenstrom von 2500 m^3/h und einem Gesamtdruckverlust von 300 Pa lag. Würde nun der neue Druckverlust nur geringfügig auf 400 Pa erhöht werden müssen, so ergäbe sich für beide Laufräder immerhin der gleiche, nicht aber der beste Wirkungsgrad (58%). Bei Druckverlusten bis zu 1500 Pa wird jetzt das Hochleistungsrad immer besser, während der Trommelläufer mit zunehmendem Druckbedarf auf einem schlechteren Wirkungsgrad arbeitet.

Kenngrösse		TE 31	ME 31	TE 31	ME 31	TE 31	ME 31
V	[m^3/h]	2'500	2'500	2'500	2'500	2'500	2'500
Δp_{ges}	[Pa]	300	300	500	500	1'200	1'200
η_V	[%]	60.0	52.0	60.5	60.5	55.0	71.0
L_{WA}	[dB(A)]	72.5	87.5	76.5	88.0	86.0	92.0
n	[min^{-1}]	830	2'000	1'120	2'300	1'780	3'000
P	[W]	345	400	575	575	1'515	1'175

Tabelle 5.1
Kenndaten des Trommelläufers TE 31 und des Hochleistungs-Radialventilators ME 31 [5.5]

Wenn hingegen im Planungsstadium zwischen dem Trommelläufer und dem Hochleistungsrad gewählt werden kann, so muss der Vergleich beider Bauarten im jeweils besten Wirkungsgradbereich erfolgen. Deshalb wird der Ventilator mit rückwärts gekrümmten Schaufeln meistens eine oder zwei Baugrössen grösser gewählt werden müssen.



Figur 5.21
Kennlinienfelder von Trommelläufer und Hochleistungs-Radialventilator unterschiedlicher Baugrösse [5.5]

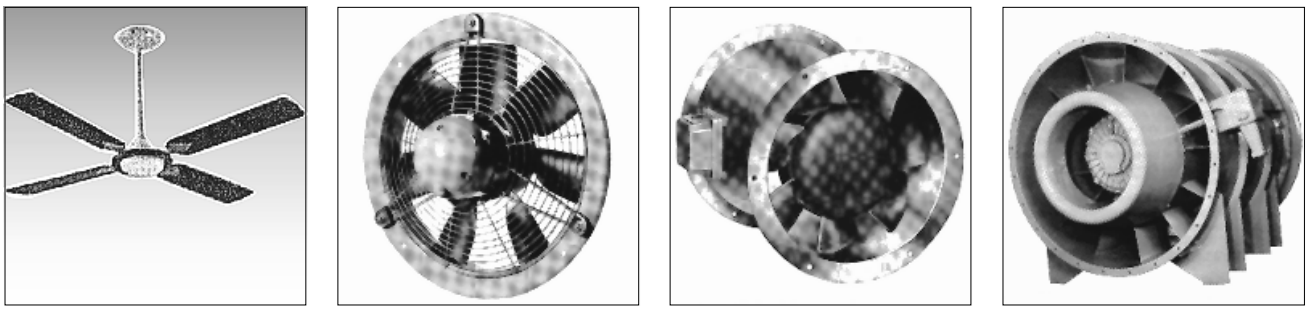
Am oben dargestellten Beispiel vom Vergleich eines Trommelläufers der Baugrösse TE 31 mit einem Hochleistungs-Radialventilator der Baugrösse ME 45 lässt sich zeigen, dass sich jetzt die jeweils optimalen Betriebspunkte nahezu decken.

Beim Vergleich in einem praxisnahen Betriebspunkt wird sofort klar, dass der um zwei Baugrössen grössere (und deshalb natürlich auch etwas teurere) Ventilator deutliche Vorteile aufweist. Bei 4500 m^3/h und 800 Pa ist P = 1430 W anstatt 2025 W und L_W ist 77.5 dB(A) statt 84.5 dB(A). Der richtig ausgewählte Hochleistungs-Radialventilator ist demnach nicht nur energetisch deutlich besser sondern auch leiser! Einzig bei der Anwendung von Drosselregulierungen kann das Teillastverhalten des Trommelläufers wieder günstiger werden (siehe Kapitel 5.5).

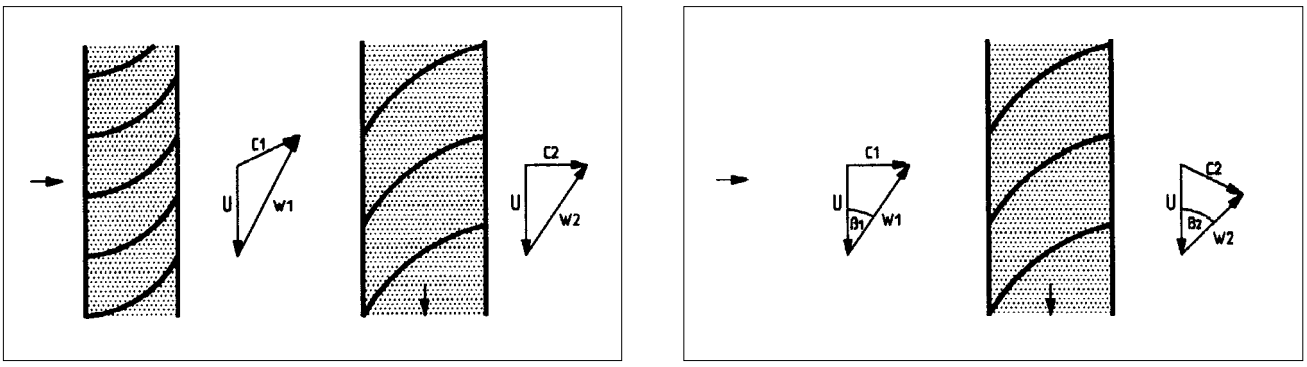
5.2.2 Axialventilatoren

Mit dem letzten Vergleich ist der Übergang zu den Axialventilatoren gegeben, die im Zeitalter der Monoblockgeräte eine etwas untergeordnete Rolle spielen. Zumindest aber bei den neueren Lüftungstechniken, die die Nachtlüftung zur Gebäudekühlung einbeziehen, dürfte der Axialventilator als Deckenmodell eine Renaissance erleben. Aber auch zur Massenspeicherbewirtschaftung in Aktiv- und Passiv-Solaranwendungen dürften in Zukunft einfachere Ausführungsformen des Axialventilators mehr und mehr angewendet werden.
Bei den Axialventilatoren können die Bauarten nicht einfach nach ihren Schaufelwinkeln eingeordnet werden. Man unterscheidet daher eher zwischen:

- Propeller- oder Umwälzventilatoren ohne Rohrgehäuse,
- Wand- und Fensterventilatoren mit einem Ring oder einem Gehäuse und
- aufwendigeren Ausführungen mit verstellbaren Schaufeln, Leiträdern, Diffusoren oder gar Gegenlaufrädern.



Figur 5.22
Bauarten von Axialventilatoren (Deckenventilator, Wandventilator, Rohreinbauventilator, Mitteldruckventilator mit Nachleitrad und Nabendiffusor)



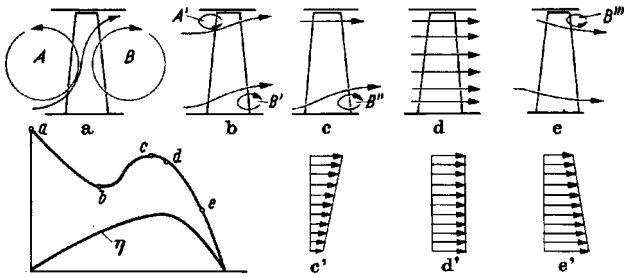
Figur 5.23
Geschwindigkeitsdreiecke von Axialventilatoren mit und ohne Leitapparat

Die Strömung im Laufrad wird auch beim Axialventilator durch die Ein- und Austrittsdreiecke dargestellt. Vom Laufrad wird dem Luftstrom ein Drall aufgeprägt, der bei der Anwendung eines Leitrades (vor oder hinter dem Laufrad) aufgehoben und in zusätzliche Druckenergie umgesetzt wird.

Der theoretisch erzielbare Druck, ohne Berücksichtigung der Strömungsverluste, kann wie beim Radialventilator wie folgt dargestellt werden:

$$\Delta p_{th\infty} = \frac{\rho}{2} \left[(w_1^2 - w_2^2) + (c_2^2 - c_1^2)\right]$$

Im Gegensatz zu Radialventilatoren haben Axialventilatoren innerhalb ihres Kennlinienfeldes ein ausgeprägtes Abrissgebiet, den sogenannten instabilen Bereich (Figur 5.24).



a Bei der Förderung Null füllen die Wirbel auf der Eintritts- und Austrittsseite den ganzen Saug- und Druckraum aus.
b Betrieb im tiefsten Punkt der Kennlinie mit Ablösungen am Schaufelrücken und am Eintritt.
c Betrieb im Scheitel der Kennlinie mit Ablösung am Schaufelrücken.
d Betrieb bei maximalem Wirkungsgrad mit gleichmässiger Durchströmung.
e Betrieb bei Überlast mit Verschiebung der Strömung nach innen.

Figur 5.24
Schematische Darstellung der Strömungszustände eines Axialventilators bei verschiedenen Drosselzuständen [5.2]

Die meisten Axialventilator-Hersteller geben in ihren Kennlinienfeldern nur den stabilen Bereich an oder markieren die Grenzen des stabilen Bereichs deutlich. Die linke Grenze des stabilen Bereichs wird häufig als Pumpgrenze bezeichnet.

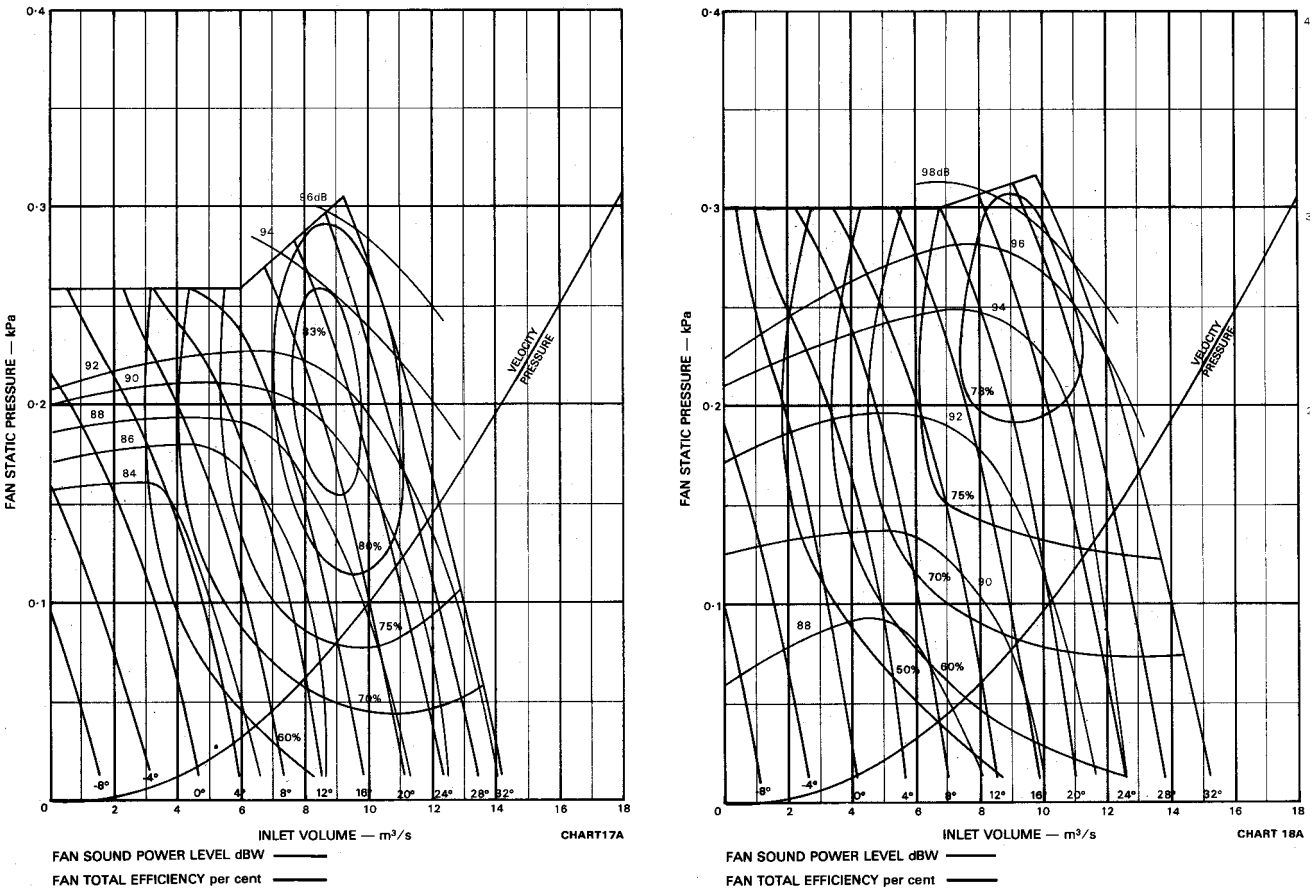
Zur Vermeidung von Betriebsstörungen ist es für den Lüftungstechniker erforderlich, die Problematik des instabilen Bereiches zu kennen. Verschiebt sich durch eine fehlerhafte Auslegung oder durch anlagenseitige Veränderungen ein Betriebspunkt in Richtung Abrissgebiet, kann es zu Beschädigungen von mechanischen Komponenten des Ventilators kommen.

Bei einem Betrieb im instabilen Bereich liegt die erhöhte Gefahr einer mechanischen Beschädigung des Ventilators darin, dass sich bei geringsten Veränderungen im System Wirbel ganz oder teilweise schlagartig ablösen und sich dabei die Luftleistungen ebenso schnell ändern. Dies bedeutet ein schlagartiges Auftreffen von Kräften auf die Laufradschaufeln. Da sich beim Betrieb im instabilen Bereich die Wirbel immer wieder neu aufbauen, führt dies zu einem steten Hin- und Herpendeln des Betriebspunktes.

Durch die Tatsache, dass der Bestpunkt d eines Axialventilators immer relativ nahe am Scheitelpunkt c und damit am Beginn des Abrissgebietes liegt, wird die Notwendigkeit einer äusserst sorgfältigen und genauen Auslegung deutlich. Dies gilt insbesondere für den Betrieb von Axialventilatoren in Parallelschaltung.

Die Pumpgrenze der Axialventialtoren kann durch einen Stabilisierungsring weitgehend vermieden werden. Dabei handelt es sich um eine ringförmige Kammer oder einen zylindrischen Ring vor dem Laufrad. Vor allem bei Parallelbetrieb mehrerer Axialventilatoren wird der Einbau von Stabilisierungsringen dringend empfohlen. Nähere Angaben dazu finden sich in den Unterlagen der Hersteller.

Die Figur 5.25 zeigt das Kennlinienfeld eines Axialventilators mit 6 und 8 Schaufeln. Der Ventilator mit 6 Schaufeln erreicht einen Maximalwirkunsgrad um 83%, jener mit 8 Schaufeln um 78%.



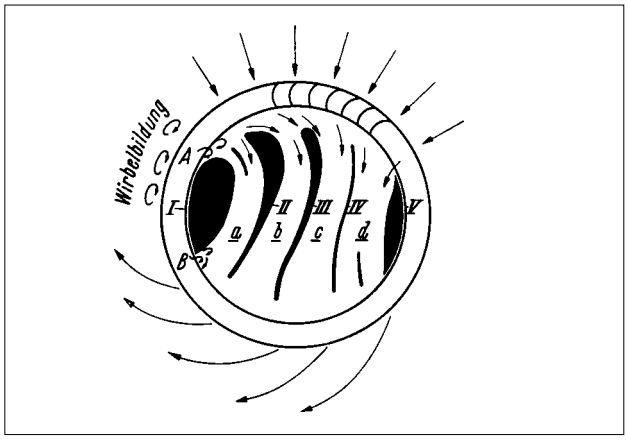
Figur 5.25
Beispiel des Kennlinienfeldes eines Axialventilators mit 6 (links) und 8 (rechts) verstellbaren Laufradschaufeln [5.4]

5.2.3 Querstromventilatoren

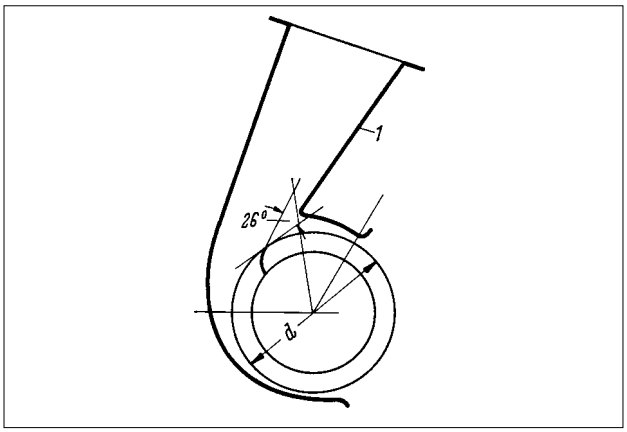
Querstromventilatoren gibt es in den folgenden zwei Ausführungsformen:

– Mit Innenleitrad (Figur 5.26).

– Ohne Innenleitanordnung aber mit speziell geformten Gehäusen (Figur 5.27).

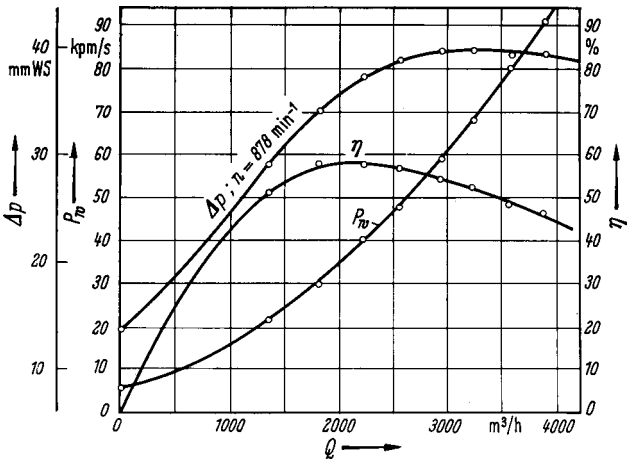


Figur 5.26
Querstromventilator mit Innenleitrad [5.2]



Figur 5.27
Querstromventilator mit Gehäuse [5.2]

Die Figur 5.28 zeigt ein Beispiel für die Kennlinien eines Querstromventilators mit Gehäuse.



Figur 5.28
Kennlinien für einen Querstromventilator mit Gehäuse [5.2]

Aufgrund des bescheidenen Wirkungsgrades von maximal etwa 60% und der zu Instabilität neigenden Kennlinie bleibt die Anwendung der Querstromventilatoren eng begrenzt. Typische Einsatzgebiete von Querstromventilatoren in der Gebäudetechnik sind:

- Induktionsgeräte
- Klimatruhen
- Türluftschleier

5.3 Gas-, Proportionalitäts- und Affinitätsgesetze

Grundsatz

- *Die Umrechnungsgesetze dienen der rechnerischen Voraussage, wenn aus der Nennkennlinie eines Ventilators auf andere Betriebsbedingung oder auf ähnliche Modelle (grössere oder kleinere) umgerechnet werden muss.*

5.3.1 Einfluss der Luftdichte

Die Angaben der Hersteller gelten immer für eine bestimmte Luftdichte, welche auf den Unterlagen vermerkt ist.

Änderungen der Luftdichte bei gleichbleibender Drehzahl (bzw. Änderung der absoluten Temperatur bei gleichem Fördermedium) haben keine Veränderung des Luftvolumenstroms zur Folge. Ventilatoren werden darum manchmal auch als Volumenstrommaschinen bezeichnet. Die Drücke (statisch, dynamisch, gesamt) und damit auch der Leistungsbedarf ändern sich proportional der Dichte.

V = konstant

$$\frac{\Delta p_1}{\Delta p_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{T_2}{T_1}$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{T_2}{T_1}$$

5.3.2 Proportionalitätsgesetze

Die Proportionalitätsgesetze kommen zur Anwendung, wenn die Drehzahl eines bestimmten Ventilators verändert wird.

Da die Geschwindigkeitsdreiecke aufgrund der gleichbleibenden Schaufelwinkel bei Drehzahländerungen proportional grösser oder kleiner werden, so ändert sich auch der Volumenstrom proportional. Weil sich der Druck aus $w^2 \cdot \rho/2$ berechnet, ändert sich die Druckerhöhung im Ventilator mit dem Quadrat des Volumenstroms, bzw. des Drehzahlverhältnisses. Entsprechend ändert sich der Leistungsbedarf proportional zur dritten Potenz des Drehzahlverhältnisses.

$$\frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^1$$

$$\frac{\Delta p_1}{\Delta p_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3$$

Beispiel

Ein Ventilator dreht mit 2000 min^{-1} und fördert nur 80 % des gewünschten Luftvolumenstroms. Auf welche Drehzahl muss er gebracht werden, um den Sollwert zu erreichen?

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

$$\Rightarrow n_2 = \frac{n_1 \cdot V_2}{V_1}$$

$$\underline{n_2} = \frac{2000 \cdot 100}{80} = \underline{2500\ min^{-1}}$$

Beispiel

Der Luftvolumenstrom eines Ventilators kann aufgrund einer besseren Einblastechnik in die Räume von 3600 m^3/h auf die Hälfte reduziert werden. Bei 3600 m^3/h hatte er bei einem Gesamtwirkungsgrad von 70% einen Gesamtdruck von 400 Pa aufzubringen. Es ist kein Gegendruck für Volumenstromregler oder ähnliches aufrecht zu erhalten.

$$P_1 = \frac{\Delta p_{ges} \cdot V}{\eta} = \frac{400 \cdot 3600}{0.7 \cdot 3600} = 571\ W$$

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{3600}{1800} = 2$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 = 2^3 = 8$$

$$\Rightarrow \underline{P_2} = \frac{P_1}{8} = \frac{571}{8} = \underline{71\ W}$$

Es wäre nun noch zu prüfen, ob der für den ersten Betriebspunkt gültige Ventilatorwirkungsgrad beim neuen Betriebspunkt noch zutrifft, oder ob eine Berücksichtigung des unterschiedlichen Wirkungsgrades notwendig ist. Diese Umrechnung würde wie folgt geschehen:

$$P_{2\,eff} = \frac{P_2 \cdot \eta_1}{\eta_2}$$

5.3.3 Affinitätsgesetze

Die Affinitätsgesetze kommen zur Anwendung, wenn ein Ventilator bei gleicher Drehzahl geometrisch ähnlich vergrössert oder verkleinert wird. Das heisst, wenn die Winkel gleich bleiben und alle Abmessungen mit einem konstanten Faktor verändert werden.

$$\frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^3$$

$$\frac{\Delta p_{ges1}}{\Delta p_{ges2}} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^5$$

Beispiel

Ein Ventilator mit dem Laufraddurchmesser d_1 = 315 mm fördert bei n = 1000 min^{-1} einen Volumenstrom von V_1 = 1500 m^3/h. Wie schnell müsste ein ähnlicher Ventilator mit dem Laufraddurchmesser d_2 = 250 mm laufen, um gleich viel zu fördern?

Nach dem Affinitätsgesetz:

$$\frac{V_1}{V_2'} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^3$$

$$\Rightarrow V_2' = \frac{V_1}{(d_1/d_2)^3}$$

$$V_2' = \frac{1500}{(315/250)^3} = 750\ m^3/h$$

Nach dem Proportionalitätsgesetz:

$$\frac{n_2'}{n_2} = \frac{V_2'}{V_2}$$

$$\Rightarrow n_2 = \frac{n_2'}{V_2'/V_2}$$

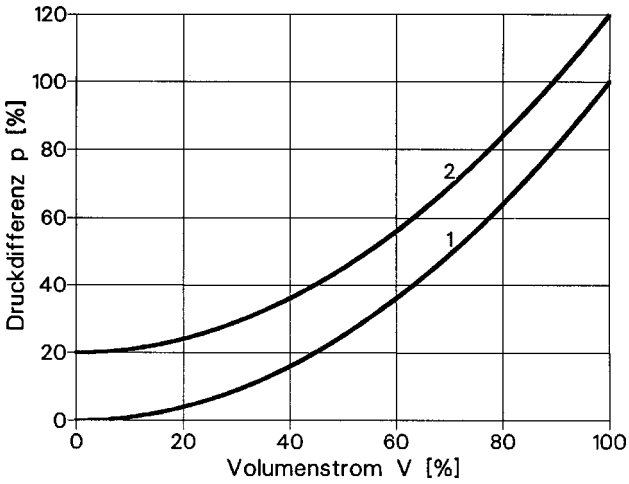
$$\underline{n_2} = \frac{1000}{750/1500} = \underline{2000\ min^{-1}}$$

5.4 Netzkennlinie und Betriebspunkt

Grundsatz

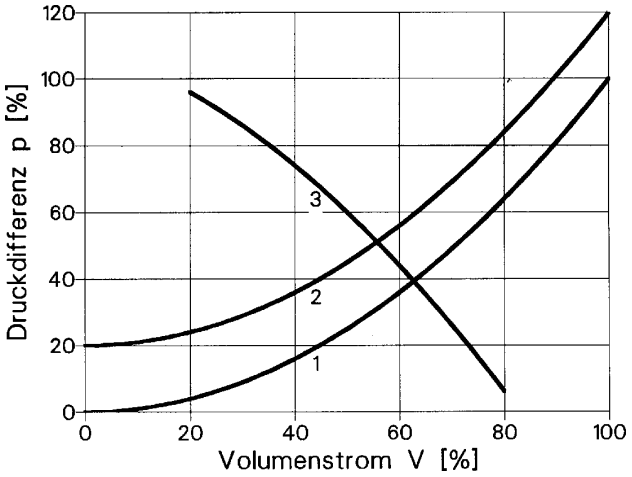
– *Die Festlegung des Betriebspunktes ist die Grundlage für das Verständnis der hydraulischen Zusammenhänge. Im Rahmen von RAVEL wird allerdings nur auf weiterführende Literatur hingewiesen.*

Der Druckverlust, der einem Luftvolumenstrom in einem bestimmten Kanalnetz entgegengesetzt wird, addiert sich aus allen Einzel- und Rohrwiderständen auf dem gesamten Luftweg. Die meisten dieser Widerstandselemente werden turbulent durchströmt und ändern ihren Widerstand proportional zum dynamischen Druck und somit im Quadrat zur Volumenstromänderung. Laminar durchströmte Einzelwiderstände mit einer linearen Abhängigkeit des Druckverlustes vom Luftvolumenstrom sind aufgrund der üblichen Geschwindigkeiten sehr selten. Sie kommen praktisch nur in Schwebstoffiltern vor, wo die Geschwindigkeiten im Filtervlies um 2 cm/s betragen.

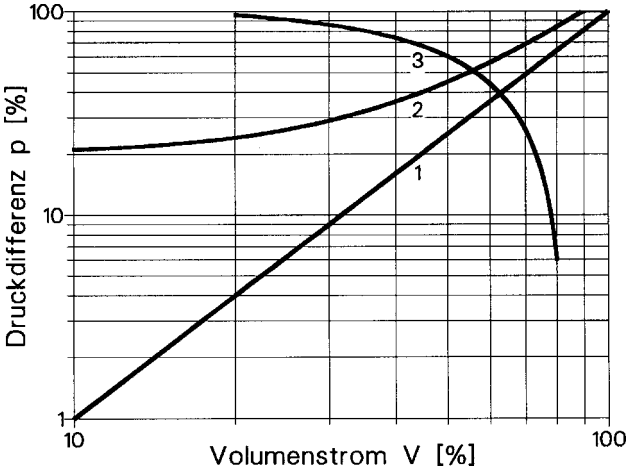


Figur 5.29
Netzkennlinie bei turbulenter Strömung
1: ohne Vordruck
2: mit konstantem Vordruck
(z.B. für selbsttätige Volumenstromregler)

Hat ein Ventilator seinen Volumenstrom durch ein Rohrnetz mit einer bestimmten Netzkennlinie zu fördern, so stellt sich der Betriebspunkt im Schnittpunkt von Ventilatorkennlinie und Netzkennlinie ein.



Figur 5.30
Betriebspunkt im Schnittpunkt von Ventilatorkennlinie und Netzkennlinie
1: Netzkennlinie ohne Vordruck
2: Netzkennlinie mit konstantem Vordruck
3: Ventilatorkennlinie



Figur 5.31
Betriebspunkt, Darstellung auf doppelt logarithmischem Papier

Eine differenzierte Darstellung verschiedenster Kombinationen von Netz- und Ventilatorkennlinien findet sich z.B. in [5.1, Kapitel 7.7].

5.5 Regelbarkeit

Grundsätze

Die Regelbarkeit spielt beim Sparen von elektrischer Energie eine sehr wichtige Rolle.

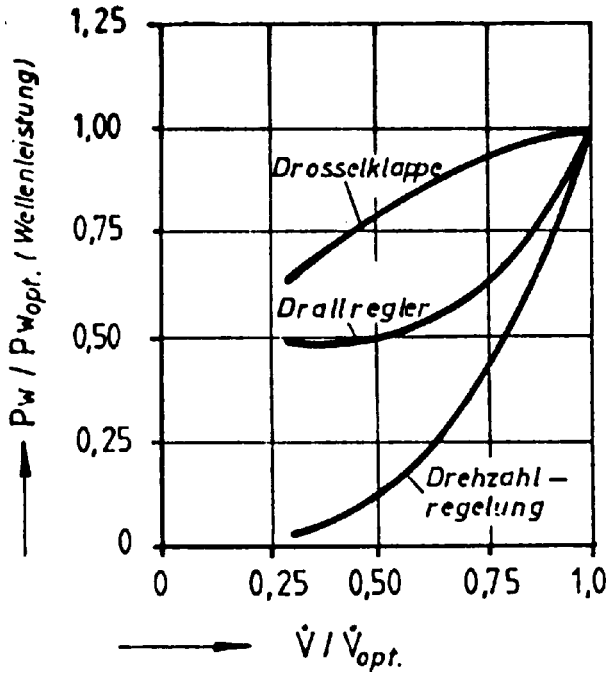
- *Die Bypassregelung muss vermieden werden.*
- *Die Drallregelung hat bei Radialventilatoren einen eng begrenzten Anwendungsbereich und wird wegen ihres mechanischen Aufwandes zunehmend von der Drehzahlregelung verdrängt.*
- *Die Drosselregelung hat bei kleinen Trommelläufer-Ventilatoren immer noch ihre Berechtigung.*
- *Die Drehzahlregelung ist für Ventilatoren die eleganteste Lösung.*

Bei modernen lüftungstechnischen Anlagen gibt es mehrere Gründe, um den Luftvolumenstrom in Stufen oder stufenlos zu variieren. Bei extremen Wetterbedingungen im Sommer und Winter ermöglicht eine bedarfsgerechte Anpassung des Luftvolumenstroms eine Reduktion des Energieverbrauchs für die Luftaufbereitung. Da sich gemäss Abschnitt 5.3.2 der Leistungsbedarf an der Welle des Ventilators proportional zur dritten Potenz des Drehzahlverhältnisses resp. des Luftvolumenstroms ändert, ist ein bedarfsgerechter Betrieb aber vor allem zur Reduktion des Energieverbrauchs für die Luftförderung von grosser Bedeutung.

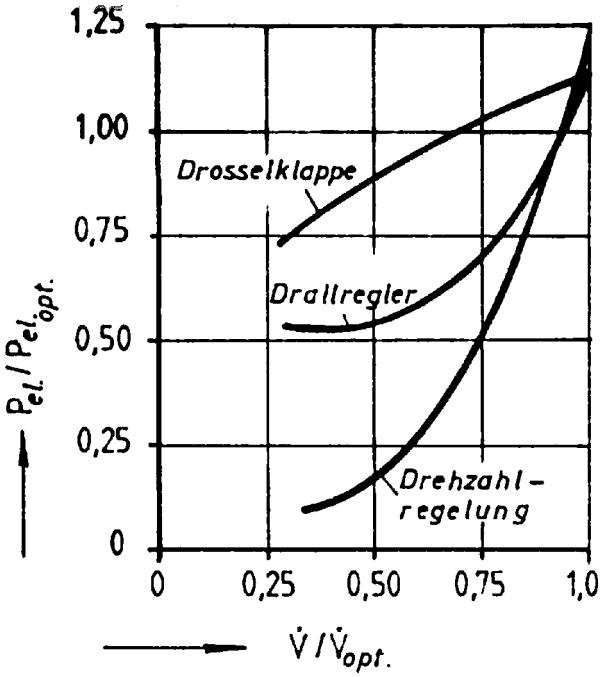
Für Radialventilatoren bieten sich folgende Regelverfahren an:

– Drehzahlregelung	• Verstellbare Keilriemenantriebe • Änderung der Motordrehzahl (Kapitel 6)
– Drallregelung	• Leitapparate für Eintrittswinkel
– Bypassregelung	• Kurzschlussklappe
– Drosselregelung	• Drosselklappe

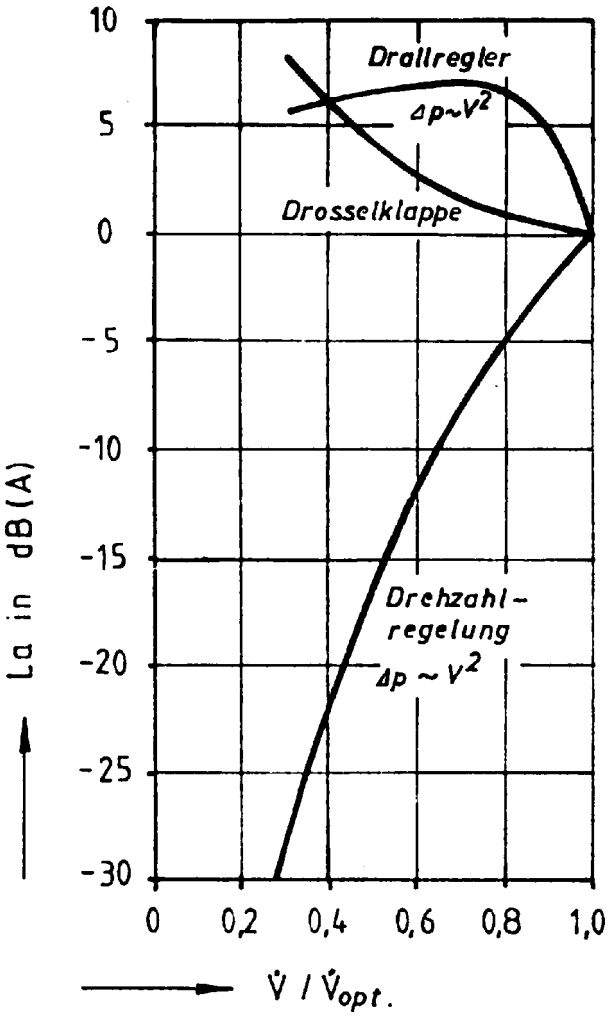
Für die rationelle Anwendung von elektrischer Energie interessiert nicht nur die erforderliche Antriebsleistung an der Ventilatorwelle, sondern die elektrische Leistung, die aus dem Netz bezogen wird. Die folgenden Figuren geben qualitativ einen Überblick über die Zusammenhänge. Die Betrachtung dieser Figuren zeigt, dass die Drehzahlregelung nicht nur Vorteile bezüglich Energieverbrauch sondern auch bezüglich Schallpegel aufweist.



Figur 5.32
Leistungsbedarf bei veränderlichem Volumenstrom [5.3]



Figur 5.33
Wirkleistungsaufnahme bei veränderlichem Volumenstrom [5.3]



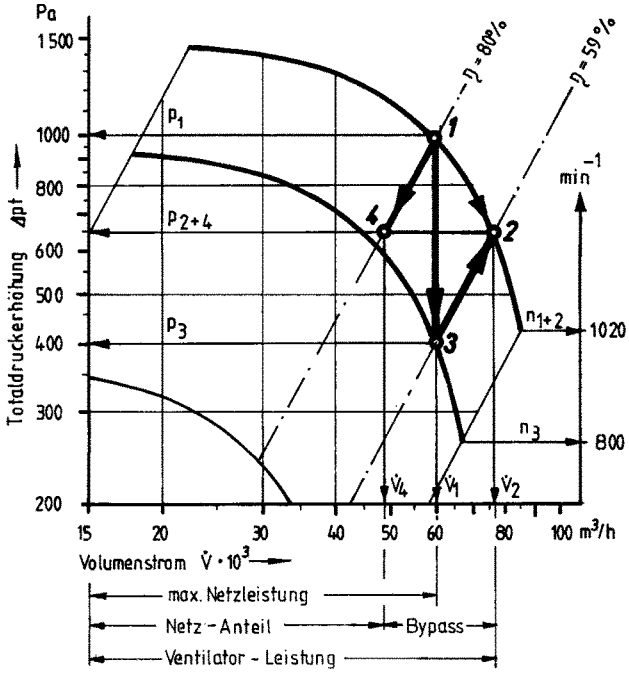
Figur 5.34
Schallpegel bei veränderlichem Volumenstrom [5.3]

Bypassregelung

Die Bypassregelung kann im Rahmen rationeller Anwendung von elektrischer Energie niemals zur Anwendung kommen. Während zwar der Luftvolumenstrom zum Netz reduziert werden kann, erhöht sich der Volumenstrom über dem Ventilator. Die Stromaufnahme kann dabei ganz erheblich ansteigen.

Im Beispiel von Figur 5.35 zeigt sich, dass durch das Öffnen des Bypassweges der Volumenstrom im Netz von 1 nach 4 (von 60 000 auf 48 000 m^3/h) zurückgeht und gleichzeitig der Ventilator aufgrund des abgesenkten Druckniveaus mehr Luft (76 000 m^3/h) fördert. Der Wirkungsgrad sinkt von 80% auf 59%. Als Resultat der Bypassregelung wird also weniger Luft gefördert und mehr Strom verbraucht!

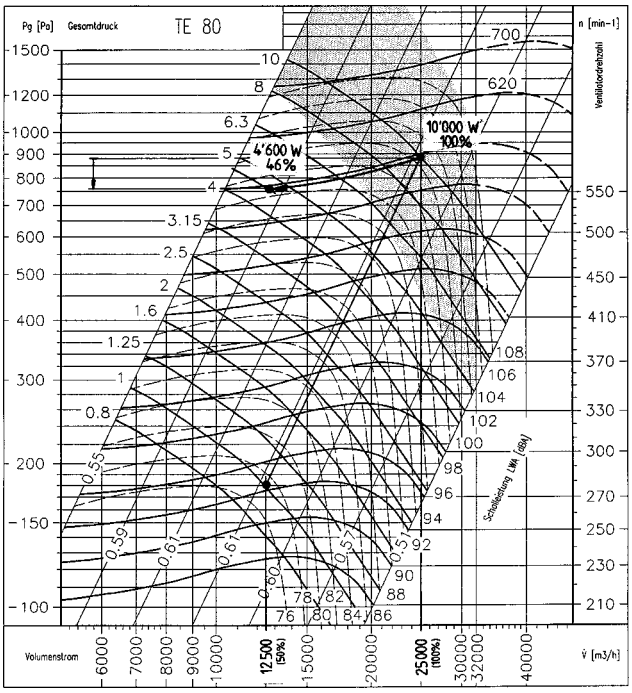
Bei Trommelläufern könnte es sogar vorkommen, dass sich der Betriebspunkt durch das Öffnen des Bypasses so verschiebt, dass ein grösserer Netzvolumenstrom resultiert.



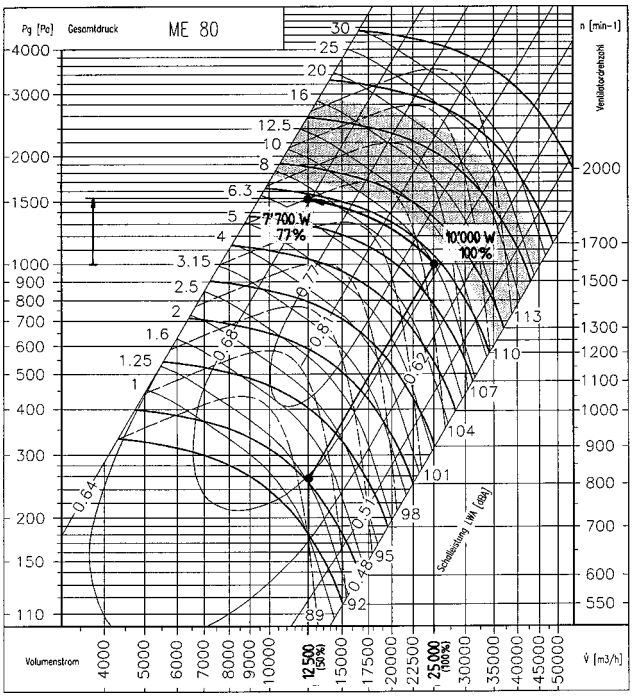
Figur 5.35
Beispiel einer Bypassregelung [5.3]

Drosselregelung

Bei kleinen Ventilatoren ist im konkreten Fall zu prüfen, wie sich die Leistungsaufnahme bei einer simplen Drosselung im vorgesehenen Volumenstrombereich verhält. Die Drosselregelung kann gegenüber der Drehzahlregelung evtl. energetisch besser sein, weil die Verluste der Drehzahlregelung bei kleinen Motoren und bei kleinen Abweichungen vom Nennluftstrom grösser sein können. Wenn bei kleineren Ventilatoren die Drosselregelung zur Anwendung kommen soll, so muss darauf geachtet werden, dass der häufigste Betriebspunkt in dem Bereich des optimalen Wirkungsgrades zu liegen kommt. Auf jeden Fall ist der maximale Volumenstrom wenn möglich rechts vom optimalen Wirkungsgradbereich zu wählen.
Die Figuren 5.36 und 5.37 zeigen, dass sich der Trommelläufer für die einfache Drosselregelung besser eignet als der Hochleistungs-Radialventilator, der im gedrosselten Zustand zwangsläufig unnötig Druckenergie vernichtet.



Figur 5.36
Drosselregelung bei einem Trommelläufer. Volumenstrom von 100 auf 50%, Leistungsaufnahme von 100 auf 46%

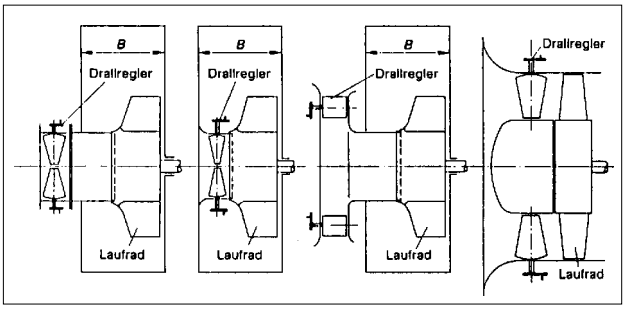


Figur 5.37
Drosselregelung bei einem Hochleistungs-Radialventilator. Volumenstrom von 100 auf 50%, Leistungsaufnahme von 100 auf 77%

Drallregelung

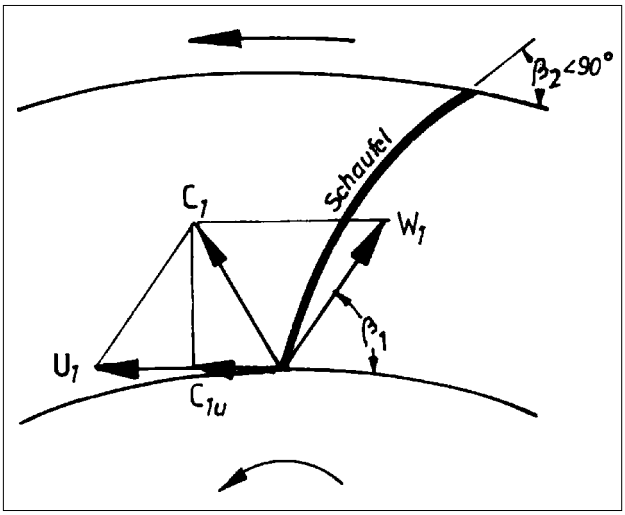
Ein wirtschaftliches Mittel, Volumenströme stufenlos auf etwa 2/3 des Maximalwertes zu reduzieren, besteht in der Drallregelung mit der Hilfe von verstellbaren Leitschaufeln. Je nach Anschlussart und Platzverhältnissen am Ansaugstutzen kann zwischen zwei axial durchströmten und einem radial durchströmten Leitapparat gewählt werden.

Bei Axialventilatoren wird der Drall auf das Laufrad entweder durch einen Leitapparat oder durch ein vorausgeschaltetes, erstes Laufrad erzeugt.

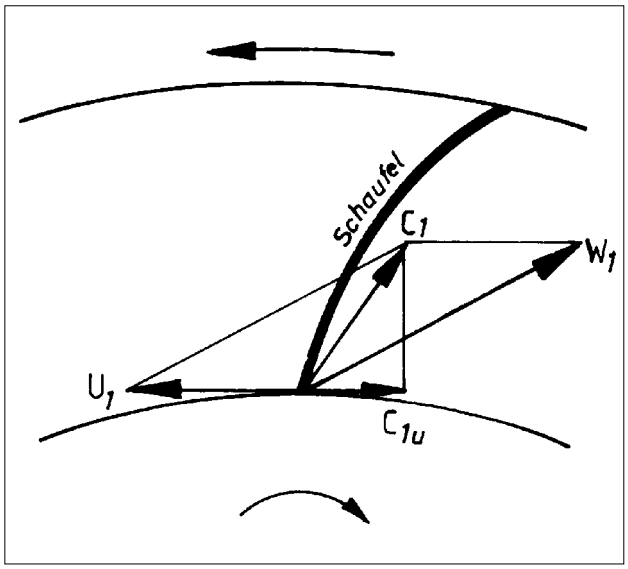


Figur 5.38
Verschiedene Drallregler [5.1]

Der Drallregler erzeugt am Laufradeintritt einen Drall und ändert damit die Lufteintrittsrichtung in den Schaufelkanal. Dabei kann ein Gleichdrall oder ein Gegendrall erzeugt werden.



Figur 5.39
Gleichdrall [5.3] (positives c_{1u}, Volumenstromverminderung)



Figur 5.40
Gegendrall (negatives c_{1u}, Volumenstromvergrösserung. Praktisch aber nur bei Axialventilatoren angewendet) [5.3]

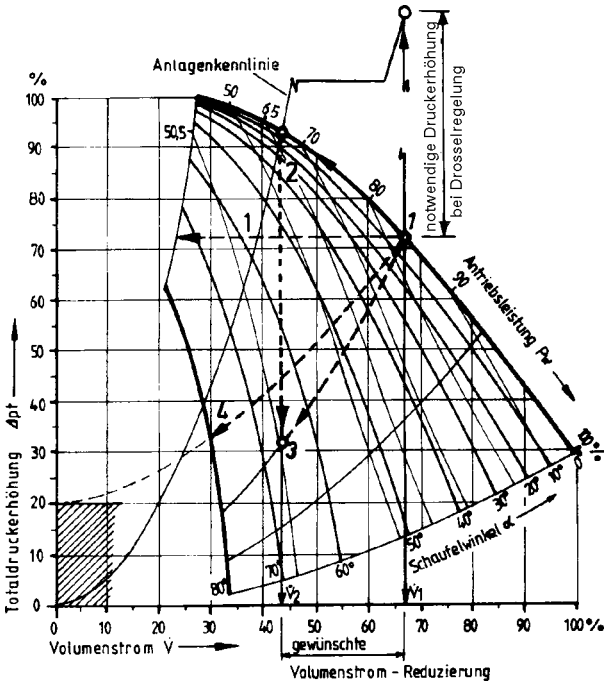
Drallregler sind nur für Hochleistungs-Radialventilatoren und für Axialventilatoren geeignet. Bei den relativ breiten Schaufelkanälen eines Trommelläufers würden sich starke dreidimensionale Sekundärströmungen mit den entsprechenden Verlusten und Instabilitäten ergeben.

Für jede Stellung der Leitschaufeln ergibt sich eine neue Ventilatorkennlinie, die unterhalb der Kennlinie bei völlig geöffnetem Regler liegt.

Abgesehen davon, dass sich die Betriebspunkte bei der Drallregelung im optimalen Wirkungsgradbereich bewegen, nehmen sowohl Volumenstrom wie auch Druckerhöhung im erwünschten Mass ab. Beides ganz im Gegensatz zur Drosselregelung.

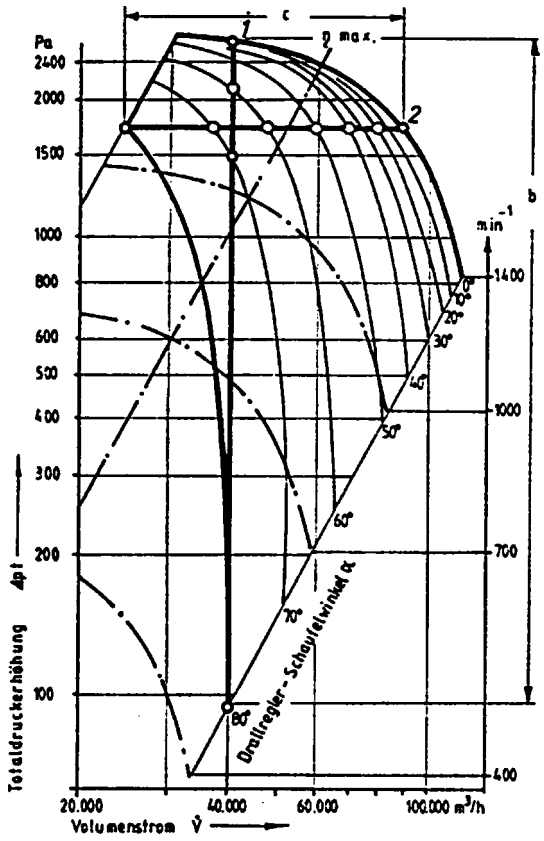
Die Figur 5.41 enthält ein Beispiel für die Wirkung einer Drall- und Drosselregelung zur Reduktion des Luftvolumenstroms auf ca. 2/3 des Ausgangswertes. Mit der Drallregelung verschiebt sich der Betriebspunkt von 1 nach 3, mit der Drosselregelung von 1 nach 2. Damit reduziert sich die Stromaufnahme bei der Drosselregelung nur auf ca. 70%, bei der Drallregelung auf ca. 50%.

Wenn bei konstantem Druck oder bei konstantem Volumenstrom geregelt werden muss, ist darauf



1 Betriebspunkt bei Nennvolumenstrom und Nenndruck
2 Betriebspunkt bei reduziertem Volumenstrom bei Drosselregelung
3 Betriebspunkt bei reduziertem Volumenstrom bei Drallregelung

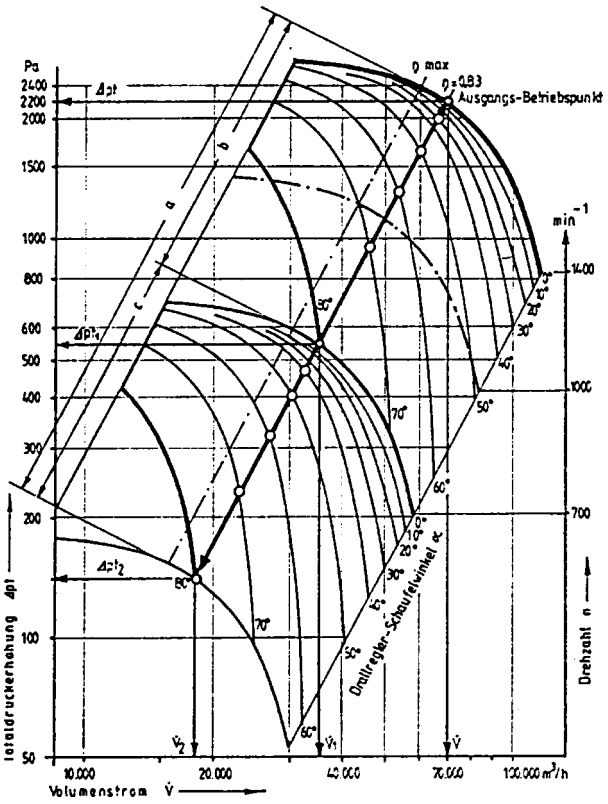
Figur 5.41
Drallregelung im Vergleich zur Drosselregelung [5.3]



Figur 5.42
Kontrolle der Betriebspunkte innerhalb des Regelbereichs [5.3]

zu achten, dass die häufigsten Betriebsfälle in den günstigsten Wirkungsgradbereich zu liegen kommen.

Wenn auf der Netzkennlinie geregelt werden soll, kann zur Erzielung eines grösseren Regelbereichs ein zweistufiger Ventilatormotor eingesetzt werden.

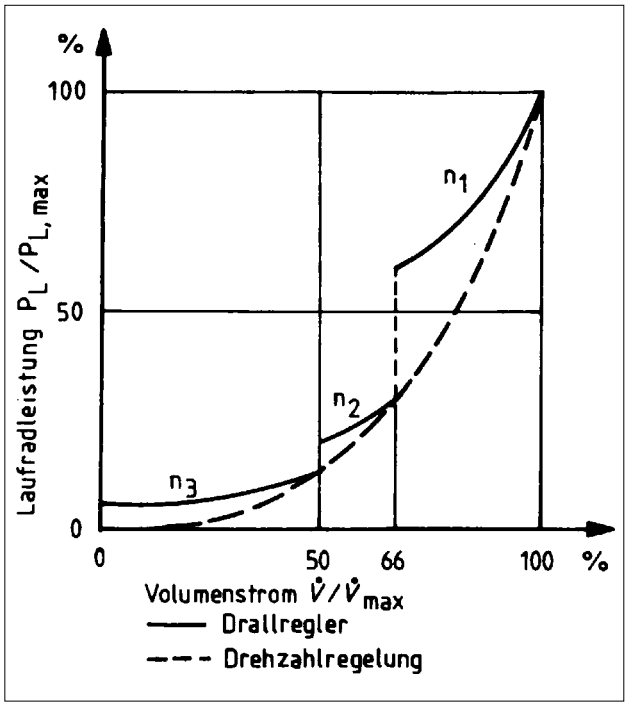


Figur 5.43
Kombination von Drehzahl- und Drallregelung [5.3]

Drehzahlregelung

Die für den Ventilator zweifellos eleganteste Lösung ist die Drehzahlregelung. Die bereits vollzogenen und noch zu erwartenden Fortschritte auf dem Gebiet der Motorregelung (siehe Kapitel 6) geben dem drehzahlgeregelten Ventilator die besten Zukunftschancen. Eine weitere Verbesserung kann durch den Verzicht auf den Riemenantrieb erreicht werden. Die Zukunft dürfte dem direkt auf der Motorwelle sitzenden Laufrad gehören, das gut abgedichtet in ein leichtgebautes Spiralgehäuse eingebaut wird, wobei jedoch darauf geachtet werden muss, dass das Gehäuse trotzdem schalltechnisch genügen kann. Beim Axialventilator ist diese Bauweise bereits gegeben.

Abschliessend ist in Figur 5.44 noch ein Vergleich des Leistungsbedarfs eines drehzahlgeregelten Ventilators mit dem Leistungsbedarf eines mehrstufigen drallgeregelten Ventilators angegeben.



Figur 5.44
Leistungsbedarf bei Drallregler in Kombination mit polumschaltbarem Motor im Vergleich zur Drehzahlregelung [5.1]

5.6 Verluste beim Einbau

Die Kennlinienfelder der Ventilatoren werden auf genormten Prüfständen ermittelt. Ein Ventilator überwindet die Druckverluste der Volumenstrom-Messgeräte. Der Prüfling wird so in das System eingebaut, dass er frei ansaugt und kontrolliert ausbläst.

Im praktischen Einsatz saugen und blasen die Ventilatoren immer in ein Kanalnetz oder in einen räumlich begrenzten Monoblocteil.

Der Verlust auf der Saug- und Druckseite kann mit Widerstandsbeiwerten aus der Literatur abgeschätzt werden. Bei vernünftigem Einbau liegen diese Werte, bezogen auf die Ansaug- und Ausblasquerschnitte, sowohl für Kanaleinbau wie in Monoblocs für Zu- und Abströmung zusammen um 1 bis 2.

Werden Ventilatoren direkt an Kanal- und Rohrsysteme angeschlossen, müssen die Übergänge sehr sorgfältig konstruiert werden, damit bessere Verhältnisse erzielt werden als bei einem Qualitätsmonobloc.

Literatur zu Abschnitt 5

[5.1] Arbeitskreis der Dozenten für Klimatechnik
Lehrbuch der Klimatechnik
Band 3, Bauelemente
Verlag C.F. Müller Karlsruhe, 2. Auflage
ISBN 3-7880-7207-5

[5.2] Bruno Eck
Ventilatoren
Springer-Verlag, 5. Auflage
ISBN 3-540-05600-9

[5.3] J. Lexis
Radialventilatoren in der Praxis
Gentner Verlag Stuttgart
ISBN 3-87247-278 x

[5.4] Novenco Variax
Tellus - Variable Pitch Axial Flow Fans
DK-4700 Naestved

[5.5] Paul Wirz AG
Ventilatorenbau
3000 Bern 22

[5.6] Recknagel, Sprenger, Hönmann
Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik
Verlag Oldenbourg, Ausgabe 1992/93
ISBN 3-486-26212-2

6 Antriebssysteme für Ventilatoren

6.1 Energieversorgung 101
6.1.1 Versorgungssicherheit 101
6.1.2 Frequenz und Spannung 101
6.1.3 Beeinträchtigung des Netzes 102

6.2 Elektromotoren (Drehstrom-Asynchronmotoren) 103
6.2.1 Bauarten 103
6.2.2 Normung 104
6.2.3 Allgemeine Eigenschaften der Käfigankermotoren 108

6.3 Leistungsmessung 113

6.4 Transmission 114

6.5 Drehzahlsteuerung 115
6.5.1 Änderung der Polpaarzahl 115
6.5.2 Änderung des Schlupfes 117
6.5.3 Thyristorsteuerung 117
6.5.4 Frequenzsteuerung 117
6.5.5 Veränderung des Wirkungsgrades 119

6.6 Explosionsschutz 120

6.7 Akustik 120

Literatur zu Abschnitt 6 121

6 Antriebssysteme für Ventilatoren

Im Sinne der geforderten integralen Betrachtungsweise wird in der vorliegenden Dokumentation das Antriebssystem für die Ventilatoren als Kombination aus
– Energieversorgung,
– Antriebsmaschine und
– Transmission
verstanden.

In der Lüftungstechnik werden für den Antrieb der Ventilatoren praktisch ausschliesslich elektrische Motoren verwendet. Entsprechend interessiert hier unter dem Stichwort Energieversorgung die Situation bezüglich der elektrischen Energie.

Aufgrund der Tatsache, dass schon heute der überwiegende Teil aller Elektroantriebe als Induktionsmotoren verwendet wird, konzentrieren sich die nachfolgenden Betrachtungen auf Induktionsmotoren der Bauart Drehstrom-Asynchronmotor im Leistungsbereich zwischen 100 W und 100 kW.

Dem Stichwort Transmission kommt in jüngster Zeit erneut erhöhte Bedeutung zu, da einerseits ein gewisser Trend von den heute sehr weit verbreiteten Keilriemenantrieben in Richtung Flachriemenantriebe festzustellen ist und andererseits bei konsequenter Anwendung der motorseitigen Leistungssteuerung die Forderung nach direkter Wellenkupplung nicht ausbleiben kann.

Auf jeden Fall muss das Antriebssystem stets in Kombination mit der Arbeitsmaschine und ihrer allfälligen Leistungssteuerung im Netzwerk der hydraulischen Anlage und deren Ausrichtung auf den praktischen Betrieb gesehen werden.

Eine optimale Nutzung der elektrischen Energie basiert auf dem idealen Zusammenwirken dieser Komponenten.

6.1 Energieversorgung

Wie bereits eingangs erwähnt, werden Arbeitsmaschinen zur Förderung von Luftvolumenströmen in den allermeisten Fällen durch Asynchronmotoren mit Käfigläufer angetrieben und demzufolge mit elektrischem Drehstrom versorgt.

Zur Beschreibung der Stromerzeugung, des Transportes und der Transformation auf die Gebrauchsspannung für Antriebsmaschinen in der Haustechnik ist an dieser Stelle weder Platz noch Bedarf. Unsere Schnittstelle ist das Niederspannungsnetz, unter Umständen ersetzt durch das Notstromaggregat oder ein hauseigenes Blockheizkraftwerk (BHKW).

6.1.1 Versorgungssicherheit

Die Versorgungssicherheit ab Netz ist in nicht allzu abgelegenen Gegenden der Schweiz genügend hoch, so dass für Lüftungsanlagen kaum je eine Notstromanlage gefordert wird. Langjährige Beobachtungen am Universitätsspital Zürich haben beispielsweise ergeben, dass Stromausfälle an Motorklemmen der Lüftungsanlagen zu mehr als 90% auf Pannen zwischen der hauseigenen Trafostation und der Motorklemme zurückzuführen sind. Aus diesem Grund werden selbst Lüftungsanlagen für Operationsräume und Intensivpflegestation nicht an Notnetze geschaltet.

Selbstverständlich muss ein Konzept für das Verhalten während geplanten Netzausfällen, z.B. während Notstromversuchen, vorhanden sein. In besonders heiklen Fällen (z.B. Sterilpflege) werden nur minimale Schutzdruckfunktionen aufrechterhalten.

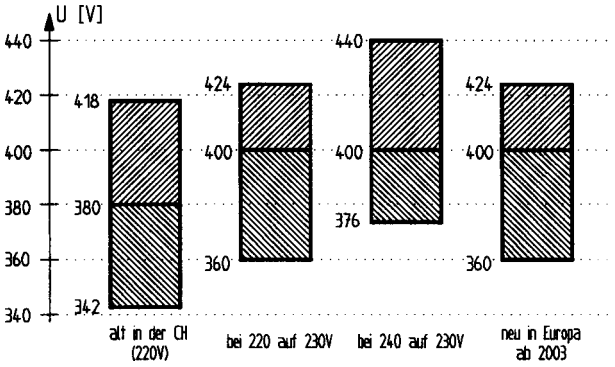
Bevor die Forderung nach einem Notstromnetz durch den Lüftungsplaner erhoben wird, sollte eine sorgfältige Analyse der Folgen eines längeren Netzausfalls, unter Berücksichtigung aller dämpfenden Einflüsse und aller zumutbaren betrieblichen Massnahmen, vorgenommen werden.

Für entlegene Gegenden geben die Elektrizitätswerke Auskunft über Häufigkeit und Zeitdauer der vorgekommenen Netzausfälle.

6.1.2 Frequenz und Spannung

Zurzeit bereitet sich die Schweiz auf die für Europa beschlossene Umstellung der Netzspannung vor.

Die heute noch gebräuchlichen Spannungen und die neu genormte Eurospannung sind in der Figur 6.1 zusammengestellt.



Figur 6.1
Anpassung der Spannung in Europa auf 230/400 V 50 Hz

Beim Betrieb eines Motors am unteren Rand der Netzspannungstoleranz ergeben sich die folgenden Konsequenzen:

Negativ Der Schlupf wird grösser
Die Drehzahl wird kleiner
Die thermische Überlastungsgefahr steigt
Der Wirkungsgrad fällt

Neutral Das Anlaufmoment sinkt

Positiv Der Cosinus phi steigt
Der Anlaufstrom sinkt

Für den Einfluss der Netzspannung auf die Wirkleistung gilt:

$$P = P_N \left(\frac{U}{U_N}\right)^a$$

P Wirkleistungen bei U
P_N Nennwirkleistung bei U_N
U Tatsächliche Spannung
U_N Nennspannung
a Exponent des Spannungseinflusses

Bei Motoren ist der Exponent a = 0. Eine Änderung der Spannung hat bei Motoren also keinen Einfluss auf die Wirkleistung. Im Gegensatz dazu erreicht der Exponent z.B. bei Glühlampen einen Wert von a = 1.6, bei Wärmegeräten von a = 2.0.

Für die Elektrizitätswerte wirkt sich die Erhöhung der Netzspannung günstig aus, da diese eine geringe Reduktion der Übertragungsverluste und damit eine Verbesserung der Übertragungsfähigkeit bestehender Netze bewirkt.

Achtung: Ungeregelte Elektroheizungen und Elektrolufterhitzer verbrauchen bei der oberen Grenzspannung über 20% mehr Strom.

Die Frequenz des Drehstromes beträgt in unseren Netzen 50 Hz, während die Normfrequenz in den USA und in Kanada 60 Hz beträgt. Im osteuropäischen Raum wird ebenfalls mit 50 Hz gearbeitet.

Diese unterschiedlichen Voraussetzungen haben zur Folge, dass Motoren mit gleicher Polzahl bei 60 Hz entsprechend schneller drehen und bei gleichem Drehmoment über die höhere Drehzahl eine höhere Leistung abgeben.

Da der Leistungsbedarf von Strömungsmaschinen bei hoher Drehzahl stärker ansteigt als die mögliche Leistungsabgabe des Motors, können Probleme auftreten. Im umgekehrten Fall wäre eine Minderleistung im Förderstrom die Folge.

6.1.3 Beeinträchtigung des Netzes

In den Kapiteln 6.5.3 «Thyristorsteuerung» und 6.5.4 «Frequenzsteuerung» wird auf das Thema der störenden Oberschwingungen eingegangen.

Für kleine Antriebe, bei welchen aus Gründen der Einsparung vorzugsweise einphasige Wechselstrommotoren gewählt werden, muss im Netz auf einen Ausgleich unter den drei Phasen geachtet werden.

6.2 Elektromotoren (Drehstrom-Asynchron-motoren)

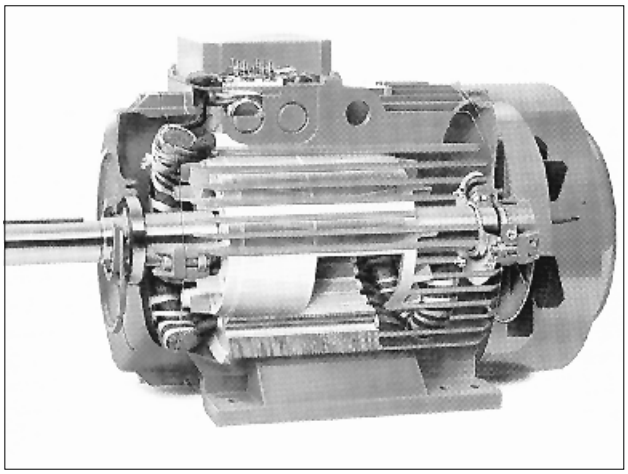
Grundsätze

- *Trotz guter Qualität weisen die relativ kleinen Motoren für Ventilatorantriebe bescheidene Wirkungsgrade um 80 bis 90% auf.*
- *Die hauptsächlich bei Aussenläufern verwendeten Spaltpolmotoren und die Kollektormotoren liegen deutlich tiefer, bei 30 bis 50%.*
- *An der IHS 1993 wurden neue elektronisch kommutierte (EC)-Aussenläufermotoren vorgestellt, die eine deutliche Verbesserung versprechen (insbesondere im Zusammenhang mit der dazu passenden Drehzahlsteuerung).*
- *Die Normung ist im Sinne von RAVEL ungenügend. Es fehlt eine Deklarationspflicht für die Wirkungsgrade über einen breiten Drehzahl- und Teillastbereich.*

6.2.1 Bauarten

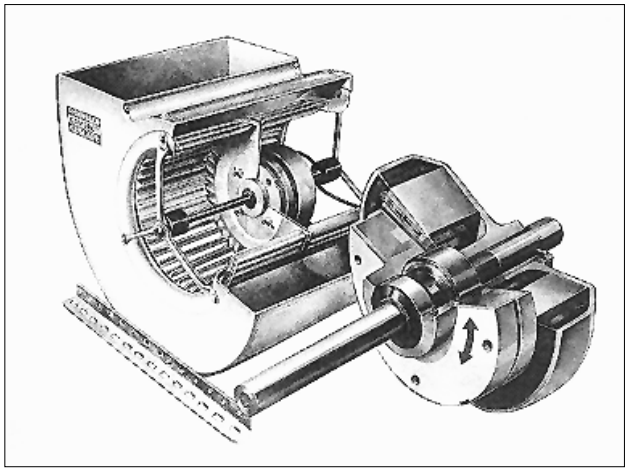
Beim Käfiganker- oder Käfigläufermotor (als Drehstrom- oder Einphasenmotor) besteht der Rotor aus einem genuteten Zylinderblechkörper, in welchem Stäbe liegen, die stirnseitig zu einem geschlossenen Käfig verbunden sind. Damit an der Welle ein Drehmoment entstehen kann, muss der Motor dem Statorfeld nacheilen, d.h. asynchron drehen.

Eine grosszügige Bemessung der Komponenten im Stator erhöht den Wirkungsgrad des Motors.



Figur 6.2
Röntgenzeichnung eines geschlossenen Käfigläufer-Drehstrommotors [6.2]
(Schutzart IP 54.862021)

Im Ventilatorbau sind Aussenläufermotoren stark verbreitet. Die Statorwicklung ist im engen Kern des Motors untergebracht, was in der Regel zu knapperen Kupferwicklungen führt. Der Motor dreht um den Kern herum. Konstruktiv ergibt sich der Vorteil, dass das Laufrad direkt auf dem Motor befestigt werden kann. Der Wegfall des verlustbehafteten Riementriebes führte zwecks Drehzahlanpassung zur weiten Verbreitung der verlustreichen und zudem störungsbehafteten Schlupfsteuerung mittels Spannungsreduktion.



Figur 6.3
Kompaktventilator mit Schlupfsteuerung

Neue Entwicklungen von permanent erregten Aussenläufermotoren (mit Permanentmagneten am Läufer) lassen allerdings aufhorchen. An der IHS 93 wurden verschiedene Ventilatorbauformen (axial, tangential, radial) mit solchen Motoren vorgestellt. Die technischen Unterlagen sollen ab Frühjahr 94 verfügbar sein.

6.2.2 Normung

Bezogen auf unser Land sind zwei internationale Organe mit der Herausgabe von Motornormen beschäftigt, nämlich die IEC (Internationale Elektrotechnische Kommission) und die CENELEC als westeuropäisches Gremium. Nationale Normen entsprechen in Europa in zunehmendem Mass der CENELEC und IEC.

Die Einhaltung der Normen stellt sicher, dass IEC-Motoren untereinander bezüglich Anbauabmessungen und Leistungsdaten austauschbar sind.

Bezüglich der elektrischen Betriebsdaten wie Wirkungsgrad, Leistungsfaktor (cos phi) und Höhe der Drehmomente und des Schlupfes, bestehen noch keine genormten Grenzwerte. Der herrschende Wettbewerb sorgt zwar für eine gewisse Normung, ein klarer Trend zu höheren Wirkungsgraden macht sich allerdings noch zu wenig stark bemerkbar.

Der Streubereich zwischen guten und weniger guten Wirkungsgraden liegt bei Motoren, die heute auf dem Schweizermarkt angeboten werden, für einen 55-kW-4-Pol-Motor beispielsweise zwischen 85% und 94%. Sehr gute Wirkungsgrade könnten für grössere Serien-Normmotoren in nächster Zukunft bei 95% liegen.

Generell schlechter im Wirkungsgrad sind Spaltpol- und Kollektormotoren. Zu dieser Gruppe gehören die weitverbreiteten Aussenläufermotoren. Aus den Lieferantenunterlagen sind die Wirkungsgrade zwar nicht direkt ablesbar. Man kann aber davon ausgehen, dass die Gesamtwirkungsgrade für Motor und Ventilator trotz Wegfall der Keilriemenverluste lediglich bei etwa 10 bis 15% liegen.

Um die Wirkungsgrade zu steigern, sind Anstrengungen notwendig, damit es zu einer allgemeinen Deklarationspflicht der wichtigsten elektrotechnischen Daten für Motoren und ihren allfälligen Leistungsregulierungen kommt. Dabei sind auch die Wirkungsgrade im Teillastbereich von grossem Interesse. Diesbezügliche Regelungen werden zur Zeit im Rahmen des Energienutzungsbeschlusses des Bundes erarbeitet.

6.2.2.1 Grösse, Nennleistungsstufen und Schutzart

Die Grösse des Normmotors einer bestimmten Bauart, die Polzahl und die Nennleistung, sind durch die Achshöhe und einen Zusatzbuchstaben (S, M oder L), sowie durch die Angabe der Schutzart bestimmt.

Grösse Achshöhe [mm]	Nennleistung [kW] Käfigläufermotoren	
	IP 54	IP 23
56	0,06	
56	0,09	
63	0,12	
63	0,18	
71	0,25	
71	0,37	
80	0,55	
80	0,75	
90S	1,1	
90L	1,5	
100L	2,2	
100L	3	
112M	4	
132S	5,5	
132M	7,5	
160M	11	11
160L	15	15
160L	–	18,5
180M	18,5	22
180L	22	30
200M	–	–
200L	30	37
225S	37	45
225M	45	55

Tabelle 6.1
Kenngrössen von 4poligen Normmotoren [6.2]

Die Schutzart ist gemäss IEC-Publikation 34-5 mit der Bezeichnung IP (International Protection), gefolgt von zwei Kennziffern, z.B. IP 54, angegeben.

– Die erste Kennziffer steht für den Berührungs- und Fremdkörperschutz.

– Die zweite Kennziffer gibt über den Schutz gegen Wasser Auskunft.

Die in der Haustechnik gebräuchlichen Schutzarten sind in der Tabelle 6.2 gekürzt zusammengestellt.

Motor	Schutz-art	1. Kennziffer Berührungs-schutz	Fremdkörper-schutz	2. Kennziffer Wasserschutz
Innen–gekühlt	IP 21	Berührung mit den Fingern	mittelgrosse, feste Fremd-köper mit d>12 mm	senkrechtes Tropf-wasser
	IP 22			Tropfwasser bis 15° zur Senkrechten
	IP 23			Sprühwasser bis 60° zur Senkrechten
Ober–flächen gekühlt	IP 44	Berührung mit Werk-zeug oder ähnlichem	klein, feste Fremdkörper mit d > 1 mm	Spritzwasser aus allen Richtungen
	IP 54	vollständiger Schutz gegen Berührung	schädliche Staubablage–rungen	Spritzwasser aus allen Richtungen
	IP 55			Strahlwasser aus allen Richtungen
	IP 65	vollständiger Schutz gegen Berührung	Schutz gegen Eindringen von Staub	Strahlwasser aus allen Richtungen
	IP 67			Motor unter festgelegten Druck- und Zeit-bedingungen unter Wasser

Tabelle 6.2 Schutzarten von Motoren

6.2.2.2 Kühlungsart, Isolierstoffklassen und Wahl der Motorgrösse

Die notwendige Kühlungsart und die zulässige Belastung hängen von der verwendeten Isolierstoffklasse und von den äusseren Kühlparametern wie Aufstellungshöhe und Umgebungstemperatur ab.

Die Kühlungsart wird durch die beiden Buchstaben IC (für Internal Cooling) und zwei folgende ein- oder zweistellige Ziffern definiert.

Die Tabelle 6.3 enthält einige Beispiele für die Kennzeichnung der Kühlungsart von Motoren mit nur einem Kühlkreis. Die Kennziffern haben folgende Bedeutung:
– Die erste Kennziffer beschreibt die Art des Kühlmittelumlaufs.
– Die zweite Kennziffer beschreibt die Art des Antriebs für die Bewegung des Kühlmittels.

Kenn-zeichen	Kurze Beschreibung
IC 01	Maschine mit freiem Luftein- und -austritt, Eigenkühlung
IC 06	Maschine mit freiem Luftein- und -austritt, Fremdkühlung durch an die Maschine angebauten, nicht von dieser angetriebenen Lüfter
IC 11	Maschine mit Rohranschluss, ein Einlasskanal, Eigenkühlung
IC 17	Maschine mit Rohranschluss, ein Einlasskanal, nicht von der Maschine angetriebener, getrennter Lüfter
IC 21	Maschine mit Rohranschluss, ein Auslass-kanal, Eigenkühlung
IC 27	Maschine mit Rohranschluss, ein Auslass-kanal, nicht von der Maschine angetriebener, getrennter Lüfter
IC 31	Maschine mit Rohranschluss, Ein- und Aus-lasskanal, Eigenkühlung
IC 37	Maschine mit Rohranschluss, Ein- und Aus-lasskanal, nicht von der Maschine an-getriebener, getrennter Lüfter
IC 41	Oberflächenkühlung, Eigenkühlung
IC 51	Maschine mit eingebautem, durch Umge-bungsluft gekühltem Wärmeaustauscher, Ei-genkühlung

Tabelle 6.3 Kennzeichnung der Kühlungsart von Motoren mit einem Kühlkreislauf

Für Motoren mit zwei Kühlkreisläufen wird die Kennzeichnung etwas aufwendiger. Einige Beispiele dazu sind in Tabelle 6.4 zusammengestellt. Die Kennziffern haben folgende Bedeutung:

– Die erste Kurzzeichengruppe mit einem Buchstaben und zwei Ziffern gibt den äusseren, sekundären Kühlkreis mit niedriger Temperatur an.

– Die zweite Kurzzeichengruppe, die ebenfalls aus einem Buchstaben und zwei Ziffern besteht, gibt den inneren primären Kühlkreis mit höherer Temperatur an. Der Buchstabe A bezeichnet Luft und der Buchstabe W Wasser. Wenn nur Luft als Kühlmittel vorkommt, kann das A weggelassen werden.

Kennzeichen	Kurze Beschreibung
IC 00 41	Oberflächengekühlte Maschine ohne Lüfter
IC 01 51	Eingebauter Wärmeaustauscher, gekühlt durch Umgebungsluft, Eigenkühlung
IC 06 41	Oberflächengekühlte Maschine mit aufgebautem, nicht von der Maschinenwelle angetriebenem Lüfter
IC W 37 A 71	Luftgekühlte Maschine mit eingebautem, wassergekühltem Wärmetauscher
IC W 37 A 81	Geschlossene Maschine mit Luft-Wasser-Kühlung, austauschbarer Wasserkühler (Kassettentyp)
IC W 37 A 75	Maschine mit innerer Luftumwälzung durch nicht von der Maschinenwelle angetriebenen Lüfter und mit eingebautem, wassergekühltem Wärmeaustauscher

Tabelle 6.4
Kennzeichnung der Kühlungsart von Motoren mit zwei Kühlkreisläufen

Motoren in Standardausführung sind für den Betrieb bei Umgebungstemperaturen von höchstens 40 °C und einer grössten Aufstellungshöhe von 1000 m ü.M. vorgesehen. Abweichungen davon machen Korrekturen der Nennleistung nötig.

Bei Kühlmitteltemperaturen die von 40 °C abweichen, muss die Motorleistung für die meist verwendeten Isolierstoffklassen B und F nach IEC 85 (auf dem Typenschild angegeben) gegenüber der Nennleistung wie folgt umgerechnet werden:

$$P_M = c_t \cdot P_N$$

P_M Motorleistung bei der Kühlmitteltemperatur t

P_N Nennleistung des Motors bei der Kühlmitteltemperatur 40 °C

c_t Korrekturfaktor für die Kühlmitteltemperatur t nach Tabelle 6.5

Kühlmitteltemperatur t [°C]	Korrekturfaktor c_t bei der Isolierstoffklasse B	F
30	1,06	1,05
35	1,03	1,02
40	1,00	1,00
45	0,96	0,97
50	0,92	0,94
55	0,87	0,91
60	0,82	0,87

Tabelle 6.5
Faktor c_t für die Leistungsanpassung bei der Kühlmitteltemperatur t
(Aufstellungshöhe 1000 m ü.M.)

Bei Aufstellungshöhen > 1000 m ü.M. und bei gleichbleibender Kühlmitteltemperatur t = 40 °C ist die Motorleistung zu reduzieren.

$$P_M = c_H \cdot P_N$$

P_M Motorleistung bei der Aufstellungshöhe H

P_N Nennleistung des Motors auf 1000 m ü.M.

c_H Faktor für die Aufstellungshöhe H nach Tabelle 6.6

Aufstellungs-höhe H [m ü.M.]	Korrekturfaktor c_H bei der Isolierstoffklasse B	F
1000	1,00	1,00
1500	0,98	0,98
2000	0,97	0,97
2500	0,93	0,94
3000	0,92	0,93
3500	0,83	0,90
4000	0,78	0,88

Tabelle 6.6
Faktor c_H für die Leistungsreduktion bei der Aufstellungshöhe H (Kühlmitteltemperatur 40 °C)

Kann das infolge der Aufstellungshöhe verminderte Kühlvermögen durch eine tiefere Kühlmitteltemperatur ausgeglichen werden, so ist die Leistungsreduktion infolge der Aufstellungshöhe kleiner. Für die Ausnützung der vollen Nennleistung des Motors (c_H = 1) dürfen die Kühlmittel-Eintrittstemperaturen die Grenzwerte in der folgenden Tabelle nicht überschreiten.

Aufstellungs–höhe H [m ü.M.]	Maximal zulässige Kühlmitteltemperatur t [°C] bei der Isolierstoffklasse B	F
1000	40	40
1500	36	35
2000	32	30
2500	28	25
3000	24	20
3500	20	15
4000	16	10

Tabelle 6.7
Maximal zulässige Kühlmitteltemperatur je nach Aufstellungshöhe H für volle Nennleistung (c_H = 1)

Wenn der Leistungsbedarf P_L einer Arbeitsmaschine bekannt ist, kann die erforderliche Motornennleistung P_N je nach Aufstellungshöhe, maximal vorkommender Kühllufttemperatur und vorgeschriebener Isolierstoffklasse wie folgt bestimmt werden:

$$P_N = \frac{P_L}{c_t \cdot c_H}$$

P_N Nennleistung des Motors

P_L Leistungsbedarf

c_t Korrekturfaktor nach Tabelle 6.5

c_H Korrekturfaktor nach Tabelle 6.6

Bei der Wahl der Motorgrösse ist weiter zu bedenken, dass es der Leistungsbedarf der Arbeitsmaschine ist, der die Leistungsabgabe der Antriebsmaschine und somit auch vom Netz (und eines allfälligen Umformers) bestimmt.

Wenn beispielsweise ein Ventilator 12 kW fordert, wird diese Leistung vom Motor abgegeben, und zwar unabhängig davon, ob er für 10 oder für 15 kW vorgesehen ist. Ein 10-kW-Motor würde beim Betrieb auf 1000 m ü.M. mit 40 °C Umgebungstemperatur also ständig mit 20% überlastet.

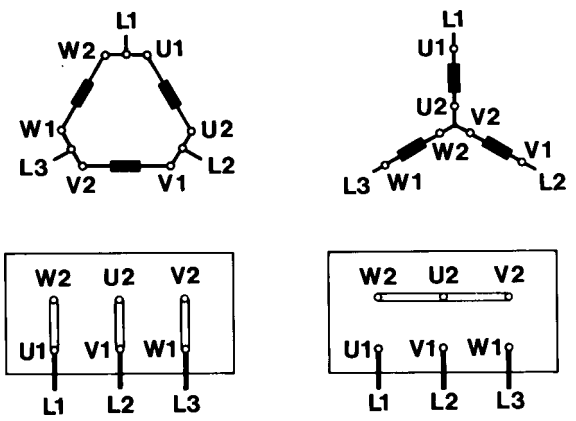
Die direkte Folge einer Überbelastung des Motors ist ein Ansteigen der Wicklungstemperatur über einen Grenzwert, der für den jeweiligen Isolierstoff noch eine zufriedenstellende Lebensdauer sicherstellt (30 000 h). Überschreitungen der Grenztemperatur um 8–10 K verkürzen die Lebensdauer der Isolierung um ungefähr die Hälfte. 20 Kelvin Übertemperatur bedeuten eine Einbusse von 75%.

Eine Steigerung der Lebensdauer um den Faktor 4 kann erzielt werden, wenn der gleich grosse Motor mit der Isolierstoffklasse F anstelle von B ausgerüstet wird.

6.2.2.3 Anschlusskennzeichnung

In der IEC-Publikation 34-8 sind die Grundlagen für die Anschlusskennzeichnung genormt.

Wenn das Leistungsschild eines Drehstrommotors Spannungen für sowohl Stern- als auch Dreieckschaltung angibt, bedeutet dies, dass der Motor für z.B. 230 V und auch für 400 V eingesetzt werden kann. Für 230 V wird die Wicklung im Dreieck geschaltet, indem man die Schaltlaschen gemäss dem linken Bild in Figur 6.4 anbringt. Für 400 V Anschlussspannung wird die Sternschaltung verwendet. Die Schaltlaschen sind dann gemäss dem rechten Bild angeordnet.



links: Dreieckschaltung, 230 V
rechts: Sternschaltung, 400 V

Figur 6.4
Aussehen von Wicklung und Klemmenbrett bei Dreieck- und Sternschaltung

Motor°3°⁻	50/60Hz	IEC°34-1
MBT°112°M		2860/3460r/min
4/4.6°kW	Cl.F	cos°φ°=°0.90
380-420/440-480V°Y		8.1/8.1A
220-240/250-280V°˘		14.0/14.0A
No.°MK°142031-AS	IP°55	30kg

Figur 6.5
Beispiel eines Typenschildes

Aus den Angaben auf dem Typenschild kann der Wirkungsgrad bei Nennleistung wie folgt berechnet werden:

$$\eta = \frac{\mathbf{P}}{\sqrt{\mathbf{3}} \cdot \mathbf{U} \cdot \mathbf{I} \cdot \mathbf{cos}\varphi}$$

η Wirkungsgrad [–]
P Leistung [W]
U Spannung [V]
I Strom [A]
cosφ Phasenverschiebung [–]

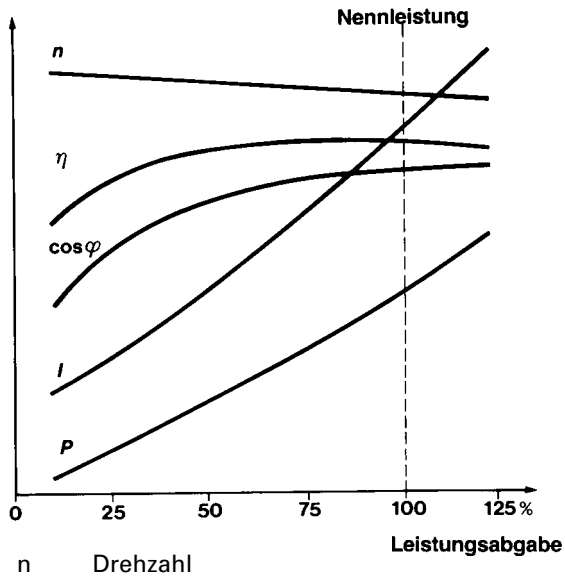
Die Figur 6.5 zeigt das Beispiel eines Typenschildes. Mit den Daten dieses Beispiels ergibt sich der folgende Wirkungsgrad bei der Nennleistung:

$$\eta = \frac{4000}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 8.1 \cdot 0.90} = 0.79$$

6.2.3 Allgemeine Eigenschaften der Käfigankermotoren

Auf die richtige Leistungsauswahl für einen Elektromotor wurde bereits in Kapitel 6.2.2.2 eingegangen. Nebst der dort im Vordergrund stehenden Berücksichtigung von Überbelastungsfolgen durch Alterung der Wicklungsisolation sind noch andere Faktoren zu berücksichtigen, die einen Einfluss auf den Nutzungsgrad haben.

Wird ein Motor beispielsweise unnötig überdimensioniert, so läuft er auf ungünstigen Betriebswerten. Ausserdem ergibt sich ein unnötig hoher Anlaufstrom, der in einem gewissen Verhältnis zur Motorgrösse steht. Der qualitative Verlauf der wichtigsten Kennwerte ist aus Figur 6.6 ersichtlich.

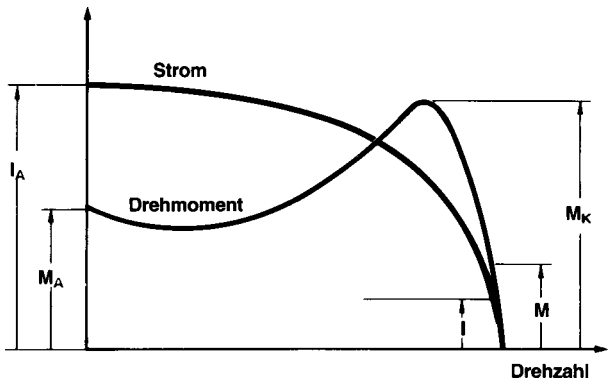


n Drehzahl
η Wirkungsgrad
cosφ Leistungsfaktor
I Stromaufnahme
P Leistungsaufnahme

Figur 6.6
Qualitativer Verlauf der wichtigsten Kenngrössen je nach Leistungsabgabe des Motors [6.2]

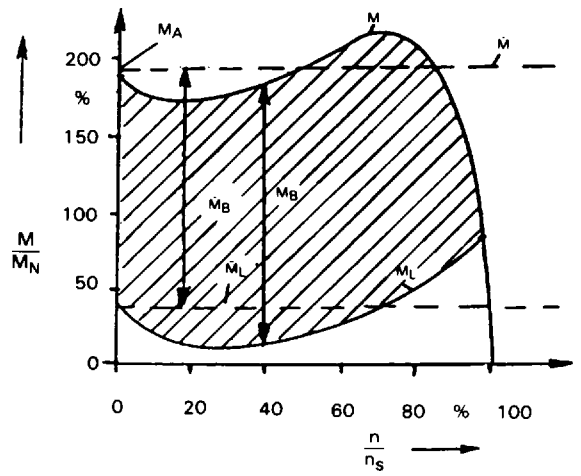
6.2.3.1 Anlaufeigenschaften

Der charakteristische, qualitative Verlauf des Drehmomentes und des Stromes eines Drehstrom-Käfigankermotors ist in Figur 6.7 dargestellt.



I_A Anzugsstrom
I Nennstrom
M_A Anzugsmoment
M Nennmoment
M_K Kippmoment

Figur 6.7
Strom und Drehmoment als Funktion der Drehzahl für einen Drehstrommotor [6.2]



M Motormoment
M_L Gegenmoment der Arbeitsmaschine
n Motordrehzahl
n_s synchrone Drehzahl
$\bar{M}$ mittleres Motormoment
$\bar{M}_L$ mittleres Gegenmoment der Arbeitsmaschine
M_B Beschleunigungsmoment
$\bar{M}_B$ mittleres Beschleunigungsmoment

Figur 6.8
Charakteristischer Verlauf des Motormomentes M und des Gegenmomentes M_L am Beispiel eines Ventilatorantriebs [6.3]

Bei der Einschaltung entwickelt der Motor das sogenannte Anzugsmoment und es fliesst der Einschaltstrom. Im Hochlauf klingt der Strom ab und erreicht im Betrieb mit Nennlast den Nennstrom. Die Höhe des maximalen Drehmomentes (Kippmoment) ist ein Mass für die mögliche Überlastbarkeit des Motors, welche aber aus thermischen Gründen nur sehr kurzzeitig in Anspruch genommen werden darf.

Der korrekte Hochlauf des Motors bis auf die Nenndrehzahl ist nur dann möglich, wenn das Lastmoment der Arbeitsmaschinen in jedem Zeitschritt kleiner ist als das vorhandene Motordrehmoment. Zum momentanen Lastmoment der Arbeitsmaschine addieren sich im Verlaufe des Beschleunigungsprozesses auch die rotierenden Massen beider Maschinen und gehen in die Anlaufzeit ein.

Ein charakteristischer, qualitativer Verlauf eines Motordrehmomentes gegenüber Last- und Beschleunigungsmomenten ist in Figur 6.8 dargestellt.

Die Anlaufzeit, welche aufgrund des erhöhten Stromflusses zu hohen Erwärmungen führt, ist vom Trägheitsmoment der Massen, von der Enddrehzahl und vom Beschleunigungsmoment des Motors abhängig.

Die im Ventilatorbau vorkommenden Massenträgheitsmomente sind, verglichen mit anderen Antriebsaufgaben, für Käfigankermotoren unkritisch.

Einzig bei grossen Industrieventilatoren empfiehlt es sich zum Schutz des Motors, diesen eine oder zwei Baugrössen grösser zu wählen, um die Hochlaufzeit zu verkürzen. Aus der Sicht des Versorgungsnetzes wäre es allerdings besser, ein Hilfsmittel für sanfteren Anlauf anzuwenden (siehe Abschnitt 6.2.3.2).

Beim Zurückschalten von hohen auf tiefere Drehzahlen sollte bei grösseren Ventilatoren eine Umschaltverzögerung eingebaut werden, d.h. ein im praktischen Betrieb einstellbares Zeitrelais im Sekundenbereich soll sicherstellen, dass zwischen

dem Abschalten der hochtourigen Wicklung und dem Einschalten der nächst langsameren Drehzahl einige Sekunden verstreichen. Damit wird die ruckartige Belastung der Transmission verhindert.

6.2.3.2 Anlaufhilfen

Für einen sanfteren Anlauf stehen verschiedene Anlaufhilfen zur Wahl. Bei Motoren mit einer Nennleistung von mehr als 3 bis 5 kW untersagen die meisten Elektrizitätswerke einen direkten Anlauf auf der höchsten Drehzahlstufe.

Beim Stern-Dreieck-Anlauf wird der Motor, der für beispielsweise 400 V gewickelt ist, mit der Wicklung in Sternschaltung angelassen. Dazu wird je ein Ende der drei Wicklungen durch einen dazu eingesetzten Schaltschützen über eine Brücke zusammengeschlossen. Die drei Stromleiter werden an die drei freien Wicklungsenden geschaltet. Dadurch liegt die Spannung zwischen zwei Phasen (400 V) über jeweils zwei hintereinander geschalteten Wicklungen. Die Spannung pro Wicklung wird dann um den Faktor Wurzel 3 verringert. Es fliesst ein entsprechend kleinerer Strom und der Anlauf geht langsamer vor sich. Wenn das Drehmoment des Motors bei dieser Spannung und das Lastmoment des teilbeschleunigten Ventilators gleich sind, werden die drei Wicklungen in Dreiecksform geschaltet und der Motor läuft mit seiner Nennspannung und seinem Nennstrom auf das Nennmoment, das wiederum dem Nennlastmoment des Ventilators entspricht.

Der Stromstoss, der beim Umschalten erfolgt, ist zwar nicht viel kleiner als beim Direktanlauf. Seine Zeitdauer ist aber wesentlich kürzer.

Problemlos kann ein sanfter Anlauf sichergestellt werden, wenn für den Motor eine Drehzahlregelung vorgesehen ist und eine Anlauframpe gefahren werden kann oder mit geringem Aufwand die Frequenz in Stufen hochgeschaltet wird.

6.2.3.3 Drehzahl

Die Drehzahl eines Drehstrommotors ist von der Netzfrequenz und von der Polpaarzahl der Ständerwicklung abhängig.

$$n = \frac{f \cdot 60}{p}$$

n Drehzahl [min^{-1}]
f Netzfrequenz [Hz, s^{-1}]
p Polpaarzahl [–]

Polpaarzahl	Synchrone Drehzahl [min^{-1}] bei 50 Hz	60 Hz
1	3000	3600
2	1500	1800
3	1000	1200
4	750	900
5	600	720
6	500	600

Tabelle 6.8
Synchrone Motordrehzahlen

Ein Asynchronmotor kann die synchrone Drehzahl im Leerlauf nahezu erreichen, bei Nennleistung liegt die Drehzahl etwas tiefer.

Der Schlupf ergibt sich aus der Gleichung:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}$$

s Schlupf
n_1 synchrone Drehzahl
n asynchrone Drehzahl

Der Schlupf verhält sich proportional zur Belastung.

Beispiel

4poliger Motor, 4 kW, 380 V, 50 Hz, 1425 min^{-1}

$$s \text{ bei } 4kW = \frac{1500 - 1425}{1500} = 0.05$$

entsprechend 1500 - 1425 = 75 min^{-1}

$$s \text{ bei } 3\ kW = \frac{3}{4} \cdot (1500 - 1425) = 56\ min^{-1}$$

n bei 3 kW beträgt also 1500 - 56 = 1444 min^{-1}

Der Schlupf ist umgekehrt proportional zum Quadrat der Spannung.

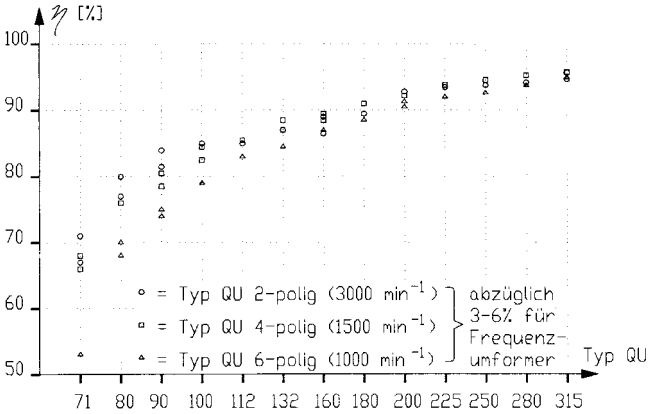
Beispiel

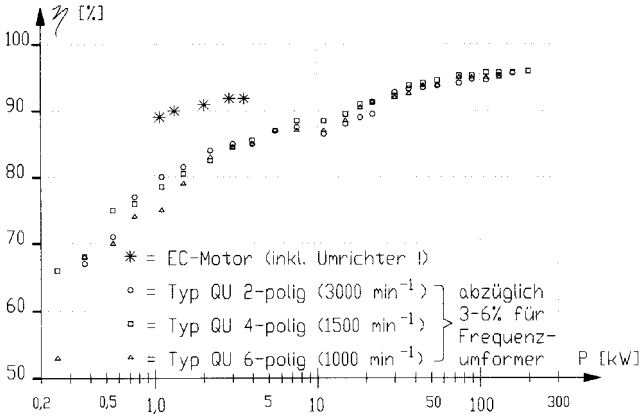
4poliger Motor, 4 kW, 380 V, 50 Hz, 1425 min^{-1}
Anschlussspannung 346 V, 50 Hz

$$s \text{ bei } 346\ V = \left(\frac{380}{346}\right)^2 \cdot \frac{1500 - 1425}{1500} = 0.06$$

$$\text{entsprechend } \left(\frac{380}{346}\right)^2 \cdot (1500 - 1425) = 90\ min^{-1}$$

n beträgt also 1500 - 90 = 1410 min^{-1}





Figur 6.9
Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der Baugrösse (oben) bzw. von der Nennleistung (unten)

6.2.3.4 Motorwirkungsgrad

Der Wirkungsgrad von Elektromotoren wird stark vom sogenannten Leistungsdurchsatz beeinflusst. Dies bedeutet, dass die erzielbaren Wirkungsgrade mit der Leistungsgrösse der Motoren zunehmen.

Als Argumentationshilfe für die Anwendung von Käfigankermotoren sei in Figur 6.9 noch einmal auf die erzielbaren Wirkungsgrade und deren Verlauf im Bereich der üblichen Betriebsfälle hingewiesen.

Es zeigt sich deutlich, dass Bauformen, wie Scheibenanker und Aussenläufer sogar den Einphasen-Käfigankermotoren unterlegen sind.

Hinzu kommt, dass diese Motoren unter der Fahne der einfachen Regelbarkeit mittels Schlupfsteuerung a priori in die falsche Richtung zielen!

Ebenfalls mit Vorsicht zu beurteilen sind Spitzenwirkungsgrade ohne Angabe des Verlaufes bei kleineren Leistungsentnahmen, insbesondere für die Anwendung bei verschiedenen Betriebspunkten.

Höhere Wirkungsgrade zukünftiger Motoren sind durch folgende Massnahmen denkbar:

– Reduktion der Statorwiderstände durch grössere Kupferquerschnitte

– Reduktion der Eisenverluste im Stator durch hochwertigere Magnetbleche mit höherem Aktivmaterialanteil

– bessere Kühlventilation

– bessere Lager- und Schmiervoraussetzungen.

Eine Reduktion der Rotorwiderstände über grössere Querschnitte wird durch die damit einhergehende Veränderung der Drehmomentcharakteristik vereitelt.

Nicht erwähnt sind die am schwierigsten zu erfassenden sogenannten Streuverluste, die mit 10 bis 20% der Gesamtverluste beteiligt sind und im wesentlichen von Fertigungstoleranzen abhängen.

Neuheit auf dem Motormarkt

Im Frühjahr 1993 tauchte auf den Fachmessen für den Leistungsbereich bis 5 kW ein neuentdecktes Motorenkonzept auf: Der elektronisch kommutierte (EC)-Motor. Es handelt sich um einen kollektor- bzw. bürstenlosen Gleichstrommotor (brushless DC-motor) mit sehr gutem Wirkungsgrad auch bei kleinen Leistungen.

Da noch wenige Daten in den bisher üblichen Darstellungsarten verfügbar sind, wurden einige typische Punkte in der Figur 6.9 eingetragen.

In den Publikationen wird die deutliche Wirkungsgradverbesserung beim EC-Motor durch den Wegfall der Schlupfverluste, der Erregerleistung und der reduzierten Kupferverluste begründet.

EC-Motoren können sowohl als Innenläufer- wie auch als Aussenläufermotoren gebaut werden. Aussenläufer-EC-Motoren bieten wegen ihrer kompakten Bauart günstige Voraussetzungen im Ventilatorbau. Sie können direkt ins Laufrad integriert werden. Damit kann die Forderung nach Wegfall der Riemenantriebe in die Tat umgesetzt werden.

Allgemein gilt bei EC-Motoren mit Permanentmagneten, d.h. konstantem Feld:

n prop. U

Bei EC-Motoren ist also die Drehzahl proportional zur angelegten Spannung.

Das verfügbare Drehmoment ist beim EC-Motor dem Motorstrom proportional:

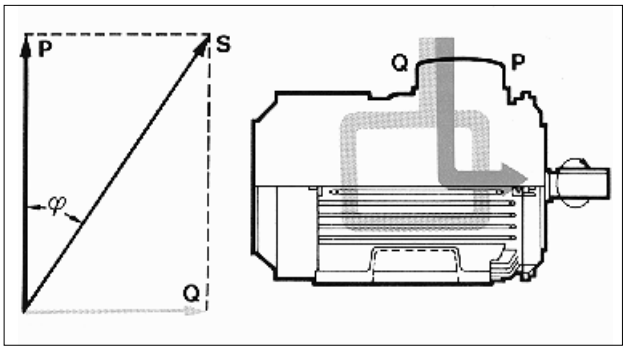
M prop. I

Für die Bestimmung der Motorbaugrösse ist das Drehmoment massgebend. Die Drehzahl ist durch die Spannung gegeben und kann praktisch beliebig gewählt werden.

6.2.3.5 Der Leistungsfaktor

Der Induktionsmotor entnimmt dem Netz nicht nur Wirkleistung, welche in mechanische Arbeit umgewandelt wird, sondern benötigt auch Blindleistung, welche zur Erregung notwendig ist, mit der aber keine eigentliche Arbeit verrichtet wird.

Der Blindleistungsbedarf beeinflusst aber die Höhe des fliessenden Stromes und damit die Belastung des installierten Netzes.



Figur 6.10
Wirkleistung P und Blindleistung Q [6.2]

Wirkleistung und Blindleistung, in Figur 6.10 durch die Vektoren P und Q dargestellt, bestimmen die Scheinleistung S. Das Verhältnis zwischen der in kW gemessenen Wirkleistung und der als Produkt aus Strom- und Spannungsmessung resultierenden, in kVA angegebenen Scheinleistung, bezeichnet man als Leistungsfaktor. Der Winkel zwischen P und S heisst phi, der Verhältniswert ist somit der Cosinus phi ($\cos\varphi$).

Je nach Motorgrösse und Polzahl liegt der Wert für cosφ zwischen 0,6 (für kleinere Motoren und höhere Polzahl) und 0,9 (für grosse Motoren mit kleiner Polzahl). Der Leistungsfaktor kann auch gemessen werden, siehe dazu Kapitel 6.3.

6.3 Leistungsmessung

Grundsätze

- *Die einfachste Leistungsmessung ist möglich, wenn der Motor einen eigenen Stromzähler hat.*
- *Wenn der Leistungsfaktor cosφ eines Motors bekannt ist, kann seine Nutzleistung aus der Spannungs- und der Strommessung ermittelt werden.*
- *Mit einem Wattmeter, einem Ampèremeter und einem Voltmeter kann der Leistungsfaktor bestimmt werden.*

Die aufgenommene Leistung eines Motors kann in der Praxis mit den folgenden Methoden ermittelt werden:

- Ablesen der registrierten Arbeit eines Stromzählers in kWh zwischen zwei Zeitpunkten und Division durch die dazwischen verstrichene Zeitdauer.

  Beispiel:

Ablesedauer	1/2 Stunde
Abgelesene Differenz	10 kWh
Leistung 10 kWh/0,5 h =	20 kW

- Messen des Stromes in einem Leiter durch Einbau eines Ampèremeters oder unter Zuhilfenahme einer Stromzange und Messen der Klemmen-Spannung über der Wicklung.

Die Leistungsaufnahme beträgt dann:

$$\mathbf{P = \sqrt{3} \cdot I \cdot U \cdot \cos\varphi}$$

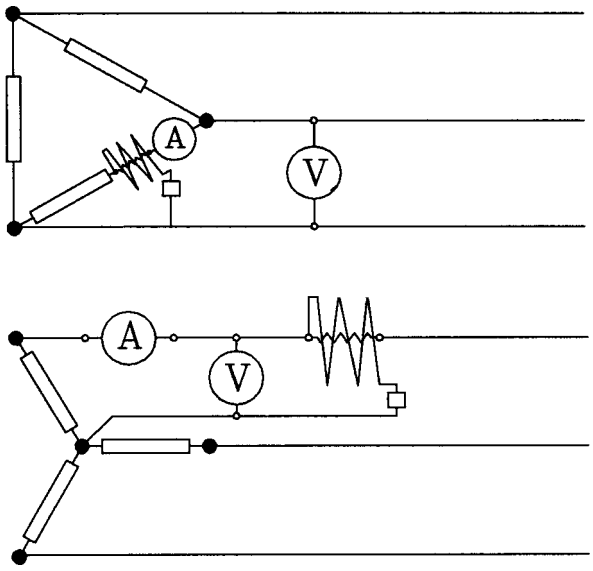
P	Wirkleistung [W]
I	Strom [A]
U	Spannung [V]
cosφ	Phasenverschiebung zwischen U und I [–]
$\sqrt{3} \cdot I \cdot U = S$	Scheinleistung [VA]

Achtung:
Beim Messen des Stromes mittels Stromzange muss dafür gesorgt werden, dass nur ein Leiter umschlossen wird. Bei der symmetrischen Belastung der Motoren für Ventilatoren fliesst in jedem

Leiter der gleich grosse Strom, allerdings um 1/3 phasenverschoben. Die jeweils mit einer Phase bestimmte Leistung entspricht denn auch der Motorleistung wie bei einem einphasigen Motor.

Während die Scheinleistung als Produkt der Strom- und Spannungsmessung bestimmt wird, erhält man den cos φ als Verhältnis zwischen der Wirkleistung P (Messung mit Wattmeter) und der Scheinleistung $S = \sqrt{3} \cdot I \cdot U$.

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot I \cdot U}$$



Figur 6.11
Prinzip der Leistungsmessung bei Dreieck- und Sternschaltung

Bei EC-Motoren müssen folgende Grundsätze beachtet werden:

- Energiezähler vor der Kommutierungseinheit einbauen
- Spannungsmessungen vor der Kommutierungseinheit vornehmen
- Strommessungen nach der Kommutierungseinheit vornehmen

6.4 Transmission

Grundsätze

- *Das meistverbreitete Zugmittelgetriebe in der Lüftungstechnik ist der Keilriemenantrieb.*
- *Ob Flachriemen vorteilhafter sind, ist zur Zeit noch umstritten. Ihr Wirkungsgrad ist möglicherweise 1 bis 2% besser.*
- *Am besten sind Direktantriebe, weil sie den Zugmittelgetriebeverlust ausschliessen.*

Der Keilriemenantrieb ist in der Ventilatortechnik gut eingeführt, weil er die Anpassung der Ventilatordrehzahl an den Druckverlust des Netzes problemlos zulässt. Dieses erfolgt durch Austausch der Keilriemenscheiben bzw. durch die stufenlose Verstellung des wirksamen Durchmessers bei verstellbaren Scheiben.

Der endlose Schmalkeilriemen ist der meist verwendete Riementyp. Für grössere Leistungen kommt der Verbundkeilriemen in Frage, der aus zwei oder mehreren, durch ein Band zusammenvulkanisierten Schmalkeilriemen besteht.

Der meistverbreitete Fehler besteht darin, dass oft aus Unsicherheit Doppel- und Mehrfachriemen verwendet werden, wo ein einziger Schmalkeilriemen der richtigen Dimension ausreichen würde. Ungleichmässige Abnutzung führt zu Schwingungsgeräuschen, erhöhter Einzelriemenabnutzung und zu geringerer Standzeit.

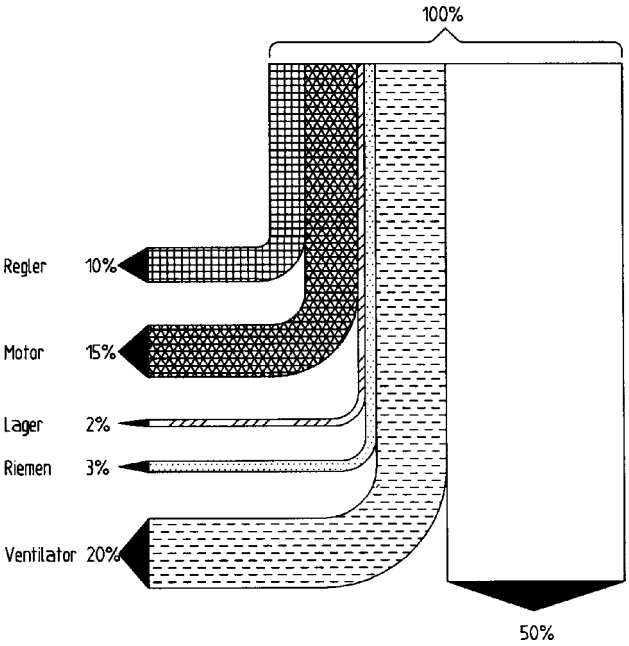
Zurzeit geniessen die Flachriemen für grössere Antriebe den Ruf, dass sie bessere Wirkungsgrade aufweisen. Eine im Auftrag des AFB am Technikum Windisch durchgeführte Studie an gebräuchlichen Ventilatoren hat eine nur um 1% bessere Übertragung ermittelt [6.5].

Während bei gut eingestellten Keilriemenantrieben mit einem Wirkungsgrad von etwa 96 bis 97% gerechnet werden darf, kommen gut eingestellte Flachriemenantriebe auf 97 bis 98%.

Bei kleinen Scheibendurchmessern und im Teillastbereich von drehzahlgesteuerten Ventilatoren gehen die Wirkungsgrade des Keilriemenantriebs bis auf 80% zurück.

Wenn auf hohe Laufruhe, auf geringe Schwingungen und auf geringen Abrieb geachtet werden muss, hat der Flachriemen deutliche Vorteile.

Die Nachteile des Flachriemens liegen aber nebst dem um mehr als 50% höheren Preis in der höheren Lagerbelastung. Insbesondere die modernen, kostenoptimierten Motorlager sind nicht unbedingt auf diese höheren Anforderungen ausgelegt.



Figur 6.12
Energieflussbild eines Ventilators mit komplettem Antrieb (Leistungsbereich 3 kW) [6.6]

Keilriemenantriebe mit zu kleinen Riemenscheiben, unnötigen Doppelriemen und schlechter Spannung verursachen unnötige Verluste von 10 bis 20%. Solche Zustände sind heute leider noch recht häufig anzutreffen.

Es ist augenfällig, dass hier im Sinne von RAVEL noch deutliche Verbesserungen nötig sind!

6.5 Drehzahlsteuerung

Grundsatz

– *Im Sinne von RAVEL ist die Drehzahlsteuerung stets über den gesamten Betriebsbereich zu beurteilen, insbesondere im Vollastbetrieb, wo die Verluste nicht unbedeutend sind!*

Im Kapitel 5.5 wurden die verschiedenen Möglichkeiten der Druck- und Volumenstromsteuerung von Ventilatoren zusammengefasst. Mit dem Trend nach Minimierung der Luftvolumenströme im Allgemeinen und der zunehmenden Bedeutung bedarfsgeregelter Lüftungssysteme im Speziellen, kommt der Drehzahlsteuerung des Ventilators und damit des Motors eine stark wachsende Bedeutung zu.

Zwischen der Netzfrequenz, der Polpaarzahl, dem Schlupf und der Drehzahl, besteht der folgende Zusammenhang:

$$\mathbf{n = \frac{f \cdot 60\,(1-s)}{p}}$$

n Drehzahl [min^{-1}]
f Netzfrequenz [Hz, s^{-1}]
s Schlupf [–]
p Polpaarzahl [–]

Im Prinzip lässt sich die Drehzahl dadurch steuern, dass entweder die Polpaarzahl, der Schlupf oder die Netzfrequenz verändert wird. In der Praxis kommen alle drei Möglichkeiten zur Anwendung.

6.5.1 Änderung der Polpaarzahl

Es gibt drei Möglichkeiten, die Polpaarzahl von Käfigläufer-Asynchronmotoren zu ändern:

Der Ständer kann entweder

– mit zwei oder mehreren getrennten Wicklungen,

– mit einer polumschaltbaren Wicklung oder

– mit einer Kombination obiger Wicklungsarten

versehen werden.

Die Drehzahlsteuerung mittels unterschiedlicher Polpaarzahlen hat den Vorteil, dass der Wirkungsgrad für alle Drehzahlen praktisch gleich gut bleibt. Theoretisch sind auch unzählige Drehzahlkombinationen möglich. Dies wird allerdings durch den Platzbedarf mehrerer Wicklungen und grösserer Polpaarzahlen stark eingeschränkt. In der Praxis trifft man deshalb meistens zwei bis höchstens drei getrennte Wicklungen an. Polpaarzahlen über 4 (8 Pole) kommen in Kombination mit anderen Wicklungen aus Platzgründen kaum vor. Andernfalls würden die Motoren für eine bestimmte Leistung zu gross. Aus diesem Grund sollte vermehrt an den Einsatz von zwei unterschiedlichen Motoren gedacht werden, die auf beiden Wellenenden des Ventilators direkt angekoppelt werden können.

6.5.1.1 Getrennte Wicklungen

Wie bereits oben ausgeführt, ist die wachsende Motorgrösse der limitierende Faktor für die ansonst ziemlich freie Kombinationsmöglichkeit verschiedener Polpaarzahlen.

Bei den für den Ventilatorantrieb verwendeten Motoren kann in grober Näherung angenommen werden, dass ein Motor mit zwei getrennten Wicklungen bei der hohen Drehzahlstufe etwa 80% der Leistung abgibt wie ein gleich grosser Motor bei gleicher Drehzahl mit nur einer Wicklung.

Die theoretisch möglichen Kombinationen sind in der Tabelle 6.9 zusammengefasst. Wenn drei Drehzahlen erforderlich sind, wäre eine Aufteilung auf zwei Motoren sinnvoll.

Polpaarzahl	Synchrone Drehzahl bei 50 Hz [U/min]	Motorgrösse für P = 15 kW
1	3000	160 M
2	1500	160 L
3	1000	180 L
4	750	200 L
1 + 2	3000/1500	180 M
2 + 3	1500/1000	180 M
3 + 4	1000/750	200 L
2 + 3 + 4	1500/1000/750	200 L
3 + 4 + 5	1000/750/600	225 S

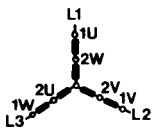
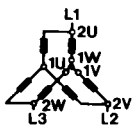
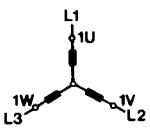
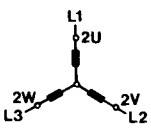
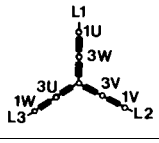
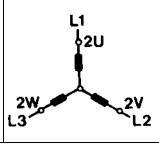
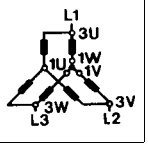
Tabelle 6.9
Kenngrössen von Motoren mit getrennten Wicklungen

6.5.1.2 Polumschaltbare Wicklungen

Es gibt mehrere Arten, eine Wicklung polumschaltbar zu machen und somit eine bessere Motorausnutzung zu erreichen. Aus Gründen der möglichst unkomplizierten Schaltausrüstung kommt in der Praxis zumeist nur entweder die Lindström-Dahlander-Schaltung oder die Pol-Amplituden-Modulation (PAM) vor.

Mit der Dahlanderschaltung ergibt sich ein Polpaarzahlverhältnis von 1:2. Mit der Pol-Amplituden-Modulation wird es möglich, andere Verhältnisse auszuführen. Zudem ergibt sich eine bessere Ausnützung der Motorgrösse.

Für Ventilatorantriebe werden die Wicklungsteile gemäss Figur 6.13 zusammengeschaltet.

Art der Drehmomentkennlinie	Motoren mit zwei Drehzahlen und 1 Wicklung[1])		2 Wicklungen		Motoren mit zwei Drehzahlen und 2 Wicklungen[2])		
	Drehzahl				Drehzahl		
	Niedrig	Hoch	Niedrig[3])	Hoch[3])	Niedrig	Mittlere[3])	Hoch
Ventilatormoment							

[1]) Dahlander- oder PAM-Schaltung
[2]) Beispielsweise für 8/6/4 Pole. Eine der Wicklungen ist in Dahlander- oder PAM-Schaltung angeschlossen.
[3]) Die Wicklung kann auch in Dreieck geschaltet sein.

Figur 6.13 Beispiele für Ständerwicklungen und Schaltungen bei unterschiedlichen Ausführungen von Motoren mit mehreren Drehzahlen [6.2]

6.5.2 Änderung des Schlupfes

Die Anwendung der Schlupfsteuerung macht die Ausrüstung des Motorrotors mit Schleifringen und Kontaktbürsten notwendig. Durch Zuschalten eines Aussenwiderstandes an die Läuferwicklung besteht eine einfache Möglichkeit zur Drehzahlsteuerung.

Bei geeigneter Materialwahl und Konstruktion (Höchstdrehmoment im Stillstand) kann die Schlupfänderung auch bei Käfigankermotoren realisiert werden. Die Spannungsänderung erfolgt durch einen Trafo, wobei das Moment vom Quadrat der Spannung abhängt. Die Verluste sind oberwellenfrei. Anders sind die Verhältnisse bei der Phasenanschnittsteuerung, wo die Spannungsversorgung lückenhaft wird und zu Oberwellen führt.

Aufgrund des besonderen Drehmomentverlaufs von Ventilatoren bei Drehzahländerungen ist die Schlupfsteuerung einigermassen vertretbar. Ganz im Gegensatz zum Beispiel bei einem Kranantrieb, wo das Lastmoment bei langsameren Drehzahlen gleich bleibt und der Betrag der gedrosselten Leistungsabgaben im Widerstand verheizt wird.

Bei Ventilatoren und Kreiselpumpen nimmt das Lastmoment mit abnehmendem Volumenstrom stark ab. Immerhin erreicht der Verlust bei ca. $^2/_3$ der Nenndrehzahl ein Maximum, das ca. 15% der Nennleistung beträgt.

6.5.3 Thyristorsteuerung

Auch bei der Thyristorsteuerung muss der Motorrotor mit Schleifringen ausgerüstet sein. Das Grundprinzip dieser Art der Drehzahlsteuerung liegt darin, dass dem Läufer über die Schleifringe Leistung entnommen wird. Diese wird aber nicht einfach nur verheizt, sondern gleichgerichtet und über einen Transformator in das Netz zurückgegeben.

Durch Änderung des Zündwinkels für die Thyristoren lässt sich die zurückzuspeisende Leistung variieren.

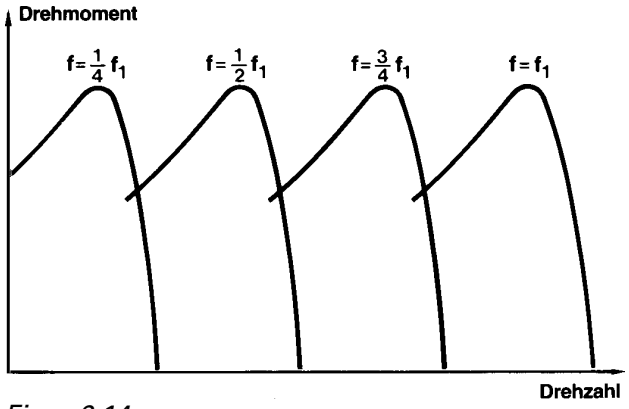
Die Thyristorsteuerung hat Abweichungen in der Sinusform des Stromes im Läuferkreis zur Folge. Die dadurch bedingten Verluste machen einen etwas grösseren Motor erforderlich. Im Gegensatz zu anderen Anwendungen spielt die schwächere Kühlung bei kleineren Drehzahlen beim Antrieb von Strömungsmaschinen keine Rolle, da ja auch das Lastmoment quadratisch zurückgeht.

Das Netz wird bei dieser Steuerungsart durch Oberschwingungen beeinträchtigt.

6.5.4 Frequenzsteuerung

Am Vorteilhaftesten scheint die Regelung der Drehzahl durch eine Änderung der Frequenz.

Die Figur 6.14 zeigt die Änderung der Drehmoment/Drehzahl-Kennlinie bei einem Absenken der Frequenz und einer proportionalen Änderung der Primärspannung als Funktion der Frequenz. Das Kippmoment bleibt unverändert.



Figur 6.14
Beispiel für das Aussehen einer Drehmomentkennlinie bei verschiedenen Frequenzen und einer zur Frequenz proportionalen Spannung [6.2]

Da das Lastmoment mit der Drehzahl im Quadrat abnimmt, werden Frequenzumrichter für Strömungsmaschinen so ausgeführt, dass die Spannung überproportional abnimmt, was zu geringeren Verlusten führt. Zum Teil wird zu diesem Zweck auch die Ständerwicklung von Stern auf Dreieck und umgekehrt umgeschaltet, um eine schrittweise Grobanpassung zu erreichen.

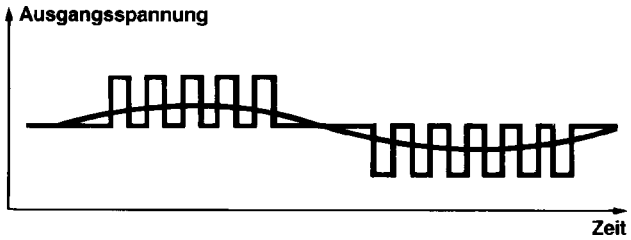
Früher wurden rotierende Umformer verwendet. Die heute gebräuchlichen statischen Umformer haben aber zur Wirtschaftlichkeit und zum Durchbruch der Frequenzsteuerung geführt.

Die rasche Entwicklung im Bereich der Leistungselektronik hat zu sehr leistungsfähigen Frequenz-

umrichtern geführt. Es gibt hier verschiedene Systeme, je nach Leistungsbereich und anderen Voraussetzungen. Allen Systemen gemeinsam ist, dass sich zusätzliche Verluste im Motor aufgrund der mangelnden Sinusform der Spannung ergeben. Der Motor lässt sich daher nicht fortlaufend mit Nennleistung belasten. Im allgemeinen nimmt man eine Überdimensionierung des Motors um etwa 10% vor, um die zusätzlichen Verluste auszugleichen.

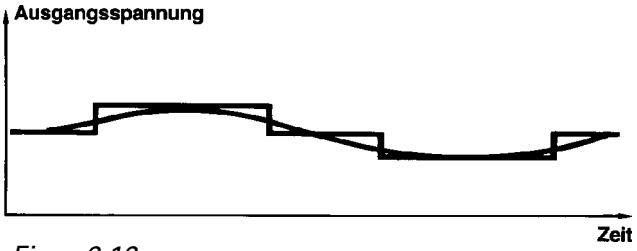
Der Oberschwingungsanteil kann manchmal zu einer gewissen Zunahme des Geräuschpegels des Motors führen und auch zu geringen momentanen Impulsen, deren Frequenz im allgemeinen dem Sechsfachen der eingespeisten Frequenz entspricht.

Ein oft vorkommendes Frequenzumrichtersystem hat ein Zwischenglied mit konstanter Gleichspannung und eine pulsdauermodulierte Ausgangsspannung. Solche Systeme werden im allgemeinen mit PWM bezeichnet, wobei PWM für Pulsdauermodulation (Pulse Width Modulation) steht. Dabei wird die konstante Gleichspannung in kurze Impulse zerhackt, deren Dauer so gesteuert wird, dass sich mit der gesamten Impulsdauer, d.h. Impulsbreite, die erforderliche Zeit-Spannungs-Fläche ergibt.



Figur 6.15
Kennlinienform bei Pulsdauermodulation (PWM) [6.2]

Eine andere Art von Umrichtern mit Gleichspannungszwischenglied sind die Umrichter mit Pulsamplitudenmodulation, abgekürzt PAM (von Pulse Amplitude Modulation). Die Amplitude der Ausgangsspannung variiert und die Frequenz wird so gesteuert, dass sich ein proportionales Verhältnis zwischen Spannung und Frequenz ergibt.



Figur 6.16
Kennlinienform bei Pulsamplitudenmodulation (PAM) [6.2]

Der Motor wird im allgemeinen so gewählt, dass die Nennspannung mit der Netzspannung übereinstimmt. Dadurch wird ermöglicht, dass man den Motor auch direkt am Netz betreiben kann, falls im Umrichter eine Störung auftreten sollte.

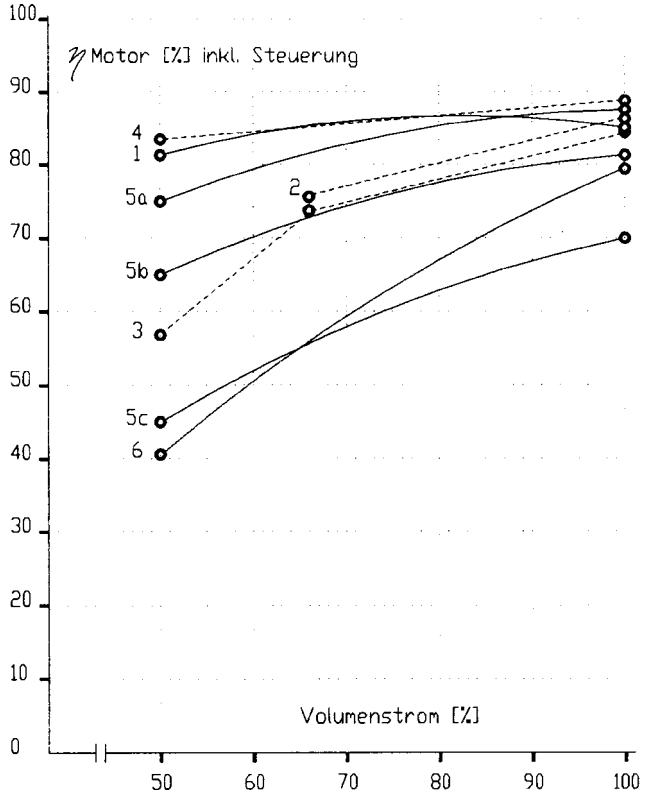
Es ergibt sich auch die Möglichkeit, den Frequenzumrichter durch mehrere Motoren steuern zu lassen, jedoch jeweils nur einen nach dem andern. Der Umrichter wird dann mit einer Vorrichtung versehen, mit deren Hilfe man den Motor vom Umrichter wegschalten und direkt an das Netz anschliessen kann.

Falls die Nennspannung des Motors mit der Netzspannung übereinstimmt, kann der Motor unter Beibehaltung des Lastmoments nicht auf höhere Drehzahlen als die Nenndrehzahl gesteuert werden, da der Umrichter keine höhere Spannung als die Netzspannung abgeben kann.

Eine andere Begrenzung beim Hinaufsteuern liegt in der Bauweise des Läufers. Besonders bei grösseren, hochtourigen Motoren wird das Hinaufsteuern durch die kritische Drehzahl des Motors und die höchstzulässige Schleuderdrehzahl bestimmt.

6.5.5 Veränderung des Wirkungsgrades

Je nach Art der Drehzahl- resp. Volumenstromregelung ergibt sich der in Figur 6.17 dargestellte qualitative Verlauf des Motorwirkungsgrades.



1a 3-Phasen-Normmotor, Normalausführung 4 kW, bei Drosselregelung
• Achtung: Der Gesamtwirkungsgrad sinkt auf ca. 15% bei 50% Volumenstrom

2 Polumschaltbarer Motor mit zwei getrennten Wicklungen 6/8polig

3 Polumschaltbarer Motor mit drei getrennten Wicklungen 4/6/8polig

4 Polumschaltbarer Motor mit einer Wicklung 4/8polig (Dahlander-Schaltung)

5a Normalmotor inkl. Frequenzsteuerung, Nennleistung 15 kW

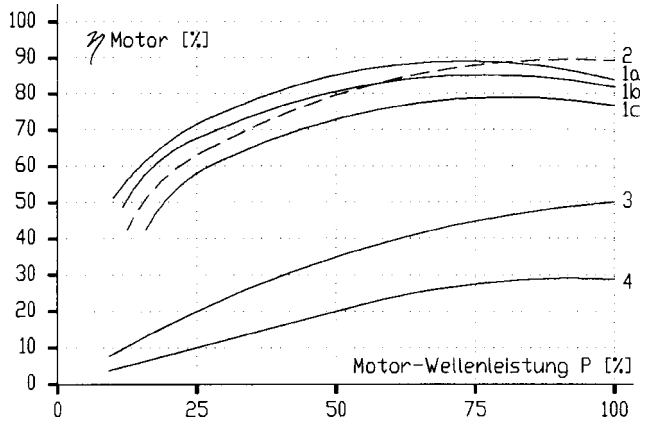
5b Normalmotor inkl. Frequenzsteuerung, Nennleistung 4 kW

5c Normalmotor inkl. Frequenzsteuerung, Nennleistung 1.1 kW

6 Spezialmotor für Schlupfregelung (Phasenschnitt oder Trafo), Nennleistung 4 kW

Figur 6.17
Qualitativer Verlauf des Wirkungsgrades bei Änderung der Motordrehzahl

Die Figur 6.18 zeigt den qualitativen Verlauf des Motorwirkungsgrades in Abhängigkeit der abgegebenen Motorwellenleistung für einen 4poligen Motor unterschiedlicher Bauart.



1a Drehstrom-Normmotor, Normalausführung 15.0 kW

1b Drehstrom-Normmotor, Normalausführung 4.0 kW

1c Drehstrom-Normmotor, Normalausführung 1.1 kW

2 Drehstrom-Normmotor, Hochwirkungsgrad 15.0 kW

3 Einphasen-Asynchronmotor mit Betriebskondensator 0.2 kW

4 Spaltpol-Motor 0.2 kW

Figur 6.18
Verlauf des Motorwirkungsgrades in Abhängigkeit der Motorwellenleistung für einen 4poligen Motor unterschiedlicher Bauart

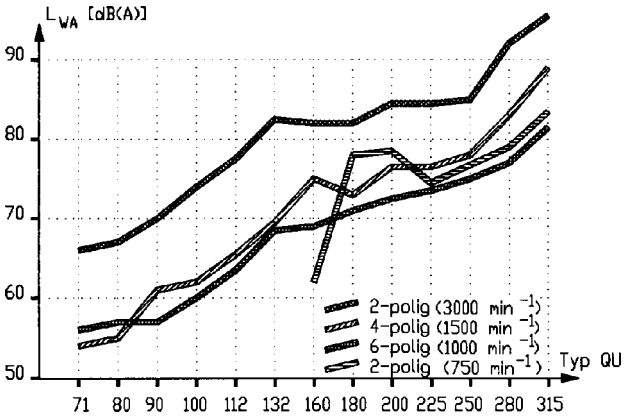
6.6 Explosionsschutz

Für Anlagen, wo aufgrund von explosionsfähigen Gasmischungen, Explosivstoffen oder brennbarem Staub Explosionsgefahr vorliegt, gelten besondere Verordnungen für die Anwendung von elektrischen Betriebsmitteln.

Beim Explosionsschutz von Elektromotoren gibt es zwei hauptsächliche Prinzipien. Im einen Fall wird der Motor so ausgeführt, dass gefährliche Wärmeentwicklung oder Funken nicht entstehen können. Dazu gehört die Ausführung mit erhöhter Sicherheit, EEx e. Das andere Verfahren basiert darauf, gefährliche Wärme oder Funken im Motor zu isolieren, so dass eine Entzündung explosiver Gasgemische ausserhalb des Motors verhindert wird. Dazu gehören die Ausführungen mit druckfester Kapselung, EEx d und die Ausführung mit Überdruckkapselung, EEx p.

6.7 Akustik

Grenzwerte für die tolerierten Geräusche von Motoren sind in der VDE-Richtlinie 0530 festgelegt. Im Einzelfall sollten die Werte aus den technischen Unterlagen der Hersteller entnommen werden. In Figur 6.19 sind als Beispiel die Angaben von ABB für oberflächengekühlte Käfigläufer der Bauart QU in Schutzart IP 54 graphisch dargestellt.



Figur 6.19
Typische Geräuschwerte von Motoren [6.1]

Die Wahl der Motordrehzahl spielt bei der Geräuschentwicklung eine wesentliche Rolle. Aus den Angaben von ABB sind folgende Werte entnommen:

Leistung [kW]	Drehzahl [min^{-1}]	Typ QU	L_{WA} [dB(A)]	η [%]
15	3000	160 M2	82.0	88.0
15	1500	160 L4	75.0	89.5
15	1000	180 L6	71.0	88.5
15	750	200 L8	78.5	91.0

Tabelle 6.10
Kenndaten von ABB-Motoren [6.1]

Für höhere Anforderungen können andere Kühlvarianten verwendet werden, die zu wesentlich tieferen Geräuschbelastungen führen können.

Ruhiger laufende Motoren erlauben es unter Umständen, auf einen Schalldämpfer zu verzichten. Dies kann in zweifacher Hinsicht helfen: Wegfall des Druckverlustes des Schalldämpfers und Platzgewinn zugunsten von besser geformten Kanalanschlüssen vor und nach dem Ventilator.

Literatur zu Abschnitt 6

[6.1] ABB Elektromotoren GmbH
Drehstrommotoren für Niederspannung
Broschüre DE EMO/B10-4002 DE, 1992-05

[6.2] ABB Motors
Der Drehstrommotor
Broschüre A10-2004 T, 1989-01

[6.3] ABB Normelec AG
Drehstrom-Asynchronmotoren
Grundlagen und Dimensionierung

[6.4] Bundesamt für Konjunkturfragen
RAVEL-Handbuch
Strom rationell nutzen
ISBN 3 7281 1830 3, 1992

[6.5] HTL Brugg-Windisch
Vergleichende Untersuchung zwischen Keilriemen und Hochleistungsflachriemen
Info Energie, 1989

[6.6] G. Häussermann, Ziehl Abegg GmbH
Energiesparpotential bei Ventilatoren
Symposium RLT-Geräte, 4. September 1991, Essen

7 Checklisten

C1 Checkliste für die Planung des Gebäudes 125
Möglichst früher Beizug eines Haustechnikplaners 125
Form und Orientierung des Gebäudes sowie Fenstergrössen optimieren 125
Guter Wärmeschutz und gute Dichtheit der Gebäudehülle 125
Hohe Wärmespeicherfähigkeit der Baukonstruktion 125
Wahl emissionsarmer Baustoffe und Inneneinrichtungen 126
Wirksamer Sonnenschutz 126
Trennung unterschiedlicher Nutzungen 126
Klares Brandschutzkonzept 126
Anordnung und Raumbedarf der haustechnischen Installationen 127
Beleuchtungskonzept 127
Tageslichtnutzung 127

C2 Checkliste für die Planung der lüftungstechnischen Anlage 128
Klare Festlegung der Grundlagen und Garantiebedingungen 128
Bedarfsabhängige Aussenluftzufuhr 128
Wärme- und Kühlleistungsbedarf 128
Interne Wärmequellen 128
Örtliche Wärme-, Schadstoff- und Feuchtequellen 128
Luftführung im Raum 128
Freie Kühlung 129
Abwärmenutzung 129
Unterschiedliche Nutzung 129
Einsatz von Lufterdregistern 129
Einsatz von Erdsonden 129
Messkonzept 129

C3 Checkliste für die Planung einzelner Komponenten 130
Niedriger Leistungsbedarf für die Luftförderung 130
Guter Wirkungsgrad der Ventilatoren 130
Wärmerückgewinnung 131
Befeuchtung 131
Kältemaschinen 131
Kältemittel- und Kaltwasserleitungen 131

C4 Checkliste für die Betriebsphase 132
Zweckentsprechende Raumlufttemperatur einhalten 132
Zweckentsprechende Raumluftfeuchte einhalten 132
Bedarfsgerechte Betriebsart und Betriebszeit der lüftungstechnischen Anlagen wählen 132
Zweckmässige Bedienung des Sonnenschutzes im Winter 132
Vermeidung unnötiger Wärmelasten im Sommer 133
Regelmässige Kontrolle und Wartung 134
Energiebuchhaltung 134
Optimierung der Anlagen 134

C1 Checkliste für die Planung des Gebäudes

Möglichst früher Beizug eines Haustechnikplaners

Zur Gewährleistung einer integralen Planung unter Berücksichtigung des Zusammenwirkens von Gebäude und Haustechnik ist der möglichst frühe Beizug eines Haustechnikplaners oder evtl. eines Energieberaters zweckmässig.

Allfällige Zusatzkosten werden durch Einsparungen bei den späteren Investitions- und Betriebskosten erfahrungsgemäss im allgemeinen mehr als kompensiert.

Weitere Angaben siehe Abschnitt 4.1

Form und Orientierung des Gebäudes sowie Fenstergrössen optimieren

Die Form und Orientierung des Gebäudes sowie die Fenstergrössen je nach Fassadenorientierung sind unter Berücksichtigung des sommerlichen und winterlichen Wärmeschutzes sowie der Wärmegewinne durch Sonnenstrahlung im Winter zu optimieren.

Weitere Angaben siehe Abschnitte 4.1, 4.2

Guter Wärmeschutz und gute Dichtheit der Gebäudehülle

Bei allen Neubauten und bei gekühlten Räumen in Altbauten muss der sommerliche und winterliche Wärmeschutz die Anforderungen gemäss Norm SIA 180 erfüllen und es sind mindestens die Grenzwerte der Empfehlung SIA 380/1 einzuhalten. Für energetisch sehr gute Anlagen ist die Einhaltung der Zielwerte anzustreben.

Besondere Beachtung ist auch den Anforderungen an die Dichtheit der Gebäudehülle gemäss Anhang 7 der SIA 180 zu schenken. Gebäude mit lüftungstechnischen Anlagen sollen möglichst luftdicht sein.

Weitere Angaben siehe Abschnitte 3.2, 4.1, 4.5

Hohe Wärmespeicherfähigkeit der Baukonstruktion

Damit bei gekühlten Räumen die Wärmespeicherfähigkeit der Baumasse ausgenützt werden kann, ist mindestens eine mittelschwere Bauweise mit einer speicherwirksamen Masse pro Raum von $m > 350\ kg/m^2$ gemäss SIA V382/2, Ziffer 52, anzustreben. Für energetisch sehr gute Anlagen ist $m > 400\ kg/m^2$ wünschbar. Um auch bei herabgehängten Decken die Speichermasse der Betondecke nutzen zu können, ist die Konstruktion ganzflächig zu hinterlüften mit mehr als etwa 10% offener Deckenfläche. Für eine wirksame Nachtlüftung muss die Luft direkt mit der Gebäudemasse in Berührung kommen. Bei akustischen Massnahmen ist darauf zu achten, dass keine vollflächigen Verkleidungen ausgeführt werden.

Weitere Angaben siehe Abschnitte 3.2, 4.1, 4.5, 4.7

C1

Wahl emissionsarmer Baustoffe und Inneneinrichtungen

Durch die geeignete Wahl der Baustoffe und Inneneinrichtungen sind unnötige Emissionen zu vermeiden. Es ist unbedingt zu vermeiden, dass die Luftrate der Lüftungsanlage erhöht werden muss zur Verdünnung und Abführung vermeidbarer Emissionen.

Informationen über die Emissionen der wichtigsten Baustoffe werden zur Zeit erarbeitet und durch den SIA veröffentlicht.

Weitere Angaben siehe Abschnitte 3.3, 4.2.4

Wirksamer Sonnenschutz

Sämtliche Fensterflächen von gekühlten Räumen sollen über einen wirksamen Sonnenschutz oder eine entsprechende Beschattungseinrichtung verfügen. Im Hinblick auf den sommerlichen Wärmeschutz wird auch für nicht gekühlte Wohn- und Büroräume ein wirksamer Sonnenschutz empfohlen.

Im allgemeinen soll ein Gesamtenergiedurchlassgrad für die Sonnenstrahlung durch die Verglasung inklusive Sonnenschutz von g = 0.15 oder kleiner erreicht werden. Richtwerte typischer Kombinationen von Verglasung und Sonnenschutz finden sich in Ziffer 7 3 2 der Empfehlung SIA V382/2. Bei der Wahl der Beschattungseinrichtung ist darauf zu achten, dass nicht nur ein guter Sonnenschutz, sondern auch eine gute Tageslichtnutzung möglich ist. Bei Nordfassaden kann im allgemeinen auf einen Sonnenschutz verzichtet, resp. zum Schutz gegen die diffuse Strahlung ein leicht reflektierendes Glas eingesetzt werden.

Zu empfehlen ist ein beweglicher äusserer Sonnenschutz mit automatischer Steuerung pro Fassadenorientierung.

Weitere Angaben siehe Abschnitte 3.2, 4.2.4, 4.5

Trennung unterschiedlicher Nutzungen

Durch bauliche (und auch technische und betriebliche) Massnahmen sollen die Bereiche mit besonderen Anforderungen an das Raumklima möglichst klein gehalten werden. Für zu kühlende Bereiche und für Raucher- und Nichtraucherzonen ist eine bauliche Abtrennung anzustreben.

Weitere Angaben siehe Abschnitte 3.2.4, 3.3, 4.5, 4.6

Klares Brandschutzkonzept

Die Einteilung der Brandabschnitte kann einen starken Einfluss auf die Disposition der lüftungstechnischen Anlagen haben. Das Brandschutzkonzept ist darum frühzeitig in Zusammenarbeit mit der Feuerpolizei festzulegen. Die Anordnung der Zentralen und Schächte ist darauf abzustimmen.

Weitere Angaben siehe Abschnitte 4.1, 4.2

C1

Anordnung und Raumbedarf der haustechnischen Installationen

Der Raumbedarf der Luftkanäle und Lüftungszentralen sowie der übrigen haustechnischen Installationen ist von allem Anfang an gebührend zu berücksichtigen. Hinweise über den Raumbedarf von lüftungstechnischen Anlagen finden sich im Anhang 1 der Empfehlung SIA V382/1.

Zur Vermeidung unnötiger Druckverluste ist auf kurze Wege zwischen Aussenluftfassung, Zentrale und Räumen zu achten. Die Aussenluftfassung soll so plaziert werden, dass die Vorbelastung der Luft möglichst gering ist. Bei grösseren Anlagen kann eine Aufteilung in mehrere Zentralen und Schächte zweckmässig sein. Dabei ist auch das Brandschutzkonzept zu beachten. Je feingliedriger das Kanalnetz gewählt wird, desto besser ist eine Anpassung auf die verschiedenen Brandabschnitte möglich und desto flexibler ist das System bei späteren Änderungen.

Weitere Angaben siehe Abschnitte 4.1, 4.2

Beleuchtungskonzept

Durch ein geeignetes Beleuchtungskonzept kann bei normaler Büronutzung die im Raum spürbare Abwärme der Beleuchtung im allgemeinen um 10 W/m^2 gehalten werden. Richtwerte für Nennbeleuchtungsstärken und spezifische Anschlussleistungen der Beleuchtungskörper sind in Ziffer 6 2 1 der Empfehlung SIA V382/2 gegeben. Für eine 5 bis 6 m tiefe Aussenzone sollte am Tag die natürliche Beleuchtung für Büronutzung genügen.

Zu empfehlen ist eine bedarfsgerechte Aufteilung in verschiedene Beleuchtungszonen und Regelung über mindestens zwei Beleuchtungsstufen.

Weitere Angaben siehe Abschnitte 3.2, 4.1, 4.2.4, 4.5

Tageslichtnutzung

Die Ausschöpfung der Möglichkeiten zur Tageslichtnutzung erlaubt eine spürbare Reduktion des Energiebedarfes für die künstliche Beleuchtung. Bereits einfache Massnahmen wie geeignet plazierte Fensterflächen (möglichst hohe Anordnung mit Brüstungen), verstellbare Beschattungseinrichtungen und helle Farben in den Räumen (besonders wichtig ist dies für die Decken) erbringen gute Resultate.

Zur Beurteilung der Tageslichtnutzung stehen heute verschiedene zuverlässige Computerprogramme auch für PC zur Verfügung.

Weitere Angaben siehe Abschnitt 4.1

C2 Checkliste für die Planung der lüftungstechnischen Anlage

Klare Festlegung der Grundlagen und Garantiebedingungen

Die Anforderungen an die Raumluftkonditionen und den Aufenthaltsbereich sind in der Empfehlung SIA V382/1 festgelegt und der Anhang 2 der Empfehlung stellt ein technisches Raumdatenblatt zur Verfügung, welches in Zusammenarbeit mit dem Bauherrn für alle Nutzungszonen ausgefüllt werden sollte.

Erhöhte Anforderungen sind nur in begründeten Ausnahmefällen zu akzeptieren. Beim Betrieb der Anlagen ist zu beachten, dass die zulässigen Bandbreiten ausgenützt werden.

Weitere Angaben siehe Abschnitte 3.1, 4.1, 4.5, 4.6

Bedarfsabhängige Aussenluftzufuhr

Bei Nutzungen mit stark unterschiedlichen Personenbelegungen oder anderen Lasten ist eine bedarfsabhängige Aussenluftzufuhr, z.B. über eine Regelung mit CO_2-oder Mischgassensor, vorzusehen. Häufig ist auch eine Inbetriebnahme aufgrund von Anwesenheitsfühlern/Bewegungsmeldern zweckmässig.

Weitere Angaben siehe Abschnitte 3.1.4, 3.2.3, 4.2.4, 4.13

Wärme- und Kühlleistungsbedarf

Die Berechnung des Wärme- und Kühlleistungsbedarfes des Gebäudes richtet sich nach den Empfehlungen SIA 384/2 und SIA V382/2.

Weitere Angaben siehe Abschnitte 3.2, 4.5

Interne Wärmequellen

Für die Beurteilung massgebend sind die unter Berücksichtigung der Gleichzeitigkeit tatsächlich anfallenden Lasten mit ihrem Tagesgang. Diese sind bei der Auslegung für den Sommer- und den Winterbetrieb zu berücksichtigen. Angaben dazu finden sich in Ziffer 6 der Empfehlung SIA V382/2. Die Leistungsangaben gemäss Typenschild haben für diese Betrachtung keine Bedeutung.

Weitere Angaben siehe Abschnitte 3.2, 4.2.4, 4.5

Örtliche Wärme-, Schadstoff- und Feuchtequellen

Wenn immer möglich sollen konzentriert anfallende Wärme, Schadstoffe oder Feuchte direkt abgeführt werden, damit sie das Raumklima möglichst wenig belasten. Für grössere unvermeidbare örtliche Quellen sollen wenn immer möglich räumliche Abtrennungen vorgenommen werden.

Weitere Angaben siehe Abschnitte 3.1, 3.2, 3.3, 4.2.4, 4.5

Luftführung im Raum

Die Luftströmung im Raum soll eine gute Raumdurchspülung gewährleisten. Als Kenngrösse dient die Lüftungswirksamkeit, welche das Verhältnis darstellt zwischen der kürzest möglichen Verweilzeit der Luft und der durchschnittlichen Verweilzeit des Schadstoffes im Raum.

Weitere Angaben siehe Abschnitt 4.2.4

C2

Freie Kühlung

Die Möglichkeiten der freien Kühlung (direkte Verwendung der kühlen Aussenluft, Kaltwassererzeugung via Kühlturm oder luftgekühltem Rückkühlwerk unter Umgehung der Kältemaschine) sind auszunutzen, so weit als damit der Gesamtenergieverbrauch reduziert werden kann.

Weitere Angaben siehe Abschnitte 4.5, 4.7

Abwärmenutzung

Im Gebäude anfallende Abwärme ist zu nutzen, soweit dafür ein Bedarf besteht und die Abwärmenutzung wirtschaftlich vertretbar ist.

Weitere Angaben siehe Abschnitt 4.3

Unterschiedliche Nutzung

Für Räume mit unterschiedlichen Anforderungen an das Raumklima und für Räume mit unterschiedlichen Betriebszeiten muss das Anlagekonzept einen individuellen Betrieb ermöglichen. Wenn möglich sind Zonen mit stark unterschiedlichen Nutzungen baulich zu trennen.

Weitere Angaben siehe Abschnitte 3.1, 4.2.4, 4.5, 4.6, 4.12, 4.13

Einsatz von Luft-erdregistern

Zur Reduktion des Primärenergieverbrauchs ist der Einsatz von Lufterdregistern zur Vorwärmung der Aussenluft im Winter und zur Kühlung der Aussenluft im Sommer zu prüfen.

Weitere Angaben siehe Abschnitt 4.10

Einsatz von Erdsonden

Zur Reduktion des Primärenergieverbrauchs ist der Einsatz von Erdsonden zu prüfen.

Weitere Angaben siehe Abschnitt 4.11

Messkonzept

Bei der Planung der Anlage sind rechtzeitig ein geeignetes Messkonzept und die dazu notwendigen Messmöglichkeiten festzulegen.

Weitere Angaben siehe Abschnitte 3.1, 4.1

C3 Checkliste für die Planung einzelner Komponenten

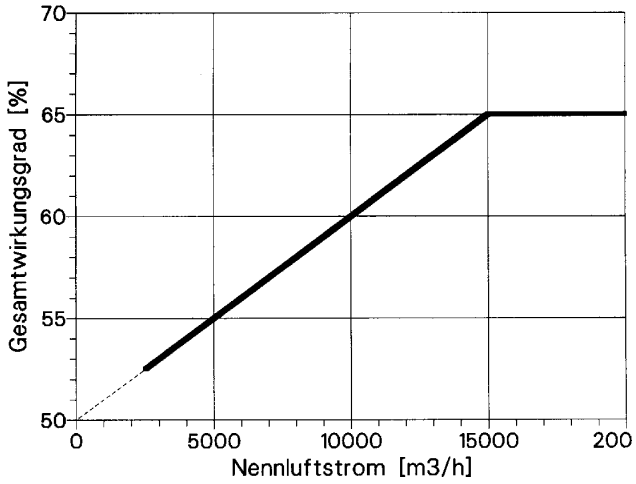
Niedriger Leistungsbedarf für die Luftförderung

Bei der Dimensionierung des Luftkanalnetzes und der Auswahl der Apparate ist auf kleine Strömungsgeschwindigkeiten und geringe Druckverluste zu achten. Gemäss SIA V382/3 soll der gesamte Druckverlust (Summe der Zu- und Abluftanlage inkl. WRG) bei maximalem Luftvolumenstrom und sauberen Filtern höchstens 1200 Pa betragen. Für energetisch sehr gute Anlagen gilt ein Grenzwert von 900 Pa.

Weitere Angaben siehe Abschnitte 3.4, 4.2.4

Guter Wirkungsgrad der Ventilatoren

Gemäss SIA V382/3 soll der Gesamtwirkungsgrad der Ventilatoren inkl. Motor und Antrieb im Optimalpunkt gemäss Prüfstandsmessungen die folgenden Werte erreichen:



Für energetisch sehr gute Anlagen soll der Gesamtwirkungsgrad um 5%-Punkte höher sein.

Besondere Aufmerksamkeit ist den Einbaubedingungen und dem Teillastbetrieb zu schenken. Die Auslegung soll so erfolgen, dass im ganzen Anwendungsbereich ein möglichst guter Wirkungsgrad erzielt wird.

Im Vergleich verschiedener Geräte für die gleiche Aufgabe ist vor allem der Geräteförderwirkungsgrad zu vergleichen. Es gilt

$$\eta = \frac{\mathbf{V} \cdot \Delta \mathbf{p}_{\mathbf{extern}}}{\mathbf{P}_{\mathbf{Motor}}}$$

$\mathbf{V}$	Luftvolumenstrom [m^3/s]
$\Delta \mathbf{p}_{\mathbf{extern}}$	Differenz der externen Gesamtdrücke [Pa]
$\mathbf{P}_{\mathbf{Motor}}$	Leistungsaufnahme des Motors [W]

Weitere Angaben siehe Abschnitte 3.4, 5.2, 5.5, 5.6, 6.4, 6.5

C3

Wärme-rückgewinnung

Anlagen mit erwärmter oder gekühlter Zuluft sind in der Regel mit Wärmerückgewinnungsanlagen auszurüsten. Die Anforderungen richten sich nach der Richtlinie SWKI 89-1 «Wärmerückgewinnungsanlagen».

Weitere Angaben siehe Abschnitt 4.3

Befeuchtung

Wenn eine Befeuchtung der Raumluft erforderlich ist, soll diese auf das zulässige Minimum beschränkt bleiben und im allgemeinen adiabatisch erfolgen. Eine Befeuchtung der Raumluft soll in der Regel zusammen mit einer Wärmerückgewinnung mit Feuchteaustausch eingesetzt werden.

Weitere Angaben siehe Abschnitte 3.1, 4.3, 4.6

Kältemaschinen

Wenn eine mechanische Kälteerzeugung erforderlich ist, soll die Kaltwassertemperatur den effektiven Bedürfnissen angepasst und möglichst hoch, die Kondensationstemperatur möglichst tief gewählt werden. Bei kurzfristigen Lastspitzen ist die Verwendung von Speichern auf geeignetem Temperaturniveau zu prüfen. Die bei der Kälteerzeugung anfallende Abwärme soll so weit als möglich genutzt werden.

Weitere Angaben siehe Abschnitte 3.1, 4.5

Kältemittel- und Kaltwasser-leitungen

Kältemittel- und Kaltwasserleitungen sollen nicht nur gegen Schwitzwasser, sondern auch für möglichst geringe Kälteverluste isoliert werden.

Es ist eine zonenweise Abschaltung der Verteilung zu ermöglichen.

C4 Checkliste für die Betriebsphase

Zweckentsprechende Raumlufttemperatur einhalten

Der Energiebedarf für Heizen und Kühlen kann massgeblich reduziert werden, wenn die Raumlufttemperatur in einem möglichst weiten Bereich frei schwingen kann.

Bei Büroräumen wird im «Winterbetrieb» allgemein ein Betriebsbereich der Raumlufttemperatur von 19 bis 24 °C als angemessen betrachtet, im Kühlbetrieb (sofern überhaupt erforderlich) liegt er bei 22 bis 28 °C, wobei an Hitzetagen mit maximalen Aussentemperaturen über 30 °C auch höhere Innentemperaturen als zumutbar gelten.

In vielen Nebenräumen ist eine deutlich grössere Variation der Raumlufttemperatur zulässig. Diese soll so weit als möglich ausgenutzt werden.

Weitere Angaben siehe Abschnitte 3.1, 3.2, 4.5

Zweckentsprechende Raumluftfeuchte einhalten

Der Behaglichkeitsbereich erstreckt sich für die relative Luftfeuchtigkeit von 30 bis 65%. Gelegentliche Unterschreitungen an wenigen Tagen pro Jahr bis 20% r.F. und gelegentliche Überschreitungen bis 75% r.F. sind physiologisch zulässig.

In Büro- und Wohnbauten ist im allgemeinen keine Befeuchtung der Luft erforderlich. Klagen wegen zu trockener Luft im Winter sind häufig auf zu hohe Aussenluftraten, zu hohe Belastungen der Raumluft mit Verunreinigungen oder auf zu hohe Raumlufttemperaturen zurückzuführen.

Weitere Angaben siehe Abschnitte 3.1, 4.3, 4.6

Bedarfsgerechte Betriebsart und Betriebszeit der lüftungstechnischen Anlagen wählen

Es ist eine möglichst bedarfsgerechte Betriebsweise der lüftungstechnischen Anlagen anzustreben.

Die wirksamste Massnahme besteht in einer vollständigen Abschaltung der Anlage in den Zeiten, in denen sie nicht benötigt wird. Dies kann z.B. sehr einfach über eine Zeitschaltuhr mit Wochenprogramm realisiert werden.

Wenn die Anlage in Betrieb sein muss, soll nur so viel Luft wie nötig gefördert werden. Dazu sollte die Anlage mit mehrstufigen oder stufenlosen Antrieben ausgerüstet sein. Eine automatische Regulierung der Luftmengen kann über CO_2- oder Mischgassensoren realisiert werden.

Weitere Angaben siehe Abschnitte 3.1, 4.12, 4.13

Zweckmässige Bedienung des Sonnenschutzes im Winter

Im Winter ist die Sonnenstrahlung durch die Fenster ein willkommener Beitrag zur Reduktion des Heizenergiebedarfes. Während der Heizsaison soll der Sonnenschutz lediglich als Blendschutz eingesetzt werden und die erwünschten Wärmegewinne möglichst nicht reduzieren.

Während der Nachtstunden können vor allem dicht schliessende Aussenstoren eine Reduktion der Transmissionsverluste bewirken und deren Benutzung ist während der Heizperiode entsprechend erwünscht.

C4

Vermeidung unnötiger Wärmelasten im Sommer

a) Externe Lasten

Im Sommer soll der Sonnenschutz das Eindringen von Sonnenstrahlung in den Raum verhindern, da diese zu einer unerwünschten Erwärmung des Raumes, resp. zu einer Erhöhung des Kühlleistungsbedarfes führen würde. Bei der Bedienung eines Sonnenschutzes ist darauf zu achten, dass dieser rechtzeitig, d.h. beim ersten Eintreffen von direkter Strahlung auf das Fenster und nicht erst aufgrund zu hoher Raumlufttemperaturen betätigt wird. Dabei ist darauf zu achten, dass die Lamellenstellung nicht nur einen guten Sonnenschutz, sondern auch eine gute Tageslichtnutzung ermöglicht. Sofern dies aus Sicherheitsgründen zulässig ist, sollte der Sonnenschutz während der Nachtstunden die Nachtauskühlung, evtl. in Kombination mit einer Nachtlüftung über die Fenster, nicht behindern.

b) Interne Lasten

Während interne Wärmelasten im Winter einen Beitrag zur Raumheizung leisten (allerdings nicht sehr effizient) sind sie ausserhalb der Heizperiode unerwünscht, da sie zu einer Erhöhung der Raumlufttemperatur resp. des Kühlleistungsbedarfes führen.

Zur Reduktion der internen Wärmelasten durch Maschinen und Apparate sind die folgenden Massnahmen zu beachten:

- Grundsätzliche Notwendigkeit des wärmeabgebenden Apparates überprüfen
- Aufstellung ausserhalb der Komfortzonen prüfen
- Möglichkeiten zur Reduktion der Wärmeabgabe an den vorhandenen Apparaten prüfen (Teillast- oder Standby-Betrieb, Abschaltung wenn immer möglich)
- Beim Kauf neuer und beim Ersatz bestehender Apparate auf kleinen Stromverbrauch und die Möglichkeiten eines bedarfsgerechten Betriebs und einer direkten Wärmeabfuhr achten
- Bei unvermeidbaren grösseren Lasten eine direkte Wärmeabfuhr über ein geschlossenes Wasser- oder Luftsystem prüfen.

Weitere Angaben siehe Abschnitte 3.2, 4.1, 4.2.4, 4.5

C4

Regelmässige Kontrolle und Wartung

Die Einhaltung der oben aufgeführten Massnahmen soll regelmässig kontrolliert werden.

Die regelmässige Wartung der Anlagen soll immer auch folgende Punkte umfassen:
- Kontrolle und wenn nötig Ersatz der Filtermatten
- Kontrolle der Flach- oder Keilriemenspannung
- Reinigung der Anlagekomponenten inkl. Luftdurchlässe
- Reinigung der Fühler und Kontrolle der Sollwerte

Weitere Angaben siehe Abschnitte 3.4, 4.1, 6.4

Energie-buchhaltung

Führen einer Energiebuchhaltung und Vergleiche mit den Vorjahreswerten vornehmen. Die dazu notwendigen Messeinrichtungen sind bei der Planung der Anlage zu berücksichtigen.

Weitere Angaben siehe Abschnitte 3.4, 3.5, 4.1

Optimierung der Anlagen

Die Erfahrung zeigt, dass bei vielen Anlagen ein grosses Optimierungspotential besteht unter Berücksichtigung der tatsächlichen Betriebsbedingungen und Nutzungen. Dazu sind nach der Abnahme der Anlagen häufig weitere Messungen und langfristige Messprogramme zweckmässig.

Weitere Angaben siehe Abschnitt 4.1.4