

Weiterentwicklung der EnEV zur Umsetzung der neuen EG-Richtlinie

Grundlagen zur Inspektion von Klimaanlage

Teil 3: Mindestanforderungen an die energetische Qualität von Klimaanlage

Endbericht

Forschungsprogramm

Ressortforschung Bauwesen

Projektlaufzeit

September 2004 bis Juli 2005

Aktenzeichen

Z6-10.06.03.-04.123

im Auftrag

des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS)

sowie

des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung (BBR)

bearbeitet von

Dipl.-Ing. Heiko Schiller

schiller engineering, Hamburg

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzzusammenfassung	3
2	Grundsätzliches zu Einzelanforderungen an die energetische Qualität von Klimaanlage	5
3	Bestehende Ansätze für Einzelanforderungen	9
3.1	Europäische Normung	9
3.2	Deutschland	11
3.3	Dänemark.....	13
3.4	Schweden	13
3.5	Schweiz.....	14
4	Vorschläge für Mindestanforderungen an Klimaanlage.....	15
4.1	Begrenzung des Energiebedarfs für die Luftförderung.....	15
4.2	Mindestanforderungen an die Wärmerückgewinnung	18
4.3	Befeuchtung und Entfeuchtung von Luft.....	19
4.4	Bedarfsgerechte Steuerung des Luftvolumenstromes.....	21
4.5	Raumtemperaturregelung	22
5	Wirtschaftlichkeit der vorgeschlagenen Maßnahmen	24
5.1	Luftförderung.....	24
5.2	Wärmerückgewinnung	25
5.3	Befeuchtung und Entfeuchtung von Luft.....	27
5.4	Bedarfsgerechte Steuerung des Luftvolumenstromes.....	28
5.5	Raumtemperaturregelung	29
6	Quellenverzeichnis.....	30

1 Kurzzusammenfassung

Die Möglichkeit, Einzelanforderungen an die energetische Effizienz von Klimaanlage zu stellen, ergibt sich aus Artikel 4 und Artikel 6 EPBD.

Wegen der Bedeutung von Klimaanlage für die Gesamteffizienz von Gebäuden und der Kosteneffizienz der Maßnahmen wird vorgeschlagen, die Anwendung von Einzelanforderungen vom erstmaligen Einbau der Anlagen in neuen und bestehenden Gebäuden auch auf die Erneuerung bestehender Anlagen auszudehnen.

Von Nachrüstvorschriften für bestehende Anlagen, für die keine Sanierung geplant ist, wird derzeit abgeraten. Stattdessen sollten mit der für 2006 geplanten Verordnung zunächst praktische Erfahrungen mit der Ausweitung der Energieeinsparverordnung (EnEV) auf Klimaanlage gesammelt werden. Zu einem späteren Zeitpunkt wäre dann eine größere Präzision bei der Formulierung und der Folgeabschätzung von Nachrüstvorschriften möglich.

Für das Anwendungsgebiet wird vorgeschlagen, sich an der Definition für die Inspektion von Klimaanlage zu orientieren.

Die vorgeschlagenen Einzelanforderungen gliedern sich in fünf Einzelformulierungen.

1. Zur Begrenzung des Energiebedarfs für die Luftförderung sollte die Klasse SFP 4 nach DIN EN 13779 eingehalten werden, wobei zwischen Zuluft- und Abluftventilator eine Verrechnung der Einzelbeträge zulässig ist. Gleichzeitig sollten die mittleren Luftgeschwindigkeiten in zentralen raumluftechnischen Geräten, bezogen auf den Nettogerätequerschnitt, 2,8 m/s auf der Zuluftseite und 3,0 m/s auf der Abluftseite nicht überschreiten.
2. Raumluftechnische Anlagen sollten mit einer Einrichtung zur Wärmerückgewinnung ausgestattet werden, die mindestens der Klassifizierung H2 nach DIN EN E 13053 entspricht.
3. Wird die Raumlufffeuchte durch Klimaanlage gezielt konditioniert, sollten folgende Forderungen erfüllt werden.
 - Der Istwert der Feuchteregelung muss als physikalische Größe direkt gemessen werden.
 - Befeuchter müssen hinsichtlich der Befeuchtungsleistung regelbar sein.
 - Die Regeleinrichtungen müssen so ausgeführt werden, dass eine getrennte Sollwertvorgabe für die Befeuchtung und Entfeuchtung mit einem dazwischenliegenden „Sollwert-Totband“ möglich ist.
4. Bei Anlagen mit einem spezifischen Luftvolumenstrom $> 9 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$ sollte der Luftvolumenstrom den veränderlichen thermischen und/oder stofflichen Lasten bedarfsgerecht angepasst werden, soweit die Veränderungen messtechnisch oder zeitabhängig erfasst werden können.
5. Raumkühlanlagen sollten raumweise oder raumgruppenweise mit selbsttätig wirkenden Einrichtungen zur Raumtemperaturregelung ausgestattet werden. Für thermisch aktive Bauteile wurden Ausnahmenvorschläge formuliert.

Generell orientiert sich das Anforderungsniveau der Vorschläge eher an möglichen Effizienzsteigerungen für den Gebäude- und Anlagenbestand, für den es zahlreiche Zwänge zu berücksichtigen gilt. Für den Neubau dürfte das Erfüllen der Einzelanforderungen im Regelfall keine deutliche Verschärfung gegenüber dem derzeitigen Stand der Technik bedeuten.

Für die wesentlichen Anforderungen wurden Aussagen hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit vorgenommen. Wegen schwer vollständig zu übersehender Vielfalt an Anlagen und Systemen war dies teilweise nur exemplarisch möglich.

Es wird eingeschätzt, dass die notwendigen Investitionen für die vorgeschlagenen Einzelanforderungen in einem angemessenen Verhältnis zu den Energiekosteneinsparungen während der Lebensdauer der Anlagen stehen.

2 Grundsätzliches zu Einzelanforderungen an die energetische Qualität von Klimaanlage

Nach Artikel 4 und 6 der EPBD-Richtlinie [1] ist durch nationale Verordnungen sicherzustellen, dass Mindestanforderungen an die Energieeffizienz von Gebäuden erfüllt werden.

Während diese bei Neubauten durch Anforderungen an den primärenergetisch bilanzierten Energiebedarf gestellt werden, sind für die Sanierung bestehender Gebäude nach Artikel 6 der Richtlinie konkrete Einzelanforderungen an die energetische Qualität möglich.

„Die Anforderungen können entweder für das renovierte Gebäude als Ganzes oder für die renovierten Systeme oder Bestandteile festgelegt werden, wenn diese Teil einer Renovierung sind, die binnen eines begrenzten Zeitraums mit dem oben genannten Ziel durchgeführt werden soll, die Gesamtenergieeffizienz des Gebäudes zu verbessern.“

Einzelanforderungen sind auch anzuwenden, wenn die nachträgliche Erstinstallation von Anlagen in bestehenden Gebäuden, wenn z. B. Nutzungsänderungen oder Komfort erhöhungen geplant sind, vorgenommen wird.

Die Formulierung von Einzelanforderungen ist auch für den Neubau sinnvoll, um Extremauslegungen zu vermeiden.

In der derzeitigen Energieeinsparverordnung und deren Vorläufern haben sich Einzelanforderungen für die Gebäudehülle und für Heizungsanlagen bewährt.

Die EnEV 2004 [2] stellt für Heizungs- und Trinkwarmwassererwärmungsanlagen folgende Anforderungen:

1. Mindestanforderungen an die Effizienz der Wärmeerzeugung
2. zentrale zeit- und witterungsangepasste Regelung der Wärmeerzeugung
3. Einzelraumregelung der Raumtemperatur
4. Leistungsregelung von Umwälzpumpen
5. Zeitsteuerung von TWW-Zirkulationspumpen
6. Wärmedämmung von Heizwasser- und Trinkwarmwasserverteilleitungen
7. Wärmedämmung von Speichern.

Für raumluftechnische Anlagen fehlen äquivalente Anforderungen bisher vollständig.

Dabei weisen Raumluftechnische Anlagen folgende Besonderheiten im Vergleich zu Heizungsanlagen auf.

1. Die Versorgungsaufgaben von RLT-Anlagen sind in der Regel komplexer, da sowohl thermische als auch stoffliche Lasten (Lüftungsfunktion) abgeführt werden. Eine alleinige Betrachtung thermischer Fragestellungen ist unzulässig. Die Lüftungsfunktion unterliegt zahlreichen Anforderungen und Zwängen.
2. Die Systemvielfalt und Individualität ist im Vergleich zu Heizungsanlagen wesentlich höher. Eindeutige Klassifizierungen nach dem Baualter sind nicht möglich. Durch die Individualität ist begründet, dass für die eingesetzten Komponenten in der Regel außer Herstellerangaben keine unabhängig geprüften Produktkennwerte existieren.
3. RLT-Anlagen beanspruchen ein konstruktiv deutlich größeres Bauwerksvolumen als Heizungsanlagen, sodass wünschenswerte Maßnahmen an den räumlichen Gegebenheiten vor Ort scheitern können oder unverhältnismäßige Folgekosten in anderen Gewerken nach sich ziehen können.

Es wird nicht zu vermeiden sein, dass in Einzelfällen die Umsetzung von Einzelanforderungen unmöglich oder völlig unwirtschaftlich sein wird. Daher sollte unabhängig von den konkreten Formulierungen eine Befreiung im Einzelfall aufgrund besonderer Umstände möglich sein. Artikel 6 EPBD weist ausdrücklich auf diese Möglichkeit im Zusammenhang mit bestehenden Gebäuden hin:

„... sofern dies sofern dies technisch, funktionell und wirtschaftlich realisierbar ist.“

Zur Wirtschaftlichkeit von Maßnahmen gibt die EPBD-Richtlinie an:

„Es sollte möglich sein, bei einer solchen Renovierung anfallende Zusatzkosten binnen einer im Verhältnis zur technischen Lebensdauer der Investition vertretbaren Frist durch verstärkte Energieeinsparungen zu amortisieren.“

Neben dem Gebot der Wirtschaftlichkeit gilt der Grundsatz, dass mit der geplanten nationalen EnEV 2006 keine Erhöhung des generellen Anforderungsniveaus geplant ist.

In den Begründungen der EPBD [1] wird in Absatz 13 und 14 der Anwendungsrahmen für bestehende Gebäude geliefert.

„(13) Größere Renovierungen sind solche, bei denen die Gesamtkosten der Arbeiten an der Gebäudehülle und/oder den Energieeinrichtungen wie Heizung, Warmwasserversorgung, Klimatisierung, Belüftung und Beleuchtung 25 % des Gebäudewerts, den Wert des Grundstücks - auf dem das Gebäude errichtet wurde, nicht mitgerechnet - übersteigen, oder bei denen mehr als 25 % der Gebäudehülle einer Renovierung unterzogen werden.“

- (14) *Die Verbesserung der Gesamtenergieeffizienz eines bestehenden Gebäudes setzt zwar nicht unbedingt eine vollständige Renovierung des Gebäudes voraus, sie könnte sich aber auf die Teile beschränken, die am wichtigsten für die Gesamtenergieeffizienz des Gebäudes und kosteneffizient sind.*

Die Begründung nach Absatz (14) ist für die Sanierung von raumluftechnischen Anlagen zutreffend, da die Bedeutung der Klimatisierung für die Gesamteffizienz von Gebäuden hoch ist und die vorgeschlagenen Einzelanforderungen kosteneffizient sind.

Es wird vorgeschlagen, die Einzelanforderungen unterschiedslos auf den Fall der Anlagensanierung auszudehnen. Dafür bedarf es der Definition einer Sanierung.

Für das generelle Anwendungsgebiet wird vorgeschlagen, die identische Definition wie für die Inspektion von Klimaanlage [4] zu verwenden.

Zusammenfassend werden folgende Formulierungen für das Anwendungsgebiet vorgeschlagen.

Wer in Gebäude

- 1. Raumkühlanlagen mit einer Nennleistung größer als 12 Kilowatt (thermisch) oder*
 - 2. raumluftechnische Anlagen, die für einen Volumenstrom der Zuluft von 4000 Kubikmeter je Stunde oder mehr ausgelegt sind,*
- einbaut oder einbauen lässt*

Die Anforderungen sind ebenfalls einzuhalten, wenn wesentliche Bestandteile einer vorhandenen raumluftechnischen Anlage erneuert werden. Als wesentliche Bestandteile gelten raumluftechnische Zentralgeräte oder das Luftkanalnetz.

Einzelanforderungen können, wie im Falle der Heizungsanlagen in der Vergangenheit geschehen, auch zu einer Nachrüstvorschrift bei älteren Anlagen führen, für die keine konkrete Sanierung geplant ist.

Da mit Einzelanforderungen auf dem Gebiet der raumluftechnischen Anlagen

- noch keine praktischen Erfahrungen vorliegen,
- die Systemvielfalt und die Wechselwirkung mit nichtenergetischen Aspekten groß ist,

wird vorgeschlagen, auf Nachrüstvorschriften bei bestehenden Anlagen in der kommenden Verordnung zu verzichten.

Es wird erwartet, dass durch die erstmalige Aufnahme von Klimaanlage in die unterschiedlichen Betrachtungen wie Energiebedarfsausweise, Einzelanforderungen und Inspektionen in den kommenden Jahren zahlreiche Erfahrungen gesammelt werden. Die zu erwartenden Auswirkungen von Nachrüstvorschriften wären dann besser vorherzusehen.

In [3] und [4] wurde der Bestand und durchschnittliche Energiebedarf von Klimaanlage in Deutschland abgeschätzt. Danach dürften in Deutschland die zentralen raumluftechnischen Anlagen eine

dominierende Rolle spielen. Der mittlere spezifische Primärenergiebedarf bezogen auf Luftvolumenstrom und Jahr wird mit $25 \text{ kWh}/(\text{a m}^3/\text{h})$ bei einer mittleren Anlagengröße von $10.000 \text{ m}^3/\text{h}$ eingeschätzt. Die Bandbreite wird bei $15 \dots 60 \text{ kWh}/(\text{a m}^3/\text{h})$ gesehen.

Die Aufteilung des Primärenergiebedarfs auf die unterschiedlichen Nutzungsarten kann starken Schwankungen unterliegen. Als Bandbreiten können für zentrale raumluftechnische Anlagen angesetzt werden:

- | | |
|--|-------------|
| 1. Luftförderung: | 40 .. 70 % |
| 2. Lufterwärmung einschließlich Befeuchtung: | 20 .. 60 % |
| 3. Luftkühlung einschließlich Entfeuchtung: | 10 .. 40 %. |

Bei reinen Raumkühlanlagen dominiert dagegen der Primärenergiebedarf für die Kälteerzeugung.

3 Bestehende Ansätze für Einzelanforderungen

3.1 Europäische Normung

Die europäische Norm DIN EN 13779 [7] definiert die spezifische Ventilatorleistung p_{SFP} (SFP = Specific Fan Power) als Quotient aus Gesamtdruckerhöhung und Gesamtwirkungsgrad eines Ventilators (einschließlich Kraftübertragung und Motor). Es erfolgt lediglich eine Klassifizierung von Ventilatoren nach den Klassen SFP 1 bis SFP 5. Diese Klassen umfassen einen Bereich von $p_{SFP} = < 0,5$ bis $> 2,0$ kW/(m³/s).

Kategorie	P_{SFP} in $W \cdot m^{-3} \cdot s$
SFP 1	< 500
SFP 2	500 – 750
SFP 3	750 – 1 250
SFP 4	1250 – 2000
SFP 5	> 2000

Bild 3-1: Klassifizierung von SFP-Werten nach DIN EN 13779 [7]

Grenzwerte werden in DIN EN 13799 nicht gesetzt. Die Klassifizierung dient lediglich zur Beschreibung der Energieeffizienz. Typische SFP-Bereiche werden im Anhang, gestaffelt nach der Komplexität der Anlage, aufgeführt.

Der europäische Normentwurf DIN EN E 13053 vom Mai 2004 [26] legt Anforderungen an zentrale raumluftechnische Geräte fest.

Danach „sollten RLT-Anlagen mit Zuluft und Abluft mit Wärmerückgewinnungseinrichtungen ausgestattet werden.“

Die minimalen trockenen Rückwärmzahlen (bezogen auf das Massestromverhältnis 1:1) und die maximalen luftseitigen Druckverluste werden, gestaffelt nach Laufzeit und Anlagengröße gemäß Bild 3-2 vorgegeben.

Diese Vorgaben sind identisch mit der deutschen VDI-Richtlinie 3803 Ausgabe 2002 [8].

Wie in europäischen Normen häufig üblich, werden für die Mindestanforderungen an die Wärmerückgewinnung Klassifizierungen eingeführt. Diese sind in Bild 3-3 dargestellt. Mit der Klasse H2 würden die Anforderungen nach Bild 3-2 unverändert gelten.

Rückwärmzahl %	Luftvolumenstrom $m^3 \times s^{-1}$					
	0,55 to 1,39	> 1,39 to 2,78	> 2,78 to 6,94	> 6,94 to 13,89	> 13,89	
Betriebsstunden $h \times a^{-1}$	< 2 000	-	0,40	0,43	0,50	0,55
	$\geq 2\ 000$ bis 4 000	0,40	0,43	0,47	0,53	0,58
	> 4 000 bis 6 000	0,43	0,45	0,50	0,58	0,63
	> 6 000	0,45	0,50	0,55	0,63	0,68
Druck- verluste Pa	-	150	175	200	225	
	175	200	225	250	275	
	200	225	250	275	300	
	225	250	275	300	325	

Bild 3-2: Mindestwerte für Rückwärmzahlen und maximale Druckverluste in Abhängigkeit der Betriebsstundenzahl und des Luftvolumenstromes nach DIN EN E 13053 [26]

Als Bezugsgröße für den Luftvolumenstrom wird der „maximal erforderliche Außenluftanteil im Winterbetrieb“ genannt.

Klasse	Rückwärmzahl %	Druckverlust Pa
Klasse H5	Keine Anforderungen	Keine Anforderungen
Klasse H4	Wert x 0,8	Wert x 1,2
Klasse H3	Wert x 0,9	Wert x 1,1
Klasse H2	Wert nach Tabelle 3	Wert nach Tabelle 3
Klasse H1	Wert x 1,1	Wert x 0,8

Bild 3-3: Klassifizierungen für Wärmerückgewinnungsanlagen hinsichtlich Energieeffizienz nach DIN EN E 13053 [26]

Eine genaue Definition des Begriffes Rückwärmzahl fehlt in DIN EN E 13053. Es erfolgt ein Verweis, dass der Leistungsnachweis für die Rückwärmzahl nach EN 308 [25] zu erfolgen hat. In der DIN EN 308 wird anstelle der Rückwärmzahl der Begriff „Temperatur-Änderungsgrad“ verwendet. Die DIN EN 308 legt Laborprüfverfahren zur Ermittlung der Bemessungsdaten von Luft/Luft-Wärmerückgewinnungsanlagen fest.

3.2 Deutschland

In der VDI-Richtlinie 3803 „Raumlufttechnische Anlagen – bauliche und technische Anforderungen“ [8] werden in Deutschland an zwei Stellen Mindestanforderungen an die energetische Qualität formuliert.

Diese Mindestanforderungen enthalten:

1. eine Begrenzung des elektrischen Leistungsbedarfs von Ventilatoren gemäß Bild 3-4
2. die Forderung nach Ausstattung mit Anlagen zur Wärmerückgewinnung nach Bild 3-5.

Die Ventilatoranforderungen der VDI 3808 folgen der SFP-Definition nach DIN EN 13779 [7].

Luftvolumenstrom m ³ /h	Geräteklasse 1 (ohne thermodynamische Luft-Behandlung) kW/m ³ /s	Geräteklasse 2 (mit Lufterwärmung) kW/m ³ /s	Geräteklasse 3 (mit weiteren Funktionen) kW/m ³ /s
2 000 bis 5 000	2,7	3,3	3,8
5 000 bis 10 000	2,5	3,0	3,6
10 000 bis 25 000	2,3	2,7	3,3
25 000 bis 50 000	2,0	2,5	2,9
größer 50 000	1,9	2,3	2,7

Bild 3-4: Maximale SFP-Werte von Ventilatoren nach VDI 3803 [8]

Für den Anwendungsbereich nach EPBD (siehe Definitionsvorschlag nach [4]) wären für Zuluftanlagen nach der Tabelle VDI 3803 gemäß Bild 3-4 die Geräteklassen 2 und 3 relevant. Die Geräteklasse 1 wäre nach VDI 3803 auf Abluftanlagen anzuwenden. Die Grenzwerte entsprechen mit Ausnahme der Abluftanlagen > 50.000 m³/h immer der ungünstigsten Gruppe SFP5 nach DIN EN 13779.

Die Mindestanforderungen an die Ausstattung mit Wärmerückgewinnungsanlagen sind gestaffelt nach Anlagengröße und jährlicher Anlagenbetriebszeit. Gleichzeitig werden für deren Einsatz Begrenzungen der luftseitigen Druckverluste gefordert. Offensichtlich sind diese Anforderungen in der europäische DIN EN 13053 [26] übernommen worden.

Als Bezugsgröße für den Luftvolumenstrom wird ebenfalls der „maximal erforderliche Außenluftanteil im Winterbetrieb“ genannt.

Außenluftvolumenstrom Outdoor airflow volume von/bis m ³ /h/ from/to m ³ /h	bis/up to 2000 h/a	2000 bis/to 4000 h/a	4000 bis/to 6000 h/a	ab/from 6000 h/a
2000–5000	–	0,40	0,43	0,45
dP Pa	–	175	200	225
5000–10 000	0,40	0,43	0,45	0,50
dP Pa	150	200	225	250
10 000–25 000	0,43	0,47	0,50	0,55
dP Pa	175	225	250	275
25 000–50 000	0,50	0,53	0,58	0,63
dP Pa	200	250	275	300
> 50 000	0,55	0,58	0,63	0,68
dP Pa	225	275	300	350

Bild 3-5: Rückwärmzahlen und Druckverluste (je Luftseite) von Wärmerückgewinnungsanlagen nach VDI 3803 [8]

In den AMEV-Hinweisen [21] wird bezüglich der Begrenzung von Ventilatorleistungen auf den früheren Entwurf DIN EN 13779 (Ausgabe: Entwurf Februar 2000) verwiesen. Für Klimaanlage wird die Klassifizierung 3 bis 4 empfohlen, wobei Anlagen mit mehr als 3.000 jährlichen Betriebsstunden SFP 3 erreichen sollten.

Die Obergrenzen lägen demnach als Summe aus Zuluft- und Abluftventilator:

- für < 3.000 Betriebsstunden: max. 2,5 kW/(m³/s)
- für > 3.000 Betriebsstunden: max. 4,0 kW/(m³/s).

Zu Wärmerückgewinnungsanlagen wird in den AMEV-Hinweisen ausgeführt, dass bei mehr als 1.000 jährlichen Betriebsstunden die „bestmögliche“ Rückwärmzahl (d. h. > 0,80) wirtschaftlich sei. Konkrete Vorgaben werden nicht gemacht. Stattdessen werden individuelle Wirtschaftlichkeitsnachweise empfohlen, in die der Energierückgewinn, der Energieaufwand durch Pumpen und Ventilatoren sowie Sondereffekte wie verringerte Energieerzeugerleistungen einfließen sollen.

Im aktuellen Normentwurf DIN V 18599 – 7 [20] werden Standard-Rechenwerte für die Luftförderung angegeben. Diese orientieren sich an der Klassifizierung SFP 4 nach prEN 13799 und sind wie folgt gegliedert:

- Abluftanlagen: 1,25 kW/(m³/s)
- Zuluftanlagen (nur Erwärmung): 1,60 kW/(m³/s)
- Zuluftanlagen Teil- und Vollklimaanlagen): 2,00 kW/(m³/s).

BECK schlägt in [6] ebenfalls die Verwendung spezifischer Ventilatorleistungen als Grenzwerte vor. Der Vorschlag beinhaltet eine Zusammenfassung von Zuluft- und Abluftkennwert zu einem gemeinsamen Kennwert.

Danach sollten für:

1. Außenluftanlagen mit Wärmerückgewinnung 3,5 kW/(m³/s)

- | | |
|---------------------------------------|----------------------------|
| 2. reine Zu-, Fort- und Umluftanlagen | 2,4 kW/(m ³ /s) |
| 3. Anlagen im Mehrschichtbetrieb | 1,8 kW/(m ³ /s) |

nicht überschritten werden.

Weiterhin schlägt BECK vor, Wärmerückgewinnungsanlagen mit einer Rückwärmzahl von mindestens 0,50 vorzuschreiben.

Im Rahmen des MEG-Projektes [12] wurden als Grenzwerte $p_{SFP} = 1,7 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$ für Zuluftanlagen und $p_{SFP} = 1,0 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$ für Abluftanlagen vorgeschlagen. Die Umsetzung dieses Vorschlages würde das Anforderungsniveau gegenüber dem heute üblichen Standard sehr stark erhöhen und Ausnahmeregelungen für erhöhte Luftfilterung und Bestandsanlagen notwendig machen.

Für Klimazentralgeräte existiert eine RAL-Gütegemeinschaft, deren Mitglieder verbindliche Standards im Rahmen einer Selbstverpflichtung definiert haben [9]. Energetische Belange werden direkt oder indirekt berührt. Die Auslegungswerte für Wärmerückgewinner werden für die Grundsysteme gestaffelt aufgeführt. Als Mindestwert (Kreislaufverbundsystem) wird eine Rückwärmzahl von 0,40 gefordert. Aus Sicht der Gerätehersteller sind interne konstruktive Merkmale wie Wirkungsgrade, die Anströmgeschwindigkeiten und Einbausituationen von Komponenten maßgebend für die energetische Qualität, da die äußeren Einsatzbedingungen nicht beeinflussbar sind. Im Rahmen einer Verordnung sind diese Merkmale wegen der schwierigen Nachprüfbarkeit kaum durchsetzbar.

3.3 Dänemark

In der dänischen Bauordnung Bygningsreglement 1995 [13] werden Grenzwerte für die maximalen SFP-Werte von Lüftungsanlagen vorgegeben.

Bei

1. Anlagen mit konstantem Volumenstrom sind $2,5 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$
2. Anlagen mit variablem Volumenstrom sind $3,2 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$ bezogen auf den Maximalvolumenstrom

einzuhalten.

Die Grenzwerte gelten jeweils für die Summe aus Zuluft- und Abluftanlage.

Der Einsatz von Anlagen zur Wärmerückgewinnung ist vorgeschrieben.

3.4 Schweden

Laut BECK [6] ist in Schweden der Einsatz von Wärmerückgewinnungsanlagen behördlich vorgeschrieben.

Nach einer persönlichen Auskunft [24] sind in Schweden zukünftig folgende Mindestanforderungen an den SFP-Wert geplant:

- Zuluftanlagen und Abluftanlagen mit Wärmerückgewinnung 2,0 kW/(m³/s)
- Zuluftanlagen und Abluftanlagen mit Wärmerückgewinnung 1,5 kW/(m³/s)
- Abluftanlagen mit Wärmerückgewinnung 1,0 kW/(m³/s)
- Abluftanlagen mit Wärmerückgewinnung 0,6 kW/(m³/s)
- bei Variabel-Volumenstrom-Anlagen ist ein um 25 % erhöhter SFP-Wert zulässig
- für Anlagen mit einer Luftvolumenstrom < 0,20 m³/s (720 m³/h) ist 2,0 kW/(m³/s) zulässig
- bei weniger als 800 Betriebsstunden pro Jahr sind Ausnahmen zulässig.

3.5 Schweiz

In der Schweiz werden durch das Energiegesetz Rahmenbedingungen vorgegeben. Die konkreten Verordnungen werden kantonal geregelt und stützen sich auf das Energiegesetz. Ein besonders hohes Anforderungsniveau wird im Kanton Basel [14] mit den nachfolgenden Mindestanforderungen gefordert.

1. Für Räume oder Raumgruppen unterschiedlicher Nutzung müssen Einrichtungen installiert werden, die einen individuellen Betrieb ermöglichen.
2. Mechanische Abluftanlagen müssen bedarfsgerecht gesteuert werden.
3. Es müssen Wärmerückgewinnungsanlagen vorgesehen werden, die auf einen maximalen Nettoenergieerückgewinn auszulegen sind.
4. Die maximale Luftgeschwindigkeit in Luftaufbereitungsgeräten darf 1,5 m/s bezogen auf die Nettoquerschnittsfläche des Gehäuses und 2,0 m/s bezogen auf die Nettoquerschnittsfläche eines Apparates nicht überschreiten. In den „für den Druckverlust maßgebenden Strängen des Kanalnetzes“ dürfen die maximalen Luftgeschwindigkeiten nach Volumenstrom gestaffelte Grenzwerte nicht überschreiten. Ausnahmen sind zulässig, bei Anlagen mit weniger als 1.000 Betriebsstunden / Jahr, bei unvermeidbaren räumlichen Hindernissen oder aufgrund des Nachweises mit einer fachgerechten Energiebedarfsberechnung, dass kein erhöhter Energieverbrauch auftritt.

4 Vorschläge für Mindestanforderungen an Klimaanlage

4.1 Begrenzung des Energiebedarfs für die Luftförderung

Die Verwendung von SFP-Werten hat sich in der nationalen und europäischen Normung sowie in den europäischen Nachbarländern durchgesetzt. Die kombinierte Größe vereint komponentenbezogene und systembezogene Merkmale und lässt den Planern ausreichenden Gestaltungs- und Optimierungsspielraum.

Der Rückgriff auf genormte Grenzwerte ist grundsätzlich zu empfehlen, da durch die Richtlinienarbeit eine breite Akzeptanz erzielt wird und der technische Fortschritt durch Fortschreibung der Richtlinien bzw. Normen Berücksichtigung finden wird.

So ist die Gliederung und Darstellung in der VDI-Richtlinie 3803 [8] zunächst positiv zu bewerten. Allerdings wird das Anforderungsniveau als zu deutlich zu gering eingeschätzt. Ein Verweis auf diese Grenzwerte würde kaum Verbesserungen herbeiführen und eine negative Symbolik bewirken. Setzt man einen Gesamtwirkungsgrad für die Luftförderung von 0,60 an, ergeben sich aus VDI 3803 die maximal zulässigen Gesamtdruckerhöhungen nach Tabelle 4-1.

Luftvolumenstrom [m ³ /h]	Abluftanlagen [Pa]	Zuluftanlagen	
		nur Erwärmung [Pa]	weitere Funktionen [Pa]
2.000 bis 5.000	1.755	1.980	2.280
5.000 bis 10.000	1.625	1.800	2.160
10.000 bis 25.000	1.495	1.620	1.980
25.000 bis 50.000	1.300	1.500	1.740
größer 50.000	1.235	1.380	1.620

Tabelle 4-1: Zulässige Gesamtdruckerhöhungen (überschlägig), resultierend aus Mindestanforderungen VDI 3803

Damit dürften die Mindestanforderungen vor allem im unteren und mittleren Größenbereich verhältnismäßig weit gefasst sein.

Zwar ist zu berücksichtigen, dass der Anwendungsbereich ausgedehnte Bestandsgebäude ebenso wie Anlagen mit aufwendiger Luftfilterung (Schwebstoff-Filter) gleichermaßen umfasst. Es wird jedoch eingeschätzt, dass die Einhaltung der Ventilatoranforderungen nach VDI 3803 im praktischen Regelfall derzeit bereits gegeben ist.

Ein Verweis auf die SFP-Werte nach DIN EN 13779 [7], die ab Mai 2005 als nationale Umsetzung in Deutschland gilt, ist grundsätzlich möglich, wenn durch die Verordnung die Einhaltung einer SFP-Klasse fordert werden würde.

Ein Problem wird darin gesehen, dass nach der Norm die Klassifizierung im entscheidenden Bereich nicht differenziert genug ausfällt.

- Die Klasse SFP 5 verfügt über keine Obergrenze und ist bereits aus diesem Grund ungeeignet.
- Die Forderung nach Einhaltung von SFP 4 mit einer Bandbreite von 1,25 .. 2,00 kW/(m³/s) (bzw. ca. 750 ... 1.200 Pa) würde, bezogen auf den Einzelventilator, eine Verschärfung für das Bauen im Bestand bedeuten. Mit Klasse SFP 4 läge man teils 50 % unter den Mindestanforderungen nach VDI 3803. Eine Einhaltung von SFP 4 bei Einsatz von Schwebstofffiltern dürfte erhebliche praktische Umsetzungsprobleme aufwerfen, sodass Ausnahmeregelungen erforderlich wären.

An der Fortschreibung der DIN EN 13799 wird bereits gearbeitet. Zwischenentwürfe zeigen auf, dass bei der Klassifizierung der SFP-Werte Veränderungen zu erwarten sind. So ist zu erwarten, dass die Klassen von SFP 5 auf bis zu SFP 7 erweitert werden. Somit würden auch für SFP 5 Obergrenzen verfügbar. Für Anlagen mit Schwebstofffiltern würde eine „additional specific fan power“ gewährt werden, was praxisgerecht erscheint. Trotzdem wäre der wirksamste Grenzwert für Zuluftanlagen innerhalb des Bereiches der Klasse SFP 5 mit 2,0 .. 3,0 kW/(m³/s) (bzw. ca. 1.200 ... 1.800 Pa) zu sehen.

Als praktikabel für den ersten Schritt der Verordnung wird ein Maximalwert im Bereich $p_{SFP} = 2,2 \text{ .. } 2,4 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$ für größere komplexe Anlagen plus Zulage für eventuelle Schwebstofffilter angesehen.

Als Lösung wird vorgeschlagen, die Klassifizierung SFP4 nach dem gültigen Stand DIN EN 13799 als Summengröße für Zuluft- und Abluftanlagen verbindlich zu fordern – dabei aber die Möglichkeit einzuräumen, zwischen Zuluft- und Abluftanlagen asymmetrische Aufteilungen vornehmen zu können. So wäre, gleiche Zuluft- und Abluftvolumenströme vorausgesetzt, bei einem typischen Verhältnis der Druckverluste von Abluft- und Zuluftanlage im Bereich 1 : (1,20 ... 1,50) für den Zuluftventilator ein Wert von $p_{SFP} = 2,2 \text{ .. } 2,4 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$ möglich, der durch den Abluftventilator mit $p_{SFP} = 1,8 \text{ .. } 1,6 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$ kompensierbar wäre. Sind Zuluft- und Abluftvolumenstrom nicht identisch, ergibt sich als maßgebende Größe der volumenstromgewichtete Summenwert.

Beispiel:

Anlagenvolumenstrom:	10.000 m ³ /h
Zuluftventilator zentral:	10.000 m ³ /h / 1.400 Pa
Abluftventilator 1 dezentral:	9.000 m ³ /h / 1.000 Pa
Abluftventilator 2 dezentral:	1.000 m ³ /h / 500 Pa
Gesamtwirkungsgrade:	0,65

$$p_{SFP, \text{Gesamt}} = \frac{\sum_i \frac{\dot{V}_i \Delta p_i}{\eta_i}}{\dot{V}_{Anl}} = \frac{\left(\frac{10.000 \cdot 1.400 + 9.000 \cdot 1.000 + 1.000 \cdot 500}{0,65} \right) \text{ W}}{10.000 \text{ m}^3/\text{s}} = 3,62 \frac{\text{kW}}{\text{m}^3/\text{s}}$$

Der SFP-Summenwert von 3,62 kW/(m³/s) wäre kleiner als der zweifache Grenzwert der Klassifizierung SFP4 von $2 \times 2,0 = 4,0 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$!

Zum gleichen Ergebnis für die Verrechnung der SFP-Werte würde man gelangen, wenn der Quotient aus der Summe aller Ventilatorleistungen und dem Anlagenvolumenstrom gebildet und in Bezug auf den einfachen Grenzwert nach DIN EN 13779 gesetzt wird. Allerdings stünde diese Vorgehensweise in gewissem Widerspruch zu dem ausdrücklichen Hinweis in DIN EN 13799, wonach die Werte je Ventilator gelten.

Die aktuelle Fassung der DIN EN 13779 [7] führt im informativen Anhang A typische Anhaltswerte für die Aufteilung der luftseitigen Druckverluste von RLT-Anlagen auf.

Danach würden bei einer Zuluft-Vollklimaanlage Kategorie „Hoch“ 850 Pa bei einstufiger Filterung und 1.100 Pa bei zweistufiger Filterung auf das Klimazentralgerät (inkl. Schalldämpfer) entfallen. Bei Gesamtdruckverlusten von 1.320 Pa bzw. 1.570 Pa würde der interne Geräteanteil 64 .. 70 % betragen.

Betrachtet man die externen Druckverluste von Kanalsystem und Einbauteilen lässt sich verallgemeinern:

1. Auf das reine Kanalsystem entfallen nur ca. 20 – 30 % der Gesamtdruckverluste, wobei hier eine Aufteilung auf gerade Kanal- und Rohrstrecken sowie auf Formstücke und Klappen als Einzelwiderstände (Richtwert 50 % : 50 %) zu sehen ist.
2. Bei den Endkomponenten wie Volumenstromreglern, Luftdurchlässen, Induktionsgeräten ist der Spielraum für Einzelanforderungen kaum gegeben, da einerseits bestimmte Vordrücke für die Funktion notwendig sind, andererseits durch die Geräuscherzeugung bereits enge Grenzen bei der Auslegung gesetzt sind.

Somit verbleiben für die Verbesserung der Energieeffizienz hauptsächlich zwei Grundschrirte:

1. Systementwurf: Dezentralisierung, Verkürzung der Kanalwege, Anordnung der RLT-Zentralen im Gebäude, Reduzierung der Einzelwiderstände. Hierbei sind bei Sanierungen des Bestandes enge Grenzen gesetzt.
2. Dimensionierung der RLT-Zentralgeräte: in erster Näherung sinken die Druckverluste umgekehrt quadratisch zur Querschnittsfläche, wodurch die Förderleistung umgekehrt kubisch zur Querschnittsfläche sinkt.

Über eine Begrenzung der zulässigen Strömungsgeschwindigkeit innerhalb von Lüftungszentralgeräten wäre eine direkte Einflussnahme auf die wesentlichen Verursacher zu hoher Luftförderleistungen möglich. Als mittlere Strömungsgeschwindigkeit wäre der Quotient aus Luftvolumenstrom und der inneren Querschnittsfläche des Lüftungszentralgerätes zu definieren. Der Vorteil dieser Größe besteht in der leichten Nachprüfbarkeit

in der universellen Anwendbarkeit, unabhängig von Größe und Ausdehnung des Gebäudes oder Art und Umfang der Luftfilterung.

Als konkrete Grenzwerte für die mittlere Luftgeschwindigkeit werden empfohlen:

max. 2,8 m/s für Zuluftgeräte

max. 3,0 m/s für Abluftgeräte.

Entgegen der früheren Empfehlung aus dem 1. Grobkonzept [18] wird empfohlen, auf die Begrenzung der Strömungsgeschwindigkeiten in Luftkanälen zu verzichten, da die erwarteten Effekte gering und die erwarteten Probleme im praktischen Vollzug unverhältnismäßig hoch sind.

Es werden folgende Formulierungen vorgeschlagen.

Die spezifische elektrische Leistung von Einzelventilatoren ist auf die Grenzwerte der Kategorie SFP 4 entsprechend DIN EN 13799 (Ausgabe Mai 2005) zu begrenzen. Eine Verrechnung von Zuluft- und Abluftventilatorleistungen einer Anlage ist möglich, wenn der gewichtete Summenwert den zweifachen Grenzwert gemäß Satz 1 nicht überschreitet. Die Anforderungen nach Satz 1 und 2 gelten nicht für Anlagen, in denen der Einsatz von Luftfiltern nach DIN EN 1822 notwendig ist.

Innerhalb von zentralen raumlufttechnischen Geräten darf die mittlere, auf die innere Gehäusefläche bezogene Luftgeschwindigkeit den Wert von 2,8 Meter je Sekunde in der Zuluft und 3,0 Meter je Sekunde in der Abluft nicht überschreiten.

4.2 Mindestanforderungen an die Wärmerückgewinnung

Die Anforderungen an die Wärmerückgewinnung nach DIN EN E 13053 [26] bzw. VDI 3803 [8] (Bilder 3-2 bis 3-4), gestaffelt nach Luftvolumenstrom und jährlicher Anlagenbetriebszeit, sind plausibel und nachvollziehbar. Ebenso wird die gleichzeitige Berücksichtigung der luftseitigen Druckverluste als sinnvoll angesehen, da der Energierückgewinn nur in geringem Umfang durch einen Energiemehraufwand bei der Luftförderung kompensiert werden darf. Allerdings werden auch hier die Grenzwerte für die maximalen Druckverluste als deutlich zu hoch angesehen. Durch die Kombination mit den gleichzeitig vorgeschlagenen Begrenzungen der Ventilatorleistung ergeben sich hier jedoch auf indirekte Weise Beschränkungen.

Bei Einsatz von Plattenwärmeübertragern und Rotoren ist die Einhaltung der geforderten Rückwärmzahlen problemlos möglich.

Lediglich für Anlagen mit größeren Luftleistungen und hohen jährlichen Betriebsstundenzahlen wird dann ein erhöhter Aufwand gesehen, wenn aus Gründen der Schadstoffübertragung und des Konstruktionsvolumens Kreislaufverbundsysteme eingesetzt werden müssen. Jedoch sind auch hierfür

Komponenten am Markt verfügbar, die Rückwärmzahlen von 0,68 ermöglichen. Aufgrund der hohen Betriebsstundenzahlen ist die Wirtschaftlichkeit gegeben (siehe Abschnitt 5.2).

Es wird daher empfohlen, an Wärmerückgewinnungsanlagen die Mindestanforderung Klasse H2 nach DIN EN 13053 zu stellen.

Zwei Aspekte bedürfen einer Präzisierung.

1. Es muss juristisch geprüft werden, welche Auswirkungen der Verweis in DIN EN E 13053 auf DIN EN 308 hat, da diese für Laborprüfungen gilt. Die Formulierungen sollten sicherstellen, dass nicht für sämtliche Wärmerückgewinnungsanlagen, hier handelt es sich um individuell gefertigte Baugruppen, Laborprüfungen notwendig werden. Anderenfalls kann auf die VDI-Richtlinie 3803 verwiesen werden.
2. Aus energetischer Sicht ist die Umluftbeimischung der Wärmerückgewinnung gleichgestellt. Gerade im Gebäudebestand sind häufig Anlagen mit Umluftbeimischung anzutreffen. Nach der Klassifizierung entsprechend DIN EN E 13053 oder DIN EN 308 fällt die Umluftbeimischung in keine der genannten Kategorien. Kann die Umluftbeimischung uneingeschränkt nach energetischen Aspekten betrieben werden, wären Fälle denkbar, bei denen Wärmerückgewinnungsanlagen unwirtschaftlich bis überflüssig werden. Die relevanten Einsatzfälle dürften vorrangig bei prozesslufttechnischen und ähnlichen Anlagen (z. B. Reinraumanlagen, EDV-Klimaanlagen, OP-Anlagen) zu finden sein. Diese sollten nicht in das Anwendungsgebiet der Verordnung fallen. Befreiungen im Einzelfall sollten möglich sein.

Vorgeschlagen wird folgende Formulierung.

„Wer in Gebäude Anlagen ... einbaut oder einbauen lässt, hat diese mit einer Einrichtung zur Wärmerückgewinnung auszustatten, die mindestens der Klassifizierung H2 nach DIN EN E 13053 (Mai 2004) entspricht.“

Optional könnte durch einen Nebensatz gefordert werden, auch bei Anlagen kleiner 5.000 m³/h und weniger als 2.000 jährlichen Betriebsstunden, die in den Anwendungsbereich der Verordnung fallen, eine Wärmerückgewinnung zu fordern.

4.3 Befeuchtung und Entfeuchtung von Luft

Das Befeuchten und besonders das Entfeuchten von Luft sind energieintensive Vorgänge und sollten auf ein Minimum begrenzt bleiben.

Für Räume, die dem Aufenthalt von Personen dienen, kann die Raumlufffeuchte nach DIN 1946 – 2 [15] innerhalb eines großen Toleranzbereiches variieren. Es sollte angestrebt werden, diesen Toleranzbereich energieoptimal auszunutzen.

Bei älteren RLT-Anlagen mit Verdunstungsbefeuchtern ist häufig eine so genannte Taupunktregelung vorzufinden. Diese energetisch ungünstige Regelungsart war deswegen weit verbreitet, weil in der Vergangenheit zuverlässige Feuchtesensoren nicht verfügbar, unzuverlässig oder zu teuer waren. Statt der direkten Feuchtemessung wurde die Lufttemperatur nach einem unregelmäßigen Verdunstungsbefeuchter bzw. Nasskühler gemessen. Beide Apparate mussten dann so betrieben werden, dass der thermodynamische Luftzustand am Austritt der Apparate annähernd dem Sättigungszustand entsprach. Die gemessene Trockenkugeltemperatur entsprach dann näherungsweise der Taupunkttemperatur und war somit ein Maß für die Zuluftfeuchte. Die Folge dieses Regelungsprinzips waren stark erhöhte Energieverbräuche. In der SANIREV-Studie [16] wurden erhebliche Unterschiede im Heiz- und Kühlenergiebedarf zwischen Taupunktregelung und direkter Feuchterege-lung quantifiziert. Die Befeuchterregelungsart wurde deshalb als Unterscheidungsmerkmal für das in SANIREV entwickelte Kennwertverfahren für den Nutzenergiebedarf der thermischen Luftaufbereitung [19] aufgenommen.

Die Mindestanforderungen an die Feuchterege-lung sollten deshalb folgende Punkte enthalten:

1. Der Istwert der Feuchterege-lung muss als physikalische Größe direkt gemessen werden.
2. Befeuchter müssen hinsichtlich der Befeuchtungsleistung regelbar sein.
3. Die Regeleinrichtungen müssen so ausgeführt werden, dass eine getrennte Sollwertvorgabe für die Befeuchtung und Entfeuchtung mit einem dazwischenliegenden „Sollwert-Totband“ möglich ist.
4. Verdunstungsbefeuchter, die in der Abluft angeordnet sind und zur Temperaturabsenkung dienen, somit damit keine Nacherwärmung erfordern, können unregelmäßig betrieben werden.

Formulierung:

„Wer in Gebäude Anlagen nach ... einbaut oder einbauen lässt, in denen die Feuchte der Raumluff verändert wird, muss diese mit regelbaren Befeuchtern und selbsttätigen Rege-lungseinrichtungen ausstatten, bei denen getrennte Sollwerte für die Be- und die Entfeuchtung eingestellt werden können und als Führungsgröße mindestens die direktv gemessene Zuluftfeuchte dient.“

4.4 Bedarfsgerechte Steuerung des Luftvolumenstromes

Raumluftechnische Anlagen haben innerhalb von Gebäuden häufig mehrere Funktionen parallel zu erfüllen. Diese können sein:

- Lüftungsfunktion: Verdrängung oder Verdünnung von Schadstoffen, Filterung von Partikeln
- Temperierfunktion: Heizen oder Kühlen von Räumen
- Feuchtefunktion: Einhaltung von Grenzen für die Raumlufffeuchten.

Die Dimensionierung der RLT-Anlage ergibt sich aus dem ungünstigsten Lastfall dieser parallelen Funktionen. Im Laufe der Betriebszeit unterliegen die Lastfälle in der Regel starken Schwankungen, die von der Witterung, der internen Belegung oder dem Zeitprofil von Sollwertvorgaben abhängen.

Die häufig anzutreffenden Konstant-Volumenstrom-Anlagen sind nicht imstande, bedarfsgerecht auf die Lastschwankungen zu reagieren und somit einen durchgängig energetisch optimalen Betrieb zu gewährleisten.

Häufigste Anwendungen für einen energiesparenden Variabel-Volumenstrom-Betrieb sind:

- Regelung des Volumenstromes nach der Raumtemperatur
- Steuerung des Volumenstromes nach Zeitprogrammen: Tag-/Nachtbetrieb, Belegungsplänen
- Regelung des Volumenstromes nach der Raumlufqualität, z. B. detektiert durch CO₂-Sensoren.

Der apparative Aufwand für die Ertüchtigung einer Anlage zur bedarfsgerechten Steuerung des Luftvolumenstromes setzt sich zusammen aus:

- den erforderlichen Sensoren und Reglern
- einer Drehzahlregelung der Ventilatoren
- eventuell einer Zonenregelung mittels motorischer Volumenstromregler.

Im Einzelfall kann der Aufwand sehr unterschiedlich ausfallen.

Bei typischen Einzelzonenanlagen wie Theatern, Hörsälen, Sporthallen, Industriehallen wird im Regelfall auf Volumenstromregler verzichtet werden können und die zentrale Drehzahlregelung der Ventilatoren ausreichend sein.

Stand der Technik stellen Frequenzumrichter dar, die für alle Leistungsgrößen von Ventilatoren zur Verfügung stehen.

Bei zentralen Multizonenanlagen wird der Einsatz von motorischen Volumenstromreglern in Zu- und Abluft sowie Regelgeräten in den Zonen bis einzelnen Räumen unumgänglich sein, um auf die indivi-

duellen Lastschwankungen reagieren zu können. Daraus ergibt sich ein deutlich höherer investiver Aufwand, der den Einsatz nur bei sehr hohen Luftwechseln rechtfertigt. Die bedarfsgerechte Steuerung sollte in diesem Fall nur gefordert werden, wenn es sich z. B. um den Ersatz veralteter Nur-Luft-Vollklimaanlagen oder Zwei-Kanal-Konstantvolumenstrom-Anlagen handelt.

Hier werden zwei Hauptgruppen gesehen:

- Anlagen zur Klimatisierung von Bürogebäuden (kühllastabhängige Regelung der Volumenströme möglich)
- Anlagen zur Laborlüftung (zeit- oder nutzungsabhängige Regelung der Volumenströme möglich).

Als Grenzkriterium wird ein flächenbezogener spezifischer Luftvolumenstrom von $9 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$ vorgeschlagen, der im Regelfall zu einem Luftwechsel $> 3 \text{ h}^{-1}$ führt. Anlagen für Büro- und Aufenthaltsräume mit einer Belegungsdichte von weniger als 1 Person auf 5 m^2 und einem Luftvolumenstrom, der entsprechend personenbezogener Mindestaußenluft rate bemessen ist, wären dadurch nicht betroffen.

Als weiteres Kriterium sollte eingeführt werden, dass anders lautende Regelwerke, die aufgrund des Arbeits- und Gesundheitsschutzes abweichende Forderungen stellen, eine Befreiung von der Mindestanforderung bewirken können.

Weiterhin muss die Anwendung auf Fälle beschränkt bleiben, bei denen die Lastschwankungen entweder zeitlich oder messtechnisch erfassbar sind. Hier sei als Beispiel eine WC-Lüftungsanlage in einem größeren Gebäude genannt, bei der trotz eines spezifischen Volumenstromes von im Regelfall $> 9 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$ ein konstanter Betrieb während der Nutzungszeit beibehalten werden sollte.

Formulierung:

„Wer in Gebäude Anlagen ... einbaut oder einbauen lässt, deren Zuluftvolumenstrom je Quadratmeter Nettonutzfläche 9 Kubikmeter pro Stunde überschreitet, muss diese mit Einrichtungen zur selbsttätigen Regelung der Volumenströme in Abhängigkeit von den thermischen oder stofflichen Lasten oder zur Einstellung der Volumenströme in Abhängigkeit von der Zeit ausstatten. Unberührt von Satz 1 bleiben Anwendungen, in denen aufgrund des Arbeits- und Gesundheitsschutzes höhere Zuluftvolumenströme vorgeschrieben sind oder Anwendungen, bei denen Lastveränderungen weder messtechnisch noch zeitlich erfassbar sind.“

4.5 Raumtemperaturregelung

Bei Heizungsanlagen wird nach EnEV [2] §12 Absatz (2) gefordert:

„Wer heizungstechnische Anlagen mit Wasser als Wärmeträger im Gebäude einbaut oder einbauen lässt, muss diese mit selbsttätig wirkenden Einrichtungen zur raumweisen Regelung der Raumtemperatur ausstatten.“

Bei grundsätzlicher Betrachtung wäre eine Übertragung dieser Formulierung auf Raumkühlanlagen gerechtfertigt.

Die Besonderheit bei der Klimatisierung besteht jedoch darin, dass ein größeres Raumtemperaturband für eine akzeptable thermische Behaglichkeit zulässig und anstrebenswert ist. So kann eine energiesparende Maßnahme oftmals darin bestehen, auf eine präzise Raumtemperaturregelung zu verzichten und stattdessen nur eine eingeschränkte unregelmäßige Kühlleistung zur Verfügung zu stellen. Bei Systemtemperaturen nahe der Raumtemperatur kann sich ein ausreichender Selbstregelleffekt einstellen. Dies kann bei Einsatz thermisch aktiver Bauteile der Fall sein, insbesondere dann, wenn Umweltenergie zum Einsatz gelangt. Bei diesen Systemen ist eine raumweise Temperaturregelung aufgrund der außerordentlichen Trägheit praktisch kaum möglich. Zudem erfolgt die Verlegung der betonintegrierten Rohrregister teilweise über die Raumbegrenzungen hinweg.

Daher wird folgende Formulierung vorgeschlagen:

„Wer in Gebäude Anlagen zur Kühlung von Räumen mittels Kaltwasser oder direkt verdampfendem Kältemittel einbaut oder einbauen lässt, hat diese mit Einrichtungen zur raumweisen Regelung der Temperatur auszustatten. Bei Räumen gleicher Nutzung, Ausstattung und Orientierung ist abweichend von Satz 1 eine Ausstattung mit einer raumgruppenweisen Regelung zulässig. Bei speichernden, bauteilintegrierten Systemen, deren Kühlleistung geringer als die maximale Kühllast dimensioniert ist, ist abweichend von Satz 1 eine zonenweise Steuerung der Kühlleistung zulässig.“

Die Forderungen der EnEV bezüglich der raumweisen Regelung von Heizungsanlagen sind vor einem längeren historischen Hintergrund zu sehen. Heizungsanlagen wurden jahrzehntlang ohne selbsttätige Regelungsmöglichkeit installiert, weil derartige Produkte erst seit den siebziger Jahren marktfähig zur Verfügung standen.

Bei Raumkühlsystemen kann mit Ausnahme der thermisch aktiven Bauteile davon ausgegangen werden, dass eine Einzelraumregelung Stand der Technik ist.

Während bei der Heizungsregelung mit der witterungsgeführten Vorlauftemperaturregelung eine (wenn auch ungünstigere) Alternative zur Raumtemperaturregelung bestand, ist bei der Kühlung die raumweise Regelung praktisch alternativlos.

Vor diesem Hintergrund dürften die praktischen Konsequenzen der Einzelanforderung Raumtemperaturregelung sehr gering sein. Eine Aufnahme in die Verordnung würde dem Prinzip der Vollständigkeit genügen, könnte aber in Hinblick auf eine Verschlingung des Verordnungstextes auch entfallen, ohne dass größere Nachteile erwartet werden.

5 Wirtschaftlichkeit der vorgeschlagenen Maßnahmen

In den nachfolgenden Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen wurden folgende Energiepreise angesetzt:

- Wärme: 40 EUR/MWh
- Strom: 150 EUR/MWh.

Auf die Anwendung betriebswirtschaftlicher Bewertungsmethoden wie z. B. der Kapitalwertmethode wurde bewusst verzichtet. Diese können nur im konkreten Anwendungsfall eingesetzt werden. In den nachfolgenden Beispielen handelt es sich um Schätzungen für typische Fälle, für die nicht der Eindruck eines überhöhten Genauigkeitsanspruches erweckt werden soll. Bei Zitaten von Wirtschaftlichkeitsnachweisen in der ausgewerteten Fachliteratur wird auf abweichende Methoden hingewiesen.

5.1 Luftförderung

Beispielhaft wurde für ein Lüftungszentralgerät untersucht, wie sich die Energie- und Investitionskosten bei einer großzügigeren Dimensionierung verändern. Die Investitionskosten basieren auf Herstellerangaben [22] und wurden um einen Unternehmerzuschlag von 20 % erhöht.

Es wurde eine einfache Teilklimaanlage mit einstufiger Filterung, Wärmerückgewinnung, Erhitzer und Kühler bei einem Luftvolumenstrom von 11.200 m³/h untersucht. Dieser Wert wird einerseits als ungefährender Durchschnittswert für den Anlagenbestand betrachtet [3],[4] und führt bei einem vorgegebenen Baugrößenraster zu einer Durchströmgeschwindigkeit der Luft (bezogen auf die Nettoquerschnittsfläche) von 2,8 m/s. Die externen Druckverluste wurden mit 500 Pa auf der Zuluftseite und 300 Pa auf der Abluftseite angesetzt.

Für die gleiche Konfiguration wurde alternativ die nächstgrößere Gehäuseabstufung betrachtet, was zu einer Reduzierung der Luftgeschwindigkeit von 2,8 m/s auf 2,5 m/s führte. Bei gleichen externen Druckverlusten reduzierte sich der SFP-Wert der Gesamtanlage (Zuluft + Abluft):

- p_{SFP} Gesamtanlage von 2,99 auf 2,41 kW/(m³/s) bzw. um 19 %
- p_{SFP} nur interner Geräteanteil von 1,59 auf 0,99 kW/(m³/s) bzw. um 37 %.

In Tabelle 5-1 sind die errechneten Energiekosten für die Luftförderung und die Investitionskosten gegenübergestellt.

Es würde sich für die Vergrößerung des Gerätequerschnitts ein Quotient aus erhöhten Investitionskosten zur jährlichen Energiekostensparnis von 3,2 ergeben.

Würde die Ausgangsbasis durch Luftgeschwindigkeiten > 2,8 m/s gekennzeichnet sein, würden sich wegen der Nichtlinearität der physikalischen Zusammenhänge die Amortisationszeiten verkürzen.

System		Luftgeschwindigkeit [m/s]	
		2,8	2,5
p_{SFP} gesamt (Zuluft+Abluft)	[kW/(m ³ /s)]	2,99	2,41
p_{SFP} extern (Zuluft+Abluft)	[kW/(m ³ /s)]	1,40	1,41
p_{SFP} intern (Zuluft+Abluft)	[kW/(m ³ /s)]	1,59	0,99
spezifische Energiekosten	[EUR/(a m ³ /h)]	0,311	0,251
spezifische Investitionskosten	[EUR/(m ³ /h)]	0,95	1,14

Tabelle 5-1: Gegenüberstellung Energiekosten Luftförderung – Investitionskosten Lüftungszentralgerät

BECK weist in [6] nach, dass sich bis zu einer unteren Grenze des internen Gesamtdruckverlustes (Zuluft- und Abluftgerät) von ca. 600 Pa von jedem Ausgangspunkt eine Reduzierung des Gerätedruckverlustes um 100 Pa während der Lebensdauer des Gerätes amortisiert. Je größer der Ausgangsdruckverlust, desto kürzer die Amortisationszeit. Mit den unter Abschnitt 4.1 vorgeschlagenen Mindestanforderungen würde die 600 Pa – Grenze nicht annähernd erreicht werden.

5.2 Wärmerückgewinnung

Grundlage für die Überprüfung der Wirtschaftlichkeit von Wärmerückgewinnungsanlagen stellen ausgewählte Stichproben der Anforderungen nach DIN EN E 13053 [26] bzw. VDI 3803 [8] gemäß Tabelle 5-2 und 5-3 dar. Die Investitionskosten wurden als repräsentative Werte von einem Gerätehersteller abgefragt und um einen Unternehmerzuschlag von 20 % erhöht. Zusätzlich wurden Kosten für die Regelung von 1.000 EUR je Anlage hinzugerechnet.

Luftvolumenstrom [m ³ /h]	System	Spezifische Investitionskosten K_{WRG} Wärmerückgewinnungsanlagen [EUR/(m ³ /h)]			
		Φ_{WRG}	K_{WRG}	Φ_{WRG}	K_{WRG}
4.000	Kreislaufverbundsystem	0,40	0,91	0,45	0,97
10.000	Plattenwärmeübertrager	0,43	0,77	0,50	0,85
50.000	Rotations-WRG	0,58	0,62	0,68	0,68

Tabelle 5-2: Spezifische Investitionskosten für Wärmerückgewinnungsanlagen

Die jährliche Ersparnis der Energiekosten ΔK_H ergibt sich nach Tabelle 5-3 aus einem reduzierten Heizenergiebedarf Δq_H nach [19] sowie dem zusätzlichen Strombedarf der Ventilatoren Δq_E zur Überwindung der Druckverluste einer WRG. Für die Druckverluste wurden die zulässigen Maximalwerte nach DIN EN E 13053 [26] bzw. VDI 3803 [8] für jeweils Zuluft- und Abluftseite angesetzt.

Luftvolumenstrom [m ³ /h]	Jährliche Betriebszeit					
	2.500 h/a			8.000 h/a		
4.000	Φ_{WRG}	[-]	0,40	Φ_{WRG}	[-]	0,45
	Δq_H	[kWh/(a m ³ /h)]	4,24	Δq_H	[kWh/(a m ³ /h)]	16,05
	Δq_E	[kWh/(a m ³ /h)]	0,37	Δq_E	[kWh/(a m ³ /h)]	1,54
	ΔK_H	[EUR/(a m ³ /h)]	0,11	ΔK_H	[EUR/(a m ³ /h)]	0,41
10.000	Φ_{WRG}	[-]	0,43	Φ_{WRG}	[-]	0,50
	Δq_H	[kWh/(a m ³ /h)]	4,55	Δq_H	[kWh/(a m ³ /h)]	17,59
	Δq_E	[kWh/(a m ³ /h)]	0,48	Δq_E	[kWh/(a m ³ /h)]	1,88
	ΔK_H	[EUR/(a m ³ /h)]	0,18	ΔK_H	[EUR/(a m ³ /h)]	0,70
50.000	Φ_{WRG}	[-]	0,58	Φ_{WRG}	[-]	0,68
	Δq_H	[kWh/(a m ³ /h)]	5,98	Δq_H	[kWh/(a m ³ /h)]	22,60
	Δq_E	[kWh/(a m ³ /h)]	0,59	Δq_E	[kWh/(a m ³ /h)]	2,39
	ΔK_H	[EUR/(a m ³ /h)]	0,24	ΔK_H	[EUR/(a m ³ /h)]	0,90

Tabelle 5-3: Energie- und Kostenersparnis bei Einsatz von Wärmerückgewinnern entsprechend Mindestanforderungen DIN EN E 13053 [26] bzw. VDI 3803 [8]

Luftvolumenstrom [m ³ /h]	System	Verhältnis Investitionskosten : jährliche Energiekostensparnis [a]			
		Φ_{WRG}	2.500 h/a	Φ_{WRG}	6.000 h/a
4.000	Kreislaufverbundsystem	0,40	8,3	0,45	2,4
10.000	Plattenwärmeübertrager	0,43	4,3	0,50	1,2
50.000	Rotations-WRG	0,58	2,5	0,68	0,8

Tabelle 5-4: Verhältnis der Investitionskosten zur jährlichen Energiekostensparnis für die Varianten nach Tabelle 5-2 und 5-3

Tabelle 5-4 gibt das Verhältnis von Investitionskosten zur jährlichen Energiekostensparnis an. Praktisch dürfte die Wirtschaftlichkeit noch wesentlich günstiger ausfallen, da die angesetzten zusätzlichen Stromkosten aufgrund der großzügigen Druckverlustgrenzwerte nach DIN EN E 13053 [26] bzw. VDI 3803 [8] überzogen ausfallen.

BECK [6] zeigt ebenfalls auf, dass ein Wärmerückgewinner mit einer Rückwärmzahl von 55 % bei einer mittleren Anlagengröße (hier Luftvolumenstrom 10.000 m³/h analog [3],[4]) bereits bei 2.500 jährlichen Betriebsstunden mit 5-9 Jahren Amortisationszeiten erzielt, die deutlich unterhalb der Lebensdauer einer Anlage liegen. Bei dieser Berechnung sind eine Verzinsung des Kapitaleinsatzes von 6 % und deutlich niedrigere Energiepreise angesetzt worden.

Eine Grenzbetrachtung wird soll für den Fall einer Anlage von 55.000 (Kategorie > 50.000) m³/h mit 6.000 jährlichen Betriebsstunden bei Einsatz in einem Laboratorium durchgeführt werden. Wegen der

Baugröße und der Verhinderung von Schadstoffübertragung würde ein Kreislaufverbundsystem einzusetzen sein, bei dem die Erreichung der geforderten Rückwärmzahl von 0,68 apparativ aufwendig ist.

Setzt man wegen hoher Innenlasten eine ganzjährig niedrigere Zulufttemperatur von 18 °C an, folgt nach dem Entwurf DIN V 18599 – 3 [19] ein jährlicher Wärmerückgewinn von 776 MWh. Der Energieaufwand für die Überwindung der Druckverluste des Wärmerückgewinners würde bei verbesserter Ausführung (Ansatz der Druckverluste von 2 x 250 Pa) 71 MWh Strom betragen. Die Netto-Energiekostensparnis läge bei jährlich 20.390 EUR bzw. einem spezifischen Wert von 0,37 EUR/(m³/h).

Die spezifischen Investitionskosten für die WRG von 2,02 EUR/(m³/h) basieren auf Herstellerangaben [23] zuzüglich Unternehmerzuschlag von 20 %.

Es ergibt sich ein Quotient von einmaligen Investitionskosten zur jährlichen Energiekostensparnis von 5,5. Die Kostenvorteile durch reduzierte Wärme-Anschlussleistungen sind dabei unberücksichtigt.

5.3 Befeuchtung und Entfeuchtung von Luft

Die in Abschnitt 4.3 vorgeschlagenen Anforderungen setzen sich aus investiven (Sensorik, Befeuchterregelung) und nichtinvestiven (Sollwerttoleranzen) Einzelschritten zusammen. Erfahrungsgemäß gehört die nachträgliche Umsetzung an bestehenden Anlagen zu den wirtschaftlichsten Energiesparmaßnahmen an Klimaanlagen überhaupt. Das primärenergetische Einsparpotenzial liegt je nach Ausgangssituation bei 10 – 40 % vom Gesamtenergiebedarf. Da Verdunstungsbefeuchter in der Regel erst ab einer gewissen Mindestgröße der Anlage eingesetzt werden, sind die notwendigen Investitionen gering im Verhältnis zu den Energiekosten. Die konstruktive Realisierung ist unproblematisch.

In einem vom Verfasser im Jahr 2001 durchgeführten Projekt wurde an drei bestehenden Anlagen eines Verwaltungsgebäudes mit Zuluftvolumenströmen von 47.000, 19.000 und 17.000 m³/h die Feuchteregelung umgerüstet. Bei den vorhandenen Luftwäschern wurden nachträglich drehzahlgeregelte Pumpen eingebaut, um zu einer regelbaren Befeuchterleistung zu gelangen.

Aufgrund veralteter, nicht mehr erweiterbarer DDC-Unterstationen mussten neue DDC-Controller nachgerüstet und in die Gebäudeleittechnik eingebunden werden. Die Gesamtinvestitionen einschließlich Planung und Inbetriebnahme belief sich für die drei Anlagen auf insgesamt 45.000 EUR.

Die ursprüngliche Taupunktregelung arbeitete mit einem gleitenden Sollwert zwischen 9 und 12 °C und führte zu Raumlufffeuchten von 40 % im Winter und 50 % im Sommer.

Nach der Umstellung auf die direkte Feuchteregelung wurde die Raumlufffeuchten im Winter auf 30 % und im Sommer auf 65 % nach DIN 1946-2 gespreizt. Im mittleren Übergangsbereich wurde im Gegensatz zur früheren Betriebsweise auf eine Be- und Entfeuchtung vollständig verzichtet.

Die jährliche Energiekostensparnis wurde mit 17.000 – 20.000 EUR beziffert, wodurch eine Amortisation der Umrüstung nach ca. 3 Jahren gegeben war.

Bei einem Neubau oder einer kompletten Sanierung der Anlage wären deutlich mehr als 50 % der Investitionskosten ohnehin fällig gewesen. Daher stellt das aufgeführte Beispiel bereits einen sehr ungünstigen Fall dar.

5.4 Bedarfsgerechte Steuerung des Luftvolumenstromes

Für Einzelzonenanlagen in Sälen, Theatern oder Hallen ist der investive Aufwand verhältnismäßig gering. Verallgemeinerungsfähige Aussagen zur Energieeinsparung wären nur empirisch zu treffen, wobei das benötigte statistische Datenmaterial nicht verfügbar ist. Aufgrund der allgemeinen Erfahrung wird jedoch eingeschätzt, dass die Wirtschaftlichkeit bei Einzelzonenanlagen gegeben ist.

Bei Multizonenanlagen dürften die Amortisationszeiten vergleichsweise größer ausfallen.

Aufgrund der hohen Luftwechsel zur Einhaltung des Gesundheits- und Arbeitsschutzes und der Notwendigkeit einer durchgehenden Lüftung sind Laboratorien für den Einsatz einer bedarfsgerechten Volumenstromregelung prädestiniert. Der apparative Regelungsaufwand ist in Laboratorien besonders groß, da in durchschnittlichen Laborräumen unterschiedliche Abluftentnahmestellen wie allgemeine Raumabluft, Digestorien, Schrank- und Sonderabsaugungen existieren können. Im Fall der bedarfsgerechten Volumenstromregelung müssten diese vollständig mit Volumenstromreglern ausgestattet werden. Weiterhin sind raumweise Regelungscontroller notwendig, die für die erforderliche Druckhaltung und das Zusammenspiel der zahlreichen Komponenten sorgen. Somit dürften Laborgebäude den Gebäudetypus mit Multizonenanlagen darstellen, bei denen die Umstellung auf bedarfsgerechte Lüftung mit den höchsten Investitionskosten verbunden ist.

In der RELAB-Studie [17] wurden 1998 umfangreiche Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen zur bedarfsgerechten Lüftung von Laboratorien vorgenommen. Die Energiekostensparnis durch bedarfsgerechte Lüftung bei einem 10h-Betrieb wurde auf 40 .. 45 % beziffert.

In die Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen gingen weiter ein:

1. Kapitalzinsen von 6 - 8 %
2. jährliche Preissteigerung von 2 % für Energie und Betrieb
3. Instandhaltungs- Wartungs- und Bedienkosten.

Die Energiekostensparnis durch den Variabel-Volumenstrom-Betrieb amortisierte die erhöhten Mehrkosten rechnerisch nach 7 – 8 Jahren.

Berücksichtigt man beim Variabel-Volumenstrom-Betrieb die Anforderungen an den Mindestluftstrom, stellt sich nach [17] die Amortisation aufgrund erhöhter Investitionen für allgemeine Raumabluft erst nach über 20 Jahren ein.

Nach eigenen Erfahrungen stellt der 24-h-Betrieb mit der Möglichkeit zur deutlichen Volumenstromabsenkung in der Nebenbetriebszeit den Regelfall dar. Gegenüber konstant betriebenen Anlagen dürfte

sich ein größeres Energieeinsparpotenzial bei gleich bleibenden Investitionen einstellen, sodass auch in diesem Fall eine Amortisation innerhalb der Lebensdauer der Anlage erwartet wird.

5.5 Raumtemperaturregelung

Die Auswirkung einer raumweisen Temperaturregelung bei Kühlgeräten auf den Energiebedarf lässt sich rechnerisch nicht quantifizieren, da die Alternative eine manuelle, willkürliche Steuerung wäre. Deren rechnerische Bewertung ist unmöglich. Empirische Studien zu dem Thema sind aus der Fachliteratur nicht bekannt. Auf Aussagen zur Wirtschaftlichkeit musste verzichtet werden.

Indirekt kann jedoch der Vergleich zur Heizungstechnik als Rechtfertigung dieser Einzelanforderung herangezogen werden.

6 Quellenverzeichnis

- [1] Richtlinie 2002/91/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2002 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden
- [2] Verordnung über energieeinsparenden Wärmeschutz und energieeinsparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung – EnEV) vom 2. Dezember 2004
- [3] Schiller, H.: Grundlagen zur Inspektion von Klimaanlageanlagen; Teilbericht 1: Abschätzung des CO₂-Reduktionspotenzials bestehende RLT-Anlagen; Januar 2005
- [4] Schiller, H.: Grundlagen zur Inspektion von Klimaanlageanlagen; Teilbericht 2: Methodik der Inspektion; März 2005
- [5] Sanierungspotential von RLT-Anlagen; Teilbericht zum Forschungsprojekt SANIREV; Hermann-Rietschel-Institut der TU Berlin; 1997
- [6] Beck, E.: Energieverbrauch, -einsparpotential und -grenzwerte von Lüftungsanlagen; Dissertation an der Universität und Gesamthochschule Kassel; 2000
- [7] DIN EN 13779: Lüftung von Nichtwohngebäuden – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen an Lüftungs- und Klimaanlageanlagen; Mai 2005
- [8] VDI 3803: Raumluftechnische Anlagen – bauliche und technische Anforderungen; Oktober 2002
- [9] Güte- und Prüfbestimmungen für raumluftechnische Geräte; RAL Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e. V.; Januar 2001
- [10] Kolmetz, S., Ostermeier, U., Rouvel, L.: Der Energiebedarf raumluftechnischer Anlagen in Nichtwohngebäuden (Lüftung, Kühlung, Klimatisierung); Bericht TP 5.31.1 des IKARUS-Projektes; März 1995
- [11] VDI 2067: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen; Teil 1: Grundlagen und Kostenberechnung; 2000
- [12] Hörner, M.: Methodik zur Erfassung, Beurteilung und Optimierung des Elektrizitätsbedarfs von Gebäuden; Modul 2.2 Luftförderung; Bericht zum Projekt MEG

- [13] Bygningsreglement 1995; Dänische Bauordnung
- [14] Text der Verordnung zum Energiegesetz (vom 11.5.1999); Kanton Basel
- [15] DIN 1946 – 2: Raumluftechnik – Gesundheitstechnische Anforderungen (VDI Lüftungsregeln); Januar 1994
- [16] Schiller, H. „Energetische Bewertung von Gebäuden mit raumluftechnischen Anlagen; Teilbericht: Vereinfachtes Berechnungsverfahren für den Energiebedarf der energetischen Luftaufbereitung für das Grundsystem: Mindestlüftung mit konstantem Volumenstrom; Zwischenbericht zum Forschungsbericht SANIREV 2; 31.12.2003
- [17] Energieeinsparung in Laboratorien durch Reduzierung der Luftströme; Schlußbericht zum Forschungsvorhaben RELAB; Stuttgart 1998
- [18] Schiller, H.: Mindestanforderungen an die energetische Qualität raumluftechnischer Anlagen – 1. Grobkonzept; 03.10.2004
- [19] Entwurf DIN V 18599: Energetische Bewertung von Gebäuden — Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Beheizung, Kühlung, Beleuchtung und Warmwasserbereitung — Teil 3: Berechnung des Nutzenergiebedarfs für die energetische Luftaufbereitung; Stand 01.03.2005; noch unveröffentlicht
- [20] Entwurf DIN V 18599: Energetische Bewertung von Gebäuden — Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Beheizung, Kühlung, Beleuchtung und Warmwasserbereitung — Teil 7: Raumluftechnik und Klimakälte; Stand 01.03.2005; noch unveröffentlicht
- [21] Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnik staatlicher und kommunaler Verwaltungen (AMEV): Hinweise zur Planung und Ausführung von Raumluftechnischen Anlagen für öffentliche Gebäude; Berlin 2004
- [22] AL-KO Therm GmbH: persönliche Mitteilung; April 2005
- [23] SEW GmbH: persönliche Mitteilung; April 2005
- [24] Rantil, Michael (Schwedisches Industrieministerium): persönliche Auskunft; April 2005
- [25] DIN EN 308: Wärmeaustauscher; Prüfverfahren zur Bestimmung der Leistungskriterien von Luft/Luft- und Luft/Abgas-Wärmerückgewinnungsanlagen; Juni 1997

- [26] DIN EN 13053: Zentrale raumluftechnische Geräte – Leistungskennndaten für Geräte, Komponenten und Baueinheiten; deutsche Fassung prEN 13053:2003; Entwurf Mai 2004
- [27] DIN EN 1822: Schwebstofffilter (HEPA und ULPA); Teil 1: Klassifizierung, Leistungsprüfung, Kennzeichnung; Juli 1998