



Forschungsvorhaben F 1469

Auswirkungen energiesparender Maßnahmen im Wohnbau auf die Innenraumluftqualität und Gesundheit

Veränderungen der Innenraumluftqualität im Zusammenhang mit energiesparenden Maßnahmen im Wohnbau und ihre Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit: Bestimmung von Handlungsbedarf auf der Basis von Forschungsergebnissen und Erfahrungsberichten

Endbericht

Juni 2005

**Gefördert aus Mitteln der Wohnbauforschung
des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit**

Dr. Hans-Peter Hutter, Dr. Hanns Moshhammer, Dr. Peter Wallner, **Ärztinnen und Ärzte für eine gesunde Umwelt (ÄGU)**

DI Peter Tappler, DI. Felix Twrdik, **Innenraum Mess- und Beratungsservice (IMB)**

Dr. Erika Ganglberger, Mag. Susanne Geissler, Ing. Antonia Wenisch,
Österreichisches Ökologie-Institut (ÖÖI)



Forschungsvorhaben F 1469

Auswirkungen energiesparender Maßnahmen im Wohnbau auf die Innenraumluftqualität und Gesundheit

Veränderungen der Innenraumluftqualität im Zusammenhang mit energiesparenden Maßnahmen im Wohnbau und ihre Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit: Bestimmung von Handlungsbedarf auf der Basis von Forschungsergebnissen und Erfahrungsberichten

Endbericht

Juni 2005

**Gefördert aus Mitteln der Wohnbauforschung
des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit**

Dr. Hans-Peter Hutter, Dr. Hanns Moshhammer, Dr. Peter Wallner, **Ärztinnen und Ärzte für eine gesunde Umwelt (ÄGU)**

DI Peter Tappler, DI. Felix Twrdik, **Innenraum Mess- und Beratungsservice (IMB)**
Dr. Erika Ganglberger, Mag. Susanne Geissler, Ing. Antonia Wenisch,
Österreichisches Ökologie-Institut (ÖÖI)

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	12
1.1	Allgemeines	12
1.2	Zielkonflikt Energieperformance und Innenraumlufthqualität	13
1.2.1	Passivhauskonzept	14
1.3	Innenraumlufthqualität und Gesundheit	15
1.4	Ziele der Studie.....	16
1.4.1	Übergeordnete Ziele.....	16
1.4.2	Spezielle Fragestellungen	16
1.5	Überblick über die Befragung von PraktikerInnen	18
1.6	Arbeitsweise und Aufbau des Endberichts	18
2	ÜBERBLICK ÜBER LUFTVERUNREINIGUNGEN UND ANDERE PARAMETER IN INNENRÄUMEN, DIE GESUNDHEIT UND WOHLBEFINDEN DER BEWOHNERINNEN BEEINFLUSSEN.....	20
2.1	Übersicht über innenraumrelevante Luftverunreinigungen und ihre Quellen.....	22
2.1.1	Lebewesen	22
2.1.2	Bausubstanz/Gebäudeausrüstung	22
2.1.3	Raumnutzung	23
2.1.4	Belastung durch Außenluft und Umgebung	23
2.2	Abiotische Luftverunreinigungen	24
3	BIOGENE LUFTVERUNREINIGUNGEN	25
3.1	Begriffsdefinition.....	25
3.2	Allergene	26
3.2.1	Eigenschaften von Allergenen und Allergien.....	26
3.2.2	Allergene in Innenräumen	27
3.2.3	Zunahme der Allergien	28
3.2.4	Einflüsse auf die Allergenkonzentration in Innenräumen und Präventionsempfehlungen	28
3.2.4.1	Richt- und Orientierungswerte	30
3.3	Schimmelpilze.....	30
3.3.1	Eigenschaften und Vorkommen	30
3.3.2	Einflussfaktoren für mikrobielles Wachstum.....	31
3.3.3	Gesundheitliche Auswirkungen	33
3.3.4	Mykotoxine	34
3.3.5	β-1,3-Glucan.....	34
3.3.6	MVOC.....	34

3.3.7	Richt- und Orientierungswerte	35
3.4	Bakterien.....	36
3.4.1	Eigenschaften und Vorkommen.....	36
3.4.2	Gesundheitliche Auswirkungen.....	36
3.4.3	Endotoxine	37
3.5	Anthropogene Luftverunreinigung.....	38
3.5.1	Eigenschaften und Vorkommen.....	38
3.5.2	Der Mensch als Quelle von CO ₂ in Innenräumen	39
3.5.3	Gesundheitliche Auswirkungen.....	40
3.5.4	Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit.....	41
3.5.5	Auswirkungen auf die Zufriedenheit mit der Innenraumluft.....	41
3.5.6	Richt- und Orientierungswerte	42
4	AUSWIRKUNGEN ENERGIESPARENDER MASSNAHMEN AUF RAUMLUFTQUALITÄT, RAUMKLIMA, WOHLBEFINDEN UND GESUNDHEIT	44
4.1	Allgemeines	44
4.2	Untersuchungen der Auswirkungen des Einsatzes Lüftungstechnischer Anlagen in Passiv- und Niedrigenergiehäusern.....	45
4.3	Luftschadstoffe und energiesparende Maßnahmen	46
4.3.1	Anreicherung von im Innenbereich produzierten Luftverunreinigungen im Altbestand ohne Lüftungstechnische Anlage	46
4.3.2	Verringerung von aus dem Außenbereich eingebrachten Luftverunreinigungen.....	47
4.3.3	Einfluss des Luftwechsels auf Luftverunreinigungen bei Lüftungstechnischer Anlagen	48
4.3.4	Verringerung von im Innenbereich produzierten Luftverunreinigungen	48
4.3.5	Verringerung von aus dem Außenbereich stammenden Luftverunreinigungen.....	48
4.3.6	Verringerung anthropogener Luftverunreinigungen	49
4.3.7	Erhöhung des Eintrags von aus dem Außenbereich stammenden Luftverunreinigungen bei einfacheren Lüftungstechnischen Anlagen	49
4.4	Nominaler, energie- und schadstoffäquivalenter Luftwechsel.....	50
4.4.1	Allgemeines, Definitionen	50
4.4.2	Natürlich belüftete Gebäude	51
4.4.3	Gebäude mit kontrollierten Belüftungsanlagen	54
5	RELEVANZ VON REINLUFTZUSTÄNDEN BEI KONTROLLIERTEN WOHNRAUMBELÜFTUNGSANLAGEN	55
5.1	Fragestellung.....	55
5.2	Keimreduzierte Luft und Gesundheit	55
5.3	Die Hygiene-Hypothese	56
5.4	Kontrollierte Wohnraumlufbelüftungsanlagen und Hygiene-Hypothese	57

6	RELEVANZ VON VERUNREINIGUNGEN DES LÜFTUNGS-SYSTEMS BEI KONTROLLIERTEN WOHNRAUMBE-LÜFTUNGSANLAGEN.....	59
6.1	Allgemeines	59
6.2	Luftfilter	60
6.2.1	Allgemeines.....	60
6.2.2	Kondensation auf der ersten Filterstufe	60
6.2.3	Wachstum und Akkumulation von Mikroorganismen auf Filtern	61
6.2.4	Mangelnde Filterleistung, falscher Einbau von Filtern.....	61
6.3	Luftleitungssystem.....	62
6.4	Luft-Erdwärmetauscher (LEWT).....	62
6.4.1	Allgemeines.....	62
6.4.2	Von außen eingetragene Verunreinigungen in LEWT.....	62
6.4.3	Mikrobielle Verunreinigungen in LEWT	65
7	RADON	67
7.1	Allgemeines	67
7.2	Gesundheitliche Auswirkungen.....	68
7.2.1	Allgemeines, Wirkmechanismen	68
7.2.2	Neue Erkenntnisse aus gesamteuropäischen Studien.....	69
7.3	Radoneintritt und Anreicherung im Wohnbereich durch energiesparende Maßnahmen	71
7.3.1	Allgemeines.....	71
7.3.2	Radonanreicherung nach Fenstertausch	72
7.3.3	Radoneintritt über Luft-Erdwärmetauscher	72
7.3.4	Radoneintritt über Unterdruckerscheinungen.....	72
8	LUFTFEUCHTE	73
8.1	Begriffsdefinitionen, physikalische Zusammenhänge	73
8.2	Physikalisch-klimatologische und physiologische Grundlagen	74
8.3	Gesundheitliche Bedeutung.....	75
8.4	Sekundäre Auswirkungen der Luftfeuchtigkeit in Innenräumen	76
8.5	Richt- und Orientierungswerte.....	77
8.6	Beeinflussung der Luftfeuchtigkeit durch energiesparende Maßnahmen.....	78
8.6.1	Energiesparende Maßnahmen im Altbestand ohne Lüftungstechnische Anlage	78
8.6.2	Auswirkungen von Lüftungstechnischen Anlagen ohne Luftbefeuchtung	79
8.6.3	Wärmetauscher zur Erhöhung der relativen Luftfeuchte	79
9	LUFTIONEN.....	80

9.1	Allgemeines	80
9.2	Begriffsdefinition	81
9.3	Gesundheitliche Auswirkungen	81
9.3.1	Allgemeines	81
9.3.2	Primäre Ionenwirkungen	83
9.3.3	Sekundäre Ionenwirkungen	83
9.3.4	Produktion von Ozon	84
9.3.5	Wirkungen von negativen Luftionen.....	85
9.4	Richt- und Orientierungswerte	85
9.5	Veränderung der Luftionisation durch Rohrleitungen	85
10	SENSOREN IN LÜFTUNGSTECHNISCHEN ANLAGEN	86
10.1	Allgemeines	86
10.2	Einsatz von Sensoren zur Steuerung von Lüftungsanlagen	86
10.3	Einsatz von Sensoren zur Sichtbarmachung schädlicher Schadstoffkonzentrationen.....	87
11	SCHLUSSFOLGERUNGEN UND EMPFEHLUNGEN	88
11.1	Gebäude ohne Lüftungstechnische Anlagen nach energetischer Sanierung.....	88
11.1.1	Allgemeines	88
11.1.2	Möglichkeiten und Grenzen der verstärkten individuellen Fensterlüftung.....	88
11.1.3	Möglichkeiten der Erhöhung des Luftwechsels.....	88
11.1.4	Vermeidung von Schadstoffquellen	89
11.1.5	Fazit und Empfehlungen	89
11.2	Gebäude mit Lüftungstechnischen Anlagen	90
11.2.1	Luftverunreinigungen aus dem Innenbereich.....	90
11.2.2	Luftverunreinigungen aus dem Außenbereich	90
11.2.3	Fazit und Empfehlungen	90
11.3	Verringerung von Keimen und Allergenen	90
11.3.1	Verringerung von Allergenen aus dem Außenbereich	90
11.3.2	Verringerung von Allergenen aus dem Innenbereich.....	91
11.3.3	Hygiene Hypothese.....	91
11.4	Luftverunreinigungen aufgrund schlecht geplanter oder gewarteter Lüftungstechnischer Anlagen	91
11.4.1	Außenluftansaugung	91
11.4.2	Luft-Erdwärmetauscher.....	92
11.4.3	Luftfilter	92
11.4.4	Luftleitungsnetz und Lüftungs-Zentralgerät	93
11.4.4.1	Vermeidung von Staubablagerungen	93
11.4.4.2	Vermeidung von Kondensat	94

11.4.5	Reinhaltemanagement und sonstige Maßnahmen.....	94
11.4.6	Fazit und Empfehlungen	94
11.4.7	Maßnahmen für die Planung und Ausführung von Lüftungstechnischen Anlagen in Wohnhäusern	95
11.4.7.1	Forschungsbedarf	95
11.4.7.2	Regelwerke	95
11.5	Radoneintritt in Wohnräume	95
11.5.1	Ausführung des Luft-Erdwärmetauschers (LEWT).....	95
11.5.2	Vermeidung von Unterdruck im Gebäude in Radonrisikogebieten	96
11.5.3	Sonstiges.....	96
11.5.4	Forschungsbedarf	96
11.5.5	Regelwerke	96
11.6	Luftionen – Forschungsbedarf.....	96
11.7	Luftfeuchtigkeit.....	97
11.7.1	Allgemeines.....	97
11.7.2	Luftfeuchtigkeit in Gebäuden ohne Lüftungstechnische Anlagen nach Fenstersanierung.....	97
11.7.2.1	Allgemeines.....	97
11.7.2.2	Möglichkeiten für den Nutzer zur Senkung der relativen Luftfeuchtigkeit	98
11.7.2.3	Vermeidung von Wärmebrücken.....	98
11.7.3	Luftfeuchtigkeit in Gebäuden mit Lüftungstechnischen Anlagen	99
11.7.3.1	Allgemeines.....	99
11.7.3.2	Fazit und Empfehlungen	99
11.7.4	Erhöhung der Luftfeuchtigkeit in Innenräumen	99
11.7.4.1	Allgemeines.....	99
11.7.4.2	Einzelraumbezogene Lösungen zur Erhöhungen der Luftfeuchtigkeit.....	99
11.7.4.3	Luftfeuchteconditionierung durch interne Feuchtproduktion	100
11.7.4.4	Erhöhung der Luftfeuchtigkeit über spezielle Wärmetauscher.....	100
11.7.4.5	Veränderung der Leistung Lüftungstechnischer Anlagen	101
11.7.5	Fazit.....	101
11.7.6	Luftfeuchte – Forschungsbedarf.....	102
11.8	Veränderungen der Luftionenkonzentrationen durch kontrollierte Wohnraumbelüftungsanlagen.....	102
11.9	Regelung der Lüftungstechnischen Anlage	102
11.9.1.1	Luftmengenregelung – Forschungsbedarf	103
11.10	Abschließende Einschätzung	103
11.10.1	Allgemeines	103
11.10.2	Schadstoffmessungen	104
11.10.2.1	Forschungsbedarf	104
11.10.2.2	Regelwerke	104
11.10.3	Überblick über positive und negative humantoxische Wirkungen verschiedener energiesparender Maßnahmen	104
12	LITERATUR	107

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Passivhauskonzept (Quelle: CEPHEUS Austria, Endbericht 2001. Thermie-Programm BU/027/97).....	14
Abbildung 2: Integration der Projektteile.....	17
Abbildung 3: Innenraumrelevante Quellen für Luftverunreinigungen (Quelle: eigene Darstellung).....	22
Abbildung 4: Verallgemeinerte Isoplethensysteme für Sporenauskeimung und Myzelwachstum (Sedlbauer 2001).....	33
Abbildung 5: Die CO ₂ -Konzentration als Indikator für anthropogene Emissionen (nach ECA 1992)	42
Abbildung 6: Veränderung der Konzentration an CO ₂ in den Nachtstunden durch die Reduktion des Luftwechsels von 0,5 auf 0,1 h ⁻¹ durch Einbau dichter Fenster, geschlossene Innentüre, Berechnung mittels CO ₂ -Berechnungstool (Amt der OÖ Landesregierung 2003)	47
Abbildung 7: Luftwechsel bei natürlich belüftetem Gebäude, Unterschiedliche Formen der Belüftung (Schnieders 2003b)	53
Abbildung 8: Luftwechsel bei kontrollierter Belüftungsanlage im Referenzfall (Schnieders 2003b)	54
Abbildung 9: Lüftungsgerät mit Außenluftfilter, von Vorderseite betrachtet, Falschluff durch unzureichenden Sitz der Filters (Tappler 2005)	61
Abbildung 10: Unsachgemäße Ausführung der Betonrohre in einem LEWT – Eintritt von Bodenmaterial (Twrdik 2005).....	63
Abbildung 11: Unsachgemäße Ausführung der Betonrohre in einem LEWT – sekundäre Bildung von organischen Verunreinigungen (Spinnweben) (Twrdik 2005)	63
Abbildung 12: Falschluff durch eine nicht fachgerechte Abdichtung zwischen Filtereinsatz und dem Luftfilterrahmen bei Luftfilter vor einem LEWT (Twrdik 2004).....	64
Abbildung 13: Anordnung des Außenluftdurchlasses eines LEWT unmittelbar neben Vegetation (Tappler 2005).....	64
Abbildung 14: Nicht fachgerechte Ausführung des Anschlusses des gerippten Rohres eines LEWT an die Verrohrung zum Lüftungsgerät im Keller eines Einfamilienhauses (Tappler 2005).....	65
Abbildung 15: Eintrittswege von Radon in ein Gebäude, aus (Sarah 1998).....	67
Abbildung 16: Radonpotentialkarte für Österreich (Friedmann 2004b).....	68
Abbildung 17: Jahresmittel der Radonkonzentration in Österreich. (H.Friedmann 2004) http://www.univie.ac.at/Kernphysik/oenrap/AUSTRIA.GIF	71
Abbildung 18: Zusammenhang zwischen absolutem Wassergehalt, relativer Luftfeuchte, Dampfdruck und Temperatur der Luft.....	73
Abbildung 19: Lüftungsampel	87

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Orientierungswerte für Milbenallergenkonzentrationen im Hausstaub Hamburger und Erfurter Wohnungen (Jacob et al. 1999)	30
Tabelle 2: Wachstumstemperaturen mesophiler, thermotoleranter und thermophiler Schimmelpilze (UBA 2002)	31
Tabelle 3: Einstufung verschiedener Materialien in Substratgruppen (Sedlbauer 2001)	32
Tabelle 4: Übersicht der unterschiedlichen Einflussfaktoren auf Wachstum von Schimmelpilzen auf Baustoffen (Sedlbauer 2001)	32
Tabelle 5: Erfahrungswerte für die Beurteilung von Gesamtkeimzahlen von Pilzsporen in Innenräumen nach ECA (1993)	35
Tabelle 6: Orientierungswerte für β -(1,3)-Glucan im Hausstaub von 395 Hamburger und Erfurter Wohnungen (Gehring et al. 2001)	36
Tabelle 7: Literaturangaben für die CO ₂ -Abgabe von Menschen	39
Tabelle 8: Vorschlag zur Klassifizierung der Innenraumlufthqualität und Anforderungen an natürlich und mechanisch belüftete Gebäude in Hinblick auf CO ₂ (AK-Innenraumlufth 2004)	43
Tabelle 9: Abscheidegrade von Luftfiltern in Bezug auf Sporen und Pollen nach ÖNORM EN 779 (2003)	49
Tabelle 10: Klassifizierung des Radonpotentials laut ÖNORM S 5280-2	68
Tabelle 11: Mögliche Auswirkungen energiesparender Maßnahmen im Wohnbau – Maßnahme: Einbau dichter Fenster bei natürlich belüfteten Gebäuden	105
Tabelle 12: Mögliche Auswirkungen energiesparender Maßnahmen im Wohnbau – Maßnahme: Einbau von einfachen Entlüftungsanlagen bzw. von kontrollierten Wohnraumbelüftungsanlagen ohne Befeuchtung der Außenluft	105
Tabelle 13: Zusätzliche Risiken bei Einbau bzw. Vorhandensein von schlecht geplanten, errichteten oder gewarteten kontrollierten Wohnraumbelüftungsanlagen	106

1 EINLEITUNG

1.1 Allgemeines

Ausgelöst durch Bestrebungen zur Energieeinsparung werden in Österreich in zunehmendem Ausmaß energieoptimierte Gebäude errichtet, die in der Regel mit Lüftungstechnischen Anlagen (meist Wohnraumlüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung, zum Teil mit Erdwärmetauschern) ausgestattet sind. Durch die Reduktion der Transmissionswärmeverluste (kompakte Bauweise und entsprechende Wärmedämmung) und die Reduktion der Lüftungswärmeverluste (dichte Gebäudehülle, dichte Fenster und Türen, kontrollierte Wohnungslüftung mit Wärmerückgewinnung) kann der Heizwärmebedarf auf niedrige Werte bis unter 15 kWh/m² jährlich gesenkt werden. Zusätzlich werden schon bestehende Gebäude energetisch optimiert, was meist mit dem Tausch der Fenster und einem Vollwärmeschutz einher geht.

Aus der neueren Literatur ergeben sich deutliche Hinweise, dass eine bessere Belüftung von Räumen (in Einfamilienhäuser mit dem Einbau von Lüftungstechnischen Anlagen verbunden) zu signifikanten Verbesserungen der subjektiven Einschätzung der Luftqualität, zur Reduktion von Beschwerden und zur Steigerung der Leistungsfähigkeit führen (Leech et al. 2004; Bako-Biro et al. 2004; Wargocki et al. 2000). Allgemein wird angenommen, dass die mit Lüftungstechnischen Anlagen in Wohnungen verbundenen erhöhten Außenluftmengen in der Regel zu einem verstärkten Abtransport von Schadstoffen aus Materialien und damit insgesamt zu einer Verbesserung der hygienischen Situation in Innenräumen führen. Es existiert allerdings auch die in Fachkreisen weit verbreitete Befürchtung, dass die mit technischen Anlagen verbundenen potentiellen Risiken diesen Vorteil wieder aufheben könnten.

Erhebungen bei NutzerInnen und Personen, die sich nicht für eine Lüftungstechnische Anlage entscheiden, zeigen, dass ein Haupthindernis für eine weitere Verbreitung der Technologie die nicht vorhandene oder unzureichende unabhängige Information darstellt (Rohracher et al. 2001). Auffallend war auch, dass die zu hoch eingestuften Kosten für die Anschaffung und Installation einer Lüftungstechnischen Anlage einem Kauf im Wege standen (Rohracher et al. 2001).

Befürchtungen in Hinblick auf humantoxische Wirkungen, die in diesem Zusammenhang von Personen genannt wurden, die sich nicht für eine Lüftungstechnische Anlage entschieden, waren (Rohracher et al. 2001):

- Angst vor Entstehung von Zugluft
- Angst vor Entstehung von Lärm
- Zweifel in Hinblick auf die hygienischen Bedingungen in den Rohrleitungen

Befragungen zeigten andererseits, dass knapp 80 % der Besitzer von Wohnraumlüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung ihre Anlagen als „gut“ bis „sehr gut“ einstufen (Greml et al. 2004), „Lüftungsanlagen“ werden von BewohnerInnen vor allem mit Komfort, Ökologie und Gesundheit identifiziert (Rohracher et al. 2001). Dennoch existieren in breiten Bevölkerungsschichten Unsicherheiten, Skepsis und zum Teil Ablehnung in Bezug auf derartige Anlagen. Die Ursachen dafür liegen zum einen in real auftretenden Problemen in Zusammenhang mit der allgemeinen Konzeption, unzureichenden Anlagenkomponenten und steuerungstechnischen Schwierigkeiten (Greml et al. 2004), andererseits werden auch gesundheitliche Auswirkungen derartig unzureichender Anlagen befürchtet. Häufig werden als

Argument für eine Ablehnung solcher Anlagen auch jene Probleme angeführt, die vor allem aus Berichten aus den siebziger und achtziger Jahren über klimatisierte Gebäude bekannt sind. Die im Rahmen eines Kongresses geführte Diskussion zum Thema „Kontrollierte Wohnraumbelüftung und Gesundheit“ zeigte klar, dass der kontrollierten Wohnraumbelüftung nicht unbedingt praktische Erfahrungen entgegen stehen, sondern oft eine subjektive Ablehnung, die sich vor allem auf psychologische Ursachen zurückführen lässt (Geissler 2004).

Verbunden mit dem nicht unbeträchtlichen finanziellen Aufwand bei der Errichtung solcher Anlagen haben diese Befürchtungen dazu geführt, dass Lüftungstechnische Anlagen noch nicht zur Standardausrüstung im Wohnungsbau gehören.

Auch im Altbestand hat die Notwendigkeit, Energie zu sparen, zur breiten Umsetzung von Maßnahmen geführt, welche die Transmissions- und Lüftungswärmeverluste verringern. Hier spielt die nachträgliche Dämmung der Außenwände und die Erneuerung der Fenster eine wichtige Rolle.

1.2 Zielkonflikt Energieperformance und Innenraumlufthqualität

Wenn ein bestehendes Gebäude im Zuge einer energetischen Sanierung auch dichte Fenster erhält, wird der Luftwechsel bei geschlossenen Fenstern maßgeblich erniedrigt. Der Grund ist die Reduzierung von Lüftungswärmeverlusten, die durch Maßnahmen zur Erhöhung der Luftdichtigkeit von Gebäuden erreicht wird.

Manuelles Lüften ist in diesem Fall zwar generell eine gute Methode, kurzfristig den Luftaustausch zu erhöhen, Schadstoffe abzuführen und so die Innenraumlufthqualität zu verbessern, sie ist jedoch nicht in allen Situationen als hinreichende Möglichkeit zur Bereitstellung ausreichender Luftmengen zu betrachten (Schnieders 2003). Raumlufthygienisch ausreichendes manuelles Lüften würde im Winter zu beträchtlichen Energieverlusten führen. Die Praxis zeigt, dass in diesen Situationen von einem Teil der Nutzer weniger häufig gelüftet wird, um Energie zu sparen. In manchen Situationen ist Lüften auch nur erschwert möglich, in anderen beeinträchtigt Lüften den Wohnkomfort in unzumutbarem Ausmaß (z.B. nachts auf das Schließen von Zimmertüren zu verzichten, oder an dicht befahrenen Straßen mit starker Lärmentwicklung das Fenster offen zu halten).

Ein weiterer wichtiger Punkt ist, dass die NutzerInnen in der Regel nach Sanierungsarbeiten nicht ausreichend über die notwendigen Verhaltensänderungen informiert werden. Folge davon können einerseits unzureichende Raumlufthqualität mit gesundheitlichen Folgen für die BewohnerInnen, andererseits Sekundärschäden am Gebäude (z.B. Schimmel infolge erhöhter relativer Luftfeuchtigkeit) sein.

Der Einsatz einer kontrollierten Wohnraumlüftung mit Wärmerückgewinnung wird als eine Lösung für diesen Zielkonflikt betrachtet, die vor allem in Passivhäusern (siehe Kasten nächste Seite) nahezu durchgängig verwirklicht wird.

Als kostengünstigere Möglichkeit zur Erhöhung des Luftwechsels werden einfachere Entlüftungsanlagen propagiert. Obwohl derartige Anlagen schon seit über einem Jahrzehnt eingesetzt werden, ist wenig bekannt, welche Auswirkungen auf Innenraumlufthqualität und Gesundheit durch den Einsatz dieser Technologien zu erwarten sind. Eine erhöhte Gebäudedichtigkeit bzw. Lüftungstechnische Anlagen bewirken in jedem Fall eine Veränderung der Innenraumlufthqualität. In welcher Form die Innenraumlufth verändert wird, ob dies auch zu gesundheitlichen Auswirkungen führt und welche Gegenmaßnahmen gegebenenfalls getroffen werden können, ist Thema der vorliegenden Arbeit.

Kurzinformation Passivhaus

1.2.1 Passivhauskonzept

Passivhäuser zeichnen sich durch kompakte Bauweise, sehr gute Wärmedämmung und Dichtheit der Gebäudehülle aus. Der Luftaustausch erfolgt vollständig mittels Lüftungsanlage: den Luftaustausch durch Undichtheiten der Gebäudehülle (beispielsweise Fenster), wie das bei Altbauten der Fall ist, gibt es nicht mehr. Die Fenster sind im Regelfall aber jederzeit offenbar. Dadurch wird der Heizwärmebedarf so weit verringert, dass man auf ein konventionelles Heizsystem verzichten kann („Haus ohne Heizkörper“). Die Luftwechselzahl beträgt etwa 0,5 pro Stunde. Geheizt wird ausschließlich über die auf max. 50°C nacherwärmte Zuluft.

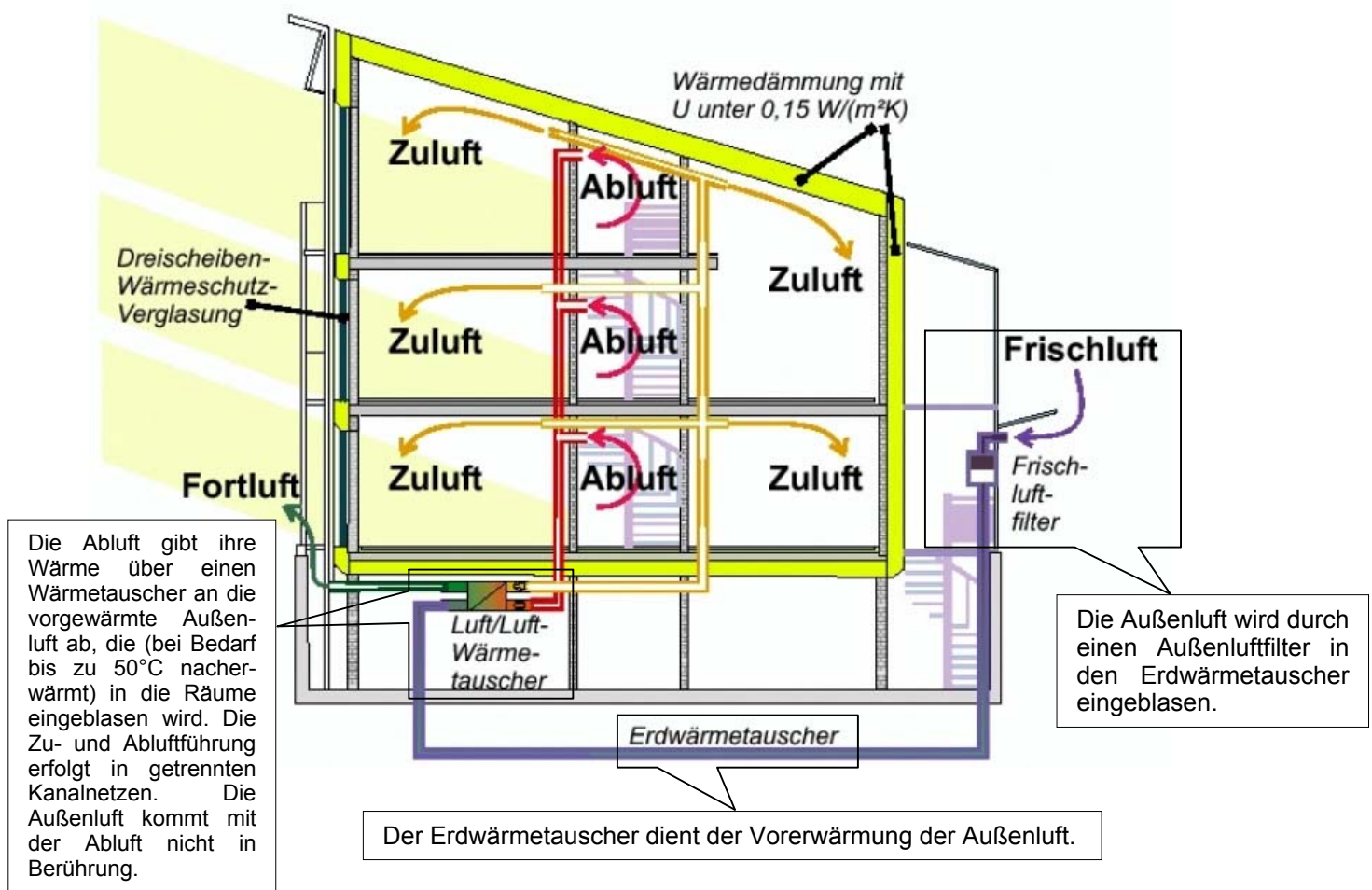


Abbildung 1: Passivhauskonzept (Quelle: CEPHEUS Austria, Endbericht 2001. Thermie-Programm BU/027/97)

1.3 Innenraumlufthqualität und Gesundheit

In unserem Kulturkreis halten sich Menschen zu einem hohen Anteil in Innenräumen auf. Geruchsbelästigungen und gesundheitliche Probleme durch schlechte Innenraumlufth sind schon seit der Antike und verstärkt seit dem 18. Jahrhundert ein Thema. Der deutsche Hygieniker Max von Pettenkofer postulierte schon 1858 0,1 Vol-% CO₂ als Richtwert für die maximale CO₂-Konzentration in Wohn- und Aufenthaltsräumen als Lüftungssparameter (Pettenkofer 1858), da er erkannte, dass hohe CO₂-Konzentrationen mit hygienisch unzureichender Luftqualität korreliert waren. Der Richtwert von 0,1 Vol-% für CO₂ hat seine Aktualität noch immer nicht verloren, er wird beispielsweise in der Klimatechnik zur Dimensionierung von Außenluftvolumina verwendet (ÖNORM H 6000-3 1989) und ist beispielsweise Basis des Grenzwertes für das geforderte Außenluftvolumen der österreichischen Arbeitsstätten-Verordnung (Ast-V 1998).

In den letzten beiden Jahrzehnten wurde immer wieder von gebäudebedingten Befindlichkeitsstörungen, wie z.B. von den unspezifischen Beschwerden des Sick Building Syndroms, berichtet. Aber auch Überschreitungen von festgelegten Grenz- und Richtwerten für Innenraumschadstoffe wurden dokumentiert. Insgesamt richtet sich das Augenmerk aber immer stärker auf humantoxische Wirkungen von Innenraumnoxen, wobei der Problemkreis der chemisch stärker empfindlichen Menschen (z.B. MCS-Patienten) im Zentrum der Betrachtung steht (BMLFUW 2004).

Insbesondere für Kleinkinder, Kranke und andere sensible Personengruppen ist wegen ihrer vergleichsweise langen Aufenthaltsdauer in Innenräumen die Qualität der Innenraumlufth wesentlich. Die Innenraumlufth hat über die unmittelbare toxikologische Bedeutung hinaus eine wichtige Funktion für die Wohn- und Lebensqualität, weshalb bei Luftschadstoffen auch das Wohlbefinden beeinträchtigende und belästigende Eigenschaften (z.B. unangenehme Gerüche) zu berücksichtigen sind. Darüber hinaus ist die Funktion der Wohnumwelt als Erholungsraum z.B. von Belastungen am Arbeitsplatz zu berücksichtigen (BMLFUW 2004).

Für Schadstoffe, die nicht in den Innenräumen emittiert werden, liegt die Belastung in einem ähnlichen Ausmaß wie im Außenbereich oder darunter. Sind jedoch Schadstoffquellen in Innenräumen und/oder eine schlechte Belüftungssituation vorhanden, kann die Belastung jene in der Außenluft um ein Vielfaches überschreiten (De Bortoli et al. 1986, Wallace et al. 1986). Wichtige Quellen in Innenräumen sind bestimmte menschliche Aktivitäten (z.B. Zigarettenrauchen, Reinigungstätigkeiten), Verbrennungsvorgänge sowie auch Baustoffe, Einrichtungsgegenstände und Materialien der Innenausstattung (Seifert 1990a). Neben den klassischen chemischen Schadstoffen wie Formaldehyd, dem radioaktiven Edelgas Radon oder flüchtigen organischen Verbindungen existieren eine Reihe weiterer Noxen in Innenräumen, die in Hinblick auf humantoxische Wirkungen und Behaglichkeit von Relevanz sind. Darunter sind Bioaerosole, Stäube und Faserstoffe wie Asbest oder künstliche Mineralfasern sowie physikalische Parameter wie Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Luftzug zu nennen.

Als Alternative zu synthetischen Materialien wurden natürliche, zum Teil traditionelle Baustoffe, Materialien und Konstruktionen in den Markt eingeführt, die jedoch in Einzelfällen, meist als Folge falscher Anwendung, ebenfalls zu raumlufthygienischen Problemen führen können (Tappler 2004a).

Der Luftwechsel hat einerseits einen signifikanten Einfluss auf die sich einstellende Konzentration an Luftinhaltsstoffen und beeinflusst andererseits auch die physikalischen Parameter des Raumklimas. Während in undichten alten Gebäuden ein ständiger unkontrollierter, wenn auch in Bezug auf die Luftmenge stark schwankender Luftaustausch über

Öffnungen der Gebäudehülle erfolgt, wird dies in energieoptimierten Gebäuden bewusst unterbunden. Es muss gezielt gelüftet werden, um die von Materialien und durch die Bewohner verursachten Gase und Schadstoffe zu entfernen. Dies erfolgt entweder automatisch mittels Lüftungstechnischen Anlagen oder es muss manuell mehrmals am Tag gelüftet werden.

1.4 Ziele der Studie

1.4.1 Übergeordnete Ziele

Die übergeordneten Ziele des Projektes sind:

- mögliche Veränderungen der Innenraumlufthqualität im Zusammenhang mit energiesparenden Maßnahmen im Wohnbau und ihre Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit darzustellen
- Zielkonflikte zwischen Energieperformance und Innenraumlufthqualität zu orten
- Handlungsoptionen zur Sicherung einer optimalen Innenraumlufthqualität im Bereich vorsorgender Maßnahmen aufzuzeigen
- die Darstellung der Möglichkeiten der Erfassung und Bewertung von gesundheitlich relevanten Einflussfaktoren in Innenräumen mit Lüftungstechnischen Anlagen

1.4.2 Spezielle Fragestellungen

Im vorliegenden Projekt sollen folgende spezielle Fragestellungen, die mit energiesparenden Maßnahmen im Wohnbau bzw. dem Einsatz von Lüftungstechnischen Anlagen einher gehen, aus technischer und medizinischer Sicht möglichst umfassend dargestellt werden:

- Auswirkungen keimreduzierter Luft durch die in der Lüftungstechnischen Anlage verwendeten Filter (Hygienehypothese)
- Belastung mit Bioaerosolen bei mangelnder Wartung der Filter oder bei Betriebszuständen mit viel Kondensat
- Einfluss der Luftfeuchtigkeit
- Einfluss der Luftionisation
- Radonbelastung der Innenraumlufth durch undichte Luft-Erdwärmetauscher

Aufbauend auf den ermittelten Grundlagen werden folgende konkrete Fragen bearbeitet:

- Was sind die relevanten gesundheitlichen Auswirkungen von Schadstoffen (im weitesten Sinn) in der Innenraumlufth bei energieoptimierten Gebäuden?
- Welche Rolle spielen Lüftungsgewohnheiten bei natürlich belüfteten Gebäuden und Reinluftzustände infolge von kontrollierter Wohnraumlüftung?
- Welche Möglichkeiten gibt es, schlechte Innenraumlufthqualität und das daraus resultierende Risiko gesundheitlicher Belastungen mit Sensoren sichtbar zu machen?

- Welche Empfehlungen lassen sich für die Durchführung von Untersuchungen der Innenraumlufth und anderer Noxen in Gebäuden mit Lüftungstechnischen Anlagen formulieren?
- Welche Empfehlungen lassen sich für Nutzer, Fachplaner, Gebäudeeigentümer und öffentliche Stellen ableiten, um das Risiko der gesundheitlichen Beeinträchtigung durch Innenraumlufthbelastungen zu senken?

Die folgende Abbildung veranschaulicht die im Projekt gewählte Herangehensweise:

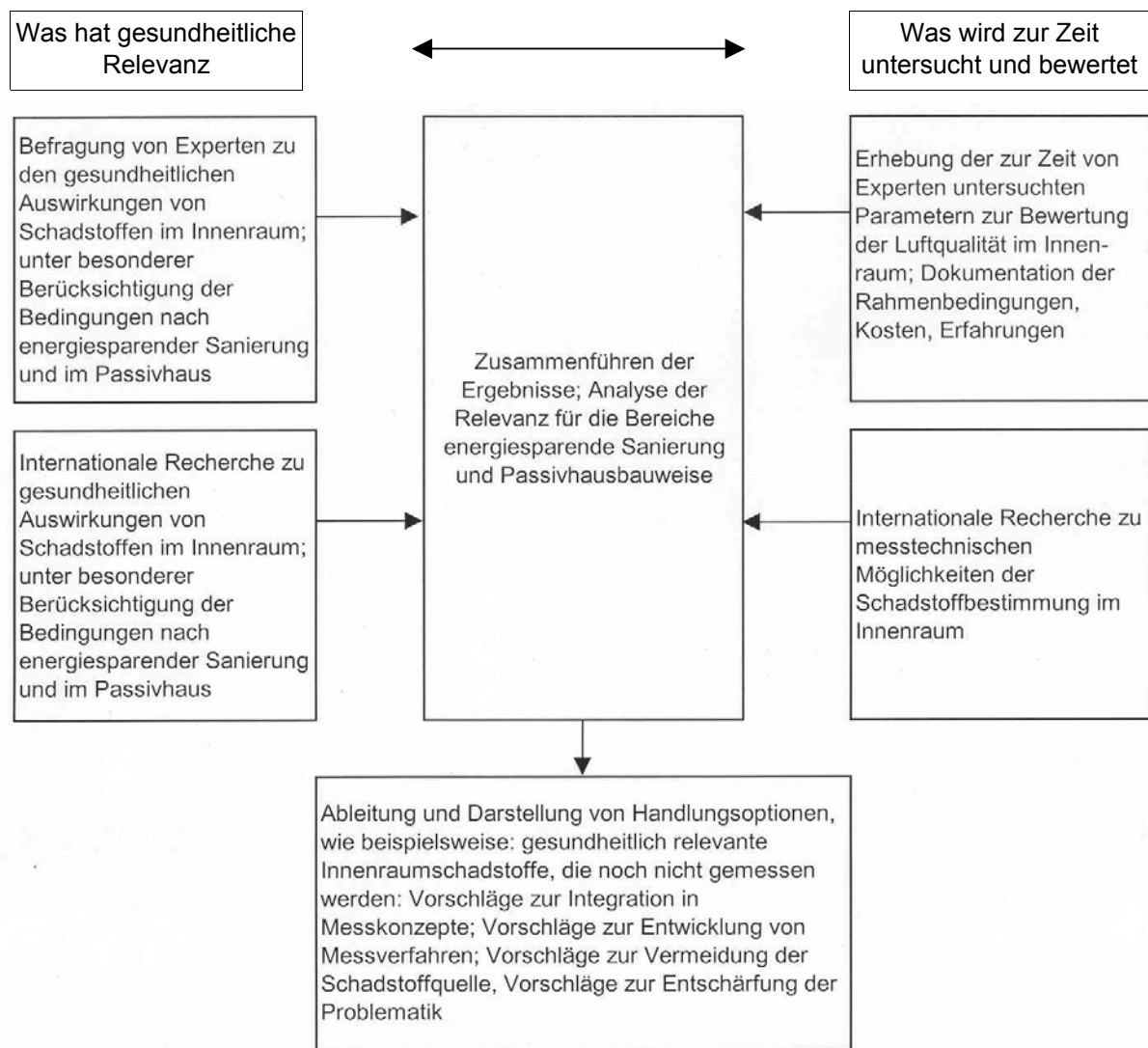


Abbildung 2: Integration der Projektteile

1.5 Überblick über die Befragung von PraktikerInnen

Um eine erste Einschätzung über den Stand der Kenntnisse bezüglich des Zusammenhangs von Energieperformance und gesunder Raumlufte unter jenen Berufsgruppen zu erhalten, die mit auftretenden Problemen konfrontiert sind, wurden ca. 600 Fragebögen auf unterschiedlichem Weg verteilt.

Die Fragebögen wurden gemeinsam mit einer Projektkurzbeschreibung und einer kurzen Darstellung des Passivhauskonzepts als Einleger in die Zeitschrift der ÄrztInnen für gesunde Umwelt an ca. 300 ÄrztInnen, vor allem AllgemeinmedizinerInnen verschickt. Weiters wurde der Fragebogen (inklusive Hintergrundinformation) an alle TeilnehmerInnen des Kongresses „Gesunde Raumlufte“ (12. - 13. Februar 2004, Messezentrum Wien, etwa 200 TeilnehmerInnen) und an alle TeilnehmerInnen der AGÖF-Jahrestagung (7. Fachkongress der Arbeitsgemeinschaft ökologischer Forschungsinstitute, 4./5. März 2004, München, etwa 100 TeilnehmerInnen) verteilt. Der Rücklauf lag bei etwa 5%.

Die teils relativ vage formulierten Antworten zeigen, dass die verschiedenen Probleme bekannt sind und als relevant erachtet werden, dass aber derzeit zu wenig gut fundiertes Wissen vorliegt und je nach Ausbildungshintergrund eine subjektive Abschätzung versucht wird. Speziell zum Thema „Luftionisation“ gibt es kaum Kenntnisse der Befragten. Zu diesem Themenbereich konnten auch kaum Experten genannt werden. Generell zeigten sich die meisten Befragten an den verschiedenen Fragestellungen interessiert und formulierten häufig den Wunsch, mehr Information zu diesen Fragen zu bekommen. Die Einsendungen der ÄrztInnen stammen durchwegs von solchen, die in ihrer Praxis mit der Fragestellung bereits zu tun hatten. Darunter waren auch einige, die über fundiertes Wissen verfügen. Diese wurden im Rahmen des Projektes – meist telefonisch – befragt und Ihre Mitteilungen flossen in den Projektbericht ein.

Auch den TechnikerInnen ist die Fragestellung bekannt, die meisten sind sich insbesondere der Bedeutung regelmäßiger und fachgerechter Wartung lüftungstechnischer Anlagen bewusst.

Die Ergebnisse der Befragung sind im Anhang dokumentiert. Die in der Befragung genannten ExpertInnen wurden ebenso wie andere, dem Projektteam aus anderen Zusammenhängen bekannte, im Rahmen des Projektes zu bestimmten Fragestellungen interviewt. Die Ergebnisse sind in die entsprechenden Abschnitte des Projektes eingeflossen.

1.6 Arbeitsweise und Aufbau des Endberichts

Die Ergebnisse von Literaturrecherche, Befragung von ExpertInnen zu den gesundheitlichen Wirkungen von Innenraumschadstoffen und physikalischen Parametern, die das Wohnklima beeinflussen sowie Fragen der Bewertung der Luftqualität im Innenraum – insbesondere in Hinblick auf Auswirkungen von Maßnahmen zur energetischen Optimierung, werden in den ersten neun Kapiteln des Berichts behandelt. Eine ausführliche Darstellung zum Thema Vorkommen und Eigenschaften chemischer Schadstoffe im Innenraum und ihre Auswirkungen auf die Gesundheit finden Sie im Anhang des Endberichts. Kapitel 2 des Endberichts gibt lediglich einen Überblick über dieses Thema. Kapitel 3 befasst sich mit Bioaerosolen in der Raumlufte, Allergenen (Milben, Schimmelpilze) im Innenraum und Allergien, und mit der von den BewohnerInnen verursachten Luftverunreinigung. Kapitel 4 dreht sich um die Auswirkungen energiesparender Maßnahmen auf die Raumlufte und vergleicht unterschiedliche Möglichkeiten, den erforderlichen Luftwechsel sicherzustellen. Kapitel 5 untersucht die Folgen von Reinluftzuständen durch Lüftungsanlagen. Kapitel 6 befasst sich sozusagen mit dem Gegenteil, nämlich mit Verunreinigungen, die durch das Belüftungssystem in die Aufenthaltsräume gelangen können. Kapitel 7 betrachtet Probleme die durch Radon, insbesondere im

Zusammenhang mit der Verwendung von Luft-Erdwärmetauschern, entstehen. Die Kapitel 8 und 9 betrachten Luftfeuchte und Luftionen in Hinblick auf Wohlbefinden und Gesundheit der Menschen und mögliche Veränderungen durch Energiesparmaßnahmen. Kapitel 10 ist ein Exkurs über Sensoren.

Interne Workshops, sowie Gespräche mit DI Peter Wagner vom BMWA dienten der Diskussion von Einschätzungen und der Formulierung von Handlungsempfehlungen. Diese werden im letzten Kapitel des Berichtes dargestellt.

2 ÜBERBLICK ÜBER LUFTVERUNREINIGUNGEN UND ANDERE PARAMETER IN INNENRÄUMEN, DIE GESUNDHEIT UND WOHLBEFINDEN DER BEWOHNERINNEN BEEINFLUSSEN

Betrachtet man die Parameter, die mit der Beschaffenheit und Nutzung eines Wohngebäudes in direktem Zusammenhang stehen und einen wesentlichen Einfluss auf die Qualität der Innenraumlufte, die Behaglichkeit und damit auf den gesundheitlichen Status der Nutzer ausüben, kann zwischen folgenden Faktoren unterschieden werden:

- **abiotische** Luftverunreinigungen wie organisch, chemische Verbindungen, Asbest, Radon
- **biogene** Luftverunreinigungen wie Pollen, Schimmelpilze, anthropogene Emissionen
- **physikalische Faktoren** wie Temperatur, Luftfeuchte oder Luftgeschwindigkeit

Zusätzlich zu den oben genannten, „klassischen“ Einflussfaktoren werden andere Noxen wie Luftionen, elektromagnetische Felder oder radiästhetische Phänomene zum Teil kontroversiell diskutiert. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird aus diesem Bereich lediglich auf das Thema Luftionen eingegangen.

Im Bereich der **Luftverunreinigungen** kann man im Wesentlichen zwischen folgenden Quellbereichen unterscheiden:

- Emissionen aus Baustoffen, Materialien der Innenausstattung, dem Untergrund und als Folge der An- und Verwendung von Produkten wie z.B. flüchtige organische Verbindungen (VOC), Formaldehyd, Radon, Schimmelpilze und deren Metaboliten infolge von Baumängeln
- anthropogene Emissionen, dies sind Substanzen, die durch den Menschen im Rahmen seines biologischen Stoffwechsels abgegeben werden (z.B. Kohlendioxid, Bioeffluents, Bakterien)
- Immissionen aus dem Außenbereich (z.B. Schimmelpilzsporen, Pollen, Schadstoffe der Außenluft)

Das Wissen über Innenraumverunreinigungen hat sich seit Beginn des verstärkten wissenschaftlichen Interesses Ende der siebziger Jahre stetig vergrößert und verfeinert. Es ist jedoch nach wie vor bei einer Vielzahl von Faktoren noch nicht hinreichend bekannt, ob und in welchem Ausmaß eine mögliche gesundheitliche Belastung von Raumnutzern besteht.

Zusätzlich zu den „klassischen“ Innenraumnoxen wie Formaldehyd, flüchtigen organischen Verbindungen (VOC), Radon oder Asbest traten in den letzten Jahren neue Themen ins Zentrum der Aufmerksamkeit. Einige dieser Problemkreise sind (ohne Anspruch auf Vollständigkeit):

- reaktive flüchtige Sekundärprodukte (Salthammer 2000, Wolkoff 2004)
- Metaboliten und Bestandteile von Mikroorganismen
- aus volatilen Substanzen gebildete ultrafeine Partikel (Weschler und Shields 1999)
- bestimmte Flammschutzmittel (Hutter et al. 2003, Sagunski und Roskamp 2002)
- Neubewertung von Substanzen (z.B. Terpene) aufgrund neuer Informationen (Tappler 2004a)
- Lungengängiger Feinstaub aus Innenraumquellen

Gerade im Spannungsbereich Innenraumlufte und Gesundheit sind Ursachen-Wirkungsbezüge äußerst schwer herzustellen, weil einerseits langfristige Belastungen im Niedrigdosisbereich vorkommen und andererseits schwer fassbare, diffuse Symptome und Befindlichkeitsstörungen eher die Regel als die Ausnahme sind. In manchen Fällen ist es schwierig, die relevanten Parameter zu erfassen. Entsprechend komplex ist es naturgemäß, Zusammenhänge zu erfassen und Noxen in Innenräumen adäquat zu bewerten.

Die im Anhang beschriebenen abiotischen Luftverunreinigungen sind in der Regel Messungen zugänglich und können quantifiziert und im Idealfall auch bewertet werden. Bewertungen in Hinblick auf gesundheitliche Aspekte erfolgen in aller Regel nach Betrachtung der Einzelfaktoren, wobei Synergieeffekte aufgrund fehlender Informationen weitgehend unberücksichtigt bleiben müssen.

Soweit vorhanden, werden im Anhang auch Richt- und Orientierungswerte für abiotische Luftverunreinigungen im Innenraum angeführt.

2.1 Übersicht über innenraumrelevante Luftverunreinigungen und ihre Quellen

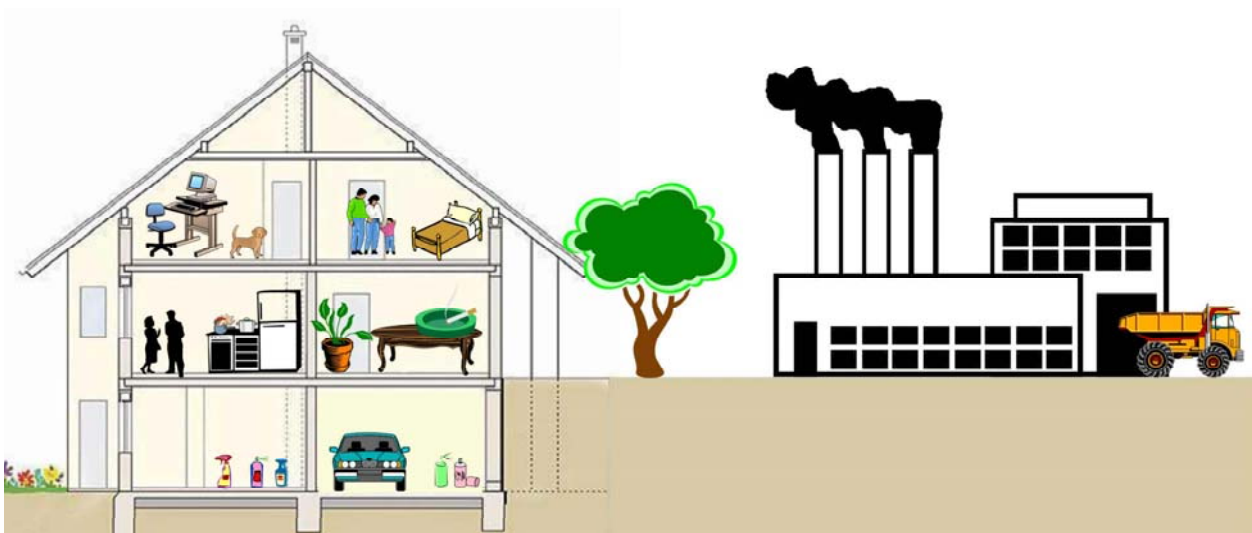


Abbildung 3: Innenraumrelevante Quellen für Luftverunreinigungen (Quelle: eigene Darstellung)

2.1.1 Lebewesen

Menschen, Haustiere und Schädlinge erzeugen durch **Atmung** Kohlendioxid, zusätzlich setzen sie Wasserdampf, körpereigene Geruchsstoffe, Geruchsstoffe aus Lebensmitteln, Bakterien und Viren, sowie durch **Transpiration** Wasserdampf und Geruchsstoffe frei. Haustiere sind eine relevante Quelle von Allergenen in Innenräumen

Durch Verdauung und Ausscheidungsvorgänge entstehen Darmgase, Geruchsstoffe und Zersetzungsprodukte aus Exkrementen bzw. krankhaften Absonderungen, es werden Bakterien, Viren, etc. freigesetzt.

Zimmerpflanzen geben durch Ausdünstung Terpene und andere Geruchsstoffe, Latex und Wasserdampf ab.

Schimmelpilze bilden durch Vermehrung und Stoffwechsel Pilzsporen, Toxine und Geruchsstoffe.

2.1.2 Bausubstanz/Gebäudeausrüstung

Bauprodukte wie Baustoffe, Oberflächenbeschichtungen, Bauten- u. Korrosionsschutzmittel, Isolierstoffe, Dichtungsmaterialien werden durch Ausgasung, Alterung, Abrieb und Zersetzung zu Quellen verschiedenartiger gas- und partikelförmiger Schadstoffe, wie z.B. Lösungsmittel, Weichmacher, Kunststoff-Monomere, Oligomere, Holzschutz- und Flammschutzmittel, Fasern (Asbest, Mineralwolle) und in Einzelfällen Radon.

Raumlufttechnische Anlagen können bei Betrieb und Wartung aus Filter, Isolier- und Dichtungsmaterialien und Ablagerungen Mikroorganismen und deren Stoffwechselprodukte, Biozide, Fasern, Staub und Geruchsstoffe freisetzen.

Raumausstattung, Einrichtungsgegenstände wie Möbel, Fußbodenbeläge, Heimtextilien, Anstrichmittel, Tapeten setzen bei Produktverarbeitung, Renovierung und durch Ausgasung vor allem in der ersten Phase der Nutzung Lösungsmittel, Monomere, Oligomere, etc. aus

Kunststoffen, Harzen, Oberflächenbeschichtung und Klebern frei, weiters Fasern, Weichmacher und Flammschutzmittel.

2.1.3 Raumnutzung

Durch **Verbrennungsprozesse** (Heizen, Kochen oder anderen offenen Feuerstellen) entstehen Verbrennungs- und Schwelprodukte wie Kohlendioxid, Kohlenstoffmonoxid, Stickstoffoxide, Wasserdampf, Staub, Kohlenwasserstoffe und andere organische Stoffe.

Bei **Körperpflege und Kosmetik** werden Lösungsmittel, Treibgase, Duftstoffe, anorganische und organische Aerosole (Farbstoffe, Pigmente, Lacke, Harze), Haloforme, Radon und Legionellen aus dem Warmwassersystem freigesetzt.

Bei Reinigungs- und Pflegemaßnahmen werden Wasch- und Putzmittel, Polituren, Desinfektionsmittel, Schädlingsbekämpfungsmittel verwendet. Diese können Ammoniak, Chlor und Chlorverbindungen, organische Lösungsmittel, Tetrachlorethen, Biozide abgeben.

Nahrungsmittel: Bei Zubereitung und -verzehr sind neben Verbrennungsprodukten (s.o.) gasförmige Pyrolyseprodukte, Geruchs- und Aromastoffe (natürlich und synthetisch) bzw. Ethanol von Bedeutung.

Bürobetrieb: Büroartikel, EDV-Geräte und Kopierer sind Quellen von organischen Lösungsmitteln, Weichmachern, Flammschutzmitteln, partikelförmiger Tonerbestandteilen und Ozon

Überdecken von Gerüchen: Sprays, Duftlampen, Räucherstäbchen geben Geruchsstoffe und flüchtige organische Verbindungen ab.

Hobby und Heimwerken: Emission von anorganischen und organischen gas- und aerosolförmigen Stoffen, vor allem Treib- und Lösungsmittel, Stäube, Metaldämpfe, Monomere, Biozide.

Beim **Rauchen** entstehen Kohlenstoffmonoxid, Stickstoffoxide, Nikotin, Aldehyde, Nitrosamine und zahlreiche andere organische Stoffe (z.B. polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe).

In **Garage** und Abstellraum werden aus Treibstoffen, Farben, Lacken und Reinigungsmitteln Kraftstoffdämpfe, Abgase und Lösungsmittel freigesetzt.

2.1.4 Belastung durch Außenluft und Umgebung

Aus **Gewerbe- und Industriebetrieben, Verkehr, Hausbrand und Landwirtschaft** gelangen aufgrund von Lüftung, Infiltration und Diffusion durch die Gebäudehülle anorganische und organische Gase, Aerosole, Lösungsmittel, Ammoniak und Geruchsstoffe in die Raumlufte.

Von **Deponien und Altlasten** freigesetzte Stoffe wie Methan u.a. flüchtige organische Verbindungen (Organohalogenverbindungen), Geruchsstoffe und Stäube können mit eindringender Bodenluft und durch Staubaufwirbelung in die Raumlufte gelangen.

Die Ursache **biogener Emissionen** sind blühende Pflanzen. Sie sind verantwortlich für Pollen, Schimmelpilzsporen, die mit der Außenluft in die Räume gelangen können.

Mit dem Eindringen von Bodenluft können auch **Radon** oder Methan in die Räume gebracht werden – abhängig von der Umgebung (Urangehalt des Bodens, Gärgase)

Quelle: (BMLFUW 2004, adaptiert nach VDI 4300 Blatt 1).

2.2 Abiotische Luftverunreinigungen

Bei den abiotischen Luftverunreinigungen unterscheidet man zwischen organischen, anorganischen sowie staub- und faserförmigen Luftverunreinigungen. Die angeführten Substanzen bzw. Substanzgruppen sind zum Teil mit ihrer chemischen Bezeichnung (z.B. Formaldehyd), zum Teil mit ihren chemischen Eigenschaften (z.B. Very Volatile Organic Compounds) und zum Teil mit ihrer Funktion im Baugeschehen (z.B. Weichmacher) angeführt. In manchen Fall können zum Teil völlig unterschiedliche chemische Substanzklassen unter einer Bezeichnung subsumiert sein, weiters bestehen auch Überschneidungen zwischen den angeführten Bezeichnungen.

Die wichtigsten abiotischen Luftverunreinigungen sind:

- Formaldehyd
- Organische Verbindungen unterschiedlicher Flüchtigkeit (VVOC, VOC, SVOC)
- Biozide
- Polychlorierte Biphenyle (PCB)
- Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)
- Polychlorierte Dibenzodioxine und -furane (PCDD/PCDF)
- Flammschutzmittel
- Weichmacher
- Radon
- Kohlendioxid (durch Verbrennungsvorgänge freigesetzt)
- Faserstoffe (Asbest, künstliche Mineralfasern)
- Stäube und Partikel
- Anorganische Gase wie Kohlenmonoxid, Ammoniak, Stickoxide oder Säuren
- Verbrennungsprodukte durch Tabakrauch

Eine ausführliche Behandlung der Eigenschaften und Vorkommen dieser Stoffe in der Raumluf, sowie deren Auswirkungen auf Gesundheit und Wohlbefinden der Menschen, befinden sich im Anhang.

Grenzwerte für abiotische Luftverunreinigungen in Innenräumen sind in Österreich nicht vorhanden. MAK-Werte sind zwar für eine Reihe von Substanzen vorhanden, sie dürfen jedoch definitionsgemäß für Bereiche wie Wohnhäuser, Büros, Schulen etc., in denen nicht mit gesundheitsschädlichen Arbeitsstoffen umgegangen wird, nicht angewendet werden.

3 BIOGENE LUFTVERUNREINIGUNGEN

3.1 Begriffsdefinition

Luftinhaltsstoffe mit biologischem Ursprung werden als biogene Luftverunreinigungen oder manchmal als Bioaerosole bezeichnet. Aufgrund der physikalischen Gegebenheiten enthält Luft bevorzugt biologische Strukturen mit kleinen Partikeldurchmessern (Owen et al. 1992). In einer Stellungnahme hat das deutsche Umweltbundesamt darauf hingewiesen, dass sich die Diskussion über Innenraumverunreinigungen in der Öffentlichkeit zu Unrecht hauptsächlich auf chemische Stoffe konzentriert. Wesentlich seltener werde dagegen von biologischen Innenraumverunreinigungen gesprochen, obwohl „diese doch zu Erkrankungen von erheblicher individualmedizinischer und epidemiologischer Bedeutung führen“ können (UBA 1995).

Ihre Konzentration, die im direkten Zusammenhang mit der Exposition des Raumnutzers steht, hängt sowohl von der Jahreszeit (Pollenflug), bestimmten Eigenschaften des Gebäudes bzw. Raumes, als auch vom Verhalten des Nutzers ab. Einflussfaktoren können die Jahreszeit, Hygienefaktoren, (Luft)Feuchte oder Haustierhaltung sein (nach Bischof 2001).

Häufige Bioaerosolbestandteile sind (Nevalainen et al. 1993):

- Mikroorganismen (Viren, Bakterien, Pilze, Protozoen)
- Pflanzliche Strukturen (Blütenpollen, Samen etc.)
- Fragmente und Ausscheidungsprodukte von Tieren (Haare, Hautschuppen, Kotballen von Milben etc.)
- Biogene Produkte (Endotoxine, Mykotoxine, β -1,3-Glucan, MVOC)

Sowohl pflanzliche Strukturen als auch Fragmente und Ausscheidungsprodukte von Tieren können potente Allergene sein. Bioaerosole sind in ihrer Zusammensetzung mitunter ausgesprochen komplexe luftgetragene Partikel biologischer Herkunft, die starke räumliche und zeitliche Konzentrationsschwankungen aufweisen können. Bioaerosole treten in der Natur ubiquitär (überall vorkommend) auf. Im Mittelpunkt des Interesses steht dabei zweifellos jener Teil der Bioaerosole, der eingeatmet wird, stellt doch die menschliche Lunge mit einer Fläche von etwa 130 m² eine große Angriffsfläche dar (Linsel 2001).

Bestimmte anthropogene Emissionen werden zwar in der Regel nicht als Bioaerosole bezeichnet, gehören jedoch ebenso zu den biogenen Luftverunreinigungen. Hier sind vor allem diverse stark flüchtige organische Verbindungen wie Aceton oder Alkohole und Geruchsstoffe zu nennen. Obwohl das von Menschen (und Haustieren) ausgeatmete CO₂ eine anorganische Substanz darstellt und auch aus abiotischen Quellen stammen kann, ist dieses CO₂ ebenfalls als biogene Luftverunreinigung zu betrachten. Dies gilt sinngemäß auch für die von Lebewesen abgegebenen organischen Verbindungen.

Im Folgenden werden die wichtigsten Gruppen von biogenen Luftverunreinigungen besprochen.

3.2 Allergene

3.2.1 Eigenschaften von Allergenen und Allergien

Unter „Allergie“ versteht man eine überschießende Reaktion des Immunsystems gegenüber bestimmten körperfremden Substanzen der Umwelt. „Überschießend“ heißt die Reaktion, weil das körpereigene Immunsystem auf Fremdstoffe (z.B. Pollen) anspricht, die anders als Krankheitskeime eigentlich keine Gefahr für die Gesundheit darstellen. Prinzipiell kann jeder Stoff in unserer Umwelt zum Auslöser einer Allergie werden. Für 20.000 Substanzen ist nach vorsichtigen Schätzungen eine allergieauslösende Wirkung bekannt (Universität zu Lübeck 2003).

Bei den meisten Allergenen handelt es sich um Eiweißsubstanzen tierischer oder pflanzlicher Herkunft, beispielsweise von Blütenpollen, Milben und Schimmelpilzen. Von den Eiweißmolekülen sind in der Regel nur kleine Abschnitte, die sog. „Epitope“, allergen wirksam. Das sind oft Molekülabschnitte mit reaktiven Seitenketten, die eventuell auch Zuckermoleküle angelagert haben (Glykoproteine). Viele dieser als Allergen wirkenden Eiweißmoleküle haben Enzymwirkung. Aber auch körpereigene Strukturproteine können durch reaktive Fremdstoffe (z.B. Medikamente) derart verändert werden, dass sie als „fremd“ erkannt werden und es zu einer Allergie gegen körpereigenes Gewebe kommt („Autoaggression“).

In Abhängigkeit von den involvierten Pathomechanismen unterscheidet man vier Typen der Allergie. Allerdings kommen diese in der Regel nicht in reiner Form vor (bei jeder Reaktion sind mehrere Teile des Immunsystems beteiligt). Die Einteilung in 4 Haupttypen der allergischen Reaktion hat daher vor allem auch didaktische Bedeutung.

Die häufige „Typ I-Allergie“ ist geprägt durch die Bildung einer bestimmten Art von Antikörper, dem sogenannten „Immunglobulin E“ (IgE), welches die Fähigkeit besitzt, an Mastzellen zu binden und diese zur Freisetzung von Histamin und anderen Entzündungsmediatoren zu veranlassen. IgE ist ein phylogenetisch recht altes Immunglobulin, das wahrscheinlich in der Abwehr parasitärer Infektionskrankheiten seine ursprüngliche Aufgabe hat. Diese Form der Allergie ist deshalb so bedeutsam, weil die häufigsten allergischen Erkrankungen – Heuschnupfen, Asthma und Neurodermitis – wesentlich von der Typ I-Reaktion geprägt sind. In den letzten Jahrzehnten kam es bei diesen Erkrankungen weltweit zu einer markanten Zunahme.

Zu unterscheiden ist weiters zwischen einer Sensibilisierung und einer Allergie. Wenn sich das Immunsystem mit einem Allergen auseinandergesetzt und z.B. Allergieantikörper (IgE) gebildet hat, so ist der Organismus gegen diesen Allergieauslöser sensibilisiert (Schmidt 2004). Eine Sensibilisierung bedeutet nicht automatisch, dass es auch zu Allergiesymptomen kommt. Nachgewiesen wird eine Sensibilisierung im Allergietest. Ist der Organismus aber einmal auf einen Allergieauslöser sensibilisiert, so wird bei jedem erneuten Kontakt das Allergen vom Immunsystem sofort wiedererkannt (Schmidt 2004). Es kann dann auch zu Krankheitserscheinungen kommen. Zur Auslösung allergischer Reaktionen genügen bei bereits sensibilisierten Personen oft verschwindend geringe Mengen des Allergens. Nur wenn ein Patient/eine Patientin neben der Sensibilisierung auch entsprechende allergische Symptome hat, kann man von einer Allergie sprechen.

Das Hinzutreten weiterer begünstigender und verstärkender Faktoren, die gleichzeitig mit oder bereits vor dem Allergen auf die Schleimhäute einwirken, modifiziert die Reaktion auf das Allergen sowohl beim Erst- als auch bei den Folgekontakten.

Allergische Symptome können sich an verschiedenen Organen manifestieren: So zeigen sich am Auge Bindehautentzündung und Lidschwellung, in den Atemwegen Heuschnupfen

(saisonalen Schnupfen), Dauerschnupfen, Schwellungen der Atemwege oder asthmatische Beschwerden, an der Haut Nesselsucht, Ekzeme oder Neurodermitis sowie im Magen-Darm-Trakt Übelkeit, Durchfall oder Magenschleimhautentzündung.

Eine Verstärkung von Asthma-Anfällen bei Allergenkontakt sowie allenfalls eine Auslösung von Anfällen bereits bei relativ geringer Allergenexposition kann durch verschiedene unspezifische Reizwirkungen erfolgen: Virusinfektionen, toxische Einwirkung von Reizgasen, Austrocknung der Schleimhaut oder parasympathische Reaktionslage sind nur ein paar besonders augenfällige Beispiele.

Prinzipiell dürften etwa ein Viertel bis ein Drittel aller Personen genetisch zur Ausbildung von Asthma, Heuschnupfen oder atopischer Dermatitis (Neurodermitis) neigen. Dass dieses genetische Potential inzwischen fast vollständig ausgeschöpft wird (Braun-Fahrlander et al. 2004), hat zweifellos verschiedene Ursachen, die noch nicht alle im Detail bekannt sind.

3.2.2 Allergene in Innenräumen

Welcher Stoff bei einem Menschen als Allergen wirkt, dürfte unter anderem auch vom Zufall abhängen, wobei ein ausreichend intensiver Kontakt während vulnerabler Phasen (z.T. in der frühen Kindheit) diese Sensibilisierung begünstigen dürfte, während länger dauernder Kontakt zum Allergen in niedriger Konzentration eventuell auch eine Toleranz bewirken kann.

Es ist daher nicht verwunderlich, dass die Liste der wichtigsten Allergene regional unterschiedlich aussieht. Dies zeigt, dass es weniger auf die Art des Allergens ankommt, sondern nur darauf, dass ein empfänglicher Organismus überhaupt Kontakt zu irgendeiner potentiell allergenen Struktur erhält. In unseren Breiten spielen die Allergene der Hausstaubmilbe (und anderen Milbenarten wie der Mehlmilbe) eine wichtige Rolle. Wesentliche Bedeutung haben in den Raum eintretende Blütenpollen, allen voran Hasel/Birke und Gräserpollen. Dann sind Allergene auf Hautschuppen einzelner Haustiere (Katzen, Hunde) zu nennen. In anderen Kontinenten sind Allergene der Küchenschabe oder auch bestimmter Schimmelpilze bedeutsam.

Insbesondere die Größe der Teilchen, die die Allergene tragen, spielen für die Ausprägung der Allergie eine wichtige Rolle. So sind Blütenpollen in der Regel zu groß, um in tiefe Abschnitte der Atemwege zu gelangen. Sie verursachen daher eher allergische Reaktionen an den oberen Atemwegen (wie Bindehautentzündung, Heuschnupfen). Die Kotbällchen der Milben, an denen die Allergene haften, sind im getrockneten Zustand so fein, dass sie auch in die Lunge gelangen und führen daher auch häufiger zu Asthma.

Innenraumschadstoffe wirken nicht primär allergen, sondern fördern vielmehr allergische Reaktionen (Wichmann und Wahn 2004). In vielen Untersuchungen zeigte sich ein Zusammenhang zwischen Tabakrauch und Asthma, weniger gut belegt sind die Effekte von Stickstoffdioxid (Nutzung von Gasherden ohne Abzug) oder von Formaldehyd. Weiters gibt es Hinweise darauf, dass Lösungsmittel (VOC) das Risiko für allergische Erkrankungen erhöhen können (Lehmann et al. 2001, DGAI/AWMF 2004). Während der Schwangerschaft eingeatmete VOC (z.B. aus Renovierungstätigkeiten) erhöhen das Risiko von Atopie (Überempfindlichkeit gegen Umweltstoffe) beim Kind (UFZ 2003). Auch Verkehrsabgase, speziell Dieselruß, sind mit einem erhöhten Allergierisiko assoziiert (DGAI/AWMF 2004, Fahy et al. 2002, Krämer et al. 2000, Studnicka et al. 1997).

Von Bedeutung sind auch Innenraumfaktoren wie Temperatur und Feuchte, die Ausstattung mit Teppichen oder das Lüftungs- und Reinigungsverhalten. Die Häufigkeit des Lüftens und die Abdichtung von Wohnungen/Häusern beeinflussen nicht nur die Schadstoff-, sondern auch die Allergenkonzentration in der Wohnung (Hausstaubmilben-, Katzenallergen) (Wichmann und

Wahn 2004). Der Einfluss verschiedener Umweltfaktoren auf das Asthma-Risiko wurde beispielsweise vom Salzburger ISAAC-Team (Oberfeld et al. 1999) untersucht. Es fanden sich insbesondere signifikante Einflüsse durch Schimmelpilze, Passivrauch-Belastung, Holzheizung in der Nachbarschaft, Verkehrsdichte (Zahl der LKW in der Straße) und die Stickoxid-Konzentration in der Region.

3.2.3 Zunahme der Allergien

Die Frage, was die in den letzten Jahrzehnten beobachtete Zunahme der Allergien bewirkt hat, ist schwer zu beantworten. Unterschiede zwischen Ost- und Westdeutschland, also Bevölkerungsgruppen mit ähnlicher genetischer Veranlagung (mit weniger Allergien in Ostdeutschland und einer Zunahme nach der Wiedervereinigung) oder zwischen Stadt und Land sowie die raschen zeitlichen Änderungen wurden eher hilflos mit „Lebensstilfaktoren“ erklärt, wobei aber schon bald auffiel, dass Kinder, die in „keimärmerer“ Umgebung aufwachsen (behütete Einzelkinder) gefährdeter sind als Kinder, die ältere Geschwister haben (Von Mutius et al. 1994). Weiters entwickelten Kinder, die im 1. Lebensjahr Kinderkrippen besuchten (was in der ehem. DDR, nicht aber in der BRD weit verbreitet war) seltener Asthma und Heuschnupfen (Krämer et al. 1999).

Versuche an Nagetieren zeigten, dass Kontakt mit (harmlosen) Bakterien kurz nach der Geburt die Umstellung des Immunsystems beschleunigen hilft: Während der Schwangerschaft müssen die Immunabwehr von Mutter und Embryo ja gebremst werden, damit es nicht zu gegenseitigen Abstoßungsreaktionen kommt. Nach der Geburt muss das Kind aber rasch eine adäquate Abwehrlage gegen die belebte Umwelt entwickeln. Fehlen die entsprechenden Reize (wobei die ersten offenbar schon kurz vor der Geburt einwirken können), besteht – so die Theorie – bei entsprechender genetische Disposition die Gefahr, dass stattdessen die phylogenetisch ältere IgE-Schiene hochgefahren wird. Im Tierversuch konnte dies auch eindrücklich bis hin zum entsprechenden Zytokinmuster belegt werden.

3.2.4 Einflüsse auf die Allergenkonzentration in Innenräumen und Präventionsempfehlungen

In zahlreichen Studien wurden verschiedene Einflussgrößen auf die Konzentration von Milbenallergen im Hausstaub und in der Raumluft nachgewiesen (Bischof 2001). Konsistent konnte nachgewiesen werden, dass sich die Der p1-Konzentration – nicht jedoch die Der f1-Konzentration – mit steigender relativer Feuchte erhöht¹. Die gleiche Tendenz zeigt die Analyse der Differenz der absoluten Feuchte innen/ außen (Gross et al. 2000). Signifikant höhere Konzentrationen von Milbenallergenen wurden in Erdgeschosswohnungen gemessen. (Gross et al. 2000). Eine erhöhte Konzentration von Milbenallergenen weisen auch, wenn auch nicht konsistent, Haushalte mit Hunden auf

Allergene von Haustieren (Hund, Katze) kommen prinzipiell in Wohnungen vor, in denen diese gehalten werden. Die Haare und Hautschuppen, die diese Allergene tragen, sind jedoch so mobil, dass sie von dort auch in Nachbarwohnungen, Klassenzimmer und andere Räume vertragen werden. Diese Allergene können im Hausstaub lange persistieren.

¹ „Der p1“ = Abkürzung für das Hauptallergen (darum 1) von *Dermatophagoides pteronyssinus* (Hausstaubmilbe). „Der f1“ = Abkürzung für das Hauptallergen der *Dermatophagoides farinae* (Mehlstaubmilbe). Beide kommen im Hausstaub vor, letztere v.a. in Mehlstaub zB in Mühlen und Bäckereien. Es besteht häufig Kreuzallergie.

Die Deutsche Gesellschaft für Allergologie und klinische Immunologie (DGAI) hat Empfehlungen zur Allergieprävention veröffentlicht (DGAI/AWMF 2004). In diesen Leitlinien heißt es unter anderem:

„Hausstaubmilben: Für Risikopopulationen kann die Reduktion der Exposition gegenüber Hausstaubmilbenallergenen das Allergierisiko senken. Eine effektive Maßnahme ist hier im Sinne der Sekundärprävention das Encasing der Matratze.

Schimmel und Feuchtigkeit: Ein Innenraumklima, das Schimmelpilzwachstum begünstigt (hohe Luftfeuchtigkeit, mangelnde Lüftung) sollte zur Allergieprävention vermieden werden. Sinnvolle Maßnahmen zur Vermeidung und Sanierung sind im „Leitfaden zur Vorbeugung, Untersuchung, Bewertung und Sanierung von Schimmelpilzwachstum in Innenräumen“ des Umweltbundesamtes enthalten (UBA 2005).

Rauchverhalten der Mutter, des Vaters und Passivrauchexposition: Aktive und passive Exposition gegenüber Tabakrauch erhöht das Allergierisiko (insbesondere das Asthmarisiko) und ist zu vermeiden. Dies gilt auch während der Schwangerschaft.“

Heftig diskutiert wurde in den letzten Jahren die Frage, ob Katzenhaltung in der frühen Kindheit das Risiko für Allergien erhöht oder verringert (Braun-Fahrlander 2003b). Die Stellungnahme der DGAI (2004) dazu lautet folgendermaßen:

„Für Personen ohne erhöhtes Allergierisiko besteht nach der gegenwärtigen Datenlage kein Grund für eine Empfehlung zur Einschränkung der Haustierhaltung aus Präventionsgründen. Bislang liegt keine ausreichende ‚Evidenz‘ vor, die eine völlige Abkehr von den bisherigen Präventionsempfehlungen für Risikopopulationen begründen könnte. Folgende differenzierte Aussagen können begründet werden:

- Die Anschaffung von Felltieren als Präventionsmaßnahme ist nicht zu empfehlen.
- Frühe Hundehaltung ist nach den vorliegenden Daten nicht mit einem höheren Allergierisiko verbunden.
- Bei der Katzenhaltung überwiegen die Studien, die in der Haltung einen Risikofaktor sehen. Deshalb sollte in Risikopopulationen die Katzenhaltung vermieden werden.
- Diese gilt auch für die Haltung von Nagetieren (Kaninchen, Meerschweinchen).“

Weiters konnte Konsens unter anderem dahingehend erzielt werden, dass alle Kinder, auch Allergiegefährdete, die empfohlenen Impfungen erhalten sollen. Zum Thema „Training des Immunsystems“ heißt es: „Es gibt Hinweise darauf, dass eine frühzeitige unspezifische Immunstimulation vor der Entwicklung allergischer Erkrankungen schützen kann. Hierzu zählen eine ländliche Wohnumgebung, der Besuch von Kindertagesstätten in den ersten 2 Lebensjahren und eine größere Geschwisterzahl. Es lassen sich aber noch keine Empfehlungen dazu ableiten. Zusätzlich gibt es erste Hinweise darauf, dass die Gabe von Lactobazillus GG präventive Effekte zeigt. Weitere Präventionsstudien müssen zeigen, ob sich hieraus eine einfache und wirkungsvolle Präventionsempfehlung ableiten lässt“ (DGAI/AWMF 2004).

Ob frühkindliche Infekte vor Allergien schützen können, ist umstritten. In einer aktuellen dänischen Studie an über 24.000 Kindern wurde zwar eine Schutzwirkung (in Bezug auf atopische Dermatitis = Neurodermitis) von Haustieren, Geschwistern, dem Besuch von Tagesstätten und einem Leben auf dem Bauernhof gefunden, nicht aber von Infektionskrankheiten in den ersten 6 Lebensmonaten (Benn et al. 2004).

3.2.4.1 Richt- und Orientierungswerte

	Konzentrationsangaben Der p1 [mg/kg]		Konzentrationsangaben Der f1 [mg/kg]	
	Erfurt	Hamburg	Erfurt	Hamburg
n	597	578	597	578
Geometrisches Mittel	0,036	0,111	0,087	0,414
25. Perzentil	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,06
Median	< 0,01	0,09	0,06	0,48
75. Perzentil	0,18	1,00	0,67	3,00
Maximum	133	345	825	1.255

Tabelle 1: Orientierungswerte für Milbenallergenkonzentrationen im Hausstaub Hamburger und Erfurter Wohnungen (Jacob et al. 1999)

Es zeigten sich nicht in allen Studien Unterschiede zwischen West- und Ostdeutschland (Hirsch 1999).

3.3 Schimmelpilze

3.3.1 Eigenschaften und Vorkommen

Schimmelpilze wachsen überall im Boden, solange Nährstoffe vorhanden sind und sie nicht durch Hemmsubstanzen, konkurrierende Arten oder ungeeignete physikalische Bedingungen daran gehindert werden (Reiss 1986). Sie leben saprophytisch, d.h. von totem organischen Material und sind besonders in der obersten Bodenschichten und in Waldböden weit verbreitet. Vom Boden aus können Schimmelpilze dank überreich gebildeter Sporen, die in die Luft gelangen, neue Lebensräume besiedeln.

Das Vorkommen von Schimmelpilzen² in der Außenluft unterliegt jahreszeitlichen Schwankungen: In den Wintermonaten liegen die Schimmelpilzkonzentrationen in der Außenluft bei einigen Hundert Keimen pro Kubikmeter. Die höchsten Konzentrationen werden im Spätsommer nachgewiesen. Die Lebensdauer und damit auch die Konzentration der Schimmelpilze in der Luft ist von der Temperatur, der relativen Luftfeuchtigkeit und der Sonneneinstrahlung abhängig. Vor allem in trockenen Sommermonaten werden viele Sporen gebildet und durch Luftbewegungen oder durch Nebeltröpfchen abgelöst und über weite Strecken transportiert, bevor sie aufgrund ihrer Dichte auf neue Substrate sedimentieren. Manche Schimmelpilze sind fähig, ihre Sporen aktiv wegzuschleudern.

Schimmelpilze kommen ubiquitär vor. Neben dem (jahreszeitlichen) Einfluss aus der Umgebungsluft sind jedoch in Einzelfällen Innenraumquellen bedeutend (Hutter et al. 2002).

² Der Begriff „Schimmelpilze“ wird im Zusammenhang mit Luft meist für Pilzsporen und nahezu nie für Pilzhypen verwendet (Kraus 2004)

Die Pilzsporenkonzentration in der Innenraumluft ist abhängig von (Schneiders 1994):

- der Schimmelpilzkonzentration in der Außenluft
- dem Wohnverhalten (unzureichende Beheizung und falsches Lüftungsverhalten), Belegung und Raumnutzung
- den bauphysikalischen Gegebenheiten (Wärmebrücken, aufsteigende Feuchte etc.)

In Gebäuden mit Feuchtigkeitsproblemen oder Wasserschäden bzw. bei Gebäuden mit bauphysikalischen und konstruktiven Mängeln (Kondensation durch unzureichende Wärmedämmung, Diffusionssperren, Wärmebrücken etc.) können sich vermehrt Schimmelpilzsporen ansiedeln, sich zu Schimmelpilzen entwickeln und erneut Sporen produzieren.

Die Konzentrationen von Schimmelpilzsporen in der Innenraumluft liegen in der Regel deutlich tiefer als in der Außenluft. Die Werte schwanken in der Regel zwischen weniger als 10 und einigen Tausend Keimen pro Kubikmeter (ECA 1993).

Raumlufttechnische Anlagen, insbesondere Luftwäscher und -befeuchter können ebenfalls Quellen und Verbreitungswege für Schimmelpilzsporen in der Innenraumluft darstellen (Flannigan 1996).

3.3.2 Einflussfaktoren für mikrobielles Wachstum

Einflussfaktor Temperatur: Für die meisten Bodenbakterien und Schimmelpilze liegt der bevorzugte Temperaturbereich im mesophilen Bereich zwischen 20 und 35°C. Viele Schimmelpilze und einige Bakterien wachsen jedoch noch bei wesentlich tieferen Temperaturen (bis 0°C), andere Pilze und Bakterien vertragen auch höhere Temperaturen (bis 40°C), thermophile Bakterien sogar Temperaturen bis weit über 60°C. Die von den Pilzen gebildeten Sporen sind äußerst kälte- und zum Teil auch hitzeresistent.

Bezeichnung	Wachstumstemperatur °C		
	Minimum	Optimum	Maximum
Mesophile Schimmelpilze	0 ... 5	25 ... 35	ca. 40
Thermotolerante Schimmelpilze	0 ... 5	30 ... 40	ca. 50
Thermophile Schimmelpilze	20 ... 25	35 ... 55	ca. 60

Tabelle 2: Wachstumstemperaturen mesophiler, thermotoleranter und thermophiler Schimmelpilze (UBA 2002)

Einflussfaktor Feuchte: Für die Entwicklung von Schimmelpilzen und Bakterien ist die Verfügbarkeit von Wasser ein wichtiger Faktor, wobei nicht der totale Wassergehalt, sondern die für die Organismen zur Verfügung stehende Feuchte ausschlaggebend ist. Pilze können sowohl vom Substrat als auch aus der Luft Wasser bzw. Wasserdampf entnehmen.

Die verfügbare Wassermenge ist abhängig von Temperatur, pH-Wert und chemischer Zusammensetzung des Substrats (Reiss 1986, Flannigan 1996). Es ist ein indirekter Zusammenhang zur Luftfeuchtigkeit gegeben, denn bei hoher Luftfeuchtigkeit und hoher Lufttemperatur entsteht in größerem Ausmaß Kondenswasser, sobald warme, feuchte Luft auf eine kältere Oberfläche trifft.

Einflussfaktor pH-Wert: Der optimale pH-Bereich des Substrats liegt für Schimmelpilze im leicht sauren Milieu (pH 4,5-6,5), die Extremwerte liegen bei pH 2 und pH 8. Bakterien bevorzugen im Allgemeinen ein leicht alkalisches Milieu, es gibt aber auch einige säuretolerante

Bakterien. Viele Organismen verändern durch ihre Ausscheidung von Stoffwechselprodukten den pH-Wert ihres Substrats.

Einflussfaktor Substrat: Schimmelpilze und die meisten Bakterien sind heterotroph, d.h. sie sind auf das Vorhandensein von Kohlenstoffverbindungen angewiesen. Besonders geeignet sind wasserlösliche Verbindungen geringer Molekülmasse. Ein Mangel an Spurenelementen (Zn, Fe, Cu, etc.) führt zu Wachstumsverzögerungen und Abnormalitäten. Viele Organismen sind in der Lage, auch komplexe Baustoffe wie Proteine, Lipide, Stärke, etc. anzugreifen oder sogar abzubauen. In experimentellen Versuchen wurde gezeigt, dass Mikroorganismen unter günstigen Bedingungen (hohe Luftfeuchtigkeit) Beton als Substrat nützen können, weil die von den Organismen ausgeschiedenen Säuren das in geringen Mengen enthaltene kohlenstoffhaltige Material abbauen. Im Unterschied dazu sind die reinen Polymere in Kunststoffen viel widerstandsfähiger, aber viele Zusatzstoffe wie Weichmacher, Emulgatoren und Füllstoffe können abgebaut werden, was zu einer Verminderung der Reiß-, Zug- und Biegefestigkeit der Kunststoffe führen kann.

Angaben zu den oberflächennahen Bauteilschichten		Zuordnung zur Substratgruppe in Abhängigkeit vom Verschmutzungsgrad ^a	
Substratgruppe ^b	Typische Repräsentanten	nicht	stark
0 optimaler Nährboden	biologische Vollmedien	0	0
I biologisch gut verwertbare Substrate ^c	Tapeten, Gipskarton, Bauprodukte aus gut abbaubaren Rohstoffen, Material für dauerelastische Fugen	I	I
II biologisch kaum verwertbare Substrate	Putze, mineralische Baustoffe, manche Hölzer, Dämmstoffe, die nicht unter I fallen	II	I
III - inerte Substrate ^d	Metalle, Folien, Gläser, Fliese	III	I

^a Der Verschmutzungsgrad wird in nicht verunreinigt („nicht“) und stark verunreinigt („stark“) eingeteilt.

^b Je nach Grad der Verschmutzung kann sich die Einstufung in eine tiefere Substratgruppe verschieben.

^c Entweder können diese Substrate biologisch verwertbare Einlagerungen besitzen oder sie werden abgebaut.

^d Diese Substrate können weder abgebaut werden noch enthalten sie Nährstoffe.

Tabelle 3: Einstufung verschiedener Materialien in Substratgruppen (Sedlbauer 2001)

Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die verschiedenen Einflussgrößen:

Einflussgröße	Parameter	Einheit	Wachstumsbereich		Bemerkungen
			minimal	maximal	
Temperatur	Temperatur an der Bauteiloberfläche	°C	-8	60	Hängt von der Pilzart und dem Lebensstadium (Sporenkeimung oder Myzelwachstum) ab
Feuchte	Relative Feuchte an der Bauteiloberfläche	%	70 ^a	100	
Substrat	Nährstoffe und Salzgehalt	-	-	-	Auch in Staubablagerungen können Nährstoffe gefunden werden
Milieu	pH-Wert der Oberfläche	-	2	11	^b

^a Bekannt sind auch Schimmelpilze (Xeromyces), die auf Gebäck schon ab 45% relativer Feuchte wachsen.

^b Der zulässige pH-Wert kann ggf. vom Pilz beeinflusst werden.

Tabelle 4: Übersicht der unterschiedlichen Einflussfaktoren auf Wachstum von Schimmelpilzen auf Baustoffen (Sedlbauer 2001)

Zur Vorhersage einer Schimmelpilzbildung auf Bauprodukten wurde in den letzten Jahren ein Isoplethenmodell entwickelt, das Sporenauskeimungszeiten bzw. Wachstumsraten in Abhängigkeit von Temperatur und relativer Feuchte beschreibt. Die Isoplethen unterscheiden sich je nach Spezies erheblich und sind substratspezifisch.

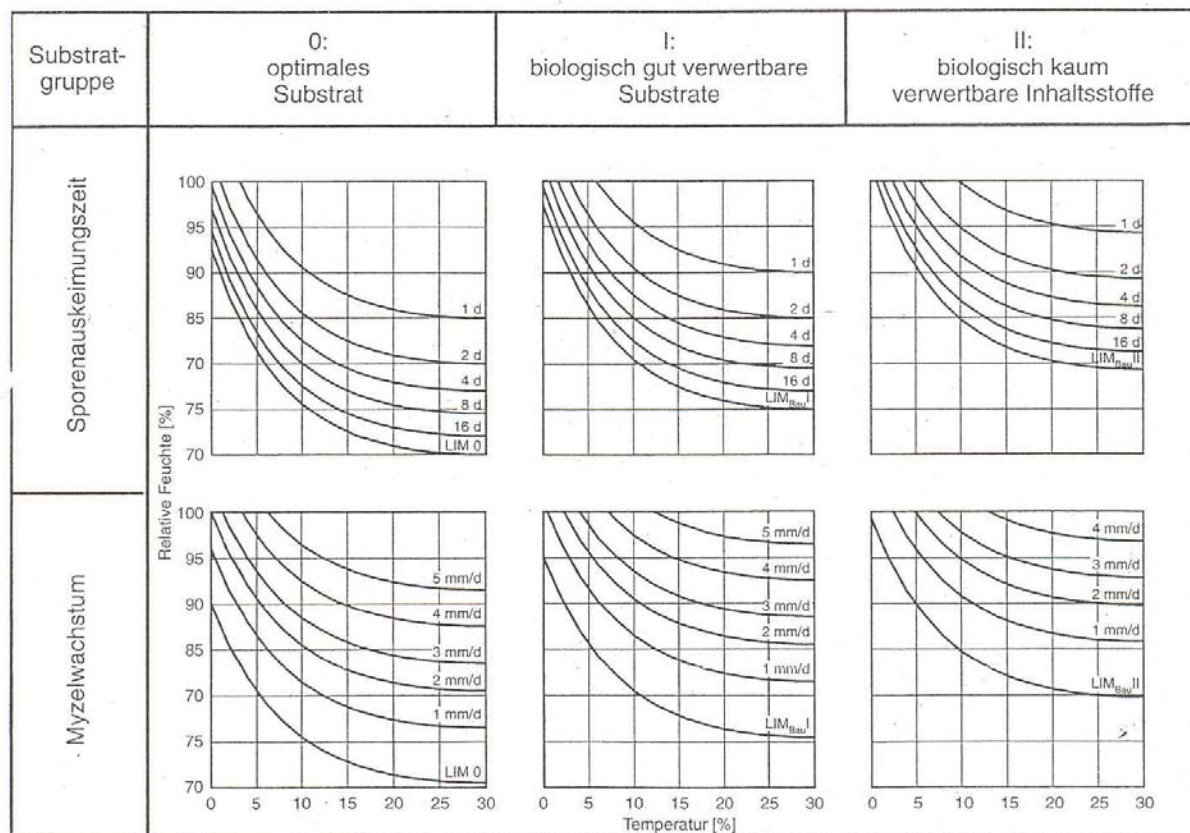


Bild 1. Verallgemeinerte Isoplethensysteme für Sporenauskeimung (Bild oben) und Myzelwachstum (Bild unten) nach [1] für alle in Gebäuden auftretenden Schimmelpilze auf optimalen Nährboden (links), biologisch verwertbarem Substrat (mittig) und Substrat ohne verwertbare Inhaltsstoffe (rechts). Die Lage des Lowest Isopleth for Mould (LIM) stellt die unterste Grenze der biologischen Aktivität dar. Die angegebene Zahl der Tage charakterisiert die Zeitdauer, nach welcher erste Auskeimungen auftreten (Bild oben) bzw. das zu erwartende Wachstum in mm/d (Bild unten).

Abbildung 4: Verallgemeinerte Isoplethensysteme für Sporenauskeimung und Myzelwachstum (Sedlbauer 2001)

3.3.3 Gesundheitliche Auswirkungen

Nur wenige Schimmelpilze sind als humanpathogen einzustufen und die wenigsten davon sind obligat pathogen, also krankmachend. Die meisten sind Opportunisten, d.h. sie leben als Saprophyten auf totem organischen Material und wirken nur unter bestimmten Bedingungen pathogen. Verschiedene Vertreter von *Aspergillus*, *Penicillium*, *Mucor* und *Rhizopus* sind auf den Schleimhäuten von gesunden Menschen anzutreffen. Infektionen werden nur hervorrufen, wenn der Abwehrmechanismus des Körpers durch eine Krankheit geschwächt ist (z.B. bei Patienten nach Organtransplantationen oder in der Chemotherapie, AIDS-Kranke).

Viele verschiedene Pilze sind als Allergene bekannt (Kersten und von Wahl 1989). Allergene Pilze, die häufig in Wohnungen nachgewiesen werden, sind *Cladosporium* (häufigster Pilz in der Außenluft), *Alternaria* (in Außenluft und feuchten Häusern weit verbreitet), *Aspergillus* (sehr anspruchslos) und *Penicillium* (sehr anspruchslos). Die Pilze können große Mengen an Sporen in die Umgebung abgeben. Diese können ähnlich wie Staub auf Schleimhäuten sedimentieren

oder eingeatmet werden, was die Entwicklung von allergischen Reaktionen bewirken kann. Verschiedene Typen von Allergien sind dabei möglich: IgE-vermittelte Typ I-Allergie (Soforttyp), IgG-assoziierte Typ III-Allergie (allergische Alveolitis), zellvermittelte Typ IV-Allergie (Spättyp) – siehe dazu auch das Kapitel „Allergene“.

Unter der Einwirkung von schimmelpilzhaltigen Aerosolen werden kurzfristig auftretende Entzündungen von Haut, Bindehaut und Schleimhäuten (Douwes et al. 1997) beschrieben. In feuchten, Schimmelpilz-befallenen Gebäuden werden Sick-Building-Beschwerden wie Ausschläge, Juckreiz, Nasenbluten, Husten und Kopfschmerzen (Davis 2001) ebenso geschildert wie Magen-Darm-Probleme und ZNS-Symptomatiken (Schwindel, Übelkeit, Konzentrationsschwäche, Müdigkeit).

3.3.4 Mykotoxine

Es gibt auch Vergiftungskrankheiten, sogenannte Mykotoxikosen, die durch giftige Stoffwechselprodukte hervorgerufen werden (Reiss 1986). Vertreter der Gattung *Aspergillus*, *Penicillium*, *Fusarium*, *Alternaria* und *Stachybotrys* können solche Toxine bilden (Mykotoxikosen durch z.B. *Stachybotrys*).

3.3.5 β -1,3-Glucan

Auch Abbauprodukte von Schimmelpilzen können in die Luft gelangen und zu gesundheitliche Beeinträchtigungen führen. β -(1,3)-Glucan ist ein Polysaccharid, das in Zellwänden der meisten Schimmelpilze und Hefen, einiger Bakterien sowie vieler Pflanzen vorkommt (Bischof 2001). Sie können Entzündungsreaktionen hervorrufen und es wird vermutet, dass dadurch innenraumassoziierte respiratorische Symptome bei Kindern und Erwachsenen ausgelöst werden können (Rylander et al. 1998). Es wurde nachgewiesen, dass sich die Konzentrationen an β -1,3-Glucan im Hausstaub um mehrere Größenordnungen unterscheiden können (Douwes et al. 1998, Gehring et al. 2001).

Identifizierte Einflussgrößen auf die Konzentration von β -1,3-Glucan im Hausstaub sind u.a. sichtbarer Schimmelbefall und höhere Feuchten (Gehring et al. 2001, Rylander 1997).

3.3.6 MVOC

Zu den Stoffwechselprodukten, die von Schimmelpilzen an die Luft abgegeben werden, zählen auch flüchtige organische Verbindungen (MVOC = Microbial Volatile Organic Compounds). Von den MVOC sind viele für Schimmelpilze spezifisch. Sie gleichen in Struktur und relativer Molekularmasse zum Teil flüchtigen organischen Verbindungen (VOC), wie sie auch von Baumaterialien und Einrichtungsgegenständen abgegeben werden können. MVOC-Verbindungen kommen in Innenräumen in der Regel in deutlich geringeren Konzentrationen vor als VOC. Dennoch lassen sich diese Verbindungen aufgrund ihrer geringen Geruchsschwelle oft wahrnehmen.

Trotz der absolut betrachtet niedrigen Konzentrationen von MVOC-Verbindungen in der Raumluft können nach dem bisherigen Stand der Erkenntnisse diese Substanzen durchaus als Indikatoren zur Beurteilung für das Vorliegen eines Schimmelwachstums dienen. Als beste Indikatoren für einen mikrobiellen Befall gelten die Verbindungen 3-Methylfuran, 3-Methyl-1-butanol, Dimethyldisulfid, 1-Octen-3-ol und 3-Octanon, weniger spezifische Indikatoren sind Hexanon, Heptanon, 1-Butanol und Isobutanol, da letztgenannte Verbindungen auch aus Bauprodukten oder Farben ausgasen können (UBA 2002). In der Literatur zu MVOC-Messungen werden auch Fälle erwähnt, bei denen trotz eines offen sichtbaren Schimmelpilzbefalls keine signifikant erhöhten Raumluftkonzentrationen von MVOC-

Verbindungen ermittelt werden konnten. Ebenso sind Fälle dokumentiert, in denen bei Vorliegen erhöhter Konzentrationen ein Befall nicht lokalisiert werden konnte. Ob sich letztlich MVOC tatsächlich zur sicheren Identifizierung eines Schimmelbefalls eignen, wird kontroversiell diskutiert (Schleibinger et al. 2004).

Die Mehrzahl der MVOC-Verbindungen weist Doppelbindungen, konjugierte Carbonylverbindungen und/oder OH-Gruppen auf, von denen bekannt ist, dass die menschliche Nase empfindlich darauf reagiert. Dies bedeutet, dass die als Indikatoren eines Schimmelpilzwachstums bekannten Stoffe in der Mehrzahl selbst in einem niedrigen Konzentrationsbereich schon geruchlich wahrgenommen werden können, was daraus entstehende Reaktionen möglich macht.

Die oft geäußerte Vermutung, dass die mikrobiell produzierten flüchtigen organischen Substanzen eine besondere Toxizität aufweisen und in den genannten Konzentrationsbereichen bereits Befindlichkeitsstörungen hervorrufen sollen, kann nach Vergleich mit vorliegenden Literaturwerten sowie im Vergleich mit bekannten Bewertungskriterien von flüchtigen organischen Substanzen aus Baustoffen (VOC) nach dem heutigen Stand des Wissens nicht abgeleitet werden. Es gibt keinen Grund, dass MVOC-Verbindungen ein toxikologisch wesentlich effektiveres Wirkungspotential als VOC aus Baustoffen aufweisen sollten. Die Entstehung von gesundheitlichen Beeinträchtigungen durch schimmeltypische Gerüche sind jedoch nicht auszuschließen.

3.3.7 Richt- und Orientierungswerte

Die Kommission der EU gibt Referenzwerte für mit Anderson-Samplern gemessene Werte für die Gesamtkeimzahlen von Pilzsporen in Innenräumen an, wobei die Klassifizierung auf üblicherweise in Innenräumen feststellbaren Konzentrationen basiert und keine gesundheitliche Bewertung darstellt.

Kategorie	Sporenkonzentration in KBE/m ³ ^a	
	Wohnungen	Büroräume
Sehr niedrig	< 50	< 25
Niedrig	50 ... 200	25 ... 100
Mittel	200 ... 1000	100 ... 500
Hoch	1000 ... 10000	500 ... 2000
Sehr hoch	> 10000	> 2000

^a koloniebildende Einheiten pro Kubikmeter Luft

Tabelle 5: Erfahrungswerte für die Beurteilung von Gesamtkeimzahlen von Pilzsporen in Innenräumen nach ECA (1993)

β -(1,3)-Glucan	Konzentrationsangaben [$\mu\text{g}/\text{m}^2$]	Konzentrationsangaben [mg/kg]
n	395	395
Geometrisches Mittel	1.197	1.711
5. Perzentil	134	489
25. Perzentil	742	1.295
Median	1249	1.830
75. Perzentil	2.183	2.519
95. Perzentil	10.817	4.065

Tabelle 6: Orientierungswerte für β -(1,3)-Glucan im Hausstaub von 395 Hamburger und Erfurter Wohnungen (Gehring et al. 2001)

3.4 Bakterien

3.4.1 Eigenschaften und Vorkommen

Bakterien leben im Boden, im Wasser, in totem organischen Materialien sowie als Symbionten und Parasiten in Pflanzen, Menschen und Tieren.

Die Außenluft bildet keinen Lebensraum für Bakterien, aber durch menschliche Aktivitäten und Windstöße können sie an Wassertröpfchen und Partikel gebunden in die Luft gelangen und verbreitet werden. Die Konzentrationen liegen zwischen ein paar vereinzelt und einigen Hundert Keimen pro Kubikmeter (ECA 1993).

Bakterienquellen in der Innenraumlufth sind vorwiegend Menschen und Tiere. Besonders beim Niesen und Husten, aber auch beim Sprechen werden viele Bakterien freigesetzt. Aufgewirbelter Staub und Hautschuppen enthalten ebenfalls Bakterien. Die Keimkonzentration kann sehr stark schwanken und befindet sich im Bereich von 10 bis 10.000 Keimen pro Kubikmeter.

Große Bakterienmengen können auch durch Luftbefeuchter, die nach dem Zerstäuber- und Luftwäscherprinzip konzipiert sind, in die Luft gelangen.

3.4.2 Gesundheitliche Auswirkungen

In der Regel zählen die in der Raumlufth nachweisbaren Bakterienarten nicht zu den bekannten Krankheitserregern. Da viele bakterielle Infektionserkrankungen aber über den Atemtrakt aufgenommen werden, müssen die Erreger zumindest kurzfristig in der näheren Umgebung von Erkrankten bzw. von Keimträgern auch in der Raumlufth vorhanden sein und überleben können. Die meisten Krankheitserreger sind jedoch nicht sehr resistent gegenüber Austrocknung. In Räumen sind sie jedoch zumindest vor dem UV-Licht der Sonne weitgehend geschützt, so dass sie dort eventuell etwas länger als an der Außenluft infektiös bleiben können.

In der Innenraumlufth überwiegen die gram-positiven³ Kokken⁴, die meist harmlose Kommensalen (Mitbewohner) sind und auf der Haut oder Schleimhaut von Menschen und

³ Gram-positive Bakterien haben eine Zellwand, die aus bis zu 40 Schichten Murein besteht. Gram-negative Bakterien haben nur eine einzelne Schicht Murein. Die Unterscheidung zwischen Gram-positiven und Gram-negativen Bakterien erfolgt mittels Gram-Färbung.

Tieren leben. Nur sehr wenige Vertreter dieser Gruppe wie *Staphylococcus aureus* und einige *Streptococccen*-Arten sind Auslöser von Infektionskrankheiten.

Die häufigsten gram-positiven Stäbchen⁵ gehören zu den Gattungen *Bacillus* und *Corynebacterium* und sind in der Natur, vorwiegend im Boden weit verbreitet. Gewisse *Corynebakterien* besiedeln auch die Haut und Schleimhäute von Menschen und Tieren. Die meisten gram-positiven Stäbchen sind harmlose Kommensalen des Menschen, nur wenige *Bacillus*- und *Corynebacterium*-Arten können pathogen wirken.

In der Medizin sind vor allem gram-negative Stäbchen von Bedeutung. Die *Enterobakterien* haben ihre natürlichen Habitate im Darmtrakt von Menschen und Tieren und gehören zu den wichtigsten Erregern von Durchfallserkrankungen (in der Raumlufte werden die pathogenen Arten aber kaum gefunden, Übertragung erfolgt v.a. durch Schmierinfektion). Manche können fakultativ pathogen wirken, wenn der Wirtsorganismus eine Abwehrschwäche aufweist (*Citrobacter*, *Serratia*, *Aeromonas* usw.).

Ein gram-negatives Bakterium, das häufig mit Kontaminationen in Lüftungsanlagen in Verbindung gebracht wird, ist *Legionella pneumophila*. Legionellen sind ein natürlicher Bestandteil der Mikroflora des Wassers. In wasserführenden haustechnischen Anlagen können sich Legionellen in Gegenwart anderer Organismen und organischer Substanzen vermehren (bei Temperaturen bis 50°C). Bei Inhalation von legionellenhaltigen Aerosolen kann es zu der schwerwiegenden Legionärskrankheit oder zum mildereren Pontiac-Fieber kommen (Ärztinnen und Ärzte für eine gesunde Umwelt 2003).

In der Innenraumlufte sind gram-negative Bakterien meist nur in geringen Konzentrationen nachweisbar.

3.4.3 Endotoxine

Die Ursache für Endotoxine liegt bei Gram-negativen Bakterien, deren äußere Zellmembran Endotoxine (Lipopolysaccharide – LPS) beinhalten kann. Beim Absterbevorgang werden diese toxischen Zerfallsprodukte mobilisiert und können in der Folge in die Raumlufte und den Hausstaub gelangen.

Es wurde nachgewiesen, dass die Endotoxin-Konzentration im Hausstaub von Wohnungen unter anderem bei Vorhandensein folgender Faktoren erhöht ist (Bischof et al. 2002, Heinrich et al. 2001, Wickens et al. 2003):

- Ältere Gebäude
- Längere Bewohndauer
- Stärkere Benützung der Wohnung
- Unregelmäßige Reinigung von Teppichen
- Kein Wissen über Lüftung
- Halten von Katzen und Hunden
- Anwesenheit von Mäusen
- Höhere Luftfeuchtigkeit und schlechtere Isolierung

⁴ Kokken – kugelförmige Zellen; die Form der Bakterien wird als morphologisches Kriterium zur Identifizierung herangezogen.

⁵ Stäbchen – längliche Zellform; die Form der Bakterien wird als morphologisches Kriterium zur Identifizierung herangezogen.

Insgesamt wurde geschlossen, dass hohe Endotoxin-Konzentration im Hausstaub von Wohnungen ein Indikator für unhygienische Verhältnisse sind.

Erhöhte Endotoxinkonzentrationen in der Luft können auch durch Luftbefeuchter-Reservoirs oder andere stehende Wasseransammlungen (Ärztinnen und Ärzte für eine gesunde Umwelt 2003) bzw. schlecht gewartete Filter in Raumluftechnischen Anlagen (Möritz et al. 2001) verursacht werden.

Wenn Endotoxine (in Form von Bakterien, Zellwandfragmenten oder freien Makromolekülen) eingeatmet werden, wirken diese Lipopolysaccharide toxisch, was zu Fieber, Übelkeit, Atemwegserkrankungen, Schock und in einzelnen Fällen zum Tod führen kann. (Ärztinnen und Ärzte für eine gesunde Umwelt 2003).

In den letzten Jahren wurde auch viel über ev. positive Effekte von Endotoxinen diskutiert (Schutz vor Allergien). Siehe dazu Kapitel 5.3 über die Hygiene-Hypothese.

3.5 Anthropogene Luftverunreinigung

3.5.1 Eigenschaften und Vorkommen

Der Mensch selbst stellt mit seinen verschiedenen Exhalationsprodukten und Ausdünstungen eine maßgebliche Quelle verschiedener Luftverunreinigungen im Innenraum dar. Dabei handelt es sich in der Hauptsache um flüchtige bis stark flüchtige organische Verbindungen wie Aceton, Buttersäure, Ethanol und Methanol. Als wichtige Komponenten der Körperausdünstungen, die sich in der Innenraumluft in relevanten Konzentrationen finden, wurden z.B. die folgenden Stoffe festgestellt: Acetaldehyd, Allylalkohol, Essigsäure, Amylalkohol, Diethylketon, Phenol. Insgesamt werden durchschnittlich 14,8 mg/h an flüchtigen organischen Substanzen je Person freigesetzt (Wang 1975).

Kohlenstoffdioxid (CO_2) gilt deshalb als Leitparameter für von Menschen verursachte Luftverunreinigungen, da der Anstieg der durch die menschliche Atmung verursachten CO_2 -Konzentration in Innenräumen gut mit dem Anstieg der Geruchsintensität menschlicher Ausdünstungen korreliert. Die Konzentration von Kohlenstoffdioxid (CO_2) in Innenräumen dient vor allem als allgemeiner Indikator für die Gesamtmenge der vom Menschen abgegebenen organischen Emissionen und Geruchsstoffe. Als Produkt der menschlichen Atmung ist der CO_2 -Gehalt der Innenraumluft daher unmittelbar Ausdruck der Intensität der Nutzung eines Raumes.

Die von Menschen abgegebene CO_2 -Menge korreliert nicht nur mit der Geruchsintensität von menschlichen Ausdünstungen, sondern auch direkt mit der Menge an flüchtigen organischen Verbindungen, die wiederum – zumindest zum Teil – als Träger des vom Körper ausgehenden Geruchs angesehen werden können.

Wang (1975) untersuchte diese Zusammenhänge in einem Klassenzimmer und stellte fest, dass die vier der Menge nach dominierenden Verbindungen in den Körperausdünstungen etwa zwei Drittel der gesamten Menge an flüchtigen organischen Substanzen ausmachen.

Es wurde vorgeschlagen, die Korrelation zwischen der Menge an CO_2 und der Menge an flüchtigen organischen Substanzen, die von einem Menschen abgegeben werden, zur Bewertung der Raumlufthverhältnisse heranzuziehen. Batterman und Peng (1995) haben als Kenngröße für die Innenraumluftverhältnisse einen dimensionslosen Anreicherungsfaktor „VOC-Enrichment Factor“ definiert. Die Ermittlung dieser Kenngröße erfordert die zeitgleiche Messung der CO_2 -Konzentration und der Konzentration an flüchtigen organischen Substanzen (als Summe) in der Innenraum- und in der Umgebungsluft. Die Werte sollen vor allem Hinweise

darauf geben, ob die Raumluft im Gebäude eher von biogenen oder abiotischen Quellen geprägt wird. In der Praxis hat dieser Faktor jedoch bis dato keine Bedeutung erlangt.

Die Klassifizierung nach der CO₂-Konzentration hat sich bei Räumen etabliert, in denen Rauchen nicht erlaubt ist und Verunreinigungen hauptsächlich durch den menschlichen Stoffwechsel verursacht werden (ÖNORM prEN 13779 2000).

Die wesentliche Bedeutung des relativ leicht zu ermittelnden Indikators CO₂ liegt darin, dass durch ihn Konzentrationen definiert werden, die einen Hinweis auf hygienisch unzureichende Raumluftqualität geben. Er eignet sich neben dieser Funktion als Orientierungsmarke auch für andere Regelungsbereiche, so z.B. für die Dimensionierung von raumlufttechnischen Anlagen oder für Lüftungsanweisungen in natürlich belüfteten, dichter belegten Räumen wie Schlafräumen.

3.5.2 Der Mensch als Quelle von CO₂ in Innenräumen

In der Innenraumlufte liegt die CO₂-Konzentration im Allgemeinen unter 1000 ppm (1830 mg/m³) und ist neben der Konzentration in der Außenluft stark von der Belegung des Raumes, der Raumgröße, der Belüftungssituation und anderen Parametern abhängig. Höhere Konzentrationen treten vor allem dann auf, wenn sich stärkere Quellen von CO₂ wie Menschen, Haustiere, bzw. technische Anlagen im Raum oder dessen unmittelbarer Umgebung befinden oder wenn im Raum Verbrennungs- oder Gärungsvorgänge stattfinden. Bei unzureichenden Lüftungsverhältnissen oder unter Raumnutzungsbedingungen mit hoher Personenbelegung kann die CO₂-Konzentration in Innenräumen allein durch die von den Nutzern ausgeatmeten Mengen bis zu einer Größenordnung von 1 Vol% (10000 ppm) ansteigen.

Der Mensch ist die bedeutendste Quelle an CO₂ in Innenräumen. Die Literaturangaben der CO₂-Abgabe für erwachsene Personen schwanken in einem relativ weiten Bereich. Das Verhältnis der CO₂-Konzentration in inhalierter zu exhalierter Luft liegt bei ca. 1:140. Je nach Art der Tätigkeit und der körperlichen Anstrengung atmet ein erwachsener Mensch zwischen ca. 10 und 200 Liter/h CO₂ aus (Pluschke 1996).

Literatur	Einheit	Wert	Anmerkung
Rietschel (1994)	[L/h] ^a	20,4	Leichte, vorwiegend sitzende Tätigkeit, entspanntes Stehen
	[L/h]	27,2	Stehende Tätigkeit
Witthauer, Horn, Bischof (1993)	[L/h]	12	Ruhiger Zustand
	[L/h]	18	Sitzende Tätigkeit
	[L/h]	180	Schwerarbeit
Recknagel, Sprenger, Schramek (1999)	[L/h]	20	Leichte, vorwiegend sitzende Tätigkeit
VDI 4300 Bl. 9 (2003) (analog zu 4300 Bl. 7 (2001))	[L/h]	15 ... 20	Sitzende Tätigkeit
	[L/h]	20 ... 40	Leichte Arbeit
	[L/h]	40 ... 70	Mittelschwere Arbeit
	[L/h]	70 ... 110	Schwere Arbeit
ASHRAE (1989)	[L/h]	18	Büroarbeit

^a Angaben in Liter CO₂ pro Stunde ohne Bezug

Tabelle 7: Literaturangaben für die CO₂-Abgabe von Menschen

3.5.3 Gesundheitliche Auswirkungen

Obwohl CO₂ in den in Innenräumen üblicherweise auftretenden Konzentrationen in der Regel kein unmittelbares Gesundheitsrisiko darstellt, können ab bestimmten Konzentrationen Befindlichkeitsstörungen wie z.B. Beeinträchtigung von Leistungsfähigkeit, Konzentration und Kopfschmerzen auftreten (Müller-Limroth 1977).

Im Körper führt die Exposition gegenüber erhöhten CO₂-Konzentrationen zu einem Anstieg des CO₂-Partialdrucks im Blut. Daraus entwickelt sich über die Hydratation des CO₂ ein Anstieg der H⁺- und HCO₃⁻-Konzentration, der zu einer respiratorischen Azidose führt, wenn die Pufferkapazität im Blut überschritten ist. Dies löst eine schnellere Atmung und eine erhöhte Abgabe des CO₂ aus (pulmonale Kompensation), während parallel das Säure-Basen-Gleichgewicht über die Niere wieder ausgeglichen wird (renale Kompensation) (Pluschke 1996).

Eine Zusammenschau von Studien zu gesundheitlichen Wirkungen und Kohlendioxid zeigte, dass sich in 50 Prozent der Untersuchungen mit abnehmender CO₂-Konzentration die sogenannten Sick-Building-Syndromassoziierten Beschwerden (z.B. Reizungen und Trockenheit von Schleimhäuten, Müdigkeit, Kopfschmerzen) verringern (Seppänen et al. 1999). In etwa der Hälfte der betrachteten Studien wurden statistisch signifikante, positive Korrelationen mit dem Auftreten einer oder mehr Beschwerden des Sick-Building-Syndroms festgestellt. In keiner einzigen Arbeit nahmen die Symptome mit abnehmender CO₂-Konzentration zu.

Eine amerikanische Studie in Gebäuden mit raumlufttechnischen Anlagen konnte statistisch signifikante, positive Korrelationen zwischen Beschwerden wie z.B. trockene Kehle, Schleimhautreizungen und Anstiegen der CO₂-Konzentrationen nachweisen, dies auch schon im Konzentrationsbereich von unter 1000 ppm absolut (Apte et al. 2000). Eine Folgestudie mit einer stark erweiterten Datengrundlage ergab Ergebnisse, die in die gleiche Richtung wiesen. Die Odds-Ratios lagen bei Werten zwischen 1,17 und 1,20 pro 100 ppm CO₂-Anstieg (Erdmann et al. 2002).

Wargocki et al. (2000) setzten Probanden in Prüfräumen unterschiedlichen personenbezogenen Zuluftvolumenströmen aus und befragten sie hinsichtlich Befindlichkeitsstörungen. Es ergab sich ein signifikanter Zusammenhang zwischen den personenbezogenen Außenluftvolumenströmen und Berichten über diverse Befindlichkeitsstörungen. Höhere Ventilationsraten reduzierten signifikant den Anteil der Personen, die mit der Luftqualität und der Geruchsintensität unzufrieden waren. Weiters reduzierten sie den Anteil der Personen, die ein Gefühl von Trockenheit in Hals und Rachen und das Gefühl, nicht klar denken zu können, angaben. Höhere Ventilationsraten korrelierten mit einem höheren Prozentsatz von Personen, die angaben, sich generell besser zu fühlen.

In einer kanadischen Studie in 52 energieoptimierten Gebäuden mit kontrollierter Wohnraumbelüftung und 53 vergleichbaren, natürlich belüfteten Gebäuden wurde die Häufigkeit von innenraumtypischen Beschwerden wie Reizungen der Kehle, Müdigkeit und Husten unmittelbar nach Bezug des Gebäudes und ein Jahr danach abgefragt (Leech et al. 2004). Es ergaben sich zwischen den beiden Gruppen von Häusern signifikante Unterschiede in den Verringerungen des Auftretens bestimmter innenraumtypischer Beschwerden im Beobachtungszeitraum, wobei sich die Beschwerderate in den mechanisch belüfteten Gebäuden stärker reduzierte. Nicht-Innenraum-bezogene Beschwerden wie z. B. Durchfall oder Übelkeit zeigten diese Tendenz nicht. Die Unterschiede wurden von den Autoren auf die verbesserte Belüftung zurückgeführt.

Über die physiologischen Wirkungen erhöhter CO₂-Konzentrationen liegen umfangreiche Erkenntnisse aus der Arbeitsmedizin, aber auch aus luft- und raumfahrtmedizinischen Untersuchungen vor. In den bisher angesprochenen Konzentrationsbereichen deutlich

unterhalb von 1 Vol% (10000 ppm = 18300 mg/m³) sind keine unmittelbaren physiologischen Wirkungen des CO₂ zu erwarten. Bei hohen Konzentrationen treten Erstickungserscheinungen auf und ab ca. 10 Vol% (100000 ppm = 183000 mg/m³) sind Schwindel und Bewusstseinsstörungen dokumentiert, bei noch höheren Konzentrationen tritt vollständige Bewusstlosigkeit ein (Pluschke 1996).

3.5.4 Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit

Wargocki et al. (2000) setzten Probanden in Prüfräumen unterschiedlichen personenbezogenen Zuluftvolumenströmen aus und prüften die Leistungsfähigkeit mittels standardisierter Tests. Es wurden die Aufgaben „Rechnen“, „Texte korrigieren“ und „Texte tippen“ untersucht. Es ergab sich bei allen Aufgaben ein Zusammenhang zwischen den personenbezogenen Außenluftvolumenströmen (damit auch indirekt zu den resultierenden Konzentrationen an CO₂) und der Leistungsfähigkeit, der in Bezug auf die Aufgabe „Texte tippen“ signifikant war. Die gemessenen Einbußen der Leistungsfähigkeit lagen bei einer Reduktion der Außenluftmenge von 36 auf 18 m³/Person*Stunde bei etwa 2 - 4 %.

3.5.5 Auswirkungen auf die Zufriedenheit mit der Innenraumluft

Bei 0,1 Vol% = 1000 ppm empfinden rund 20 % der Personen die Raumluft als unbefriedigend (BUWAL 1997). Dieser Wert entspricht der Pettenkofer-Zahl, die Von Pettenkofer (1858) als Richtwert für die maximale CO₂-Konzentration in Wohn- und Aufenthaltsräumen definiert wurde. Huber und Wanner (1982) nahmen an, dass die Belästigungsschwelle durch menschliche Ausdünstungen (nicht aber durch Rauchen oder andere Aktivitäten) in etwa mit einer CO₂-Konzentration von 0,15 Vol% zusammenfällt. Eine fixe Grenze, ab wann die Raumluft als unzureichend bezeichnet wird, ist jedoch nicht anzugeben.

Für den Zusammenhang zwischen dem Anteil an Unzufriedenen und der CO₂-Konzentration (als Konzentration über der Außenluftkonzentration) wurde folgende Formel angegeben (ECA 1992):

$$PD = 395 \cdot \exp(-15,15 \cdot C^{-0,25}) \quad (1)$$

PD = Anteil der mit der Raumluftqualität Unzufriedenen
C = Konzentration an CO₂ über der Außenluftkonzentration

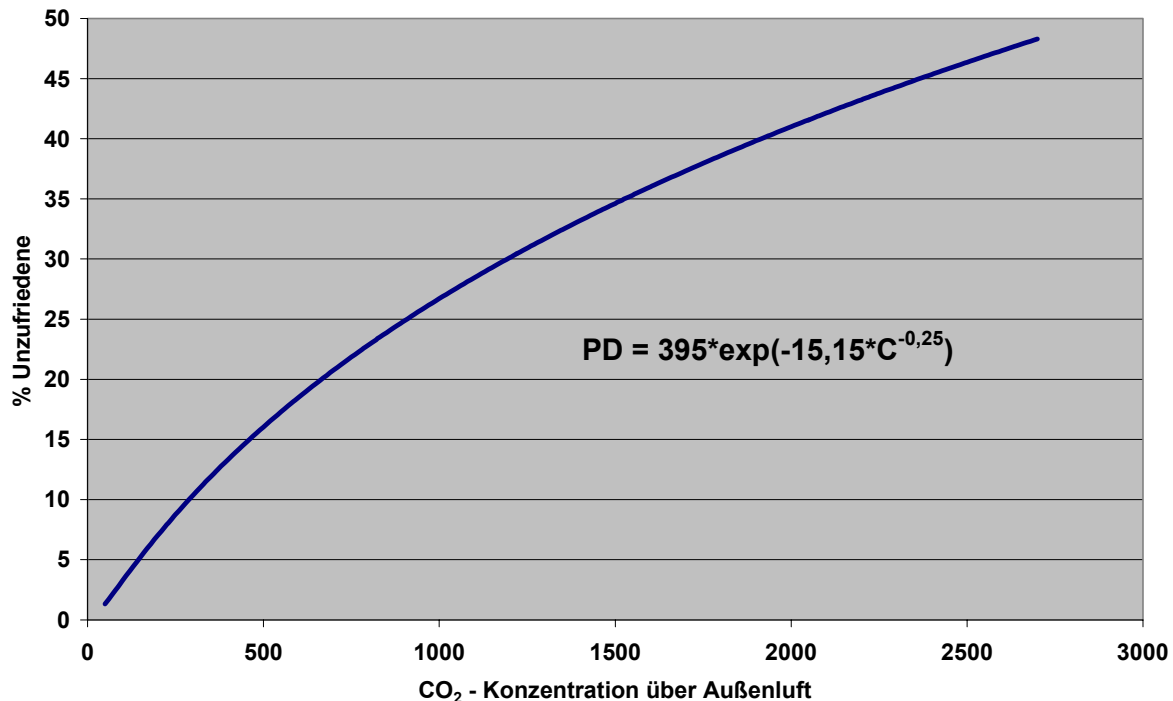


Abbildung 5: Die CO₂-Konzentration als Indikator für anthropogene Emissionen (nach ECA 1992)

Rohregger (2004) untersuchte die Zusammenhänge zwischen Situationen mit unterschiedlichen Belüftungsszenarien des Versuchsraumes, der Konzentration an CO₂ und der Zufriedenheit mit der Raumlufth bei Erwachsenen bzw. der Schlafqualität – dies allerdings mit einer sehr geringen Probandenzahl. Von allen bis auf eine Versuchsperson wurde die Luftqualität im mechanisch belüfteten Schlafraum besser empfunden als diejenige ohne Lüftung. Einzelbeispiele aus den Untersuchungen, in denen ein nachweisbarer Unterschied in der Konzentration an CO₂ bestand, zeigten Unterschiede in der nächtlichen Erholung. Weiters wurden bei den psychologischen Befragungen die Schlafqualität und die Schlaferholung bei guter Schlafraumbelüftung besser beurteilt.

3.5.6 Richt- und Orientierungswerte

In einer vom Arbeitskreis Innenraumlufth entwickelten und vom Umweltministerium und der österreichischen Akademie der Wissenschaften herausgegebenen Richtlinie zur Bewertung der Innenraumlufth werden Richtwerte für die Innenraumlufth festgelegt (BMLFUW 2004). Aufgrund der Tatsache, dass keine definierten Grenzen für das Wohlbefinden und die Leistungsfähigkeit beeinträchtigende Konzentrationen an CO₂ vorliegen, sondern steigende Konzentrationen ab etwa 700 ppm zu einer kontinuierlichen Verschlechterungen der Raumlufthqualität führen, werden in der österreichischen Richtlinie zur Bewertung der Innenraumlufth keine Richt-, sondern lediglich Orientierungswerte vorgeschlagen (AK-Innenraumlufth 2004).

Beschreibung der Innenraum-Luftqualität	Beurteilungswert ^a als CO ₂ -Konzentration über Außenluftwert (in Klammer Absolutwerte ^b)	Mindest- und Zielvorgaben für dauernd von Menschen genutzte, natürlich belüftete Innenräume	Mindest- und Zielvorgaben für dauernd von Menschen genutzte, mechanisch belüftete Innenräume
Hoch	≤ 400 ppm (etwa < 800 ppm absolut)	Zielbereich für die Innenraumluft	Zielbereich für die Innenraumluft
Mittel	$> 400 - 600$ ppm (etwa $800 - 1000$ ppm absolut)		Gleitender Stundenmittelwert: < 600 ppm
Mäßig	$> 600 - 1000$ ppm (etwa $1000 - 1400$ ppm absolut)	Gleitender Stundenmittelwert: < 1000 ppm	Beurteilungswerte im Beurteilungszeitraum: < 1000 ppm
Niedrig	$> 1000 - 1500$ ppm (etwa $1400 - 1900$ ppm absolut)	Beurteilungswerte im Beurteilungszeitraum: < 1500 ppm	Kein Wert im Beurteilungszeitraum in diesen Bereichen
Sehr niedrig	> 1500 ppm (> 1900 ppm absolut)	Kein Wert im Beurteilungszeitraum in diesem Bereich	

^a Der Beurteilungswert stellt die Differenz zwischen CO₂-Konzentration im Innenraum und jeweilig aktueller CO₂-Konzentration in der Außenluft dar

^b abhängig von Außenluftkonzentrationen

Tabelle 8: Vorschlag zur Klassifizierung der Innenraumluftqualität und Anforderungen an natürlich und mechanisch belüftete Gebäude in Hinblick auf CO₂ (AK-Innenraumluft 2004)

4 AUSWIRKUNGEN ENERGIESPARENDER MASSNAHMEN AUF RAUMLUFTQUALITÄT, RAUMKLIMA, WOHLBEFINDEN UND GESUNDHEIT

4.1 Allgemeines

Neben Luftinhaltsstoffen existieren weitere, zum Teil sehr wichtige Einflussfaktoren, die mit dem Menschen in Innenräumen in Interaktion stehen bzw. bei denen ein Einfluss auf den Menschen diskutiert wird. Die wichtigsten sind:

- Luftfeuchtigkeit
- Luftionen
- Luftwechsel, Belüftung
- Raumtemperatur
- Luftbewegungen (Geschwindigkeit, Turbulenz)
- Elektromagnetische Felder
- Licht, Beleuchtung
- Akustik, Schall

Die vorliegende Arbeit konzentriert sich aus dieser Liste auf folgende Bereiche:

- Einfluss des Luftwechsels auf die Konzentration verschiedener Schadstoffe
- Luftfeuchte und Ihre Wirkungen
- Auswirkungen der Luftionenkonzentration

Die Faktoren Luftwechsel und Belüftung werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit in Hinblick auf ihre sekundären Auswirkungen wie z.B. die Senkung anthropogener Schadstoffe durch erhöhten Luftwechsel betrachtet.

Die Faktoren Raumtemperatur, Luftbewegungen, elektromagnetische Felder, Licht, Beleuchtung, Akustik und Schall werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht beleuchtet, obwohl sie in einem wesentlichen Zusammenhang mit der Wohnzufriedenheit stehen. Da jedoch Raumtemperatur und Luftfeuchte in einem engen Verhältnis zueinander stehen, können diese Faktoren nur schwer isoliert voneinander betrachtet werden.

Andere mögliche Einflüsse wie z.B. von Phänomenen wie Wasseradern bzw. „Erdstrahlen“ oder anderen Standortfaktoren (z.B. Einschätzung eines Standortes nach „Feng Shui“) werden kontroversiell diskutiert und entziehen sich derzeit weitgehend einer technisch naturwissenschaftlichen Zugangsweise. Eine Beurteilung eines konkreten Raumes erfolgt üblicherweise aufgrund subjektiver Einschätzungen. Es existieren vor allem keine nachvollziehbaren Messverfahren zur Ermittlung der potentiellen Einflüsse, es sind weiters keine gesicherten Beweise für die Existenz dieser Faktoren vorhanden. Obschon es erste vielversprechende Ansätze zur wissenschaftlichen Behandlung derartiger Noxen gibt, werden diese im Rahmen der vorliegenden Arbeit ebenfalls nicht beleuchtet.

Die Empfindung von Behaglichkeit ist von Mensch zu Mensch unterschiedlich und neben der Wohnatmosphäre auch von weiteren Faktoren wie Bekleidung, Luftgeschwindigkeit oder Aktivität abhängig. Schon deshalb ist es schwierig jenseits von messbaren Kategorien wie der Schadstoffkonzentration ein gutes Wohnklima zu definieren. Ein Zufriedenheitsgrad von etwa 85 % der BewohnerInnen, wie er in der ISO 7730 (ISO EN 7730, 1994) angegeben ist, scheint als Maß dafür akzeptabel.

4.2 Untersuchungen der Auswirkungen des Einsatzes Lüftungstechnischer Anlagen in Passiv- und Niedrigenergiehäusern

Aus der neueren Literatur ergeben sich deutliche Hinweise, dass eine bessere Belüftung von Räumen (in Einfamilienhäuser mit dem Einbau von Lüftungstechnischen Anlagen verbunden) zu signifikanten Verbesserungen der subjektiven Einschätzung der Luftqualität, zur Reduktion von Beschwerden und zur Steigerung der Leistungsfähigkeit führen (Bako-Biro et al. 2004, Wargocki et al. 2000).

Eine in Kanada durchgeführte Studie, bei der 52 neu erbaute Einfamilienhäuser mit kontrollierter Wohnraumbelüftungsanlage mit 53 Häusern mit konventioneller Lüftung als Kontrollgruppe verglichen wurde, ergab signifikante Unterschiede in der Verbesserung von Beschwerden (Selbsteinschätzung der Nutzer) nach einem Jahr Nutzung (Leech et al. 2004). Signifikante Verbesserungen zeigten sich bei Beschwerden, die mit dem Beschwerdebild des Sick Building Syndroms assoziiert sind (Reizerscheinungen der Kehle, Husten, Müdigkeit etc.), jedoch nicht bei allgemeinen Beschwerden ohne Bezug zu Lüftung (wie z.B. Durchfall). Es ist davon auszugehen, dass dieser Effekt zumindest zum Teil auf die stärkere Reduktion von während der Bau- und Einrichtungsphase vorhandenen Schadstoffe in der Innenraumluft infolge besserer Belüftung zurückzuführen war.

Über diese kanadische Studie hinaus gibt es noch keine statistisch belastbaren Untersuchungen der Auswirkungen des Einsatzes Lüftungstechnischer Anlagen in Passiv- und Niedrigenergiehäusern. In Nürnberg wurde in vier neuerrichteten Passivhäusern das Raumklima zwei Jahre lang messtechnisch erfasst:

Die Ergebnisse bekräftigen die Einschätzung, dass Lüftungsanlagen in Hinblick auf die Konzentration an Schadstoffen positiv zu beurteilen sind. Auch die Radonkonzentration ist durch den effektiveren Luftaustausch in den Passivhäusern eher niedriger als in den Vergleichsobjekten.

Hinsichtlich der Schadstoffkonzentration (gemessen wurde ein Summenparameter für VOC) zeigt sich, dass die extrem hohen Werte während der Bauphase innerhalb weniger Monate nach dem Bezug der Wohnungen deutlich reduziert werden konnten. Die Schadstoffkonzentrationen liegen deutlich unter denen von Häusern ohne Lüftungsanlagen, wo dieselben Baustoffe eingesetzt wurden.

Hinsichtlich mikrobieller Belastungen zeigten sich in den vier Nürnberger Passivhäusern geringere Keimzahlen als in den Vergleichswohnungen (Schulze-Darup 2002).

4.3 Luftschadstoffe und energiesparende Maßnahmen

4.3.1 Anreicherung von im Innenbereich produzierten Luftverunreinigungen im Altbestand ohne Lüftungstechnische Anlage

Durch Baustoffe, Materialien der Inneneinrichtung und menschliche Aktivitäten kann es zu erhöhten Konzentrationen an Schadstoffen im Innenraum mit entsprechenden gesundheitlichen Auswirkungen kommen. Die zugeführte Luftmenge pro Zeiteinheit hat einen wesentlichen Einfluss auf die sich in einem Raum einstellende Konzentration an Luftinhaltsstoffen, in weiterer Folge auch auf die Geschwindigkeit der Abnahme von Emissionen aus Baumaterialien.

Durch energiesparende Maßnahmen im Altbestand, die in der Regel mit einer deutlichen Verringerung des Luftwechsels einher gehen, erhöht sich die Konzentration der entsprechend vorhandenen Luftverunreinigungen mit etwa dem gleichen Faktor, mit dem die Luftwechselzahl verringert wird. In Räumen mit starken Schadstoffquellen (Bauprodukte, hohe Personenbelegung, menschliche Aktivitäten) und geringem Luftwechsel kann es schon nach relativ kurzer Zeit zu einer Überschreitung von Schadstoff-Grenzkonzentrationen kommen, es müsste in für den Nutzer nicht akzeptablen kurzen Abständen gelüftet werden.

Deutlich sichtbar ist dies bei anthropogenen Luftverunreinigungen, für die als Indikator in der Regel CO₂ herangezogen wird.

Bei bestimmten abiotischen Luftverunreinigungen spielen Ad- und Desorptionseffekte an porösen Oberflächen eine nicht zu unterschätzende Rolle. Dies zeigte eine exemplarische Untersuchung der Formaldehydkonzentration in einem Fertigteilhaus, das im Rahmen einer Studie des Österreichischen Institutes für Baubiologie untersucht wurde (Tappler et al. 1997). Auch ein Lüften über den Zeitraum von 15 Minuten bewirkte lediglich eine kurzzeitige und relativ geringfügige Verringerung der Schadstoffkonzentration. Die schnelle Wiederaanreicherung erklärt sich in diesem Fall durch die starke Adsorption von Formaldehyd an sämtliche Materialien des Raumes und in Folge Reemission (Desorption) in die Raumluft.

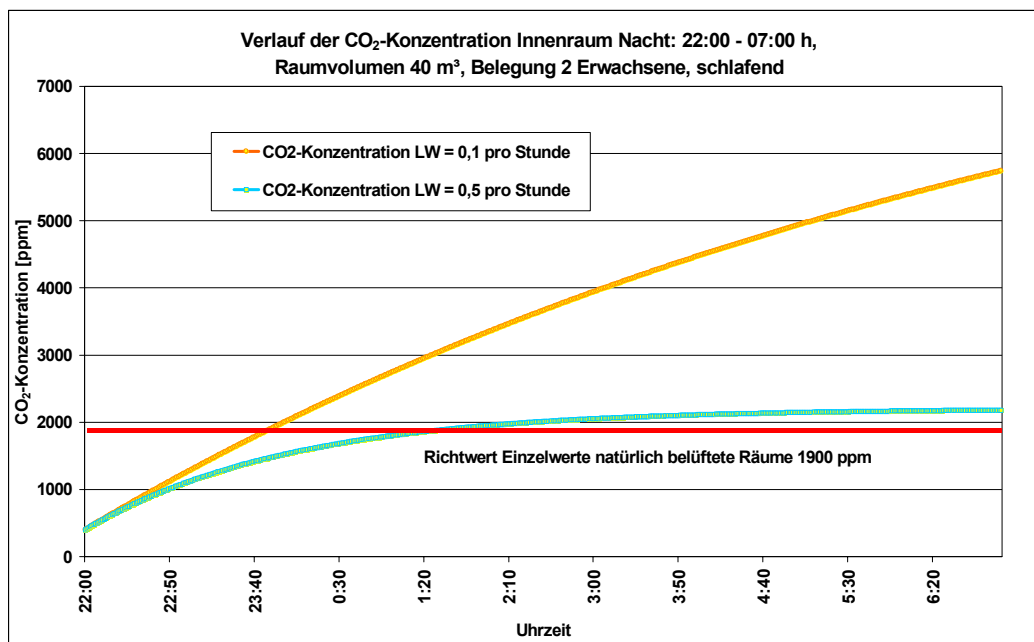


Abbildung 6: Veränderung der Konzentration an CO₂ in den Nachtstunden durch die Reduktion des Luftwechsels von 0,5 auf 0,1 h⁻¹ durch Einbau dichter Fenster, geschlossene Innentüre, Berechnung mittels CO₂-Berechnungstool (Amt der OÖ Landesregierung 2003)

4.3.2 Verringerung von aus dem Außenbereich eingebrachten Luftverunreinigungen

Obige Zusammenhänge gelten selbstverständlich nicht für von außen eingetragene Noxen wie Schimmelpilzsporen, bestimmte Allergene aus dem Außenbereich wie Pollen oder anorganische Luftverunreinigungen. Wenn Partikel wie Pollen, Sporen oder Staub Hindernisse wie z.B. Fensterfugen passieren oder sich in einem Innenraum befinden, in dem keine spezifischen Quellen bestehen, kommt es zu einer Absenkung der Konzentration infolge von Depositionerscheinungen. Die Verringerung des Luftwechsels durch energiesparende Maßnahmen bringt einen geringeren Eintrag dieser Noxen von außen mit sich. Die im Innenraum stattfindende Deposition in Verbindung mit der geringeren Nachlieferung von außen bewirkt eine signifikante Konzentrationssenkung sowie niedrigere „indoor/outdoor rates“ gegenüber dem ursprünglichen Zustand. In einer europaweit durchgeführten Studie, bei der in repräsentativen Gebäuden Partikel innen und außen untersucht wurden, konnte diese Hypothese bestätigt werden (EXPOLIS 2005).

Anorganische Luftverunreinigungen haben bedeutende Quellen im Außenbereich, die sich in abgeschwächter Form auf die Konzentration in Innenräumen auswirken. Wenn keine Quellen im Innenraum existieren, ist davon auszugehen, dass die Konzentration innen mit dem Luftwechsel korreliert, da in der Innenraumluft ein nicht zu vernachlässigender Abbau mancher reaktiver Substanzen wie NO₂ oder O₃ stattzufinden scheint. Bei sehr schlecht gelüfteten Gebäuden führt der in Innenräumen stattfindende Abbau in Verbindung mit der geringeren Nachlieferung von außen dazu, dass die „indoor/outdoor rates“ sehr niedrig sein können und im Extremfall praktisch keine nachweisbare Menge an Substanz mehr vorhanden ist, was in einer deutschen Studie auch praktisch nachgewiesen wurde (Witthauer et al. 1999). Diese Zusammenhänge können vor allem bei Gebäuden relevant sein, die nahe an Quellen anorganischer Luftverunreinigungen situiert sind (z.B. Häuser an dicht befahrenen Straßen oder in Gebieten mit hoher Ozonbelastung im Sommer).

4.3.3 Einfluss des Luftwechsels auf Luftverunreinigungen bei Lüftungstechnischer Anlagen

Bei Vorhandensein von Lüftungstechnischen Anlagen (dies sind einfachere Abluftanlagen oder kontrollierte Wohnraumbelüftungsanlagen) ist der Luftwechsel in der Zeit des Betriebes der Anlage (dies ist vor allem die kalte Jahreszeit und die Zeit mit hohen Außentemperaturen, in der die Außenluft bei manchen Anlagen gekühlt wird) gegenüber natürlich belüfteten Gebäuden im Durchschnitt stark erhöht. Der Unterschied im Luftwechsel zwischen Gebäuden mit Lüftungstechnischen Anlagen und natürlich belüfteten Gebäuden ist durch die Wahl des Typs der Lüftungstechnischen Anlage sowie von den in der jeweiligen Anlage eingestellten Parametern bestimmt.

Es wird aufgrund neuerer Studien als gesichert angenommen, dass eine bessere Belüftung von Räumen zu Verringerungen von Beschwerden über Befindlichkeitsstörungen, die mit dem Symptomenkomplex des Sick-Building Syndroms in Zusammenhang stehen und zu einer Verbesserung der Leistungsfähigkeit führt (ECA 1992, Wargocki et al. 2000).

Bei kontrollierten Wohnraumbelüftungsanlagen mit entsprechenden Filtern findet zusätzlich zu den Effekten besserer Belüftung eine starke Verringerung eingetragener Luftinhaltsstoffe aus dem Außenbereich statt.

4.3.4 Verringerung von im Innenbereich produzierten Luftverunreinigungen

Der im Durchschnitt stärkere Luftwechsel bei Lüftungstechnischen Anlagen gegenüber natürlich belüfteten Gebäuden senkt generell die Konzentration diverser, im Innenraum produzierter Luftverunreinigungen. Dies betrifft klassische abiotische Innenraumschadstoffe wie Formaldehyd oder VOC, jedoch auch Allergene (Tierhaare, Hausstaubmilbenallergene etc.) und andere Bioaerosole wie Endotoxine.

E konnte nachgewiesen werden, dass die Häufigkeit des Lüftens und die Abdichtung von Wohnungen/Häusern nicht nur die Schadstoff-, sondern auch die Allergenkonzentration in der Wohnung in Hinblick auf Hausstaubmilben- und Katzenallergen beeinflussen (Wichmann und Wahn 2004).

Lediglich bei in Materialien eingelagerten, staubgebundenen Stoffen ist eine lineare Korrelation der Konzentration mit der Luftwechselrate nicht zu erwarten

Es konnte nachgewiesen werden, dass die Menge an Hausstaubmilben und Milbenallergenen in Häusern mit Lüftungstechnischen Anlagen gegenüber konventionell belüfteten Häusern geringer war (Fletcher et al. 1996; Harving et al. 1994a; Harving et al. 1994b; Warner et al. 2000). Im Falle der Hausstaubmilben werden die bei Lüftungstechnischen Anlagen beobachteten Effekte vor allem der Verringerung der relativen Luftfeuchtigkeit zugeschrieben, die sich auf die Lebensbedingungen der Hausstaubmilbe auswirken. Es konnte auch gezeigt werden, dass Asthmatiker in Häusern mit Lüftungsanlagen eine geringere Medikation benötigten (Wickman et al. 1994). Bei Häusern mit Lüftungsanlagen, in denen keine Absenkung der relativen Luftfeuchtigkeit stattfand, konnte dagegen keine Verringerung der Menge an Hausstaubmilben gefunden werden (Stephen et al. 1997).

4.3.5 Verringerung von aus dem Außenbereich stammenden Luftverunreinigungen

Eine geeignete Filterung der Außenluft bei aufwändigen, kontrollierten Wohnraumbelüftungsanlagen bewirkt eine Reduktion vor allem saisonaler Allergene, sowie biogener Luftverunreinigungen und Stäube aus der Außenluft. Die in das Gebäude eingeblasene Luft

weist bei entsprechender Filterwahl und Wartung eine stark verringerte Keimkonzentration auf. Die Abscheidecharakteristik der entsprechenden Filterklassen legt fest, welcher Prozentsatz partikelgebundener Luftverunreinigungen in den Innenraum gelangen kann (unter Voraussetzung korrekt eingebauter und gewarteter Filter).

Filtertyp	Schimmelpilzsporen	Pollen
Grobfilter G3	Etwa 30 %	Etwa 40 %
Grobfilter G4	Etwa 50 %	Etwa 60 %
Feinfilter F5	Etwa 60 %	Etwa 100 %
Feinfilter F6	Etwa 65 %	Etwa 100 %

Tabelle 9: Abscheidegrade von Luftfiltern in Bezug auf Sporen und Pollen nach ÖNORM EN 779 (2003)

4.3.6 Verringerung anthropogener Luftverunreinigungen

Der im Durchschnitt stärkere Luftwechsel bei Lüftungstechnischen Anlagen in der Zeit des Betriebes der Anlage gegenüber natürlich belüfteten Gebäuden wirkt sich stark auf anthropogene Luftverunreinigungen aus. Als Indikator für die Gesamtsumme anthropogener Luftverunreinigungen wird in der Regel der Parameter CO₂ herangezogen (BMLFUW 2004).

Hier gilt – zumindest im Falle des stationären Gleichgewichts – der indirekt proportionale Zusammenhang zwischen Luftwechsel und CO₂-Konzentration.

4.3.7 Erhöhung des Eintrags von aus dem Außenbereich stammenden Luftverunreinigungen bei einfacheren Lüftungstechnischen Anlagen

Bei einfacheren Lüftungstechnischen Anlagen wie Abluftanlagen mit in der Regel einzelnen, raumbezogenen, passiven Außenlufteinlässen wird die Außenluft lediglich mit einem Insektengitter gefiltert, aufwändigere Filter können hier aufgrund des sonst zu erwartenden Druckabfalles nicht eingebaut werden. Wenn sich Partikel wie Pollen oder Sporen in einem Innenraum befinden, in dem keine spezifischen Quellen bestehen, kommt es mit der Zeit zu einer Absenkung der Konzentration infolge von Depositionerscheinungen. Die mit dem Einbau von einfachen Lüftungsanlagen verbundene Erhöhung des Luftwechsels führt, verglichen mit natürlich belüfteten Gebäuden, zu einem verstärkten Eintrag von Allergenen (Pollen, Schimmelpilzsporen etc.) und anderen Bioaerosolen aus der Außenluft. Bedingt durch den stärkeren, permanenten Eintrag dieser Luftinhaltsstoffe ist zu erwarten, dass sich auch die sich einstellende Innenraum-Konzentration an biogenen Luftverunreinigungen der der Außenluft annähern wird. Entsprechende Studien fehlen, es ist jedoch zu erwarten, dass die Konzentrationen deutlich höher sind als bei natürlich belüfteten Gebäuden, in denen aufgrund von Depositionerscheinungen in der Regel ein stärkeres Konzentrationsgefälle gegenüber der Außenluft vorliegt.

Eine ähnliche Situation dürfte für Feinstäube gelten, die bei einfacheren Lüftungsanlagen nicht abgefiltert werden. Es ist dabei zu beachten, dass Depositionerscheinungen mit abnehmender Größe der Partikel immer mehr in den Hintergrund treten.

Wenn Partikel wie Pollen oder Sporen Hindernisse passieren (wie der Schalldämpfer in den Außenlufteinlässen), ist zusätzlich eine gewisse (vermutlich geringfügige) Senkung der Konzentration oben angesprochener Noxen durch Deposition möglich.

4.4 Nominaler, energie- und schadstoffäquivalenter Luftwechsel

4.4.1 Allgemeines, Definitionen

Die Zusammenhänge zwischen Energieeinsatz, verschiedenen Lüftungsstrategien und Schadstoffabfuhr berühren ursächlich das Thema vorliegender Arbeit. Vor allem der Vergleich zwischen energie- und schadstoffäquivalentem Luftwechsel bei unterschiedlichen Lüftungsstrategien in energieoptimierten Gebäuden ist für die Frage ausschlaggebend, welche Auswirkungen energiesparende Maßnahmen im Wohnbau auf Innenraumlufthqualität und Gesundheit haben können.

Der nominale Luftwechsel errechnet sich als Quotient aus Zuluftmassenstrom und Luftmasse im Raum:

$$n = m/(\rho \cdot V) \quad (2)$$

Um den Energieverlust bei Lüftungsvorgängen mit dem erreichten Schadstoffabtransport in Beziehung setzen zu können, wird unter Verwendung der Formel für den Lüftungswärmeverlust Q der Begriff des energieäquivalenten Luftwechsels n_{Energie} verwendet (Schnieders 2003b):

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (3)$$

$$n_{\text{Energie}} = Q/(\rho \cdot V \cdot C_p \cdot \Delta T) \quad (4)$$

Es bedeuten:

Q : Lüftungswärmeverlust

m : Zuluftmassenstrom

C_p : spezifische Wärmekapazität der Luft

ΔT : Temperaturdifferenz zwischen Raumlufth und Außenluft (bei geschlossenem Fenster)

ρ : Dichte der Luft

V : Raumvolumen

Der schadstoffäquivalente Luftwechsel $n_{\text{Schadstoffe}}$ (der lediglich auf die Aufenthaltsräume bezogen errechnet wird) ist derjenige Luftwechsel, der bei vollständiger Durchmischung denselben Schadstoffabtransport zur Folge hätte wie der Lüftungsvorgang, der tatsächlich stattgefunden hat. Dieser hängt auch von der Art und Position der Schadstoffquelle ab. Zur Vereinfachung wird ein Schadstoff mit zeitlich und räumlich homogen verteilter Quellstärke angenommen. Der Kehrwert des mittleren Luftalters in den Zuluftzonen ergibt den schadstoffäquivalenten Luftwechsel (Schnieders 2003b).

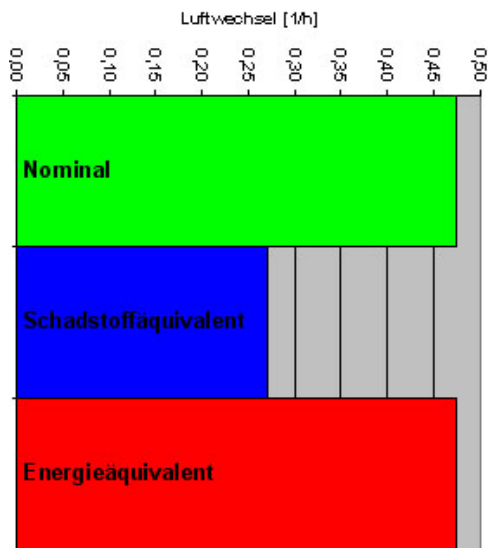
4.4.2 Natürlich belüftete Gebäude

Bei natürlich belüfteten Gebäuden und gekippten Fenstern liegt der schadstoffäquivalente deutlich unter dem energieäquivalenten Luftwechsel. Bei Stoßlüftung verbessert sich das Verhältnis etwas, beide Luftwechsel liegen in einem ähnlichen, in Hinblick auf hygienische Notwendigkeiten absolut betrachtet jedoch immer noch niedrigen Bereich.

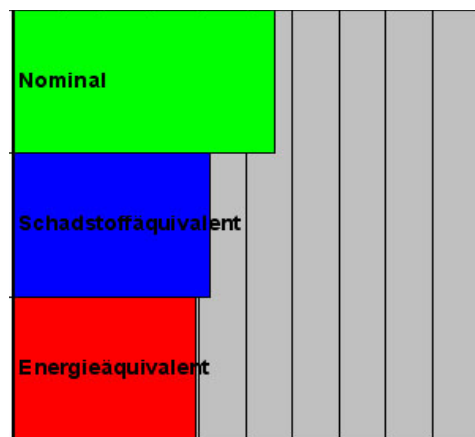
Ein in der Nacht gekipptes Schlafzimmerfenster bewirkt eine zusätzliche Abfuhr anthropogener Luftverunreinigungen im Quellbereich, insgesamt betrachtet erhöhen sich dadurch naturgemäß sowohl schadstoff- als auch energieäquivalenter Luftwechsel. Dieser Effekt wirkt sich dann stärker aus, wenn auch die Innentüren geöffnet sind – die Energieeffizienz sinkt in diesem Fall.

Dem verstärkten Lüften sind enge Grenzen gesetzt, dies gilt vor allem in den Nachtstunden und im Nahbereich von Lärmemitteln. Den Vorteilen der natürlichen Lüftung stehen Nachteile gegenüber (teilweise nach Feist 2003):

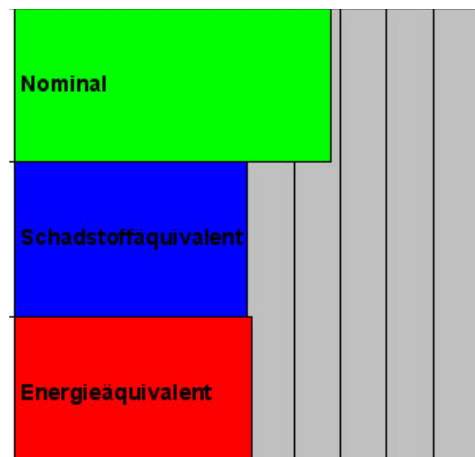
- Permanent gekippte Fenster sind als Möglichkeit der Zufuhr hygienisch ausreichender Luftmengen in der kalten Jahreszeit aus mehreren Gründen nicht geeignet. Einerseits liegt das Verhältnis von schadstoffäquivalentem zum energieäquivalenten Luftwechsel sehr ungünstig, andererseits bestehen bei permanent gekippten Fenstern Risiken durch Kondensation und darauf folgender Schimmelbildung an den Fensterlaibungen
- Stoßlüften ist zwar energetisch günstiger als das Lüften über gekippte Fenster, je länger jedoch die Stoßlüftung dauert, umso geringer wird die abgeführte Schadstoffmenge pro Zeiteinheit – am Ende sinkt die Lüftungseffizienz rapide. Dauert der einzelne Lüftungszyklus zu lange, wird in der kalten Jahreszeit keine Energieeinsparung gegenüber der reinen Fugenlüftung erzielt
- Insbesondere bei niedrigen Außenlufttemperaturen schließen die Nutzer die Fenster aufgrund der Komfortbeeinträchtigung tendenziell zu früh, so dass keine hinreichende Schadstoffabfuhr passiert. Der Anspruch an die Verantwortung der Nutzer ist in vielen Fällen praxisfern, es muss daher mit unzureichend gelüfteten Wohnungen gerechnet werden
- In den Nachtstunden wird ein permanent geöffnetes Fenster bei niedrigen Außenlufttemperaturen oder starken Lärmquellen im Außenbereich von der Mehrzahl der Nutzer nicht akzeptiert. Wird jedoch nicht gelüftet, ergeben sich vor allem bei geschlossenen Schlafzimmertüren stark erhöhte Konzentrationen anthropogener Luftverunreinigungen
- Die tatsächlich ausgetauschten Luftmengen sind bei natürlicher Belüftung von Räumen nicht kalkulierbar. Es besteht die Gefahr der Überlüftung oder zu geringen Lüftung, abhängig von den jeweilig sich oft kurzfristig ändernden Wetterbedingungen.



Fenster dreimal täglich
für 2 - 3 Stunden gekippt

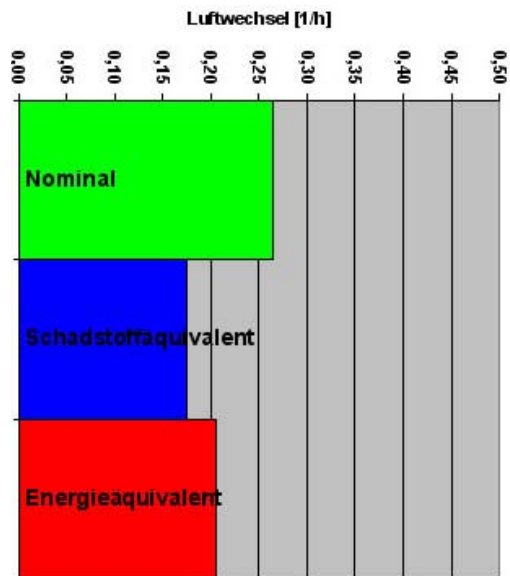


Fenster zweimal täglich
für 5 Minuten
Stoßlüftung

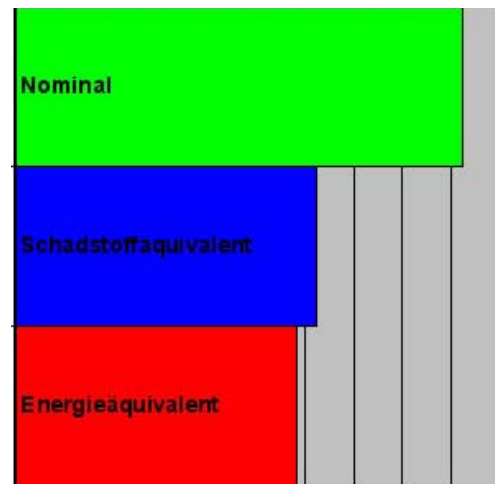


Fenster zweimal täglich
für 5 Minuten
Stoßlüftung, zusätzlich
Schlafzimmerfenster
nachts gekippt,
geöffnete Innentüren

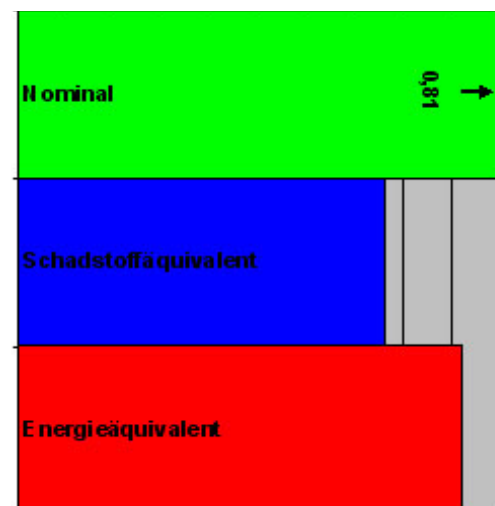
Luftwechsel bei natürlich belüftetem Gebäude, Unterschiedliche Formen der Belüftung
(Schnieders 2003b).



Fenster zweimal täglich
für 5 Minuten
Stoßlüftung, zusätzlich
Schlafzimmerfenster
nachts gekippt,
geschlossene
Innentüren



Fenster viermal täglich
für 5 Minuten
Stoßlüftung



Luftwechsel bei natürlich
belüftetem Gebäude,
Fenster viermal täglich
für 10 Minuten
Stoßlüftung

Abbildung 7: Luftwechsel bei natürlich belüftetem Gebäude, Unterschiedliche Formen der Belüftung (Schnieders 2003b)

4.4.3 Gebäude mit kontrollierten Belüftungsanlagen

Für ein Referenzgebäude mit kontrollierter Belüftungsanlage wurden folgende Werte für den nominalen, energie- und schadstoffäquivalenten Luftwechsel errechnet (Schnieders 2003b). Der schadstoffäquivalente Luftwechsel, der nur auf die Zuluftzonen bezogen ist, ist größer als der nominale Luftwechsel, beide sind, wie aufgrund der Wärmerückgewinnung zu erwarten ist, wesentlich größer als der energieäquivalente Luftwechsel.

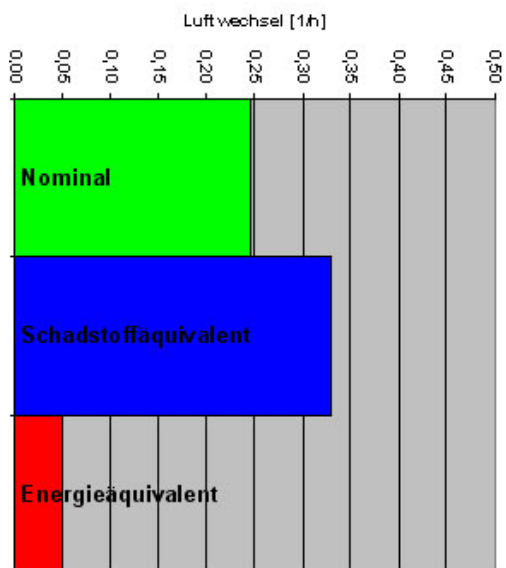


Abbildung 8: Luftwechsel bei kontrollierter Belüftungsanlage im Referenzfall (Schnieders 2003b)

5 RELEVANZ VON REINLUFTZUSTÄNDEN BEI KONTROLLIERTEN WOHNRAUMBELÜFTUNGSANLAGEN

5.1 Fragestellung

Es stellt sich die Frage, ob die Reduktion der Allergen- und Keimexposition aufgrund der Filterung der Außenluft bei kontrollierten Wohnraumbelüftungsanlagen für Nichtallergiker, insbesondere Kleinkinder, ein gesundheitliches Risiko darstellen könnte, da als eine Ursache für die stark gestiegene Häufigkeit von Allergien eine enge Beziehung zur steigenden Sauberkeit (Hygiene-Hypothese) diskutiert wird.

Die nachfolgende Kapiteln basieren auf publizierten Arbeiten sowie auf Diskussionen mit Allergologen und Kinderärzten. Namentlich sind zu nennen: PD Erika von Mutius (Universität München), Prof. Charlotte Braun-Fahrländer (Universität Basel), Ondine von Ehrenstein (Universität Berkeley), PD Ursula Krämer (Universität Düsseldorf), Julie Gillespie (Universität Wellington), Prof. Roberto Ronchetti (Universität Rom), Gabriele Bolte (Universität Ulm).

5.2 Keimreduzierte Luft und Gesundheit

Das Einatmen von keimreduzierter Luft (an bestimmten Arbeitsplätzen, in den Polarregionen, unter gewissen intensivmedizinischen Bedingungen) führt nach derzeitigem Wissensstand zu keinen schädlichen Gesundheitsfolgen. Selbst völlige Keimfreiheit ab Geburt soll im Tierversuch nicht zu Schäden geführt haben (allerdings erwies sich im Tierversuch der spätere Wechsel von keimfreier Umgebung zur Normalumwelt als problematisch, weil das tierische Immunsystem nicht für die Keimbelastung trainiert war).

Beim Menschen ist offenbar ein frühkindliches (bzw. schon vorgeburtliches) Training des Immunsystems zur Prophylaxe von Allergien in späteren Lebensabschnitten wichtig. Studien (siehe unten) zeigen so unter anderem den protektiven Effekt von:

- Aufwachsen auf einem Bauernhof
- Aufwachsen mit vielen Kindern/ Geschwistern
- Früher Kontakt zu Haustieren
- Bestimmte frühe Impfungen
- Frühe Aufnahme in eine Kinderkrippe

Bei der derzeitigen urbanen westlichen Lebensweise dürfte das vorhandene Potential an Risiko für Typ I-Allergien aber bereits ausgeschöpft sein (Braun-Fahrländer et al. 2004): Genetisch bedingt neigen offenbar etwa 30 % der Mitteleuropäer zu Atopie, d.h. zu Allergiebereitschaft. Diese 30 % sind inzwischen beinahe vollzählig auch tatsächlich Allergiker. Eine weitere Reduzierung der Umwelt-Keimbelastung sollte daher theoretisch nicht zu einem weiteren wesentlichen Anstieg der Allergierate führen. Jedoch wäre immer noch zu diskutieren, ob nicht ein Bündel an protektiven Maßnahmen zur Reduktion der Allergiehäufigkeit auch einen

intensiveren Kontakt zu (nicht infektiösen) Umweltkeimen vor allem in der frühen Kindheit beinhalten sollte.

Sehr wohl ist eine unspezifische Zunahme in der Reaktionsstärke auf Allergene zu beobachten (so dass also beispielsweise im Hauttest auch die Reaktion auf die Positiv-Kontrolle Histamin immer heftiger ausfällt). Die Ursachen für diese Zunahme der Intensität der Reaktion sind bisher noch gänzlich unerforscht (Roberto Ronchetti, persönliche Mitteilung).

Letztlich stellt sich die Frage, ob eine Filterung der Zuluft tatsächlich zu einer wesentlichen Reduktion der Keime in der Innenraumlufte im normalen Wohnbetrieb führt und welche Auswirkungen dies auf Allergien mit sich bringt.

5.3 Die Hygiene-Hypothese

Gemäß der Hygiene-Hypothese senken „unhygienische“ Kontakte mit anderen Kindern oder Tieren das Risiko, an Asthma zu erkranken oder eine Allergie zu entwickeln deutlich (Von Mutius 2001, Yazdanbakhsh et al. 2002, Wills-Karp 2001, Kabisch und Von Mutius 2002).

Die Hygiene-Hypothese, die die Beobachtungen erklären soll, dass „behütete“ Kinder ein höheres Risiko für Typ-I Allergien haben, blieb nicht unwidersprochen: es wurde vermutet, dass schlechter gestellte Familien nur einfach weniger wegen „ein bisschen Husten oder Schnupfen“ zum Arzt gehen. Hinweise, dass Menschen aus niedrigerer Sozialschicht zwar seltener Asthma haben, aber – wenn sie an Asthma erkranken bzw. wenn an ihnen Asthma diagnostiziert wurde – dies im Durchschnitt schwerer ist als bei Menschen aus höherer Sozialschicht, unterstützten diese Ansicht ebenso wie der Hinweis auf besonders hohe Asthma- und Allergie-Prävalenz in den sozial benachteiligten und sicher nicht sauberen Innenstädten der USA (dort übrigens mit hoher Allergierate auf Küchenschaben). Für Westeuropa ist aber belegt, dass Allergien (bzw. auch Sensibilisierungen im Hauttest) bei sozial Privilegierten häufiger sind.

In den letzten Jahren durchgeführte Studien an Landkindern, wobei Kinder von Bauernhöfen mit Nachbarkindern verglichen wurden, die zuerst in der Schweiz, Österreich und Deutschland durchgeführt wurden (Von Ehrenstein et al. 2000, Eder et al. 2004), inzwischen aber auch in anderen Weltgegenden wiederholt wurden, unterstützen nun augenscheinlich die Hygienehypothese: Bauernkinder haben ein vielfach geringeres Allergierisiko als ihre Nachbarn. Zwischen Bauernkindern sinkt das Risiko weiter deutlich, wenn diese bald nach der Geburt mit in den Stall genommen wurden und wenn sie Milch direkt vom Bauernhof zu trinken bekommen haben.

Die Bauernhofstudien zeigten aber auch das Zusammenspiel von Umwelt und Genetik: Nur wer genetisch zu Allergie disponiert ist, profitiert vom Aufwachsen auf dem Bauernhof (Eder et al. 2004, Werner et al. 2003). Eindrucksvoll war auch der Zusammenhang zwischen der Konzentration von Endotoxinen (Membranbestandteile von Bakterien, die Entzündungen bewirken können) in der Matratze des Kindes und asthmatisch-bronchitischen Symptomen (Bolte et al. 2003, Heinrich et al. 2002). Mit zunehmender Endotoxinkonzentration zeigte die Symptomatik einen U-förmigen Verlauf. Erst wenn man das Kollektiv in Allergiker und Nicht-Allergiker trennte (also allergisches von nicht allergischem Asthma unterschied), zeigte sich eine Abnahme der Symptome bei den Allergikern mit zunehmender Endotoxinkonzentration, gleichzeitig bzw. erst ab etwas höheren Konzentrationen eine Zunahme der nicht allergischen Asthmasymptome. Mehr Endotoxin war somit mit weniger Allergien und mit weniger Symptomen assoziiert, welche im Zusammenhang mit Allergien auftraten. Erst bei noch höheren Endotoxin-Konzentrationen nahmen (nun nicht-allergische) entzündliche Reaktionen und Symptome wieder zu.

In einer in Neuseeland durchgeführten Studie (Gillespie 2004) konnte die Abnahme von allergischen Symptomen mit sinkender Endotoxinaufnahme nicht gezeigt werden, sondern nur die Zunahme der nicht allergischen Symptome. Die Autoren schließen daraus, dass die Endotoxine in der europäischen Studie doch nur ein Surrogat für den allergieprotektiven Effekt sein können und nicht das tatsächliche Schutzprinzip. Bleibt noch anzufügen, dass bei der Studie aus der Schweiz, Österreich und Deutschland gerade der wichtige Beweis für die Richtigkeit des Konzeptes nicht erbracht werden konnte: Die aus dem Tierversuch erwartete Änderung im Zytokinmuster konnte nicht oder doch nur zum Teil gefunden werden (Braun-Fahrlander 2003a und persönliche Mitteilung). Marth (2004) führte dazu aus, dass zwischen der prinzipiellen Hochregulierung der Zytokine unter Endotoxineinfluss und der zusätzlichen Stimulierbarkeit bei bereits bestehender Hinaufregulierung unterschieden werden muss. Überraschender Weise werden die entsprechenden Toll-like Rezeptoren bei (durch Endotoxin-Kontakt hochregulierten) Leukozyten sogar vermehrt exprimiert. Dennoch erfolgt eine weitere Steigerung der Zytokinsynthese in verringertem Ausmaß. Die entsprechenden zellulären Signalketten werden derzeit in Graz ausführlich untersucht.

In den letzten Jahrzehnten wird ein deutlicher Anstieg allergischer Erkrankungen wie Asthma, Heuschnupfen und atopische Dermatitis beobachtet. Epidemiologische Studien zeigten, daß dieser Anstieg nicht durch geänderte Diagnosedefinitionen zustande kommt. Eine komplexe Interaktion zwischen genetischen Faktoren und Umwelteinflüssen ist für dieses Phänomen verantwortlich. Genetisch prädisponierte Menschen haben eine erhöhte Empfindlichkeit, Asthma oder andere allergische Erkrankungen zu entwickeln, wenn sie bestimmten Umwelt- und Lebensstileinflüssen ausgesetzt sind. Passivrauchen erhöht laut zahlreicher Studien das Risiko für Asthma, und einige zeigen auch ein erhöhtes Risiko für Atopie. Diese Assoziation ist für die Exposition gegenüber Schwefeldioxid, Staub, Dieselruß und Ozon weniger klar. Lebensstilfaktoren wie sozioökonomischer Status, Geschwisterzahl, Infekte im frühen Kindesalter, Ernährungsgewohnheiten, Aufwachsen in einer anthroposophisch orientierten Familie oder auf einem Bauernhof scheinen große Relevanz für die Entwicklung allergischer Erkrankungen zu haben. Derzeit herrscht große Unsicherheit darüber, welche Empfehlungen als Primärprävention gegeben werden sollen. Rezente Studien haben alte Paradigmen in Frage gestellt, wonach Vermeiden von frühem Allergenkontakt der Entwicklung allergischer Erkrankungen vorbeugen würde. Konsens besteht darüber, dass Rauchen während der Schwangerschaft und kindliches Passivrauchen als Primärprävention vermieden werden sollen (Kurz und Riedler 2003).

5.4 Kontrollierte Wohnraumlufthelungsanlagen und Hygiene-Hypothese

Beobachtungen legen nahe, dass eine zu „sterile“ Umgebung in der frühen Kindheit oder vielleicht auch schon vor der Geburt das Risiko für Typ I-Allergien erhöht. Die Hygiene-Hypothese versucht diese Beobachtung zu erklären, sie ist aber bisher nur eine Hypothese und kein wissenschaftlich akzeptiertes Faktum. Sowohl Beobachtungen als auch Hypothese betonen aber die Bedeutung eines kurzen Zeitfensters um die Geburt. Im späteren Leben und insbesondere für den bereits sensibilisierten Patienten stellt sich die Situation ganz anders dar: Minderung der Allergenbelastung und Meidung von schleimhautreizenden Einflüssen, wozu auch bestimmte Keime zählen, sind für ihn geboten.

Wahrscheinlich sind aber inhalative Keimbelastungen im Vergleich zur oralen Aufnahme sowie zur Aufnahme durch direkten Kontakt für das „Training“ des Immunsystems von untergeordneter Bedeutung. Eine Hyposensibilisierung erfolgt ja erfolgreicher auch parenteral über Stimulierung von IgG-Antikörpern und nicht über Schleimhaut-Kontakt und IgA-

Stimulierung. Für das Training des unreifen Immunsystems spielen wahrscheinlich andere Expositionsquellen eine wichtigere Rolle als die Einatmung von Außenluftkeimen (Schmierübertragungen bzw. andere direkte Übertragungswege von Mensch zu Mensch bzw. Tier zu Mensch). Veterinärmediziner aus der Universität Hohenheim (Prof. Werner Amselgruber und sein Team vom Institut für Umwelt- und Tierhygiene) beobachten übrigens auch bei Haustieren eine Zunahme von Typ I-Allergien, wobei auch sie von einer „Hygiene-Hypothese“ ausgehen: Bei Hunden insbesondere eine Zunahme an allergischen Hauterkrankungen, bei Pferden asthmatische Symptome. Ihre „Hygiene-Hypothese“ vermutet aber eher protektive Effekte durch parasitäre Erkrankungen, was ja angesichts der Phylogenese von IgE und auch in Anbetracht einzelner allergologischer und epidemiologischer Beobachtungen am Menschen nicht ganz von der Hand zu weisen ist.

6 RELEVANZ VON VERUNREINIGUNGEN DES LÜFTUNGS-SYSTEMS BEI KONTROLLIERTEN WOHNRAUM-BELÜFTUNGSANLAGEN

6.1 Allgemeines

Die bei kontrollierten Wohnraumbelüftungsanlagen ins Gebäude eingebrachte Zuluft ist bei korrekt ausgeführten Anlagen aufgrund der Filterung der Außenluft im Vergleich zur Außenluft in einem wesentlich geringerem Ausmaß mit Bioaerosolen wie z.B. Schimmelpilzsporen oder Pollen belastet (Pellikka et al. 1986). Die gesundheitlichen Auswirkungen von Pilz- und Bakterienbelastungen sind in den entsprechenden Kapiteln dargestellt. Die Konzentration von Stäuben wird bei Wahl geeigneter Zuluftfilter ebenfalls stark verringert.

Der Zustand einer keim- und partikelarmen Zuluft kann nur bei entsprechender Wartung der Anlage, die unter anderem Hygienekontrollen und regelmäßigen Wechsel der Filter beinhaltet, aufrecht erhalten werden. Es stellt sich die Frage, an welchen Stellen der Anlage und in welchem Ausmaß Verunreinigungen zu erwarten sind. Zudem ist zu eruieren, welche Maßnahmen zu treffen wären, um diese Probleme zu verhindern. Insbesondere stellt sich die Frage, inwieweit es bei Kondensatanfall in der Anlage zu einer Erhöhung der Keimbelastung kommt bzw. wie dies verhindert werden kann.

Bei schlecht geplanten oder gewarteten Lüftungstechnischen Anlagen kann es an mehreren kritischen Stellen der Anlage zur Ausbildung von Quellen von Luftverunreinigungen kommen.

Dies sind (ohne Anspruch auf Vollständigkeit):

- Die Außenluftansaugung
- Der Luft-Erdreichwärmetauscher (falls vorhanden)
- Die Zuluftfilter
- Das Luftleitungsnetz
- Wenn vorhanden eventuell Befeuchtungssystem

Zeitlich betrachtet kann es in folgenden Perioden zur Ausbildung von Quellen von Luftverunreinigungen kommen. Dies sind:

- Anlieferung und Lagerung der Bauteile der Lüftungstechnischen Anlage
- Montage der Lüftungstechnischen Anlage
- Betrieb der Lüftungstechnischen Anlage

Mögliche Ursachen für eine mikrobielle Kontamination der Lüftungstechnischen Anlage sind:

- ungenügende Wartung oder Konstruktionsmängel der Anlage
- Kontaminationen von Isolationsmaterialien
- Kondensatbildung oder erhöhte Luftfeuchtigkeit
- Wassereinbruch

Pilz- und Bakterienkonzentrationen in der Zuluft sind zudem abhängig vom Anlagentyp, der Effizienz der Filter und der relativen Luftfeuchtigkeit (Grillot et al. 1990). Art und Konzentration der auftretenden Mikroorganismen sind abhängig von den verfügbaren Nährstoffen, dem pH-Wert, der Temperatur und der Wasserverfügbarkeit in der Lüftungstechnischen Anlage (Ager et al. 1983).

Eine wichtige potentielle Quelle von Verunreinigungen stellt der Luft-Erdreichwärmetauscher dar.

Bei einfachen Systemen, wie z.B. zentralen Abluftanlagen mit Außenluftdurchlässen ohne aufwändigem Zuluftfilter, zentraler Außenluftansaugung und Rohrsystem wird ein Großteil dieser kritischen Bereiche vermieden, es können in der Regel jedoch auch nicht alle Vorteile von kontrollierten Wohnraumbelüftungssystemen mit Wärmerückgewinnung gegenüber reiner Fensterlüftung lukriert werden.

6.2 Luftfilter

6.2.1 Allgemeines

Im Normalfall sind die Pilz- und Bakterienkonzentrationen in der Zuluft geringer als in der Außenluft, da Pilzsporen und Bakterien aufgrund ihrer Größe durch Filter teilweise zurückgehalten werden. Die Abscheidecharakteristiken der entsprechenden Filterklassen legen fest, welcher Prozentsatz an Partikel unter Voraussetzung korrekt eingebauter Filter in den Innenraum gelangen kann (ÖNORM EN 779 2003). Die Reduktion der Bakterien ist auf Grund der Größe der Partikel generell geringer als die der Pilze, zudem ist zwischen Feinstaub- und Grobstaubfiltern kein so deutlicher Unterschied der Bakterienreduktion gegeben.

Allerdings akkumulieren in Filtern auch organische Partikel, die den Mikroorganismen als Nährstoffe dienen können und so ein mikrobielles Wachstum auf den Filtern fördern können. Entscheidender Einflussfaktor dabei ist die Wasserverfügbarkeit. Entsprechende Untersuchungen zeigen, dass besonders die Bakterienkonzentration mit dem Wassergehalt der Filter korreliert – Pilze können in Sporenform über mehrere Wochen hinweg überdauern, wodurch die Korrelation weniger scharf ist (Ohgke et al. 1993).

6.2.2 Kondensation auf der ersten Filterstufe

Der Außenluftfilter der ersten Stufe stellt auf Grund seiner Anfälligkeit für Taupunktunterschreitungen, was Kondensation zur Folge haben kann, einen kritischen Bereich dar. Eine Durchfeuchtung dieser Filter stellt, wie auch bei anderen Anlagenteilen, ein hygienisches Risiko dar.

Eine Simulation von Jachan (2003) unter Voraussetzung der in Wien herrschenden Außenluft-Klimadaten der ersten Jännerhälfte des Jahres 1997 zeigte, dass am Zuluftfilter der ersten Stufe vor dem Wärmetauscher die absolute Grenze von 90 % relativer Luftfeuchtigkeit bzw. die

Grenze von 80 % relativer Luftfeuchtigkeit über einen Zeitraum von länger als drei Tagen überschritten und somit die Grenzen der VDI 6022-1 nicht eingehalten war.

6.2.3 Wachstum und Akkumulation von Mikroorganismen auf Filtern

Bei Luftfechtigkeiten über 70 % können am Filter haftende Mikroorganismen (Pilze) auskeimen und durch den Filter hindurchwachsen. Sobald ein Organismus selbst einen Filter durchwachsen hat, können Mikroorganismen und Sporen in die Innenraumluft freigesetzt werden. Unabhängig vom Durchwachsen der Filter können Metaboliten und Abbauprodukte die Filter passieren und eine Gefährdung für die Bewohner darstellen (Martkainen 1990, Pasanen 1992).

Hinter Feinfiltern (in der Zuluft) konnte eine höhere allergene Aktivität nachgewiesen werden als im Rohrsystem selbst, d.h. die lebenden und toten Pilzsporen stellen ein Reservoir an Allergenen dar, die durch starke Luftströme mitgerissen werden können.

Felduntersuchungen zeigen, dass mit der Außenluft sowohl Endotoxine als auch endotoxinbildende Bakterien angesaugt werden. Bakterien und Endotoxinpartikel mit einem Durchmesser $> 0,45 \mu\text{m}$ werden bereits durch die erste Filterstufe zu einem hohen Prozentsatz zurückgehalten. Die Konzentration an kleineren luftgetragenen Endotoxinen wird durch die Filter nicht bzw. kaum verändert. Die abgeschiedenen Endotoxin bildenden Bakterien vermehren sich auf den Luftfiltern nicht, sondern sie sterben dort ab und führen zur Bildung von Endotoxinen, die sich auf den Filtern anreichern. Infolge dieser Akkumulation kommt es bei Filtern der erste Filterstufe nach Standzeiten von mehr als 1 Jahr zu einer steigenden Freisetzung von Endotoxinen (Möritz et al. 2001).

6.2.4 Mangelnde Filterleistung, falscher Einbau von Filtern

Eine mangelnde Filterleistung kann einerseits durch die Auswahl zu grober Filter entstehen, andererseits durch einen nicht fachgerechten Einbau der Filterelemente.



Abbildung 9: Lüftungsgerät mit Außenluftfilter, von Vorderseite betrachtet, Falschluf durch unzureichenden Sitz der Filters (Tappler 2005)

6.3 Luftleitungssystem

Bei der Beurteilung der Auswirkungen muss zwischen Lüftungsanlagen ohne Zuluftsystem und kontrollierten Wohnraumbelüftungsanlagen mit teils ausgedehntem Luftleitungssystem (Luft-Erdwärmetauscher werden gesondert diskutiert) unterschieden werden. Wenngleich Verunreinigungen in Ab- und Fortluftkanälen ebenfalls unerwünscht sind (z.B. Brandschutz), wird im Rahmen vorliegender Studie nicht auf diesen Aspekt eingegangen, da keine unmittelbare Auswirkung auf die Innenraumluftqualität und Gesundheit zu erwarten ist. Das Interesse in Bezug auf Innenraumluftqualität und Gesundheit konzentriert sich daher auf das Zuluftsystem.

Luftleitungen bergen verschiedene Risiken in sich. Rohrsysteme in Lüftungstechnischen Anlagen sind potentiell Verschmutzungen durch aus der Außenluft, durch Bauarbeiten oder von anderen Ursachen (z.B. Tiere) eingebrachten Verunreinigungen ausgesetzt.

Ein zentraler Punkt ist einerseits der Transport zur und die Lagerung der Luftleitungen auf der Baustelle, die zu groben Verschmutzungen führen kann und andererseits die mangelnde Reinigungsmöglichkeit, bedingt durch unzugängliche Bereiche, fehlende Revisionsöffnungen oder Aussteifungen und Einbauten, die eine effiziente Reinigung verunmöglichen.

Ein weiteres Thema bei Luftleitungen ist der mögliche Kondensatanfall, der von den Temperaturen der Kanäle und den darin herrschenden Luftfeuchtigkeiten abhängt. In kontrollierten Wohnraumbelüftungsanlagen ist dieses Problem auf Grund des Fehlens von Befeuchtungsanlagen zuluftseitig in der Regel nicht gegeben, da sämtliche Anlagenteile in Bereichen liegen, in denen ein Kondensatanfall nicht gegeben sein sollte (Ausnahme Luft-Erdwärmetauscher).

6.4 Luft-Erdwärmetauscher (LEWT)

6.4.1 Allgemeines

Luft-Erdwärmetauscher (LEWT) dienen einerseits zur Vorwärmung der Außenluft in der kalten als auch zur Kühlung der Außenluft in der heißen Jahreszeit. Ein fachgerecht eingebauter, frontständiger Filter mit ausreichender Qualität wird empfohlen, wird jedoch in der Praxis nur in wenigen Anlagen verwirklicht.

Im LEWT spielen sowohl von außen eingetragene als auch in der Rohrleitung selbst gebildete Verunreinigungen eine Rolle. Auf die Problematik des Eintrittes von Radon über eine undichte Verrohrung wird im Kapitel „Radon“ eingegangen.

6.4.2 Von außen eingetragene Verunreinigungen in LEWT

Eine Quelle von Verunreinigungen in LEWT kann eindringendes Bodenmaterial infolge unsachgemäßer Verlegung der Rohre sein (Twardik 2005). Eine weitere Quelle an diversen Verunreinigungen (wie Pflanzenbestandteile, Insekten und Mikroorganismen) kann dann entstehen, wenn der Außenluftdurchlass unmittelbar neben Vegetation angeordnet ist (siehe unten stehende Abbildung). Die Praxis zeigt, dass bei falschem Einbau des Filters vor dem LEWT Falschluff durch eine nicht fachgerechte Abdichtung zwischen Filtereinsatz und dem Luftfilterrahmen entstehen kann (siehe unten stehende Abbildungen). In zahlreichen Fällen ist auch kein Filter beim Lufteintritt in den LEWT vorhanden (Greml et al 2004).

Wie auch schon im Kapitel 6.3 thematisiert, kann der Transport zur und die Lagerung der Rohrelemente des LEWT auf der Baustelle zu groben Verschmutzungen führen.



Abbildung 10: Unsachgemäße Ausführung der Betonrohre in einem LEWT – Eintritt von Bodenmaterial (Twrdik 2005)



Abbildung 11: Unsachgemäße Ausführung der Betonrohre in einem LEWT – sekundäre Bildung von organischen Verunreinigungen (Spinnweben) (Twrdik 2005)

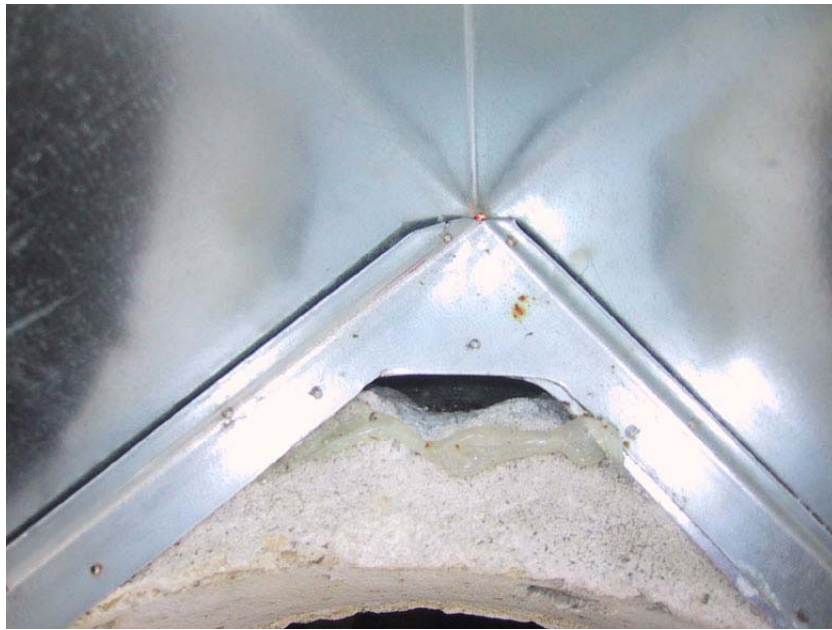


Abbildung 12: Falschluf durch eine nicht fachgerechte Abdichtung zwischen Filtereinsatz und dem Luftfilterrahmen bei Luftfilter vor einem LEWT (Twrzik 2004)



Abbildung 13: Anordnung des Außenluftdurchlasses eines LEWT unmittelbar neben Vegetation (Tappler 2005)

6.4.3 Mikrobielle Verunreinigungen in LEWT

Besonders im Sommer, wenn die Außenluft relativ feucht ist und die Temperatur im Luft-Erdreichwärmetauscher (LEWT) unter den Taupunkt sinkt, wird im LEWT Kondenswasser gebildet. Deshalb sollen alle Anlagen mit einem Gefälle angelegt werden, beim Austritt des Rohres im Keller muss ein fachgerecht ausgeführter Kondensatablauf bestehen. Unebenheiten und ungleiches Absenken der Rohre nach dem Bau, insbesondere wenn der Boden zuwenig verdichtet wurde, können dennoch zu stehendem Wasser in den Rohren führen. Bei fachgerecht eingebauten Rohren wird dieses Kondensat meist hausseitig abgeleitet, es kommt dann zu keinen persistenten Feuchteansammlungen im Kanal. Bei Kunststoffrohren ist keine Versickerung im Rohr selbst gegeben, es ist allerdings zu erwarten, dass angefallenes Kondensat in trockeneren Phasen wieder in die Gasphase übergeführt wird. Bei Betonrohren ist eine Versickerung schon durch das Material selbst gegeben, ob diese allerdings zur Abfuhr der gesamten Kondensatmenge ausreichend ist, ist ungeklärt.

In gerippten Rohren kann selbst ein Gefälle ein Ansammeln von kleinen Wassermengen nicht verhindern. Insbesondere im Sommer und in Übergangsmonaten ist dann ein mikrobielles Wachstum aufgrund der hohen relativen Luftfeuchtigkeit möglich, wenn nicht sogar zu erwarten. Gerippte Rohre fördern auch die Anreicherung von Stäuben in den Vertiefungen, eine Reinigung ist nahezu unmöglich. Mit dem Wachstum von *Aspergillus*-Arten, die schon bei geringer Feuchtigkeit wachsen können, muss beinahe ganzjährig gerechnet werden.



Abbildung 14: Nicht fachgerechte Ausführung des Anschlusses des gerippten Rohres eines LEWT an die Verrohrung zum Lüftungsgerät im Keller eines Einfamilienhauses (Tappler 2005)

In den Rohren des LEWT bieten sich für Mikroorganismen zwei Nährstoffquellen: Einerseits können Materialien der Luftleitung (Rohre, Isolation) angegriffen und zum Teil sogar abgebaut werden (Bolsaitis et al. 1993, Senkpiel et al. 1994), andererseits stellen Staubablagerungen Substrat für Mikroorganismen dar. Die Ursache von Staubablagerungen sind häufig Planungs- oder Ausführungsfehler, die zu einem Eintrag von Staub und biogenen Verunreinigungen in den LEWT führen. In Verbindung mit Feuchtigkeit stellen diese Verunreinigungen einen guten

Nährboden für das Wachstum von Mikroorganismen dar. Diese werden zwar zum Teil durch den nach dem Lüftungsgerät angeordneten Filter wieder entfernt, eine 100 %-ige Filterung aller biogenen Luftverunreinigungen ist jedoch niemals möglich. Bei starkem Anfall von Sporen ist auch ein Wachstum von außenluftseitig angelagerten Mikroorganismen durch den Filter bzw. eine Abgabe von Metaboliten und Abbauprodukten von Mikroorganismen nicht auszuschließen.

Bei LEWT bestehen große Unterschiede zwischen Einfamilienhäusern und größeren Anlagen hinsichtlich der Gesamtkeimzahlen sowie in der Verteilung auf einzelne Gattungen und Gruppen. In Einfamilienhäusern ist die Reduktion der Gesamtkeimzahlen deutlich geringer als in größeren Bauten (Einfamilienhäuser: durchschnittliche Reduktion von Bakterien: 18%, Pilze: 16%; größere Bauten: durchschnittliche Reduktion von Bakterien: 50%; Pilze: 40%). Zudem sind Einfamilienhäuser häufiger von einer Veränderung in der Mikroflora-Zusammensetzung betroffen (z.B. Zunahme von *Actinomyceten*, *Penicillium*, *Aspergillus*). Insgesamt ergaben sich jedoch aus den Untersuchungen von 12 repräsentativen Anlagen aus lufthygienischer Sicht keine Bedenken (Flückiger 1999).

7 RADON

7.1 Allgemeines

Radon ist ein geruch- und geschmackloses radioaktives Edelgas. Es entsteht ständig durch radioaktiven Zerfall aus natürlichem Uran. Die Hauptquelle von Radon ist der geologische Untergrund. Von dort kann das Gas über Kellerräume in Wohnräume eindringen. Auch manche Baustoffe (die jedoch kaum mehr verwendet werden) wie bestimmte Granitarten, Schlacken oder Phosphatgips können eine erhöhte radioaktive Eigenstrahlung aufweisen und damit zur Radonbelastung der Raumlufth beitragen.

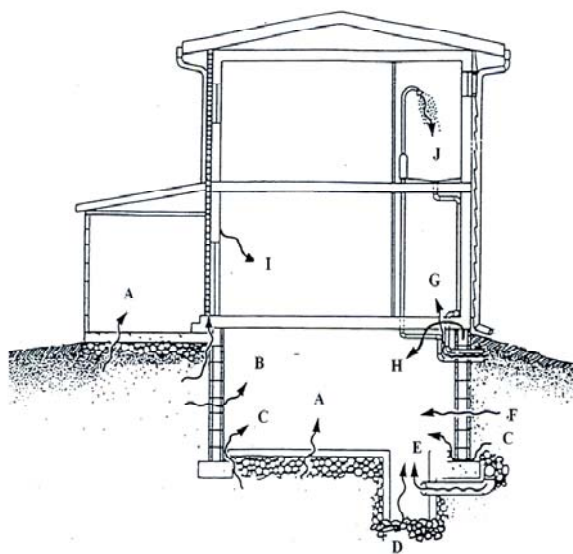


Abbildung 15: Eintrittswege von Radon in ein Gebäude, aus (Sarah 1998)

Im Rahmen der ÖNRAP-Studie (2001) wurden umfangreiche Messungen in Österreich durchgeführt, um Risikogebiete herauszufinden. Es zeigte sich, dass es zwar Risikogebiete mit durchschnittlich stark erhöhten Konzentrationen gibt, dass aber der Mittelwert eines Gebietes nichts über das tatsächliche individuelle Risiko aussagt – die Radonkonzentration hängt stark von der Bauweise und vom Lebensstil der Bewohner ab.

Die Bodenradongaskonzentration ist von der geologischen Situation abhängig. Die ÖNORM S 5280 Teil 2, die zur Abschätzung von Maßnahmen zur Radonprävention im Neubau dient, unterscheidet zwischen Radonpotentialklassen in Abhängigkeit von der berechneten mittleren zu erwartenden Radon-222-Aktivitätskonzentration im Gebäude, festgelegt jedoch auch, wenn bekannt, durch die aktuelle Bodenradongaskonzentration.

	Radonpotentialklasse		
	1	2	3
Radonpotential (mittlere zu erwartende Radon-222-Aktivitätskonzentration im Gebäude)	< 200 Bq/m ³	200 ... 400 Bq/m ³	> 400 Bq/m ³
Mittlere Radon-222-Aktivitätskonzentration im Boden	< 60 kBq/m ³	60 ... 120 kBq/m ³	> 120 kBq/m ³

Bq/m³ = Becquerel pro Kubikmeter, kBq/m³ = Kilobecquerel pro Kubikmeter

Tabelle 10: Klassifizierung des Radonpotentials laut ÖNORM S 5280-2

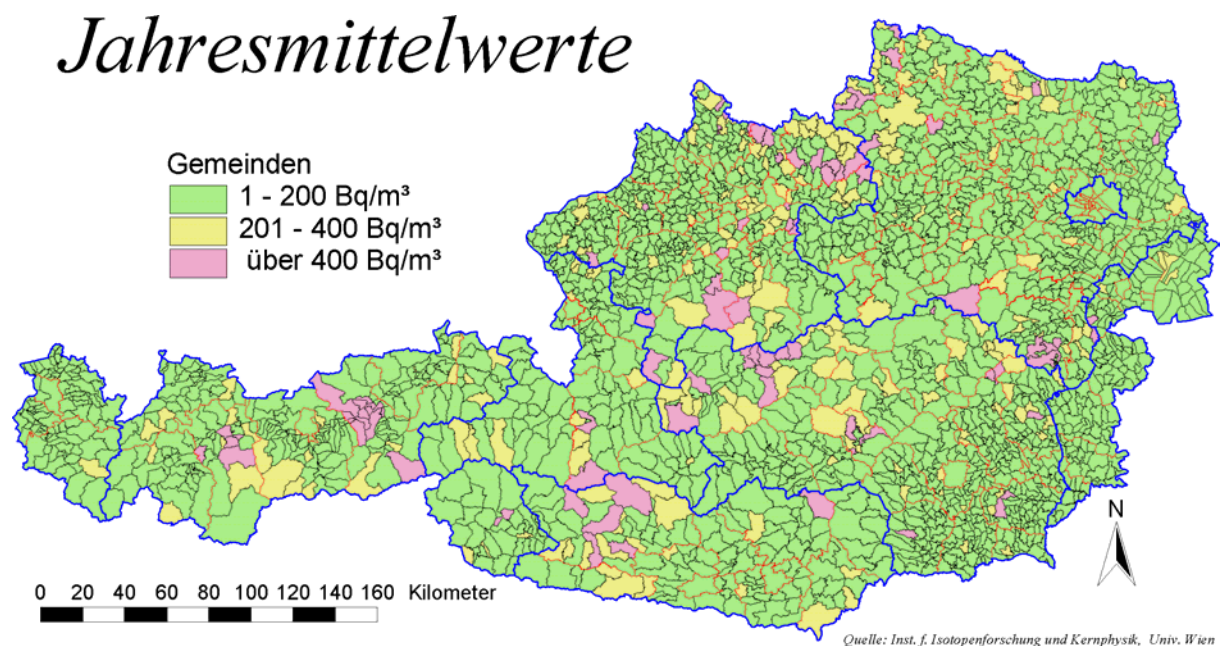


Abbildung 16: Radonpotentialkarte für Österreich (Friedmann 2004b)

Sichtbar ist anhand der Radonpotentialkarte, dass ein nicht unbeträchtlicher Anteil des österreichischen Bundesgebietes in die Radonpotentialklasse 2 oder 3 fällt.

7.2 Gesundheitliche Auswirkungen

7.2.1 Allgemeines, Wirkmechanismen

Radon wird – im Gegensatz zu seinen (ebenfalls radioaktiven) Folgeprodukten – relativ rasch wieder ausgeatmet. Die Folgeprodukte hingegen verbleiben an den feuchten Oberflächen des Atemtrakts und strahlen energiereiche Alphateilchen aus, die zu Zellschäden und Krebs führen.

Die Abschätzung des durch die Radonbelastung in Wohnungen bedingten Lungenkrebs-Risikos stützt sich im Allgemeinen auf Studien an Bergarbeitern mit nachfolgender Extrapolation in den Niedrigdosisbereich. Bereits im 16. Jahrhundert beschrieb Paracelsus die „Bergsucht“ der Bergarbeiter des Schneeberger Reviers (Erzgebirge), die dann 1879 als Lungenkrebs

identifiziert wurde. Mehrere Jahrzehnte danach wurde Radon als wesentliche Ursache für den Schneeberger Lungenkrebs erkannt. Erste Anhaltspunkte für Expositions-Wirkungs-Beziehungen ergaben sich in den 60er-Jahren durch die Studien an amerikanischen Uranbergarbeitern (Colorado-plateau-Kohorte) Arbeiter, die einer höheren Strahlenbelastung ausgesetzt waren, hatten ein größeres Lungenkrebsrisiko (Möhner 2003).

Auch für den Wohnbereich konnte in mehreren Fall-Kontroll-Studien gezeigt werden, dass mit steigender Radonkonzentration das Lungenkrebsrisiko zunimmt. In Österreich werden 5 bis 15% der Lungenkrebs-Erkrankungen dem Radon zugeschrieben (Ärztinnen und Ärzte für eine gesunde Umwelt 2003, Friedmann 2004a).

Studien zeigen, dass das Lungenkrebsrisiko bei RaucherInnen, die auch Radon ausgesetzt sind, größer ist, als wenn man die einzelnen Risiken addieren würde. Hinweise darauf, dass Radon außer einem erhöhten Krebsrisiko im Atemtrakt auch noch andere Gesundheitsschäden verursacht, gibt es kaum.

7.2.2 Neue Erkenntnisse aus gesamteuropäischen Studien

Neue europäischen Analysen stellen fest, dass Radon für rund 9% der Todesfälle infolge von Lungenkrebs verantwortlich ist und für 2% aller Krebstoten (Darby et al. 2004).

Diese Ergebnisse beruhen auf der Auswertung von 13 Studien über Radonbelastung in Innenräumen. Die WissenschaftlerInnen analysierten Daten von über 7000 Lungenkrebspatienten und über 14000 Vergleichspersonen aus ganz Europa. In der weltweit größten Studie dieser Art wurden u.a. Radonmessungen in Wohnungen durchgeführt und detaillierte Befragungen der Rauchgewohnheiten mit in die Betrachtungen eingeschlossen.

Die vorliegenden Studienergebnisse unterstützen die Annahme eines linearen Zusammenhangs zwischen den Radonkonzentrationen in Wohnungen und dem Risiko, an Lungenkrebs zu erkranken. Hierbei führt eine Erhöhung der Radonkonzentration um 100 Bq/m^3 zu einem Anstieg des Lungenkrebsrisikos um 16%. Bereits im Sommer 2004 schrieb die deutsche Strahlenschutzkommission (SSK) in einer Stellungnahme, dass bei Radonexpositionen über 250 Bq/m^3 mit einer relativen Erhöhung des Lungenkrebsrisikos um 20% zu rechnen ist. Die deutsche SSK geht dabei von einer linearen Dosis-Wirkungsbeziehung aus. (SSK_DE 2004). Die jüngsten europäischen Studien belegen schon bei einer Radonkonzentration von 150 Bq/m^3 eine signifikante Erhöhung der Lungenkrebsrate (Darby et al. 2004). Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit in Berlin bereitet deshalb ein neues Radonschutzgesetz vor.

Ähnlich wie Österreich hat auch Deutschland in den letzten Jahren die Radonbelastung in den verschiedenen Landesteilen erfasst. Im Rahmen von Forschungsarbeiten wurde die "Bundeseinheitliche Datei Radon in Gebäuden" (BuRG) geschaffen, in der alle Daten zum Radon im Untergrund und in Gebäuden zusammengeführt wurden.

Das neue deutsche Radonschutzgesetz sieht neue Grenzwerte und Maßnahmen vor, um sicherzustellen dass die Radonbelastung in Aufenthaltsräumen unterhalb der Konzentration bleibt, oberhalb der Gesundheitsschäden nachweisbar sind. Als Ziel zur Reduzierung erhöhter Konzentrationen wird in Deutschland ein Wert von 100 Bq pro m^3 angesetzt.

Deshalb sollte erreicht werden, dass in Gebieten, in denen in Aufenthaltsräumen mit Radonkonzentrationen größer 100 Bq pro m^3 gerechnet werden muss, durch Maßnahmen bei Neubauten höhere Konzentrationen als 100 Bq pro m^3 vermieden werden und in bestehenden Gebäuden Maßnahmen ergriffen werden, mit denen unter Beachtung der Umstände des Einzelfalles eine Unterschreitung der Konzentration von 100 Bq pro m^3 erreicht werden kann.

Ein Vorhaben, auch die Radonkonzentration analog zu chemischen Schadstoffen in Innenräumen in einer Baurichtlinie zu begrenzen, ist in Deutschland schon seit einiger Zeit in Diskussion. Die bestehende Baurichtlinie berücksichtigt den neusten Stand der Wissenschaft noch nicht: Für Altbauten (bestehende Gebäude) schreibt die Richtlinie einen Grenzwert von 1000 Bq pro m³ als Gefahrenwert in Gebäuden vor, ab dem innerhalb von drei Jahren saniert werden muss. Empfohlen wird dabei ein Sanierungszielwert von unter 200 Bq pro m³. Sanierungsmaßnahmen werden darüber hinaus auch unterhalb von 1000 Bq pro m³ Raumluft empfohlen insbesondere ab einem Wert von 400 Bq pro m³. Die Bauaufsichtsbehörde soll einschreiten, wenn ihr ein Wert von 10.000 Bq pro m³ bekannt wird. Bei der Planung von Neubauten sieht die Baurichtlinie lediglich als Empfehlung eine Reihe von Baumaßnahmen vor, die geeignet sind, Radonkonzentrationen von weniger als 200 Bq pro m³ einzuhalten.

Aufbauend auf dieser Richtlinie unter Berücksichtigung der neuen wissenschaftlichen Erkenntnisse und der Tatsache, dass der Radonschutz effektiv ausgestaltet sein muss bereitet das Bundesumweltministerium in Berlin derzeit ein Radonschutzgesetz als Ergänzung des Strahlenschutzvorsorgegesetzes vor, die für den Zielwert 100 Bq/m³ Maßnahmen für Neu- und Altbauten unter dem Aspekt der Vorsorge regeln soll.

Hierfür werden Radonverdachtsgebiete definiert, in denen aufgrund einer erhöhten Radonkonzentration im Untergrund mit erhöhten Radonkonzentrationen in Gebäuden zu rechnen ist.

Radonverdachtsgebiet definiert für Deutschland:

I: 20 kBq/m³ bis 40 kBq/m³

II: 40. kBq/m³ bis 100 kBq/m³

III: > 100 kBq/m³ Radon in der Bodenluft

Bei Neubauten (Planung) sind dabei entsprechend den Verdachtsgebieten I, II, III bauliche Schutzmaßnahmen der Klasse I, II, III zu berücksichtigen. Die Planung hat so zu erfolgen, dass möglichst 100 Bq/m³ nicht überschritten werden. Dies gilt für alle Neubauten.

In bestehenden Gebäuden in Radon-Verdachtsgebieten der Klasse III ist grundsätzlich mit Radonkonzentrationen von mehr als 100 Bq/m³ zu rechnen, dort ist deshalb die Radonkonzentration zu messen, in den Verdachtsgebieten II ist unter bestimmten Umständen zu messen. Werden mehr als 100 Bq/m³ gemessen, so sind im Bereich von

100 - 400 Bq/m³ Sanierungszeiten von zehn Jahren,

400 - 1000 Bq/m³ Sanierungszeiten von fünf Jahren und

oberhalb von 1000 Bq/m³ Sanierungszeiten von drei Jahren

einzuhalten. Die Sanierung ist möglichst so durchzuführen, dass Werte unterhalb von 100 Bq/m³ erreicht werden. Dies gilt nur für Gebäude, die öffentlich genutzt oder anderen Personen zur Nutzung überlassen werden, also nicht für vom Eigentümer selbst genutzte Räume (BMU 2005).

Die österreichische Strahlenschutzkommission empfiehlt für Innenräume einen Planungsrichtwert von 200 Bq/m³, der bei Planung und Bau neuer Wohnungen eingehalten werden soll, sowie einen Eingreifrichtwert von 400 Bq/m³, bei dessen Überschreitung Sanierungsmaßnahmen empfohlen werden (SSK 1994). Angesichts der neuen Forschungsergebnisse wird vermutlich auch die Absenkung dieser Richtwerte angestrebt werden. Das österreichische Recht kennt keine entsprechende Verpflichtung zur Einhaltung der Radongrenzwerte durch Bauträger und Vermieter.

Die folgende Abbildung zeigt, dass die Gebiete, wo eine Radonkonzentration im Innenraum von mehr als 100 Bq/m³ zu erwarten ist und wo diese Problematik daher relevant ist, deutlich größer sind, als wenn man sich am Richtwert von 200 Bq/m³ orientiert.

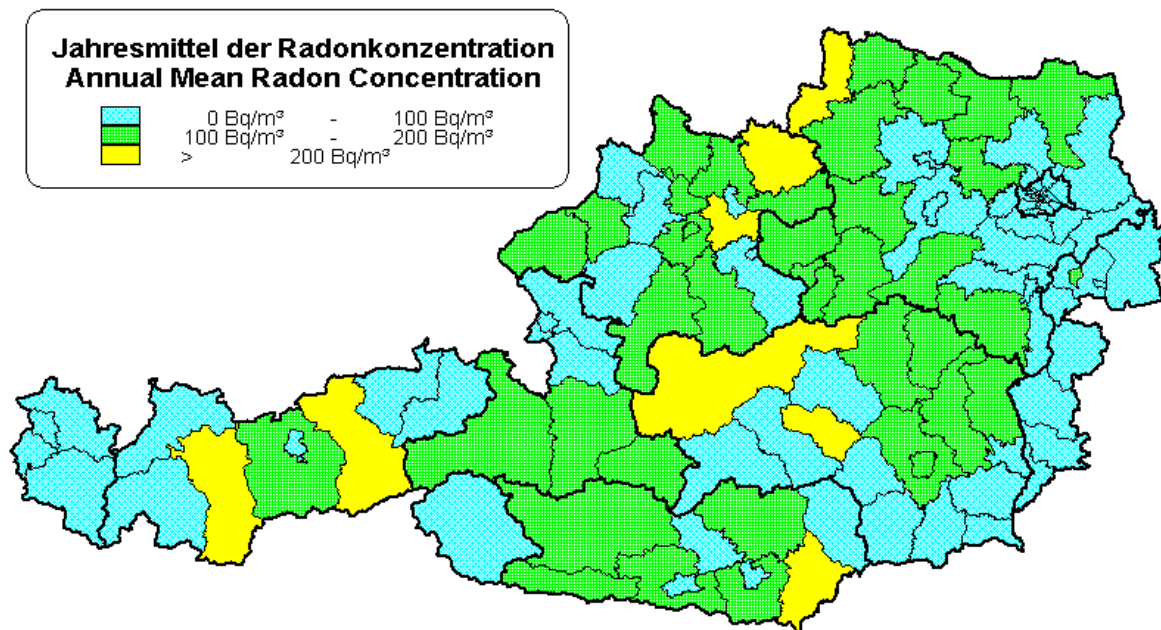


Abbildung 17: Jahresmittel der Radonkonzentration in Österreich. (H.Friedmann 2004)
<http://www.univie.ac.at/Kernphysik/oenrap/AUSTRIA.GIF>

7.3 Radoneintritt und Anreicherung im Wohnbereich durch energiesparende Maßnahmen

7.3.1 Allgemeines

Energiesparende Maßnahmen können in vielerlei Hinsicht die Konzentration des radioaktiven Edelgases Radon in den Innenräumen von Wohnungen beeinflussen.

Bei der Verwendung von Luft-Erdwärmetauschern (LEWT) in Passivhäusern zur Vorwärmung der Außenluft wird die Luft durch den Boden angesaugt, wodurch es zu einem Unterdruck im LEWT kommt. Bei Vorliegen eines derartigen Unterdrucks verbunden mit Undichtigkeiten der Verrohrung kann Radon aus dem Erdbodenbereich in das Rohrsystem gesaugt werden. Hier stellt sich die Frage, inwieweit diese Möglichkeit raumlufthygienisch relevant ist und welche Maßnahmen gegebenenfalls anlagenseitig zu treffen wären, um diesen Effekt zu verhindern. Weiters ist die Frage zu erörtern, wie sich bestimmte Anlagentypen, vor allem Abluftanlagen, bei denen bedingt durch Unterdruckerscheinungen über Undichtigkeiten zum Keller hin verstärkt Radon in den Wohnbereich gelangen könnte, auswirken.

7.3.2 Radonanreicherung nach Fenstertausch

Zahlreiche ausgeführte Beispiele im Bereich der Radonsanierung zeigen, dass durch bessere Belüftung der Räume (allerdings gemeinsam mit geeigneter Abdichtung der Radonquellen) eine signifikante Verringerung der Radonkonzentration zu erreichen ist. Es ist daher zu erwarten, dass durch energiesparende Maßnahmen im Altbestand, die in der Regel mit einer deutlichen Verringerung des Luftwechsels einhergehen, sich (wie auch für andere Luftinhaltsstoffe beschrieben) die Radonkonzentration der Raumlufte erhöht. In Räumen mit relevanten Radonquellen und geringem Luftwechsel kann es in solchen Fällen zu einer Überschreitung des Richtwertes der Strahlenschutzkommission von 400 Bq/m³ (SSK 1994) kommen.

7.3.3 Radoneintritt über Luft-Erdwärmetauscher

Wenn im Bereich der Außenluftansaugung eines Luft-Erdwärmetauschers (LEWT) ein Filter angeordnet ist, entstehen im Rohrsystem des LEWT relevante Unterdrücke. In der Arbeit von Greml et al. (2004) wird z.B. gefordert, dass der Druckverlust bei Vorliegen eines frontständigen Filters maximal 25 Pa (bei verschmutztem Filter 45 Pa) betragen sollte.

Bei Verwendung nicht vollständig dichter Rohrsysteme in Radonrisikogebieten ist daher zu erwarten, dass stark radonhaltige Bodenluft in den Kanal des Erdwärmetauschers einströmt und über diesen Weg in die Innenräume gelangt.

Bei der Annahme einer mittleren Bodenradongaskonzentration von 100 kBq/m³ (Radonpotentialklasse 2) und einer Undichtigkeit von nur 1‰ erhöht sich die Radonkonzentration der Zuluft um 100 Bq/m³. Bei einer höheren Bodenradongaskonzentration von 400 kBq/m³ (Radonpotentialklasse 3), wie sie in Radongebieten vorkommt, und einer Undichtigkeit von 1‰ erhöht sich die Radonkonzentration der Zuluft um 400 Bq/m³ und würde damit allein durch diese Erhöhung außerhalb des von der österreichischen Strahlenschutzkommission festgelegten Planungsrichtwertes für Neubauten von 200 Bq/m³ bzw. 400 Bq/m³ für bestehende Bauten (SSK 1994) liegen.

In segmentierten Rohrsystemen wie z.B. den früher häufig aufgrund ihrer guten Wärmeleitfähigkeit verwendeten Betonrohren sind durch Alterungserscheinungen der Dichtungen und Bodenbewegungen weiter gehende Undichtigkeiten zu erwarten, die zu einem verstärkten Eindringen von Radon in den Außenluftstrom im LEWT führen können.

7.3.4 Radoneintritt über Unterdruckerscheinungen

Bei Abluftanlagen, die im Innenraum einen Unterdruck erzeugen, ist es nicht auszuschließen, dass Radon über Undichtigkeiten zum Keller hin verstärkt in den Wohnbereich gelangen kann. Das Problem wird dann relevant, wenn einerseits keine ausreichend dimensionierten Nachströmöffnungen für Außenluft gegeben sind und andererseits eine lufttechnische Verbindung zu den Kellerräumen (nicht dicht schließende Türen, Installationsschächte, elektrische Installationen) besteht.

Ein Radoneintritt ist in Verbindung mit lufttechnischen Verbindungen zu den Kellerräumen auch dann zu erwarten, wenn der Zuluftstrom bei kontrollierten Wohnraumbelüftungsanlagen geringer als der Abluftstrom ist, was ebenfalls zu einem Unterdruck im Raum führt.

8 LUFTFEUCHTE

8.1 Begriffsdefinitionen, physikalische Zusammenhänge

Vor dem Einstieg in die Thematik Luftfeuchtigkeit ist es wichtig folgende Begriffe zu definieren und Zusammenhänge zu beleuchten:

Relative Luftfeuchtigkeit: Die relative Luftfeuchtigkeit beschreibt die prozentuale Sättigung der Luft mit Wasserdampf bei einer gegebenen Lufttemperatur. Die relative Luftfeuchtigkeit wird in Prozent [% r. F.] angegeben.

Absolute Luftfeuchtigkeit: Die absolute Luftfeuchtigkeit beschreibt die Gesamtmenge von Wasserdampf in einem definierten Luftvolumen und wird in Milligramm pro Liter [mg/l] oder Volumenprozent [Vol %] angegeben.

Die Zusammenhänge zwischen absoluter und relativer Luftfeuchtigkeit können in dem folgenden Diagramm (Mollier h-x-Diagramm) abgelesen werden.

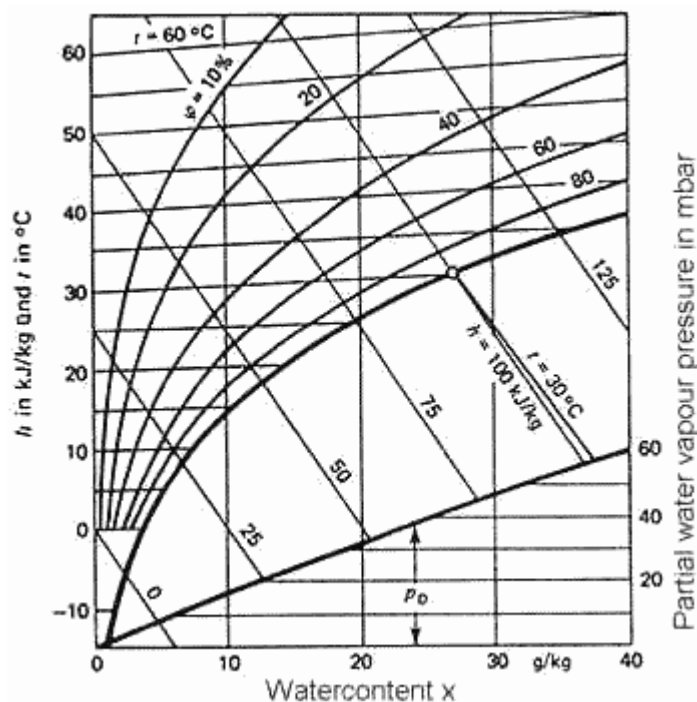


Abbildung 18: Zusammenhang zwischen absolutem Wassergehalt, relativer Luftfeuchte, Dampfdruck und Temperatur der Luft

Aus obiger Abbildung ist zu entnehmen, dass Luft mit einer relativen Feuchtigkeit von 40 % bei 0°C nur 2 g/kg Wasser enthält, während es bei 30°C bereits 12 g/kg Wasser sind.

Umgekehrt gilt, dass Außenluft von -5°C und einer Luftfeuchtigkeit von 80 %, wenn sie während des Lüftens oder durch eine Lüftungstechnische Anlage in den Aufenthaltsraum gebracht und hierbei erwärmt wird, durch die wesentlich höhere Wasserdampf-Aufnahmefähigkeit der Luft bei höherer Temperatur rapide an relativer Luftfeuchtigkeit verliert und bei 21°C nur noch eine relative Luftfeuchtigkeit von ca. 12 % besitzt. Diese Tatsache ist für Innenräume während der Heizperiode von Relevanz.

Es wurde berichtet, dass in Holzleichtbauten mit industriegetrockneten Baumaterialien die relative Luftfeuchtigkeit in der ersten Zeit überproportional absinkt, dass es also zu einer Adsorption an den Bauteilen kommt (Drexel 2005).

8.2 Physikalisch-klimatologische und physiologische Grundlagen

Wenn Luft wenig Wasserdampf enthält, entzieht sie feuchten Oberflächen Feuchtigkeit. Diese Eigenschaft ist umso ausgeprägter, je wärmer die Luft ist. Eingeatmete Luft wird in den oberen Atemwegen rasch auf annähernd Körperwärme angewärmt und ist daher in der Regel nicht wasserdampfgesättigt. Anwärmung und Befeuchtung der eingeatmeten Luft erfolgt in den oberen Atemwegen, insbesondere in der Nase. Deren Kapazität, inhalede Luft zu erwärmen und zu befeuchten kann bei behinderter Nasenatmung, verstärkter Atmung (z.B. bei körperlicher Anstrengung) und gestörter Durchblutung der Schleimhaut überfordert sein.

In diesen Fällen kann sowohl kalte als auch trockene Luft in den tieferen Atemwegen (Bronchien) einen irritierenden Reiz auslösen. Kalte Luft wird sowohl trocken als auch feucht (Nebeltröpfchen) experimentell zur Prüfung auf bronchiale Hyperreagibilität eingesetzt. Warme (heiße) trockene Luft (z.B. Wüstenklima) wird jedoch in der Regel von den Schleimhäuten der Atemwege gut toleriert. Dennoch dürfte in trockener Luft generell die Fließfähigkeit des Schleims beeinträchtigt und so die Selbstreinigung der Atemwege erschwert werden. Die Kombination von trockener Luft und Luftverunreinigungen (Staub) wirkt sich daher besonders ungünstig aus. Wahrscheinlich wird durch trockene Luft in Innenräumen auch das Risiko für akute Atemwegserkrankungen erhöht (Fiedler 1998). Teilweise sind Klagen über zu trockene Luft allerdings temperaturbedingt (zu hohe Temperatur) oder durch hohen Staub- und/oder Fremdstoffgehalt der Raumlufte verursacht (Gassel 2003).

Das Anpassungsvermögen des Menschen an Extreme der Luftfeuchtigkeit ist in beiden Richtungen beachtlich. Als „angenehmes“ Raumklima wird in unserer Klimazone aber ein Bereich zwischen 45 und 65 % rel. Feuchte (bei Zimmertemperatur) empfunden. Dabei ist zu bedenken, dass (winterliche) kalte Luft immer wenig Wasserdampf (in absoluter Menge) enthält. Wird diese Luft auf Zimmertemperatur erwärmt, so hat sie zwangsläufig eine niedrige relative Feuchte. Niedrige relative Feuchte wirkt jedenfalls weniger störend als niedrige Lufttemperatur.

Neben den Schleimhäuten kann auch die Haut von einer stark reduzierten Luftfeuchte betroffen sein. Jedenfalls wurde gezeigt, dass die Haut bei sehr trockener Luft „rauer“ wird. Dem kann prinzipiell durch Kosmetika bzw. Hautschutz vorgebeugt werden. Arbeitsplatzstudien (bei Arbeiten in Reinluft mit extrem trockenen Bedingungen unter 5% Luftfeuchtigkeit) zeigten, dass Hautbeschwerden häufiger angegeben werden als bei der Kontrollgruppe. Tendenziell wird dies auch bei Büroarbeitern unter trockenen Bedingungen beobachtet. Allerdings können Hautbeschwerden bei höherer Luftfeuchte auch zunehmen.

Ebenfalls sollte die Augenbindehaut bezüglich Raumklima beachtet werden. Physiologisch gesehen eine Schleimhaut, ist sie der Außenluft „ungeschützt“ ausgesetzt. Die Empfindlichkeit der Augenbindehaut gegenüber Austrocknung hängt von verschiedenen Faktoren ab: Die Zusammensetzung des Tränenfilms wird durch genetische und andere individuelle Umstände (hormonelle Einflüsse, Vorerkrankungen, Alter) beeinflusst. Die Häufigkeit des Lidschlags wird durch psychologische Faktoren (Aufmerksamkeit, Arbeitsaufgabe, Wachheitszustand, Stress) beeinflusst. Auch diverse Luftschadstoffe und die Luftfeuchte wirken auf die Zusammensetzung der Tränenflüssigkeit ein. Ist der Tränenfilm einmal beeinträchtigt, so können Schadstoffe (Reizgase und Staub) direkt auf die ungeschützte Bindehaut wirken und dort Reizerscheinungen auslösen.

Es verwundert daher nicht, dass meist eine Kombination von vielen Faktoren (z.B. Ergonomie der Bildschirmarbeit, Schadstoffgehalt der Luft, psychische Verfassung, eventuell Ionisation von

Staubteilchen, Physiologie der Tränenflüssigkeit, Kontaktlinsen und Luftfeuchte) für das Auftreten von Beschwerden („Trockenes Auge“, „Brennen der Augen“) verantwortlich ist ⁶.

Die gesundheitliche Bedeutung von Flüssigkeitsverlust über die Atmung v.a. bei niedriger Luftfeuchtigkeit bzw. geringem Luftdruck wird z.B. in der Höhenmedizin thematisiert: Wenn dieser nicht ausgeglichen wird, kann es über die Steigerung der Blutviskosität zu Thrombosen kommen. Dieser Zusammenhang wird auch in der Flugmedizin diskutiert. (Anmerkung: Ausreichende Flüssigkeitszufuhr kann diesem Problem entgegenwirken.) Aus der Flugmedizin bekannt sind auch die Klagen über Schleimhautreizungen durch die geringe Luftfeuchte im Flugzeug-Innenraum (Nagda und Hodgson 2001).

8.3 Gesundheitliche Bedeutung

Sehr trockene (unter 25 % rel. Feuchtigkeit) und gleichzeitig kalte Luft (die bei Erwärmung im Atemtrakt noch trockener wird) kann bei Asthmatikern (v.a. unter forcierter Atmung ⁷) einen Asthmaanfall provozieren. Bei (gesunden) Sportlern, die im Freien (in kalter, trockener Luft) trainierten, fand man in den Schleimhäuten der Atemwege einen Anstieg von Entzündungszellen, die allerdings nicht aktiviert waren. Dieser Befund wurde in dieser Arbeit daher nicht als (schädliche) Entzündung, sondern als adaptive Reaktion gedeutet.

Fiedler und Hoyer (1996) beobachteten bei trockener Luft vermehrt akute Atemwegserkrankungen bei Kindern. Auch das Risiko für die gefährliche eitrige Hirnhautentzündung wird durch trockene Luft erhöht. Der Wohnmediziner Fiedler hält fest, dass es bei unter 30 % rel. Feuchte zum Austrocknen von Kleidung, Teppichen, Möbeln, etc. kommt, was die Staubbildung fördert. Weiters können sich Staub und die daran befindlichen Bakterien sowie Viren in trockener Luft länger schwebend halten. Dies und die Austrocknung der Schleimhäute erhöhen laut Fiedler das Infektionsrisiko.

In der Regel wird eine vorübergehende Herabsetzung der relativen Luftfeuchtigkeit bis auf etwa 30 % (bei Raumtemperatur) aus gesundheitlicher Sicht vertretbar sein. Aus der Literatur ist bekannt, dass bei trockener Raumluft (also Zimmertemperatur, rel. Feuchte um die 25 %) bei Atopikern weniger Schleimhautbeschwerden (mit Ausnahme Augenbindehäute) als Hautbeschwerden (Juckreiz) leicht zunehmen. Für Patienten mit atopischem Ekzem (Neurodermitis) wird daher empfohlen, die Luftfeuchtigkeit in einem Bereich von 45 bis 55 Prozent zu halten (Ring 1996).

In einer Untersuchung von MitarbeiterInnen in einem neu errichteten Bürohaus konnte der Einfluss von Raumklimafaktoren auf selbstberichtete gesundheitliche Beschwerdesituation gezeigt werden. Einzeln betrachtet hatten die Faktoren „Raumtemperatur“, „Luftfeuchtigkeit“, „Luftbewegung“ sowie „Eindruck einer muffigen und abgestanden Luft“ und „Lärm“ einen signifikanten Einfluss auf gesundheitliche Veränderungen: Bei Personen, die diese Angaben machten, kam es nach Einzug in das neue Gebäude eher zu einer Zunahme der Beschwerden (v.a. Reizerscheinungen der Schleimhäute und Befindlichkeitsstörungen) (Hutter et al. 2003).

Über einen wichtigen Aspekt berichtet Wolkoff (2004): Er hält eine strikte Trennung physikalischer Faktoren von chemischen Luftverunreinigungen hinsichtlich ihres Beitrages in

⁶ Probleme treten eher bei Tätigkeiten auf, die mit einer länger dauernden Fixierung des Blickfeldes (z.B. Bildschirmarbeit) verbunden sind. Zu Beschwerden im üblichen Wohnumfeld kommt es nur, wenn Krankheiten, die mit einer verminderten Tränensekretion einher gehen, beteiligt sind. Eine Ausnahme bilden eventuell Kontaktlinsenträger.

⁷ z.B. bei körperlicher Anstrengung und Mundatmung; so dass die Erwärmung und Anfeuchtung der Luft über den Nasenweg entfällt

der Entwicklung gesundheitlicher Symptomen nur für eingeschränkt möglich. Vermutlich wirkt sich trockene Luft bei Anwesenheit erhöhter Konzentrationen an Raumluftverunreinigungen wesentlich stärker gesundheitlich aus.

Gesundheitliche Wirkung sind jedoch nicht nur bei niedrigen, sondern auch bei zu hohen Feuchten zu erwarten. In einer repräsentativen Wohnungsstudie in Deutschland wurden zahlreiche Zusammenhänge zwischen Feuchteschäden der Wohnung und gesundheitlichen Beeinträchtigungen gefunden (Brasche et al 2003). In 21,9 % der 5530 untersuchten Wohnungen lagen sichtbare Feuchteschäden vor. Das Vorhandensein von Feuchteschäden erhöht das Risiko, an Asthma zu erkranken, signifikant um 50 %, das Allergierisiko um 30 %. Feuchteschäden nehmen auch signifikanten Einfluss auf durch Milben und Schimmelpilze ausgelöste Allergien, aber auch auf Pollenallergien. Die definierten Schadenskategorien erhöhen signifikant das Risiko für Erkältungskrankheiten.

8.4 Sekundäre Auswirkungen der Luftfeuchtigkeit in Innenräumen

Die Luftfeuchtigkeit kann weiters Auswirkungen auf folgende Bereiche haben:

- die elektrostatische Aufladung von Materialien
- die Elastizität von Materialien und Fasern
- die Schimmelbildung
- das Milbenwachstum
- die Wahrnehmung von Gerüchen

Die elektrostatische Aufladung steigt unter 40 % rel Luftfeuchtigkeit stark an (Gassel 2003, Schneider et al. 2003b). Funken, die bei derartigen Entladungen entstehen, können integrierte Schaltkreise von Computern stören.

Bei abnehmender Luftfeuchtigkeit nimmt auch die Elastizität von Materialien und Fasern ab. Haar und Haut werden spröde. Als optimale Konservierungskondition für ihre Exponate nennen z.B. Museen bei Holz 55 - 60 %, bei Leinwand 50 - 55 %. In den meisten Museen konserviert man generell bei 55 % (Schneider et al. 2003b).

Die Schimmelbildung hängt mit der Luftfeuchtigkeit insoweit zusammen, als bei hoher Luftfeuchtigkeit die Gefahr der Kondensation an Bauteilen infolge mangelnder Wärmedämmung oder Wärmebrücken erhöht ist und die Trockenzeit für durchfeuchtete Materialien zunimmt. Für Schimmelpilzwachstum sind beim Zusammentreffen ungünstiger Randbedingungen eine tägliche über 12 Stunden währende und mindestens 5 Tage anhaltende Überschreitung der relativen Luftfeuchte an der Bauteiloberfläche von 80 % ausreichend (Schneider et al. 2003b).

Zu den häufigsten allergisierenden Substanzen im Hausstaub zählen, wie schon oben ausgeführt, die Kotballen der Hausstaubmilben. Milben sind Spinnentiere und so winzig, dass sie mit dem bloßen Auge nicht zu erkennen sind. Sie sind natürlicher Bestandteil des Ökosystems fast jeden Haushaltes, also kein Anzeichen für mangelnde Hygiene oder Sauberkeit. Der minimale Wassergehalt der Luft, bei der Hausstaubmilben noch lebens- und vermehrungsfähig sind, beträgt 7 g Wasser/kg Luft.

Hausstaubmilben sind lichtscheu. Zur ihrer Vermehrung sind Temperaturen um 20 bis 25°C, eine relative Luftfeuchtigkeit von 60 bis 80 %, das Vorkommen menschlicher und tierischer Hautschuppen und eine gewisse Zahl von Schimmelpilzen erforderlich. Milben sind auf relativ hohe Luftfeuchtigkeit angewiesen, da sie nicht trinken können, bei niedrigerer Luftfeuchtigkeit

werden sie inaktiv. Trotzdem können die allergischen Beschwerden gerade bei Absenken der Luftfeuchtigkeit (eine vorausgehende Milbenbelastung vorausgesetzt) ihren Höhepunkt erreichen, weil die Kotbällchen austrocknen, zerfallen und als Feinststaub aufgewirbelt und mit der Atemluft inhaled werden. Bei einem erneuten Anstieg der Luftfeuchtigkeit erwachen die Milben wieder zum Leben.

In Zusammenhang mit der Vermeidung von Hausstaubmilben werden hier meistens relative Luftfeuchtigkeiten unter 50 % empfohlen (Arlian et al. 2001, Schmidt 2004, Schneider et al. 2003b).

Gerüche werden bei steigender Luftfeuchtigkeit intensiver wahrgenommen, dies betrifft vor allem den Bereich relativer Luftfeuchtigkeit ab 55% (Schneider et al. 2003b).

8.5 Richt- und Orientierungswerte

Die Frage nach der optimalen und nach der noch akzeptablen Luftfeuchtigkeit in Innenräumen ist schwer zu beantworten, da über die verschiedenen Auswirkungen der Luftfeuchtigkeit auf die Behaglichkeit und Gesundheit des Menschen nach wie vor ein großes Wissensdefizit besteht. Die Arbeitsstättenverordnung legt für klimatisierte Gebäude fest, dass die relative Luftfeuchtigkeit zwischen 40 und 70 % liegen muss (Ast-V 1998). Die ÖNORM H 6000-3 legt die Grenzen der relativen Luftfeuchtigkeit bei klimatisierten Gebäuden mit 35 bis 65 % fest (ÖNORM H 6000 1989).

In der ÖNORM B 8110-2 (2003) wird der Bereich der relativen Luftfeuchtigkeit definiert, der einer feuchtigkeitstechnischen Bemessung zu Grunde liegt und der in der Praxis häufig als Obergrenze des „normalen Wohnklimas“ herangezogen wird. Es wird angenommen, dass im Winter (bei Außentemperaturen über 0 °C) eine relative Luftfeuchtigkeit von maximal 55 % in der Wohnung meist nicht überschritten wird. Nur während maximal 8 Stunden täglich kann durch die verschiedenen Tätigkeiten in der Wohnung die Luftfeuchtigkeit bis 65 % ansteigen. Bei niedrigeren Außenlufttemperaturen unter 0 °C sinken diese an sich für die Planung eingesetzten Referenzwerte um 1 % relativer Luftfeuchte je 1 °C Temperaturabfall (z.B. 50 % statt 55 % bei -5 °C Außentemperatur)

Bei der im „Haus der Zukunft“-Projekt „Themenwohnen Musik“ durchgeführten Literaturrecherche zur Luftfeuchtigkeit wurde festgestellt, dass die Frage der optimalen Luftfeuchtigkeit für Menschen in Innenräumen derzeit unbeantwortet bleiben muss (Schneider et al. 2003b). Weiters wurde festgestellt, dass die verschiedenen Aussagen kontrovers sind und sich eigentlich fast nie auf physiologische Erfordernisse des Menschen beziehen (Schneider et al. 2003b). Die vorgebrachten Begründungen für die angeführten Werte stellen entweder Behaglichkeits-Untersuchungen in den Vordergrund oder Sekundärererscheinungen wie z. B. die Schimmelbildung. Dennoch können Bereiche der relativen Luftfeuchte eingegrenzt werden, deren Verlassen zu unterschiedlichen Problemen führen kann.

Beim Projekt „Themenwohnen Musik“ wurden die folgenden Aussagen herangezogen, um die optimale Luftfeuchtigkeit in Innenräumen mit einer Raumtemperatur von ca. 21°C näher einzugrenzen:

- Prof. Dr. med. Dr. phil. nat. H. Eyer, Max von Pettenkofer Institut für Hygiene und Mikrobiologie der Universität München geht von einer physiologischen Forderung von 50 % relativer Luftfeuchtigkeit für Innenräume aus. Diese Forderung kann jedoch vermutlich nur als Mittelwert verstanden werden.
- Univ. Prof. i.R. Dipl.-Ing. Dr. techn. Erich Panzhauser, TU Wien, Institut für Bauphysik, verlangt als Untergrenze 35 %; 50 % gelten lt. Panzhauser als Mittelwert im Vorzugsbereich der relativen Luftfeuchtigkeit (Schneider et al. 2003b).

8.6 Beeinflussung der Luftfeuchtigkeit durch energiesparende Maßnahmen

8.6.1 Energiesparende Maßnahmen im Altbestand ohne Lüftungstechnische Anlage

Verringerter Luftwechsel nach Fenstersanierung erhöht in der Regel auch die relative Luftfeuchtigkeit in den Räumen. Bei Gebäuden mit wärmetechnischen Schwachstellen (schlechte Dämmung, Wärmebrücken) kann es zu Schimmelbefall kommen. Dies kann in der Folge zu einer erhöhten Sporenkonzentration und einer erhöhten Konzentration von anderen Schimmelbestandteilen in der Innenraumluft führen.

Bei wenig benutzten Wohnungen, in denen keine relevante Feuchteproduktion stattfindet, ist bei Verringerung des Luftwechsels nach Fenstertausch nur eine leichte Steigerung der relativen Luftfeuchtigkeit zu erwarten.

Anders stellt sich die Situation in stark benutzten Wohnungen mit hoher Feuchteproduktion dar. Wenn das Wohnverhalten nicht verändert wird, kommt es in diesen Fällen zu einer starken Erhöhung der relativen Luftfeuchtigkeit. Von Clausnitzer und Jahn (1997) wurden Wohnungsgesellschaften zum Thema „Energieeinsparung und Lüftung“ befragt. Die Frage, ob es Feuchteschäden vermehrt nach dem Einbau neuer Fenster auftraten, wurde von den Wohnungsgesellschaften 37 mal mit ja und 12 mal mit nein geantwortet (nur auswertbare Antworten angegeben).

Wohnungen in Gebäuden ohne Lüftungstechnische Anlagen werden nach Fenstersanierung gegenüber dem ursprünglichen Zustand höhere relativen Luftfeuchtigkeit aufweisen. Ein verändertes Wohnverhalten kann verhindern, dass eine zu hohe relative Luftfeuchtigkeit (über 60%) auftritt. Die jeweils individuelle noch akzeptable Obergrenze wird dabei durch die vorliegenden baulichen Gegebenheiten bestimmt und kann nicht als „Grenzwert“ angegeben werden. In jedem Fall sind Situationen zu vermeiden, die lokal (meist in Nähe von kalten raumumschließenden Flächen) zu einer relativen Luftfeuchtigkeit von über etwa 80 % in unmittelbarer Nähe des Bauteils führen, da in diesem Fall Schimmelbefall an Oberflächen nicht mehr ausgeschlossen werden kann (Sedlbauer 2001). Zusätzlich sind Situationen zu vermeiden, in denen eine für den Menschen als unbehaglich empfundene hohe relative Luftfeuchtigkeit im Wohnbereich von etwa 70 % überschritten wird. Längerfristig gesehen sollten die Werte nicht über 60 % liegen, da dies das Milbenwachstum begünstigt.

Möglichkeiten für den Nutzer zur Senkung der relativen Luftfeuchtigkeit sind:

- Vermehrtes und konsequentes Lüften während der Tagesstunden
- Stärkeres Heizen
- Vermeidung von Aquarien und anderen starken Feuchtequellen
- Verwendung von Wäschetrocknern mit Kondensatabfluss
- Konsequente Abfuhr von Feuchte aus Nassbereichen und Küche

Eine geeignete schriftliche Information der Bewohner und Bewohnerinnen der betreffenden sanierten Wohnung ist Voraussetzung für eine wünschenswerte, konsequente Änderung des Wohnverhalten.

8.6.2 Auswirkungen von Lüftungstechnischen Anlagen ohne Luftbefeuchtung

Bei Klimaanlage wird die Luftfeuchtigkeit automatisch über Befeuchteranlagen geregelt, bei Lüftungstechnischen Anlagen in Wohnhäusern ist dies in der Regel nicht der Fall. Der Nutzer kann hier bis zu einem gewissen Grad auf die Luftfeuchtigkeit Einfluss nehmen.

In der kalten Jahreszeit kann die in die Räume einströmende Außenluft, nachdem sie aufgewärmt wird, sehr niedrige Luftfeuchtigkeit aufweisen. Im Gegensatz zu natürlich belüfteten Häusern ist im Durchschnitt bei Gebäuden mit Lüftungstechnischen Anlagen eine signifikant niedrigere Luftfeuchte zu erwarten.

Eine deutsche Untersuchung in 5530 Wohnungen (Brasche et al. 2003) wies nach, dass neben natürlicher Lüftung zentrale Abluftanlagen und Schachtlüftungsanlagen signifikant positive Effekte in Bezug auf Feuchteschäden erzielten.

Wie oben ausgeführt wird auch sehr niedrige Luftfeuchtigkeit im allgemeinen meist gut vertragen, wenn sie nur kurzfristig auftritt. Zu trockene Luft beeinträchtigt vor allem Personen, die bereits an Atemwegserkrankungen leiden. Allerdings wird die Anzahl der Tage mit Luftfeuchten unter 30 % in der Regel überschätzt: bei einem Zuluftvolumenstrom von 30 m³/Person und Stunde und einem personenspezifischen Feuchteeintrag von 90 g/h wurden für Frankfurt nur 3 Tage/Jahr geschätzt. Bei Erhöhung des Zuluftvolumenstroms um 5 m³/Person und Stunde verdoppelt sich die Anzahl der Tage mit Luftfeuchten unter 30 % rel. LF (Pfluger 2003).

8.6.3 Wärmetauscher zur Erhöhung der relativen Luftfeuchte

Als Neuentwicklung werden auch für kleinere Lüftungsanlagen Wärmetauscher zur Erhöhung der relativen Luftfeuchte mit unterschiedlichen Konstruktionsprinzipien angeboten. Eine Ausführung arbeitet mit zwei Speichermassen, die abwechselnd mit Feuchtigkeit beaufschlagt und durch Umschalten der Klappen im Gegenzug wieder entladen werden. Laut Angaben wird etwa 45 % der Feuchtigkeit der Abluft wieder an die Zuluft abgegeben (Kislinger et al. 2003). Ein anderes Prinzip arbeitet mit einem rotierenden Wärmetauscherelement, das auch zur Speicherung von Feuchte dient (Hoval 2005).

Für den Einsatz von Speichermassenwärmetauschern sind noch wenige Erfahrungen in hygienischer Hinsicht vorhanden. Es wurde diskutiert, ob sich Risiken durch den intermittierenden Feuchtanfall am Absorber, bei dem unter Umständen eine Verkeimung gegeben sein könnte, ergeben könnten. Das Funktionsprinzip ist jedoch laut Firmenangaben (Fa. Hoval) so, dass am Wärmetauscherelement keine Kondensation stattfindet und die absorbierte Feuchte darüber hinaus sofort wieder an die durchströmende Außenluft abgegeben wird, hygienische Risiken wären daher laut Herstellerangaben ausgeschlossen.

Die in der Anlage mit rotierendem Wärmetauscherelement zur Filterung der Abluft verwendeten Filter haben laut Angabe der Fa. Hoval die Filterqualität G3, es ist daher mit einem relativen Eintrag von Staub in den Wärmetauscher zu rechnen, wenn keine Vorfilter einer höheren Filterklasse vorhanden sind. Ebenso kann Staub außenluftseitig auf den Wärmetauscher gelangen, dies ist jedoch bei allen Anlagen gegeben, die außenluftseitig über keinen Vorfilter verfügen. In diesem Fall wäre abzuklären, ob eine Verschmutzung des Wärmetauscherelementes zu erwarten wäre und wie sich diese auf die Qualität der Zuluft auswirken würde.

9 LUFTIONEN

9.1 Allgemeines

Die Literatur zum Thema „Luftionen und energiesparende Maßnahmen im Wohnbau“ erscheint dürftig und eher von persönlichen Meinungen als von fundierten, experimentell abgesicherten Tatsachen getragen zu sein. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird daher vorwiegend auf Interviews mit ExpertInnen zurückgegriffen. Nicht selten wird darauf hingewiesen, dass durch Verringerung des Luftwechsels, wie sie z.B. bei Einbau neuer Fenster im Altbestand eintritt, die Ionenkonzentration absinkt. Eine weitere häufig geäußerte Meinung besagt, dass sich durch den Durchgang von Luft durch Rohrsysteme, wie es in Wohngebäuden mit kontrollierter Raumbelüftungsanlagen der Fall ist, die Ionenkonzentration verringert und es letztlich zu einem Mangel an negativen Ionen kommt. Aussagekräftige Untersuchungen von Luftionen in Passivhäusern wurden jedoch bis dato nur punktuell durchgeführt bzw. nicht oder nur unzureichend dokumentiert.

„Wir führen seit knapp 20 Jahren Luftionen-Messungen durch und haben dabei festgestellt, dass es generell zu einer deutlichen Abnahme der Ionenkonzentration (möglicherweise durch die Belastung der Luft mit feinen Partikeln) gekommen ist.“

Mit Niedrigenergie- und Passivhäusern haben wir relativ wenig Erfahrungen – bisher wurden von uns in rund 10 Häusern Ionen-Messungen durchgeführt. Dabei zeigten sich immer Abweichungen von den natürlichen Bedingungen. Die Zahl der Ionen war verringert, und das Verhältnis zwischen positiven und negativen gestört (es fanden sich nur sehr wenig negative Ionen).

Von einem Einsatz von Ionisatoren in Passivhäusern würde ich abraten, da dabei unphysiologisch hohe Ionendichten entstehen.“ Wolfgang Maes, Baubiologe, BRD im Interview 2004.

„Mir sind keine Bestimmungen von negativen Luftionen in Passivhäusern bekannt. An sich besitzen wir aber für solche Messungen die entsprechenden Instrumente und könnten Ionen-Analysen durchführen. Generell ist es denkbar, dass es durch elektrostatisch aktive Lüftungen zu einer deutlichen Verminderung der negativen Ionen im Innenraum kommt. Dem könnte durch die Verwendung entsprechender Materialien (Vermeiden von Kunststoffrohren) und Erdungskonzepte vorgebeugt werden.“, Prof. Dr. Maximilian Moser, Leiter des Institutes für nichtinvasive Diagnostik des Joanneum Research, Graz, im Interview 2004.

In baubiologischen Kreisen werden Lüftungsanlagen kritisch betrachtet, da befürchtet wird, dass diese einen negativen Einfluss auf die Luftionenkonzentration hätten. Exemplarische Messungen an Lüftungsanlagen in Passivhäusern ergaben, dass die Anlage die Luftionenkonzentration nicht verändert. Sowohl die quantitative als auch die qualitative Ionen-Zusammensetzung der Raumluft unterschied sich in den untersuchten Passivhäusern nicht von der in konventionellen Häusern (Münzenberg und Thumulla 2002). Da nur wenige Objekte untersucht wurden und dies nur in einem kurzen Zeitraum nach Fertigstellung, stellt das Institut für Baubiologie + Ökologie Neubeuern (IBN) die Gültigkeit der Aussagen Münzenbergs in Frage. Das IBN warnt davor ohne statistisch belastbare Ergebnisse Schlüsse zu ziehen (IBN 2002): *„Durch die vorgestellten Ergebnisse verdichtet sich der Eindruck, dass durch Lüftungsanlagen keine negativen gesundheitlichen Auswirkungen zu erwarten sind bzw. dass die Vorteile sogar überwiegen.“*

9.2 Begriffsdefinition

Luftionen sind elektrische Ladungsträger, die laufend durch die beim Zerfall radioaktiver Elemente auftretenden ionisierenden α -, β - und γ -Strahlen sowie durch kurzwellige UV-Anteile des Sonnenlichts und elektrische Entladungen in Gewittern entstehen (Kröling 1991). Ihre Existenz ist seit dem Ende des 19. Jahrhunderts bekannt (Dolezalek 1985; Kröling 1985). Eine deutliche Erhöhung der Luftionisation war nach dem Reaktorunfall von Tschernobyl festzustellen.

Die Konzentration kleiner negativer Luftionen beträgt in Großstädten zwischen 100 und 800 Ionen/cm³, während sie im Wald bei etwa 700 bis 2000 Ionen/cm³ liegt (Moser 2004). Sehr hohe Ionendichten können in der Nähe von Wasserfällen gemessen werden. So wurden an den Krimmler Wasserfällen Werte bis zu 70 000 negative Ionen/cm³ gefunden (Moser 2004). Die Auswirkungen dieser hohen Konzentrationen auf Herzfrequenz, Herzfrequenzvariabilität, den vegetativen Tonus und weitere Parameter werden derzeit von Prof. Moser, Joanneum Research untersucht.

Ionisierte Luftmoleküle bilden rasch Cluster. Diese als Kleinionen bezeichneten Molekülverbände besitzen mit einer Ausbreitungsgeschwindigkeit von rund 2 cm/Sekunde eine recht hohe Beweglichkeit (Kröling 1991) und können wahrscheinlich mit der Atemluft aufgenommen werden (Bergsmann 1993).

Abhängig vom Grad der Luftverschmutzung treffen Kleinionen nach Sekunden bis Minuten auf größere Aerosolteilchen und geben ihre Ladung an diese ab. Hierdurch werden sie zu Großionen mit sehr geringer Beweglichkeit (Dolezalek 1985). Den Großionen wird geringe direkte Wirksamkeit zugeschrieben (Bergsmann 1993). Sie können aber Staubteilchen, etc. in die Atemwege transportieren (Fiedler 1995).

9.3 Gesundheitliche Auswirkungen

9.3.1 Allgemeines

Schon seit langer Zeit wird vermutet, dass Luftionen Wirkungen auf den menschlichen Organismus besitzen. Da die Ionenkonzentrationen stark von klimatischen/meteorologischen Faktoren abgänglich sind, nahmen zahlreiche Autoren einen kausalen Zusammenhang mit wetterbedingten Beschwerden und mit Befindensstörungen in geschlossenen Räumen an (Dessauer 1931, Kimura und Ashiba 1939, Sulman et al. 1976, Varga 1981, Finnegan et al. 1984, König 1986). In umbauten Räumen, speziell solchen mit Klimaanlage wurde über einen Mangel an negativen Ionen berichtet (Deleanu 1977, Fiedler 1995).

Die Polarität der Ionen spielt in der Diskussion über mögliche biologische Wirkungen von Luftionen eine bedeutende Rolle. Für viele Autoren gilt ein Überschuss an negativen Kleinionen als vorteilhaft für Befinden, Gesundheit, Leistungsfähigkeit und Luftqualität, während positive Ionen ungünstige Eigenschaften besitzen sollen (Eichmeier 1964, Jorde und Schata 1979, Varga 1981, König 1986, Fischer und Kobinger 1991, Moser 2004). Allerdings findet man in der Literatur auch Berichte über ungünstige Effekte eines Überschusses negativer Ionen etwa auf die Regulation von Kreislauf und Atmung (beim Zu- und Abschalten der Ionenquelle) (Friedmann und Haber 1982). Weiters soll auch das Verhältnis von positiven zu negativen Ladungsträgern von Bedeutung sein (Reiter 1985).

Im Rahmen des 12. Workshops „Lunge-Umwelt-Arbeitsmedizin“ befassten sich vor mehreren Jahren verschiedene Vorträge mit den Effekten von (negativen) Luftionen (publiziert in der Zeitschrift „Atemwegs- und Lungenkrankheiten“, 17. Jg., 1. Beiheft, 1991). Dabei wurde unter anderem auf die Bedeutung der vegetativen Ausgangslage der Versuchspersonen hingewiesen. Weiters stellte Fischer auf dem Workshop zusammenfassend fest, dass „ein künstliches Angebot von negativen Kleinionen in gegenüber der freien Natur erhöhten Konzentrationen eher vorteilhafte Wirkungen innerhalb der physiologischen Bandbreite auslöst“, vor allem im Sinne einer unspezifischen Aktivierung (Fischer und Kobinger 1991). Der Experte verwies dabei auch auf eigene Arbeiten wie z.B. eine Studie, die sich mit dem Einfluss künstlich erzeugter Luftionen auf die psychophysische Aktivität von Büroangestellten befasste (Skatsche et al. 1988).

Kröling (1991) verfasste für das genannte Beiheft einen längeren Übersichtsbeitrag, aus dem im Folgenden ausschnittsweise zitiert wird. Im Anschluss daran sollen auch einige Arbeiten der letzten Jahre kurz zusammengefasst werden. Es muss allerdings festgehalten werden, dass es relativ wenige neuere Publikationen zum Thema „Luftionisation“ gibt, die in anerkannten wissenschaftlichen Zeitschriften publiziert wurden. Dies könnte damit zusammenhängen, dass nach dem altersbedingten Ausscheiden von Forschern, die sich mit dem Problemkreis beschäftigt haben, aus dem Wissenschaftsbetrieb die Thematik nicht mehr bearbeitet wird.

„Kleinionen lassen sich relativ einfach künstlich erzeugen. Es ist daher verständlich, dass im Gefolge der in der Literatur diskutierten Hypothesen schon seit Jahrzehnten kommerzielle Ionisatoren zur Optimierung des „Elektroklimas“ angeboten werden. Sie beruhen alle auf dem Prinzip der Koronaentladung: Eine elektrische Hochspannung erzeugt an Nadelspitzen oder feinen Drähten extreme Feldstärken mit ionisierenden Eigenschaften. Ionisatoren werden häufig mit weiteren Vorrichtungen zur Verbesserung des Raumklimas kombiniert.“ (zit. nach Kröling 1991)

Nach Angaben in der Literatur, auf die sich Gerätehersteller häufig berufen, soll der Einsatz von Ionisatoren u.a. folgende Nutzeffekte haben (zit. nach Kröling 1991):

a) Primäre Ionenwirkungen:

- Verhinderung von Wetterfühligkeit
- Besserung von (angeblich) serotoninabhängigen Beschwerden wie z.B. Reizbarkeit, Kopfschmerzen, Schlaflosigkeit, Depression
- Optimierung der Konzentrations- und Leistungsfähigkeit

b) Sekundäre Ionenwirkungen:

- Keimverminderung der Luft
- Verringerung von Aerosolpartikeln und Allergenen (z.B. Pollenstaub)
- Besserung von (exogen-allergischem) Asthma, Hausstaub- und Pollenallergien

Laut Kröling wurden zahlreiche, in der früheren Literatur als günstig beschriebene primäre Effekte inzwischen widerlegt bzw. konnten auf Kofaktoren wie z.B. Ozon zurückgeführt werden. Hinzu komme, dass Ionisatoren keineswegs dazu geeignet sind, „natürliche“ luftelektrische Idealbedingungen zu schaffen, wie es von den Herstellern gerne behauptet werde. Schließlich betragen die künstlich erzeugten Konzentrationen etwa das 10 - 10 000-fache der natürlichen Ionenkonzentration. Entsprechend verschoben ist bei der apparativen, unipolaren Erzeugung von negativen Kleinionen das Konzentrationsverhältnis zwischen positiven und negativen Ionen. Folgte man der Ansicht mancher Autoren, die bereits geringen Abweichungen vom normalen Verhältnis eine biologische Bedeutung beimessen, so müsste die künstliche Raumluftionisation sogar als extrem unphysiologisch gelten (Kröling 1991).

9.3.2 Primäre Ionenwirkungen

Wirkungen über den Respirationstrakt: Über die Wirkungsweise von Luftionen existieren verschiedene Theorien (Fischer und Kobinger 1991; siehe auch das Interview mit Fischer weiter unten). Allerdings argumentiert Kröling (1991), dass die Ionenkonzentration in der Luft im Vergleich zu der Gesamtzahl von ca. 10^{19} Molekülen pro cm^3 Luft verschwindend klein und eine unmittelbare biologische Wirksamkeit von Luftionen, etwa in Form von biochemischer oder physikalischer Aktivität auf der Lungenoberfläche, sehr unwahrscheinlich sei.

Darüber hinaus weist er darauf hin, dass die mit einer Überschussladung behafteten Moleküle nicht als Ionen über die Schleimhäute des Respirationstraktes in die Blutbahn eindringen. Vielmehr geben sie ihre Ladung bereits bei oberflächlichem Kontakt sofort ab und werden zu normalen Luftmolekülen.

„In umbauten Räumen sinkt bei mangelnder Belüftung die Konzentration an Luftionen bis auf Null ab. Allerdings entstehen durch menschliche Aktivitäten wie Kochen und Heizen (offene Feuerstellen), Reibung an Sitzmöbeln und Fußböden und den Radongehalt der Raumluft vorwiegend positive Ionen, die negative Auswirkungen auf das Wohlbefinden haben. Warum sie diese Effekte entfalten, wissen wir nicht.

Generell ist jeder Raum als eigenes „Individuum“ anzusehen. Man kann aber davon ausgehen, dass in Räumen mit Lüftungs- bzw. Klimaanlage ein Mangel an negativen Ionen herrscht, der zu Müdigkeit, Konzentrationsstörungen und Kopfschmerzen führen kann. Durch einen Ionengenerator können diese Probleme bekämpft werden. Negative Ionen wirken eutonisierend und aktivierend, wie wir etwa in Untersuchungen an Kraftfahrern und Büroangestellten zeigen könnten. Sie erhöhen die Vigilanz. Auch bei Atemwegserkrankungen kam es zu einer Besserung. Im Tierversuch zeigten sich ebenfalls Effekte, man könnte sagen, die Tiere werden „selbstsicherer“. Zu erklären sind die Wirkungen wahrscheinlich dadurch, dass die Ladungen in Grenzflächen im Respirationstrakt eingebaut werden. Lungenrezeptoren werden erregt, und über die afferente Impulsleitung werden zentralnervöse Strukturen (Hypothalamus-Kerne) stimuliert.

Ich gehe davon aus, dass in Passivhäusern auf Grund der Lüftungsanlage praktisch keine negativen Kleinionen vorhanden sind (außer die Rohre sind aus Holz). Der Einsatz eines Ionengenerators ist daher durchaus zu empfehlen; dabei genügt ein kleiner Generator, also einer, der für 75 m^3 Luft ausgelegt ist.“ Em. Prof. Dr. Gerald Fischer, Hygiene-Institut der Medizinischen Universität Graz, im Interview 2004.

Von vielen Autoren wird ein Zusammenhang zwischen Befinden und (natürlicher) Ionenkonzentration für möglich gehalten (Dessauer 1931; Eichmeier 1964; Sulman et al. 1976; Varga 1981; König 1986). Laut Kröling können jedoch den meisten in Frage kommenden Wetterkonstellationen keine typischen Ionenkonzentrationen zugeordnet werden. Beispielsweise konnten umfangreiche Messungen im Alpengebiet den früher vermuteten Überhang von positiven Ionen bei Föhn nicht bestätigen (Reiter 1985). Darüber hinaus habe ein Zusammenhang zwischen Befindungsschwankungen und natürlichen Veränderungen des Ionenmilieus (Wetter und Innenraumklima) bisher nicht nachgewiesen werden können (Dirnagl 1985; Kröling 1991). Der als skeptisch geltende Kröling verwies auch auf verschiedene Untersuchungen mit (radioaktiven) Ionenquellen, in denen kein Einfluss auf den menschlichen Organismus gefunden wurde (Albrechtsen et al. 1978; Barron und Dreher 1964; Monaco und Acker 1963).

9.3.3 Sekundäre Ionenwirkungen

Als positive Wirkung wird das Abscheiden ionisierter Aerosole aus der Raumluft aufgrund der elektrischen Raumladung angeführt:

„Nach Einschalten eines Ionisators baut sich aufgrund des Überschusses unipolarer Ladungsträger innerhalb von Sekunden eine elektrische Raumladung von einigen kV/m Feldstärke auf. Bei anschließender Kontamination der Luft z.B. mit Zigarettenrauch steigt die Raumladung auf ca. 8 kV/m an, während die Konzentration von Kleinionen verschwindend gering wird. Der Grund für das Phänomen ist leicht verständlich: Die Kleinionen geben ihre Ladung rasch an die Rauchpartikel ab, die so zu Großionen werden. Da deren Beweglichkeit und damit der Ladungstransport zu geerdeten Flächen erheblich geringer ist, steigt der Gehalt an Raumladungen insgesamt an. Wenn nun im Zeitverlauf die elektrisch geladenen Aerosolpartikel an den geerdeten Flächen abgeschieden werden, fällt die Raumladung wieder ab, während sich die Kleinionenzahl entsprechend erholt.“ (zit. nach Kröling 1991)

Abscheidung ionisierter Aerosolpartikel: Schon mehrfach wurde in der Literatur über eine Verbesserung der Luftqualität durch künstliche Ionisation berichtet (Philipps et al. 1964; Wanner et al. 1975; Varga 1981). Keinen Effekt auf die Partikelkonzentration fanden hingegen Daniell et al. (1991).

„Ionengeneratoren reinigen die Luft die Luft und verringern den Transport von Großionen (und damit von partikulären Schadstoffen und Mikroorganismen) in die Atemwege. Großionen sind speziell bei Inversionwetterlagen in hoher Konzentration nachzuweisen und stellen eine wichtige Ursache für Erkältungskrankheiten dar. Ein Nachteil von Ionisatoren besteht darin, dass sie zu Schmutzflecken an der Wand führen.“

Ideal wäre eine Ionisierung der Luft mit Hilfe einer Deckenelektrode. Eine solche Einrichtung führte in einer Schule in Saarbrücken zu einer deutlichen Reduktion der Fehlzeiten.“ (zit. nach Em. Prof. Dr. Gerald Fischer, Hygiene-Institut der Medizinischen Universität Graz, im Interview 2004).

9.3.4 Produktion von Ozon

Je nach Bauart und Wartung geben die handelsüblichen Ionisatoren aufgrund des Koronaentladungsprinzips auch gewisse Mengen an Ozon ab. Beim Betrieb von Ionisatoren kommt es zu einer „Außenwahrnehmung“, und auch sogenannter „Ozongeruch“ wird wahrgenommen. Hier stellt sich u.a. die Frage, ob es sich bei dem bei Betrieb von Ionisatoren wahrgenommenen Geruch tatsächlich um Ozon handelt, bzw. warum man im Sommer im Freien die deutlich höheren Ozonkonzentrationen in der Regel nicht wahrnimmt. In der Fachliteratur finden sich jedenfalls große Diskrepanzen über den Geruch von Ozon und die Geruchsschwelle; darüber hinaus existiert sogar die Hypothese, dass Ozon geruchlos ist und Reaktionsprodukte für die Geruchswahrnehmungen verantwortlich sind (Wagner und Höppe 1998).

Kröling verweist darauf, dass Ozon in niedrigen Konzentrationen unangenehme Gerüche abbaut und „wesentlich zum Außenecharakter eines Luftkörpers beiträgt“. Dies könnte seiner Ansicht nach ein Schlüssel zum Verständnis für die seit vielen Jahrzehnten ungebrochene Beliebtheit von Ionisatoren sein (Kröling 1991). Weiters besitze einer alten klimatologischen Erfahrung entsprechend eine „Außene“ (und damit leicht ozonhaltige) Luft subjektiv eine bessere Atembarkeit. Dieser subjektive Eindruck habe möglicherweise auch ein messbares physiologisches Korrelat in Form einer verbesserten O₂-Aufnahme (Kröling 1991).

„Ich habe meinen Ausführungen in „Atemwegs- und Lungenkrankheiten“ (die in diesem Bericht auszugsweise zitiert werden) eigentlich nichts hinzuzufügen. Die negativen Ionen haben für den menschlichen Organismus keine Relevanz. In Innenräumen kann es übrigens sehr leicht zu einer Abnahme der Konzentration an negativen Ionen kommen: Es genügt, wenn zwei Zigaretten geraucht werden.“

Die Beliebtheit von Ionisatoren dürfte damit zusammenhängen, dass sie Ozon produzieren und auf diese Weise desodorierend wirken.“ Prof. Dr. Peter Kröling, Institut für Medizinische Balneologie und Klimatologie der Ludwig-Maximilian-Universität München, im Interview 2004.

9.3.5 Wirkungen von negativen Luftionen

Studien der letzten Jahre fanden u.a. folgende Wirkungen von negativen Ionen: Verminderung des Stresses bei Arbeiten am Computer (Nakane et al. 2002), antidepressive Wirkung bei Patienten mit Herbst-Winter-Depression (allerdings nur in Konzentrationen von $2,7 \times 10^{-6}/\text{cm}^3$) (Terman et al. 1998), Verstärkung der Effekte einer Sauna (Watanabe et al. 1997), niedrigerer diastolischer Blutdruck in der Erholungsphase nach einer Ergometrie (Ryushi et al. 1998), Abschwächung der tageszeitlichen Schwankungen der Körpertemperatur (Reilly und Stevenson 1993). Hingegen ergab eine Metaanalyse, die sich auf 6 Studien stützte, dass Luftionisationsgeräte Asthmatikern keinen Nutzen bringen (Blackhall et al. 2003). Im Rahmen der Literaturrecherche fiel weiters auf, dass sich speziell in russischen Zeitschriften etliche Artikel über die Effekte von negativen Ionen finden (z.B. Temnov et al. 2000, Livanova et al. 1998 und 1999, Stavrovskaja et al. 1998). Die Qualität der Arbeiten kann aber auf Grund der Sprachbarriere nicht beurteilt werden.

Insgesamt erscheint es denkbar, dass negative Luftionen (zumindest in hohen Konzentrationen) Wirkungen auf den menschlichen Organismus ausüben können.

9.4 Richt- und Orientierungswerte

Für die Konzentration an Luftionen sind keine allgemein anerkannten Richt- und Orientierungswerte bekannt. Vielfach wird darauf hingewiesen, dass in Innenräumen die gleiche Ionenkonzentration anzustreben ist, wie in der umgebenden Außenluft (Münzenberg und Thumulla 2002).

9.5 Veränderung der Luftionisation durch Rohrleitungen

Es ist bekannt, dass in Innenräumen die Zusammensetzung des Ionenmusters stark von der Außenluft abweicht. Lange Rohrleitungen und technische Einbauten wie Luftfilter sollen die Situation zusätzlich verschlechtern und dadurch einen negativen Einfluss auf die Raumnutzer haben. Diese Meinung wird vor allem seitens der entsprechenden Geräte zur Ionenproduktion vertreibenden Firmen vertreten, sie lässt sich wissenschaftlich jedoch nicht durch entsprechende Studien belegen. Es stellt sich die Frage, ob sich Situationen mit lüftungstechnischen Anlagen (speziell kontrollierten Wohnraumbelüftungsanlagen) von Situationen mit rein natürlicher Belüftung unterscheiden und welche möglichen gesundheitlichen Konsequenzen eine technische Ionenquelle im Raum haben kann.

Generell existiert keine übereinstimmende Expertenmeinung darüber, ob sich Situationen mit kontrollierten Wohnraumbelüftungsanlagen überhaupt von Situationen mit rein natürlicher Belüftung unterscheiden und, wenn diese Frage mit „ja“ zu beantworten ist, welche möglichen gesundheitlichen Konsequenzen daraus resultieren würden. Eine Pilotstudie, die allerdings nur in einigen Passivhäusern durchgeführt wurde, konnte keine Unterschiede in der Ionenkonzentration gegenüber üblicherweise in natürlich belüfteten Räumen gemessenen Konzentrationen ausmachen (Schulze-Darup 2002).

10 SENSOREN IN LÜFTUNGSTECHNISCHEN ANLAGEN

10.1 Allgemeines

Der Einsatz von Sensoren dient vor allem zur Steuerung lüftungstechnischer Anlagen sowie zur Anzeige zu hoher Schadstoffkonzentrationen. Als Parameter zur Erfassung anthropogener Raumluftverunreinigungen in Wohn- und Schlafräume, in denen keine außergewöhnlichen Tätigkeiten stattfinden, eignet sich am ehesten die Konzentration an CO₂. Hochwertige Sensoren für CO₂ auf Infrarotbasis sind schon seit längerem am Markt und weisen eine geringe Querempfindlichkeit gegenüber anderen Luftverunreinigungen auf.

Andere Ansätze vertreten die Meinung, dass auch Schadstoffe aus Bauprodukten und Materialien der Innenausstattung mittels Sensoren erfasst werden sollten. Diese Forderung ist prinzipiell sinnvoll, auf Grund der Vielfalt von potentiellen Emittenten ist die Erfassung und Umrechnung in einen resultierenden Anzeigewert aber mit größten Schwierigkeiten verbunden.

In jüngster Zeit wurden umfangreiche Bestrebungen zur Entwicklung eines Gassensors gemacht, der die Belastungssituation der Menschen unter Berücksichtigung seiner spezifischen Empfindlichkeit auf meist spezielle Substanzen am besten widerspiegeln soll (Llamas et al. 2004). Ein derartiger Sensor ist jedoch praktisch nicht zu verwirklichen, da sich neben der Vielzahl möglicher Verbindungen strukturell ähnliche Substanzen, die sich mit einfachen Messmethoden praktisch nicht unterscheiden lassen, in ihrer gesundheitlichen Wirkung auf den Menschen stark differieren können. Beispiele dafür findet man innerhalb einer chemischen Klasse wie z.B. der aromatischen Kohlenwasserstoffe (Vergleich Benzol – krebserzeugende Wirkung und Toluol) oder der Klasse der polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK) – siehe Anhang.

Relativ einfach aufgebaute Luftfeuchtesensoren bieten nur eine beschränkte Aussagekraft, da die Luftfeuchte von zahlreichen Faktoren wie der Luftfeuchte außen, den Feuchtequellen im Raum oder auch der Raumtemperatur beeinflusst wird; Faktoren die von den eigentlich zu erfassenden Schadstoffen unabhängig sind.

10.2 Einsatz von Sensoren zur Steuerung von Lüftungsanlagen

Dem Einsatz von Sensoren zur Steuerung von Lüftungsanlagen sind vor allem finanzielle Grenzen gesetzt. Technisch ist es jederzeit möglich, auch in kleineren lüftungstechnischen Anlagen eine Steuerung der Lüftungsanlage mittels Sensoren vorzusehen. Es kommen dabei vor allem Sensoren für CO₂ (z.B. Honeywell 2005) und Sensoren zur Messung der Luftfeuchtigkeit (z.B. Schiedel 2004) zum Einsatz.

Bei Überschreitung bestimmter Werte kann entweder raumbezogen oder zentral der Luftvolumenstrom verändert werden. Dem Einsatz von CO₂-Sensoren stehen in der Praxis in der Hauptsache ökonomische Argumente entgegen. In kleineren lüftungstechnischen Anlagen würde der Aufwand für die Sensoren und die Steuerung im Verhältnis zu den anderen Anlagenteilen unverhältnismäßig hohe Kosten verursachen, weiters ist der Aufwand für Wartung und Kalibrierung von CO₂-Sensoren zu berücksichtigen.

Die Entwicklung bei kleineren Anlagen geht daher eher in die Richtung einfach zu installierender und wartungsfreier Sensoren wie Luftfeuchtesensoren.

10.3 Einsatz von Sensoren zur Sichtbarmachung schädlicher Schadstoffkonzentrationen

Sensoren zur Sichtbarmachung schädlicher Schadstoffkonzentrationen können unterschiedliche Aufgaben haben, die Sichtbarmachung von anthropogenen Emissionen und die Sichtbarmachung von Emissionen aus Bauprodukten und Materialien der Innenausstattung.

Eine deutsche Arbeitsgruppe beschäftigte sich in den letzten Jahren mit den Einsatzmöglichkeiten und -hemmnissen eines derartigen Anzeigegeräts (Kopiske 2004). Dieses Gerät wurde auch umfassend praktisch erprobt. Schwierigkeiten ergaben sich durch das eher unspezifische Ansprechen des Sensors auf diverses Luftinhaltsstoffe, die nicht zwangsläufig ein gesundheitliches Risiko für den Menschen darstellen (Llamas et al. 2004). Ein gravierender Nachteil des Gerätes ist, dass CO₂ auf das Sensorsignal keinen Einfluss hat.

Eine Neuentwicklung aus Österreich, mit „Lüftungsampel“ bezeichnet, setzt einen hochwertigen CO₂-Sensor zur Konzentrationsmessung ein (Bico 2005) und dient zur Sichtbarmachung anthropogener Emissionen. Das Gerät hat eine gut sichtbare Anzeige der aktuellen Konzentration an CO₂ und informiert zusätzlich mittels Signallämpchen selbsterklärend über die Notwendigkeit des Lüftens, ähnlich einer Verkehrsampel. Grünes Licht bedeutet „Gute Luft“, gelb zeigt an, dass eine verstärkte Lüftung wünschenswert wäre und rotes Licht signalisiert die sofortige Notwendigkeit einer verstärkten Luftzufuhr (z.B. Fenster öffnen). Die Ansprechschwellen können vom Nutzer selbst eingestellt werden, die CO₂-Werte können auch aufgezeichnet werden. Auf Grund der Anzeige kann der Nutzer gegebenenfalls die Leistung der Lüftungsanlage verändern. Dieser Sensor, der ursprünglich für Schul- und Vortragsräume konzipiert wurde, würde sich, etwas adaptiert, auch für den Einsatz in Wohnräumen eignen.



Abbildung 19: Lüftungsampel

11 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND EMPFEHLUNGEN

11.1 Gebäude ohne Lüftungstechnische Anlagen nach energetischer Sanierung

11.1.1 Allgemeines

Der in Gebäuden ohne Lüftungstechnische Anlagen nach energetischer Sanierung (relevant ist hier die Fenstersanierung) gegenüber dem ursprünglichen Zustand anzutreffende geringere Luftwechsel führt zu einer Erhöhung der Schadstoffkonzentration, der Konzentration biogener Luftverunreinigungen sowie zum Ansteigen der relativen Luftfeuchte aus dem Innenbereich in den betreffenden Räumen. Diese Erhöhung kann zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen, Komfortverlust und Schäden am Bauwerk führen.

Wichtig ist es hier, auf die komplexen Zusammenhänge zwischen Schadstoffproduktion, Luftfeuchtigkeit, Belegung und Raumvolumen hinzuweisen. Der Luftwechsel alleine durch Fugen, Risse oder Bauteilanschlüsse ist in der Regel nicht geeignet, Schadstoffe in hohem Ausmaß abzuführen. Unter bestimmten Gegebenheiten wie geringer Schadstoffproduktion, geringer Belegungsdichte und hohen verfügbaren Raumvolumina kann jedoch auch dieser geringe Luftwechsel ausreichen.

Der Schadstoff- und Feuchtetransport durch massive Mauern („atmendes Gebäude“) ist entgegen weit verbreiteter Ansicht von der Größenordnung her auch bei dampfdiffusionsfähigen Wandkonstruktionen zu vernachlässigen.

11.1.2 Möglichkeiten und Grenzen der verstärkten individuellen Fensterlüftung

Dem Effekt der Verringerung des Grundluftwechsels kann zum Teil durch ein verändertes Wohnverhalten entgegengesteuert werden (mehr Lüften), häufig wird das Stoßlüften als Möglichkeit genannt (Energie Tirol 2001), um hygienisch ausreichende Luftmengen mit geringem Energieverlust zuzuführen.

Bei natürlich belüfteten Gebäuden sind unterschiedliche Lüftungsstrategien denkbar. Konsequent durchgeführte Stoßlüftung hat gegenüber anderen Lüftungsstrategien (z.B. permanent gekippte Fenster) gewisse Vorteile, da sich das relative Verhältnis des schadstoffäquivalenten zum energieäquivalenten Luftwechsel verändert.

Bei natürlich belüfteten Gebäuden und gekippten Fenstern liegt der schadstoffäquivalente deutlich unter dem energieäquivalenten Luftwechsel. Bei Stoßlüftung verbessert sich das Verhältnis etwas, beide Luftwechsel liegen in etwa dem gleichen, in Hinblick auf hygienische Notwendigkeiten absolut betrachtet jedoch immer noch niedrigen Bereich (siehe Kapitel 4.3).

Dem verstärkten Lüften sind vor allem in den Nachtstunden und im Nahbereich von Lärmemittanten enge Grenzen gesetzt. (siehe Kapitel 4.3).

11.1.3 Möglichkeiten der Erhöhung des Luftwechsels

Als Möglichkeiten zur Erhöhung des Luftwechsels werden in der Praxis der permanente Betrieb von Abluftventilatoren und die forcierte Spaltlüftung genannt. Mitunter wird sogar empfohlen, die Dichtigkeit der Fensterfugen zu verringern oder gar Teile dieser zu entfernen. All diese Möglichkeiten sind mit Energieverlusten verbunden, die jedoch ohne eine geeignete Form der Wärmerückgewinnung nicht vermieden werden können. Auch hier sind die tatsächlich

ausgetauschten Luftmengen nicht kalkulierbar. Es besteht die Gefahr der Überlüftung oder zu geringen Lüftung, abhängig von den jeweilig sich oft kurzfristig ändernden Wetterbedingungen im Außenbereich.

Eine Möglichkeit zur Erhöhung der personenbezogenen Außenluftmenge ist das Öffnen der Innentüren vor allem im Schlafbereich bzw. die Herstellung von Überströmöffnungen zwischen den Zimmern. Es ist davon auszugehen, dass bei geringem Luftwechsel und geöffneten Innentüren eine langsame Durchmischung der Innenraumlufte stattfindet (Schnieders 2003a), dies bedeutet, dass sich anthropogene Luftverunreinigungen verdünnen und sich der Zeitraum bis zum Erreichen kritischer Konzentrationen erhöht.

Der permanente Betrieb von kleinen Abluftventilatoren in WC oder Küchenbereich wird mitunter als Maßnahme zur Erhöhung des Luftwechsels eingesetzt. Diese Maßnahme ist jedoch mit Energieverlusten verbunden und setzt weiters die Bereitstellung von ausreichend zugeführten Außenluftmengen voraus, um den Effekt der Unterdruckbildung in der Wohnung bei völlig geschlossenen Fenstern und Türen und in der Folge u.a. Ansaugung der Luft aus anderen Bereichen des Gebäudes (interzonaler Massentransfer) zu vermeiden (Tappler und Damberger 1996).

11.1.4 Vermeidung von Schadstoffquellen

Wichtig erscheint bei natürlich belüfteten Gebäuden die konsequente Vermeidung von Schadstoffen in den entsprechenden Räumen, die bei niedrigem Luftwechsel wesentlich stärker zum Tragen kommen.

Durch menschliche Aktivitäten entstehende Schadstoffe wie z.B. Kochdünste sollten an der Quelle mittels einer eigenen Absaugvorrichtung erfasst werden, schadstoffintensive Tätigkeiten (z.B. Rauchen, bestimmte Hobby- und Bastelarbeiten) sollten komplett aus der Wohnung ausgelagert werden.

11.1.5 Fazit und Empfehlungen

Die natürlichen Lüftung als Möglichkeit der Zufuhr hygienisch ausreichender Luftmengen in energieoptimierten Gebäuden erscheint insgesamt betrachtet in den meisten Fällen (vor allem bei niedrigen Außenlufttemperaturen oder Lärmquellen im Außenbereich) ungeeignet zu sein.

Im Einzelfall – bei sehr geringer Belegung der Räumlichkeiten, geöffneten Innentüren und nicht zu hoher Feuchtigkeitsproduktion – ist eine befriedigende raumlufthygienische Situation nicht ausgeschlossen. Die einfache Argumentation, dass dichte Fenster automatisch zu innenraum-lufthygienischen Problemen führen, ist daher nicht generell aufrecht zu erhalten.

Der Einsatz von Sensoren zur Anzeige schädlicher Schadstoffkonzentrationen ist in Schlaf- und Aufenthaltsräumen vor allem nach energetischen Sanierungen empfehlenswert, da diese Sensoren dem Nutzer helfen, sich mit den neuen Gegebenheiten (in der Regel geringerer Luftwechsel) vertraut zu machen. Als zu messender Parameter für Wohnräume, in denen keine außergewöhnlichen Tätigkeiten stattfinden sowie für Schlafräume eignet sich die Konzentration an CO₂.

Im Zuge der Sanierungstätigkeiten sollte in jedem Fall der Einbau einer Lüftungstechnischen Anlage ins Auge gefasst werden.

11.2 Gebäude mit Lüftungstechnischen Anlagen

11.2.1 Luftverunreinigungen aus dem Innenbereich

Der durch Einbau einer Lüftungstechnischen Anlage erreichte erhöhte Luftwechsel, der einen verstärkten Abtransport von Luftverunreinigungen bewirkt, hat einen starken Einfluss auf die sich einstellende Konzentration an Luftverunreinigungen.

In der Phase des Normalbetriebes Lüftungstechnischer Anlagen bewirkt der hohe Luftwechsel eine verstärkte Abfuhr von permanent und intermittierend auftretenden Stoffen, die von der Tätigkeit bzw. Anwesenheit des Menschen herrühren (anthropogene Luftverunreinigungen, Tabakrauch, Bakterien, Kochdünste, flüchtige Stoffe aus Bastel- und Hobbytätigkeiten sowie Reinigungsarbeiten, etc.). Dies wirkt sich vor allem in Situationen aus, in denen eine höhere Belegung der Räume gegeben ist. Dies sind Situationen im Winter mit einer größeren Zahl von Gästen (gegebenenfalls Raucher) und die Schlafsituation mit geschlossenen Fenstern und Türen des Schlafrumes. Zusätzlich werden durch den Betrieb Lüftungstechnischer Anlagen Schadstoffe aus Baustoffen und Materialien der Inneneinrichtung verstärkt abgeführt.

11.2.2 Luftverunreinigungen aus dem Außenbereich

Abhängig von der Wahl und dem Zustand der Luftfilter kommt es bei kontrollierten Wohnraumbelüftungsanlagen zu einer signifikanten Absenkung von aus dem Außenbereich stammenden, partikelförmiger Luftverunreinigungen.

Bei Abluftanlagen ohne Filterung der Außenluft kann es auch zu einer Erhöhung der Konzentration von aus dem Außenbereich stammenden Luftverunreinigungen gegenüber Situationen ohne Lüftungstechnische Anlagen kommen.

11.2.3 Fazit und Empfehlungen

In allen Situationen, in denen eine starke Reduktion der aus dem Außen- oder Innenbereich stammenden Schadstoffe notwendig erscheint, führt die Installation einer Lüftungstechnischen Anlage bei fachgerechtem Betrieb zu dem erwünschten Effekt. Eine fachgerechte Planung und Installation der Anlage sowie eine regelmäßige Wartung, technische Funktionskontrolle und Hygieneüberwachung ist allerdings Voraussetzung für einen Erfolg dieser Maßnahme.

Zu beachten ist, dass der durch eine Lüftungstechnische Anlage erreichte Effekt in bestimmten Situationen nicht ausreicht, in diesen Fällen muss eine hinreichende Schadstoffreduktion durch andere Maßnahmen erreicht werden.

11.3 Verringerung von Keimen und Allergenen

11.3.1 Verringerung von Allergenen aus dem Außenbereich

Für Allergiker wirkt sich die durch Einbau von kontrollierten Wohnraumbelüftungsanlagen mit entsprechend hochwertigen Filtertypen bewirkte Verringerung von Allergenen aus dem Außenbereich (wie z.B. Pollen) gesundheitlich sehr günstig aus. Die Reduktion der Allergenexposition stellt eine sekundäre Präventionsmaßnahme dar, die bei bereits bestehender Erkrankung und Diagnosestellung positiv ist – das Auftreten von neuerlichen Symptomen wird reduziert, eine dauerhafte Schädigung innerer Organe wird verhindert.

Es ist in diesem Zusammenhang darauf zu achten, dass spezielle Filtertypen eingesetzt werden, um eine für die jeweilige Anforderung optimale Filterung der Außenluft zu bewirken (siehe Kapitel 10.4.4).

11.3.2 Verringerung von Allergenen aus dem Innenbereich

Der Einbau einer Lüftungstechnischen Anlage mit erhöhtem Luftwechsel gegenüber natürlich belüfteten Gebäuden bringt eine bessere Durchspülung der Räume und damit eine Verringerung luftgetragener, im Innenraum produzierter Allergene mit sich, was sich für den Allergiker gesundheitlich günstig auswirkt. Zusätzlich wird durch die niedrige Luftfeuchtigkeit im Winter das Milbenwachstum deutlich eingeschränkt, was nachgewiesenermaßen zu einer Besserung von Symptomen bei Hausstaubmilben-Allergikern führt.

Wie auch für Allergene aus dem Außenbereich ausgeführt, stellt die Reduktion der Allergenexposition eine sekundäre Präventionsmaßnahme dar, die bei bereits bestehender Erkrankung und Diagnosestellung positiv ist. Ähnliches gilt sinngemäß auch für Personen, bei denen vermutet wird, dass sie auf andere biogene Luftverunreinigungen (wie z.B. Endotoxine) empfindlich reagieren.

11.3.3 Hygiene Hypothese

Die Hygiene-Hypothese (siehe die ausführliche Darstellung in Kap. 5) ist ein interessanter Ansatz und wird vielleicht in naher Zukunft dazu führen, dass eine Art „Impfung“ gegen Allergie entwickelt werden kann. Eine generelle Empfehlung, verunreinigte Luft zu atmen oder bewusst unhygienische Verhältnisse zu suchen, darf jedoch daraus nicht abgeleitet werden.

Eine Filterung der Zuluft bei mechanischer Belüftung, die ja zu einer wesentlichen Reduktion der Keime in der Innenraumlufte in der Zuluft führt, führt mit großer Wahrscheinlichkeit nicht zu einer Beeinflussung der Allergikerrate, da die in der Wohnung befindlichen Menschen (und Haustiere) wichtige Keimquellen darstellen und da für das Training des unreifen Immunsystems wahrscheinlich andere Expositionsquellen eine wesentlich wichtigere Rolle spielen als die Einatmung von Außenluftkeimen.

Der Luftweg hat für den alltäglichen Kontakt mit Umweltkeimen sowie auch für die „Stille Feiung“ vor Infektionserregern (Immunität durch stumme Auseinandersetzung) nur eine untergeordnete Bedeutung.

11.4 Luftverunreinigungen aufgrund schlecht geplanter oder gewarteter Lüftungstechnischer Anlagen

11.4.1 Außenluftansaugung

Die Anordnung des Außenluftdurchlasses hat einen wesentlichen Einfluss auf die Qualität der Zuluft bei Lüftungstechnischen Anlagen. Die Außenluftansaugung hat eine gewisse Höhe über Erdniveau nicht zu unterschreiten und hat, wenn möglich, nicht von der Straßenseite her zu erfolgen. In der VDI 6022-1 (2005) werden 3 m angegeben, was jedoch in der Praxis bei kleineren Anlagen zu Problemen führen kann. Bei hoher Schneelage oder starkem Wind wäre jedoch bei geringen Höhen ein verstärkter Eintrag von Feuchtigkeit bzw. Staub zu erwarten. Eine Anordnung nur wenige Zentimeter über Grund oder die unmittelbare Nähe von Vegetation sollte in jedem Fall vermieden werden.

Es sollte ein gewisser Abstand zu Fortluftauslässen bestehen, um einen Lüftungskurzschluss zu vermeiden. Von Greml et al. (2004) wird ein Mindestabstand von 3 m oder eine geeignete Maßnahme zur Kurzschlussvermeidung wie eine Trennmauer oder die Anordnung auf der anderen Hausseite angegeben, von der VDI 6022-1 ein Mindestabstand von 10 m (die VDI 6022-1 bezieht sich allerdings auf meist größere raumlufttechnische Anlagen für Büros- und Versammlungsräume). Hier wird bei Lüftungstechnischen Anlagen für Wohnungen ein geringerer Abstand als ausreichend erachtet, da geringere Luftmengen transportiert werden, ein Lüftungskurzschluss muss jedoch auch hier sicher verhindert werden.

Der Außenluftdurchlass hat einen wirksamen Regen- und Schneeschutz sowie einen Schutz gegen Vögel und Insekten aufzuweisen.

Die weiteren detaillierten Vorgaben in Kapitel 4.2 der ÖNORM H 6021 und in Kapitel 4.3.1 der VDI 6022-1 sind sinngemäß einzuhalten.

11.4.2 Luft-Erdwärmetauscher

Eine Vorfilterung der Außenluftansaugung vor dem gegebenenfalls vorhandenen Luft-Erdwärmetauscher (LEWT) sollte erfolgen. Von Greml et al. (2004) wird als Filterqualität vor einem LEWT mindestens F5 nach ÖNORM EN 779 angegeben, von Pfluger (2003) F7, besser F8. Der Einbau des Filters muss so erfolgen, dass Falschluff, die durch eine nicht fachgerechte Abdichtung zwischen Filtereinsatz und dem Luftfilterrahmen entstehen kann, dauerhaft vermieden wird.

Es muss im LEWT die Möglichkeit bestehen, Kondensat rasch und vollständig abzuleiten. Es ist durch ein durchgehendes Gefälle von mehreren Prozent im LEWT dafür zu sorgen, dass keine persistenten Feuchteansammlungen im Kanal entstehen können. Von Pfluger (2003) werden 1 % als Mindestmaß (bei flexiblen Rohren wesentlich mehr) angegeben. Eine Anbindung an das Abwassernetz ist laut ÖNORM H 6021 nicht zulässig, es wird die Ausführung eines doppelten Siphons empfohlen (Pfluger 2003).

Zusätzlich zu der Forderung, dass der Gehalt der Zuluft an Stäuben und biogenen Luftverunreinigungen denjenigen der Außenluft vor Ort in keiner Kategorie überschreiten darf wird gefordert, dass es im LEWT zu keiner relevanten Anreicherung dieser Noxen kommt. Diese Situation wäre beispielsweise dann gegeben, wenn z.B. durch einen Außenluftfilter die Konzentration der Außenluftkeime verringert wird und im Erdreichwärmetauscher oder danach wieder Quellen von Stäuben oder biogenen Luftverunreinigungen vorhanden wären, welche die durch den Filter bei der Außenluftansaugung gereinigte Luft erneut verunreinigen.

Der hygienisch zu fordernde Zustand des LEWT ist bei der Planung durch die Berücksichtigung einer Möglichkeit der einfachen Reinigung sowie im Betrieb durch eine regelmäßige jährliche Inspektion (die auch von der ÖNORM H 6021 gefordert wird) zu gewährleisten. Die Struktur des Kanals des LEWT ist dabei von entscheidender Bedeutung für eine mögliche Anreicherung von Stäuben. Die Rohre sollten glattwandig und in keinem Fall gerippt ausgeführt sein.

Auf den Problemkreis „Radoneintritt in LEWT“ wird in Kapitel 11.5 gesondert eingegangen.

11.4.3 Luftfilter

ÖNORM H 6038 schreibt für kontrollierte Wohnraumbelüftungsanlagen zuluftseitig die Filterklasse F 6 vor. In einer österreichischen Arbeit über kontrollierte Wohnraumbelüftungsanlagen wird gefordert, dass die Anlage saugseitig mindestens mit einem Filter der Filterqualität F6 nach DIN EN 779 (entspricht ÖNORM EN 779) im Zuluftstrang ausgestattet sein sollte. Zusätzlich wird ein Vorfilter mit G3 bzw. G4 als wünschenswert betrachtet (Greml et al. 2004).

Die ÖNORM H 6021 (2003) geht über diese Forderungen hinaus und fordert mindestens zwei Feinstaubfilterstufen (1. Stufe saugseitig – mindestens F7 nach ÖNORM EN 779, 2. Stufe druckseitig – mindestens F8). Die VDI 6022-1 (2005) fordert für die 2. Feinfilterstufe nach dem Lüftungsgerät mindestens die Filterqualität F7 nach DIN EN 779 (entspricht ÖNORM EN 779) und empfiehlt die Filterqualität F9.

Kondensation am Außenluftfilter kann theoretisch durch den Einbau einer geeigneten Möglichkeit der Vorerwärmung der Außenluft erreicht werden. Damit würde die relative Luftfeuchtigkeit an diesem kritischen Punkt der Anlage verhindert. Ein Vorheizregister würde allerdings viel Energie verbrauchen und müsste wiederum durch einen Filter geschützt werden, eine Vorerwärmung der Außenluft wird daher in der Praxis selten bis gar nicht durchgeführt.

Auf Grund der möglichen Abgabe von Endotoxinen von Filtern der ersten Filterstufe nach Standzeiten von mehr als einem Jahr ist ein zumindest ein jährlicher Filterwechsel zu fordern. Weiters sollte eine automatische Anzeige vorhanden sein, die den notwendigen Filterwechsel anzeigt. Zur Erhöhung der Aufmerksamkeit des Nutzers ist eine Anzeige über ein optisches Signal (z.B. rote Kontrolllampe) empfehlenswert.

Die weiteren detaillierten Vorgaben in Kapitel 4.3 und im normativen Anhang der ÖNORM H 6021 sowie die Forderungen in Kapitel 4.3.3 der VDI 6022-1 sind sinngemäß einzuhalten.

11.4.4 Luftleitungsnetz und Lüftungs-Zentralgerät

11.4.4.1 Vermeidung von Staubablagerungen

Im Luftleitungsnetz von Lüftungstechnischen Anlagen können an mehreren Punkten infolge undichter oder schlecht eingebauter Filter Staubablagerungen auftreten. Es ist daher schon bei der Planung auf eine einfache Reinigungsmöglichkeit der Kanäle zu achten (siehe unten). Weiters empfiehlt sich die Verwendung glattwandiger Rohre (Wickelfalzrohr, Kunststoffrohr) und die Vermeidung von flexiblen Schläuchen mit hohem Druckverlust wie Aluflexrohre oder Kunststoffdrahtschläuchen (Greml et al. 2004). Schalldämpfer mit zur strömenden Luft hin offenen Glaswolleelementen sollten ebenfalls vermieden werden. Ein wichtiger Punkt ist jedoch schon im Vorfeld die Vermeidung des Eintritts von Luftverunreinigungen in das Luftleitungsnetz durch entsprechend hohe Filterklassen (siehe Kap. 10.4.3).

Das Lüftungs-Zentralgerät ist grundsätzlich durch ein frontständiges Filter vor Verunreinigung zu schützen. Das Zentralgerät sollte leicht zu reinigen sein. Zur Minderung der Verschmutzung sind zu kleine Lamellenabstände zu vermeiden, die Bautiefe ist so zu wählen, dass eine Reinigung bis auf den Kern möglich ist (Pflüger 2003).

Laut ÖNORM H 6021 sind alle Methoden für die Herstellung, Versteifung und Verbindung der Lüftungskanäle, welche Staubablagerungen begünstigen, Reinigungsmöglichkeiten erschweren oder gar unmöglich machen, zu vermeiden. Dazu werden unter anderem überlang in die Kanäle ragende Nieten, ungeschützte Dämmmatten oder bestimmte Materialien zur Dichtung genannt.

In der ÖNORM H 6021 wird weiters gefordert, dass die Montage der Lüftungsanlage nach Abschluss staubverursachender Tätigkeiten erfolgt. Die VDI 6022-1 empfiehlt auf Basis der Anforderungsstufen an Luftleitungen laut DIN EN V 12097 mindestens die mittlere Stufe, dies bedeutet den Schutz während der Lagerung, eine Reinigung auf der Baustelle und ein Verschließen der Luftleitungsöffnungen auf der Baustelle, jedoch weder Verpackung ab Werk noch Schutz während des Transports.

Die weiteren detaillierten Vorgaben in Kapitel 4.3 und im normativen Anhang der ÖNORM H 6021 sowie die Forderungen in Kapitel 4.3.8 der VDI 6022-1 sind sinngemäß einzuhalten.

11.4.4.2 Vermeidung von Kondensat

Es ist auf eine ausreichende Dämmung der kalten Luftleitungen im warmen Bereich zu achten, dies gilt auch für Wanddurchbrüche. Dies bedeutet laut Greml et al. (2004) eine Dämmung mit mindestens 30 mm feuchtebelastbarer Wärmedämmung ($\lambda = 0,04 \text{ W/m}^2\text{K}$). Abluftrohre von Bädern und anderen besonders feuchtebelasteten Räumen sollten mit einem Gefälle zum Lüftungsgerät verlegt werden bzw. sollten einen Kondensatstutzen am Fußpunkt der Sammelstränge aufweisen. Beim Lüftungsgerät sollte ein geeigneter Kondensatstutzen ohne Leckströmung und mit Geruchsverschluss zum Kanal hin bestehen (Greml et al. 2004).

Allgemein ist bei Geräten, die die zugeführte Luft kühlen, für einen geeigneten Kondensatablauf im Lüftungsgerät zu sorgen, das anfallende Kondensat muss unverzüglich abgeführt werden.

11.4.5 Reinhaltmanagement und sonstige Maßnahmen

Bei kontrollierten Wohnraumlüftungsanlagen ist ein effizientes Reinhaltmanagement zu implementieren. Dies beinhaltet Maßnahmen bei Planung, Montage und Betrieb der Anlage, die in der VDI 6022-1 umfassend und detailliert aufgeführt sind. Weiters sind die Nutzer nachweislich in den notwendigen hygienischen Maßnahmen zu schulen und schriftlich zu informieren, hier bietet sich eine Vorgangsweise laut VDI 6022-2 an. In der ÖNORM H 6021 werden als Inspektionsintervalle für Wärmeaustauscherflächen und Luftleitungen Intervalle von 12 Monaten genannt.

Sowohl in VDI 6022-1 als auch in ÖNORM H 6021 wird die nachträgliche Reinigungsmöglichkeit der Lüftungskanäle sowie Revisionsöffnungen gefordert. Das Luftleitungsnetz ist so zu planen und auszuführen, dass eine einfache Inspektion sämtlicher Anlagenteile sowie eine Reinigung ohne Demontage von Anlagenkomponenten möglich ist. Der Aufstellungsort des Lüftungsgerätes hat so zu erfolgen, dass ein Filterwechsel ohne jegliches Werkzeug, durchführbar von Laien, leicht möglich ist.

Die detaillierten Vorgaben in der ÖNORM H 6021 sowie die Forderungen der VDI 6022-1 in Bezug auf Kontrolle und Reinigung sind sinngemäß einzuhalten.

11.4.6 Fazit und Empfehlungen

Wie Untersuchungen gezeigt haben, können schlecht gewartete Lüftungstechnische Anlagen in zahlreichen Bereichen der Anlage zu einem hygienischen Risiko werden.

Der regelmäßigen Wartung, technischen Funktionskontrolle und Hygieneüberwachung kommt daher bei Lüftungstechnischen Anlagen ein großer Stellenwert zu. Lüftungstechnische Anlagen müssen in allen luftführenden Bereichen so gestaltet, betrieben und instand gehalten werden, dass eine zusätzliche Belastung durch schädliche Noxen vermieden und der Luftcharakter als geruchsneutral empfunden wird. Prinzipiell sind die detaillierten Vorgaben der ÖNORM H 6021 und der relevanten Teile der VDI 6022 in Bezug auf die einzelnen Anlagenteile bzw. die einzelnen Phasen Planung, Errichtung und Betrieb sinngemäß einzuhalten.

Die hygienerelevanten, an die Gegebenheiten von kleineren Lüftungstechnischen Anlagen angepassten Teile der ÖNORM H 6021 sollten in die ÖNORM H 6038 übernommen werden.

Wegen der hohen Bedeutung zur Vermeidung gesundheitlicher Schäden wird empfohlen, Pflichtprüfungen der Lüftungstechnischen Anlagen vorzuschreiben, die neben der Genehmigung und Abnahmeprüfung auch ähnlich der jährlichen Kaminprüfung durch den Rauchfangkehrer den richtigen Zustand der Lüftungsanlage sicherstellen.

11.4.7 Maßnahmen für die Planung und Ausführung von Lüftungstechnischen Anlagen in Wohnhäusern

11.4.7.1 Forschungsbedarf

Die notwendigen praktischen und organisatorischen Maßnahmen für die Planung und Ausführung von kontrollierten Wohnraumbelüftungsanlagen in Hinblick auf humantoxische Wirkungen wären aufgrund der vorliegenden Arbeit und der vorhandenen Literatur in Zusammenhang mit detaillierten technischen Ausführungsvorschlägen zu bestimmen und aufzulisten. Darüber hinaus sollten notwendige praktische und organisatorische Maßnahmen für ein effizientes Hygienemanagement von kontrollierten Wohnraumbelüftungsanlagen ermittelt werden. Zum Teil kann auf die Vorgaben der ÖNORM H 6021 sowie der VDI 6022-1 zurückgegriffen werden. Es soll ermittelt werden, welche Vorgaben dieser Regelwerke für kleinere Lüftungsanlagen sinnvoll anwendbar sind und welche spezifischen Anforderungen für kontrollierte Wohnraumbelüftungsanlagen neu gestellt werden müssen.

Die Einsatzmöglichkeit von Sensoren unterschiedlicher Type zur automatischen Regelung von kleineren Lüftungsanlagen sollte evaluiert werden.

11.4.7.2 Regelwerke

Eine stärkere Betonung hygienischer Parameter wäre bei der definitiven Erstellung der ÖNORM H 6038 (Regelwerk für Kontrollierte Wohnraumlüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung) wünschenswert. Eine Empfehlung des Arbeitskreises Innenraumlüftung am BMLFUW, in der die prinzipiellen Zielsetzungen für Planung, Errichtung und Betrieb von kontrollierten Wohnraumlüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung festgelegt sind, würde die Verbindlichkeit eines derartigen Regelwerks erhöhen.

Es soll im Rahmen der Bauordnungen eine Vorschrift erlassen werden, die bei Neubauten und Sanierungen einen Nachweis der ausreichenden Gebäudelüftung verlangt. Weiters soll die regelmäßige Überprüfung lüftungstechnischer Anlagen verlangt werden.

Es wäre zu überlegen, kleinere Lüftungsanlagen einer Kontrollpflicht zu unterziehen wie z.B. Feuerungsanlagen, eine derartige Maßnahme würde jedoch möglicherweise einer Verbreitung von Anlagen mit kontrollierter Wohnraumlüftung im Wege stehen.

11.5 Radoneintritt in Wohnräume

11.5.1 Ausführung des Luft-Erdwärmetauschers (LEWT)

Das Rohrsystem des LEWT sollte vor allem in Radon-Risikogebieten mittels verschweißter Kunststoffrohre ausgeführt werden, die erst außerhalb des Erdbodens an andere Materialien angeschlossen werden, um einen Eintritt von mit Radon belasteter Bodenluft in das Zuluftsystem zu verhindern. Diese Maßnahme wäre vor allem in Radonrisikogebieten der Klasse 2 und 3 laut ÖNORM S 5280-2 (2003) umzusetzen. Rohrsysteme, die aus mehreren Teilen bestehen, die mittels Dichtungen miteinander verbunden sind, wie z.B. Betonrohre, sollten in diesen Regionen möglichst nicht eingesetzt werden.

Besonderes Augenmerk sollte auf den Kondensatabfluss des LEWT gelegt werden, da auch dieser einen potentiellen Eintrittsweg für Radon darstellt. Dieser ist mittels eines doppelten Siphons auszuführen.

Eine Möglichkeit der Umgehung der angesprochenen Probleme stellt die Installation eines Sole-Erdwärmetauschers anstelle eines LEWT dar.

11.5.2 Vermeidung von Unterdruck im Gebäude in Radonrisikogebieten

Eine mitunter gewählte Möglichkeit der Erhöhung des Luftwechsels in Wohnungen ist der permanente Betrieb von Abluftventilatoren oder der Einbau von einfachen, zentralen Abluftanlagen mit Außenluftdurchlässen zur Bereitstellung der Außenluft. Der permanente Betrieb von Abluftventilatoren setzt die Bereitstellung von ausreichenden Zuluftmengen voraus, um den Effekt der Unterdruckbildung in der Wohnung bei völlig geschlossenen Fenstern und Türen und in der Folge Ansaugung der Luft aus anderen Bereichen des Gebäudes (interzonaler Massentransfer) zu vermeiden (Tappler, Damberger 1996). In Radonrisikogebieten sollte in beiden Fällen durch geeignete Abdichtungen oder Detektoren gewährleistet sein, dass es zu keiner Ansaugung von radonbelasteter Kellerluft kommt. Vielfach wird auch eine luftdichte Ebene bei der Bodenplatte bzw. gegenüber dem Keller gefordert, die Wirksamkeit ist hier mittels eines Drucktests zu überprüfen (Feist 2003).

In Radonrisikogebieten muss zusätzlich der Anschluss an das Lüftungsgerät luftdicht ausgeführt werden, um zu verhindern, dass mit Radon belastete Kellerluft in das Zuluftsystem eintreten kann. Die Dichtigkeit des Systems ist mittels einer Tracergasuntersuchung zu überprüfen.

11.5.3 Sonstiges

Bei bestehenden Anlagen in Radonrisikogebieten laut ÖNORM S 5280-1 empfiehlt sich eine Vergleichsmessung der Frischluft vor dem LEWT und nach dem Lüftungsgerät sowie im Anschluss gegebenenfalls Maßnahmen laut ÖNORM S 5280-3.

Generell ist in Radonrisikogebieten der Klasse 2 und 3 bei Neubauten die Einhaltung der Vorgaben der ÖNORM S 5280-2 (2003) dringend zu empfehlen.

11.5.4 Forschungsbedarf

Die angeschnittene Problematik der möglichen Anreicherung von Radon in Luft-Erdwärmetauschern wäre durch repräsentative Studien, welche auch entsprechende Messungen in ausgeführten Anlagen beinhalten, näher zu beleuchten.

11.5.5 Regelwerke

Die in den entsprechenden Kapiteln in Bezug auf Radon ausgeführten Punkte sind in der nächsten Überarbeitung der ÖNORM S 8280-2 (2003) bzw. gegebenenfalls in dem Konzept zur zukünftigen ÖNORM S 8280-3 – Radonsanierung in Altbauten zu berücksichtigen.

11.6 Luftionen – Forschungsbedarf

Die Unterschiede in der Ionenkonzentration zwischen Gebäuden mit kontrollierten Wohnraumbelüftungssystemen und natürlich belüfteten Gebäuden wären durch repräsentative Studien zu erfassen. Hier wären die möglichen Einflussfaktoren genau zu bestimmen, um die Faktoren zu identifizieren, die einen maßgeblichen Einfluss auf die Ionenkonzentration in Räumen haben könnten. Sollten Veränderungen der Luftionenkonzentrationen gefunden werden, wäre es interessant, die Auswirkungen etwa auf die Kognition zu untersuchen.

11.7 Luftfeuchtigkeit

11.7.1 Allgemeines

Die Luftfeuchtigkeit (siehe Kap. 8) ist ein wichtiger grundlegender Parameter, der zahlreiche andere hygienische Aspekte beeinflusst. Ein Mangel an Luftfeuchtigkeit trocknet die Schleimhäute aus, erleichtert die Staubbildung (was u.a. das Gefühl der Lufttrockenheit verstärkt), erhöht beispielsweise die Anfälligkeit für Infektionen und hat noch weitere Auswirkungen auf das Innenraumklima. Zu hohe relative Luftfeuchtigkeit begünstigt das Auftreten von Schimmelpilzen sowie das Milbenwachstum und wird vom Menschen als unbehaglich empfunden.

Bei Zusammenschau aller Aspekte scheint im Allgemeinen ein Bereich zwischen 40 und 60 % relativer Luftfeuchtigkeit für den Wohnbereich sinnvoll zu sein. Die Bereiche unter etwa 30 % und über 70 % sind aufgrund der beschriebenen Zusammenhänge in bestimmten Fällen mit gewissen gesundheitlichen Risiken verbunden. Aufgrund des engen Zusammenhanges zwischen Luftfeuchtigkeit und chemischen Luftverunreinigungen in Hinblick auf gesundheitliche Wirkungen kann jedoch eine Untergrenze, ab der die Luftfeuchtigkeit als inakzeptabel gilt, nicht leicht angegeben werden. Relative Luftfeuchtigkeiten unter 30 % verbunden mit sehr sauberer Luft sind daher z.B. nicht automatisch als Risikofaktor anzusehen. Es ist nach Möglichkeit anzustreben, die relative Luftfeuchte im Wohnbereich nicht unter 30 % absinken zu lassen.

Die angegebene Obergrenze wird eher von baulichen Gegebenheiten, vom Nutzerverhalten und den daraus resultierenden Folgen definiert (gute Wärmedämmung, keine Wärmebrücken, gute Durchlüftung von feuchten Bereichen, Lüften von Matratzen und Decken). Eine definierbare physiologische Obergrenze stellt auch der Wert von 70 % relativer Luftfeuchtigkeit im unmittelbaren Aufenthaltsbereich dar, ab dem die Luft vom Menschen als unbehaglich feucht empfunden wird. Weiters ist darauf zu achten, dass 60 % nicht längerfristig überschritten werden, da dies das Milbenwachstum begünstigt. Generell sind die Vorgaben der Planungsnorm ÖNORM B 8110-2 eine gute Basis für aktuelle Luftfeuchtigkeiten im Winter in bestehenden Innenräumen.

Es muss davor gewarnt werden, oben genannte Werte streng im Sinne von Grenzwerten, deren Überschreitung zwangsläufig zu Problemen führt, zu gebrauchen.

11.7.2 Luftfeuchtigkeit in Gebäuden ohne Lüftungstechnische Anlagen nach Fenstersanierung

11.7.2.1 Allgemeines

Bei wenig benutzten Wohnungen, in denen keine relevante Feuchteproduktion stattfindet, hat die Verringerung des Luftwechsels nach Fenstertausch nur eine leichte Steigerung der relativen Luftfeuchtigkeit zur Folge, die unter Umständen sogar positive gesundheitliche Auswirkungen haben kann. In diesen Fällen wäre es nicht sinnvoll, Maßnahmen zur Senkung der Luftfeuchtigkeit zu treffen. Eine neuere deutsche Studie zeigt auch, dass der Einbau von dicht schließenden Fenstern mit umlaufenden Dichtprofilen als Merkmal eines modernen Bauzustandes einen protektiven Effekt gegenüber Feuchteschäden hat (Brasche et al. 2003). Dies sollte jedoch nicht dahingehend interpretiert werden, dass eine Vermeidung von Feuchteschäden (wie sie bei modernen Gebäuden durch ausreichende Wärmedämmung und Vermeidung von Lüftungswärmeverlusten gegeben ist) automatisch zu den für Menschen zuträglichen Luftfeuchtigkeiten führt.

In Wohnungen mit starker Feuchteproduktion sollten die in Gebäuden ohne Lüftungstechnische Anlagen nach Fenstersanierung gegenüber dem ursprünglichen Zustand anzutreffenden höheren relativen Luftfeuchtigkeiten bei Überschreitung der im vorigen Kapitel beschriebenen Grenzen durch ein verändertes Wohnverhalten gesenkt werden. Die jeweils individuelle noch akzeptable Obergrenze wird dabei durch die vorliegenden baulichen Gegebenheiten bestimmt und kann nicht als „Grenzwert“ angegeben werden. In jedem Fall sind Situationen zu vermeiden, die lokal (meist in Nähe von kalten raumumschließenden Flächen) zu einer relativen Luftfeuchtigkeit von über etwa 80 % in unmittelbarer Nähe des Bauteils führen, da in diesem Fall Schimmelbefall an Oberflächen nicht mehr ausgeschlossen werden kann (Sedlbauer 2001). Zusätzlich sind Situationen zu vermeiden, in denen eine für den Menschen als unbehaglich empfundene hohe relative Luftfeuchtigkeit im Wohnbereich von etwa 70 % überschritten wird. Längerfristig gesehen sollten die Werte nicht über 60 % liegen, da dies das Milbenwachstum begünstigt. Prinzipiell wäre in diesen Fällen bei Neubauten eine Lüftungstechnische Anlage zu empfehlen.

11.7.2.2 Möglichkeiten für den Nutzer zur Senkung der relativen Luftfeuchtigkeit

Möglichkeiten für den Nutzer zur Senkung der relativen Luftfeuchtigkeit können unter anderem sein:

- Vermehrtes und konsequentes Lüften während der Tagesstunden
- Stärkeres Heizen
- Vermeidung von Aquarien und anderen starken Feuchtequellen
- Kein offenes Wäschetrocknen in der Wohnung, Verwendung von Wäschetrocknern mit Kondensatabfluss)
- Geeignete Abfuhr von Feuchte aus Nassbereichen und Küche

Eine geeignete schriftliche Information der Bewohner und Bewohnerinnen der betreffenden sanierten Wohnung ist Voraussetzung für eine wünschenswerte, konsequente Änderung des Wohnverhalten.

11.7.2.3 Vermeidung von Wärmebrücken

Wichtig erscheint auch die konsequente Vermeidung von Wärmebrücken, die bei erhöhten Luftfeuchtigkeiten wesentlich stärker zum Tragen kommen und zu Schimmelbildung führen können. Vom Einbau neuer, dicht schließender Fenster ohne allgemeine energietechnische Sanierung mit dem Schwerpunkt Vermeidung von Wärmebrücken ist daher abzuraten.

Wichtig erscheint es, auf die komplexen Zusammenhänge zwischen Luftfeuchtigkeit, Belegung und Raumvolumen hinzuweisen. Der Luftwechsel alleine durch Fugen bei Fenstern oder Türen, Risse oder Bauteilanschlüsse ist zwar in vielen Fällen nicht geeignet, Feuchte in hohem Ausmaß abzuführen (Künzel 1982, Eicke-Henning 2000), bei Vorliegen bestimmter Gegebenheiten wie geringer Feuchteproduktion, geringer Belegungsdichte und hohen verfügbaren Raumvolumina ist dieser geringe Luftwechsel jedoch eventuell als ausreichend zu betrachten. Die einfache Argumentation, dass dichte Fenster automatisch zu Feuchteschäden führen, ist daher nicht korrekt.

11.7.3 Luftfeuchtigkeit in Gebäuden mit Lüftungstechnischen Anlagen

11.7.3.1 Allgemeines

Es ist davon auszugehen, dass infolge des höheren Luftwechsels in Gebäuden mit Lüftungstechnischen Anlagen keine erhöhten Feuchtebelastungen (Feist 2003), jedoch in der kalten Jahreszeit in der Regel niedrige relative Luftfeuchtigkeiten (rel. LF) unter 30 % auftreten. Die Anzahl der Tage mit rel. LF unter 30 % im Innenbereich werden von uninformatierter Seite in der Regel überschätzt, bei einem Zuluftvolumenstrom von 30 m³/Person und Stunde und einem personenspezifischen Feuchteeintrag von 90 g/h wurden für Frankfurt 3 Tage/Jahr geschätzt. Bei Erhöhung des Zuluftvolumenstroms um 5 m³/Person und Stunde verdoppelt sich die Anzahl der Tage mit rel. LF unter 30 % rel. LF (Pfluger 2003).

11.7.3.2 Fazit und Empfehlungen

Niedrige relative Luftfeuchtigkeiten müssen sich in schadstoffarmer Luft nicht zwangsläufig auf eine Erhöhung der niedrigen Luftfeuchtigkeiten zugeordneten Symptome, etc. (siehe dazu Kap. 8.1.1 und 8.2) auswirken. Bei Verwendung emissionsarmer Materialien und geeigneter hochwertiger Zuluftfilter ist davon auszugehen, dass die zugeführte Luft einen hohen Reinheitsgrad besitzt. Unbedingte Voraussetzung ist allerdings eine fachgerechte Planung, Errichtung und Wartung der Anlage, die ein effizientes Hygienemanagement beinhaltet. Wie Untersuchungen (Greml et al. 2004) zeigen, sind diese Voraussetzungen jedoch in vielen Fällen nicht gegeben. Im Wohnbereich sollte die rel. LF längerfristig nicht unter 30 % absinken. Gelegentliche Unterschreitungen (an wenigen Tagen des Jahres) gelten als physiologisch unbedenklich.

Über einen längeren Zeitraum anhaltende niedrige Luftfeuchtigkeit kann auch zu einer Verbesserung von Symptomen bei bestimmten Bevölkerungsgruppen führen. Niedrige Luftfeuchtigkeit in Verbindung mit Lüftungstechnischen Anlagen bewirkt eine Verringerung der Menge an Hausstaubmilben und Milbenallergenen gegenüber konventionell belüfteten Häusern (Fletcher et al. 1996, Harving et al. 1994a, Harving et al. 1994b, Warner et al. 2000), Asthmatiker benötigten in Häusern mit Lüftungstechnischen Anlagen eine geringere Medikation (Wickman et al. 1994).

Auf den Einsatz wenig emittierender Baumaterialien für den Innenausbau bzw. schadstoffarmer Reinigungsmittel ist aus den oben genannten Gründen großen Wert zu legen.

11.7.4 Erhöhung der Luftfeuchtigkeit in Innenräumen

11.7.4.1 Allgemeines

Klassische Luftbefeuchtungseinheiten, wie sie in Klimaanlage eingesetzt werden, sind in kleineren Lüftungstechnischen Anlagen aufgrund der komplexen Wartungsanforderungen nicht sinnvoll und werden auch in der Regel nicht angeboten. Es sind jedoch seit kurzem Speichermassenumwärtetauscher (Enthalpiewärmetauscher) am Markt, mit denen neben Wärme auch Feuchte zurückgewonnen werden kann (z.B. Hoal 2005) – für eine genauere Beschreibung siehe Kap. 8.6.3.

11.7.4.2 Einzelraumbezogene Lösungen zur Erhöhung der Luftfeuchtigkeit

Einzelraumbezogene Lösungen wie elektrische Luftbefeuchter (Einzelgeräte) oder Zimmerspringbrunnen sind eine weitere gangbare Möglichkeit, die relative Luftfeuchtigkeit in sensiblen Bereichen zu erhöhen. Hier ist die Auswahl des Typs des Luftbefeuchters von

entscheidender Bedeutung, empfohlen werden im Falle von elektrischen Luftbefeuchtern aus hygienischen Gründen Dampfbefeuchter.

Bei raumbezogenen Lösungen muss in jedem Fall auf eine durchgehende und aufwändige Hygienekontrolle geachtet werden, da es sonst rasch zu einer Verkeimung der entsprechenden Geräte kommt. Dies bedeutet ein regelmäßiges gründliches Reinigen nach Herstellerangaben sowie die Vermeidung von die Raumluft belastenden Desinfektionsmitteln. Die in Zimmerspringbrunnen eingesetzten Silbersalze werden aus umwelthygienischer Sicht als wenig bedenklich betrachtet.

Von der oft genannten Möglichkeit, die Luftfeuchtigkeit durch nasse Textilien oder Verdunster an den Wärmequellen zu erhöhen, ist abzuraten, da auch hier Verkeimungsgefahr besteht, vor allem aber deshalb, da die theoretisch zugeführten Feuchtemengen um Größenordnungen zu gering sind, um eine relevante Erhöhung der relativen Luftfeuchtigkeit im betreffenden Raum zu erreichen.

11.7.4.3 Luftfeuchteconditionierung durch interne Feuchtproduktion

Im Gegensatz zu konventionellen Gebäuden mit dichten Fenstern, bei denen zu hohe Luftfeuchtigkeiten mit Schimmelproblemen und daraus resultierend Gesundheitsproblemen und Bauschäden meist Gegenstand der Diskussion sind, stellt bei Wohnungen mit mechanischer Be- und Entlüftung geringe Luftfeuchtigkeiten die Hauptursache von Bedenken dar.

Es konnte gezeigt werden, dass in einer Wohnung mit Lüftungswärmerückgewinnung prinzipiell auch im Winter genügend interne Feuchtigkeit anfällt, um ein Niveau von 40 % rel. LF im wesentlichen halten zu können (Schneider et al. 2003b). Diese Einschätzung ist allerdings nicht zu verallgemeinern, es ist bekannt, dass auch in gut ausgetrockneten, natürlich belüfteten Räumen die Luftfeuchtigkeit über einen längeren Zeitraum unter 30 % Luftfeuchte sinken kann (Tappler 2005).

Bei einer durchschnittlichen Nutzung – 4 Personen auf 110 m², 1 mittlere Pflanze pro Raum – kann von einer knapp ausreichenden Menge an innerer Feuchte ausgegangen werden, um 40 % rel. LF während 96 % der Zeit einhalten zu können. Dazu ist allerdings erforderlich, dass die Gesamtluftmenge von 120 m³/h während 10 h am Tag auf 50 % reduziert wird. In Abstimmung mit den wahrscheinlichsten Anwesenheitszeiten sollte dies kein Komfortproblem darstellen. Laut Schneider wurde von einer Koppelung der Beheizung mit der Lüftung abgegangen, da bei Nichtnutzung der Wohnung Lüftungsverluste (und damit Feuchteverluste) vermieden werden sollten (Schneider et al. 2003b). Dies entspricht jedoch nicht der Praxis, bei der in bestimmten Grenzen sehr wohl eine derartige Kopplung erfolgt, die auch sinnvoll erscheint. Die Luftmenge sollte allerdings nicht zugunsten der Beheizbarkeit erhöht werden. Eine Lösung ist die Abdeckung des Spitzenbedarfs an Heizenergie durch kleine zusätzliche Wärmequellen (Drexel 2005).

Es konnte gezeigt werden, dass mit geeigneter Grundrissdisposition und begrenzter, individuell einstellbarer Luftmengenverschiebung im Tagesablauf die Komfort- und Feuchtebedingungen stark verbessert werden können. Diese Methode ist umso wichtiger, je weniger Personen in einer Wohnung wohnen (Schneider et al. 2003b).

11.7.4.4 Erhöhung der Luftfeuchtigkeit über spezielle Wärmetauscher

Die als Neuentwicklung auch für kleinere Lüftungsanlagen erhältlichen Speichermassenwärmetauscher, die eine Erhöhung der relativen Luftfeuchte in Innenräumen erwarten lassen, stellen eine noch näher zu diskutierende Entwicklung dar. Hygienische Risiken wurden von der Herstellerfirma von Anlagen mit Rotationswärmetauscher (Fa. Hoval) verneint. Bis zu einer definitiven Einschätzung müssen mögliche hygienische Risiken hinsichtlich des inter-

mittlerenden Feuchtanfalls im Bereich des Wärmetauschers näher beleuchtet und durch Daten zur Langzeitstabilität ausgeschlossen werden.

11.7.4.5 Veränderung der Leistung Lüftungstechnischer Anlagen

Eine Möglichkeit, die Luftfeuchtigkeit an den Tagen mit sehr niedrigen absoluten Feuchten der Außenluft, die in den Innenräumen zu relativen Luftfeuchtigkeiten unter 30 % führen, in Wohnhäusern zu erhöhen, ist die vorübergehende Reduktion des Luftwechsels. Die Lüftungstechnische Anlage sollte in diesen Fällen durch eine manuelle oder automatische Steuerung über die Luftfeuchte der Innenraumluft auf eine kleinere Stufe gestellt werden (Feist 2003).

Bei kompletter Abschaltung können Probleme mit der Außenluftzufuhr zur Ableitung anthropogener Verunreinigungen entstehen, weiters können auch andere Probleme (z.B. Kondensation an Filtern) auftreten. Die regelmäßige komplette Außerbetriebnahme der Anlage zur Erniedrigung des Luftwechsels wird daher nicht empfohlen (Feist 2003).

Von Feist (2003) wird eine Steuerung durch den Benutzer als sinnvoll erachtet, am einfachsten über eine 3-Stufen-Regelung mit den Stufen:

- Stark: 100 % der maximal möglichen Leistung (entspricht 30 m³/Person und Stunde)
- Normal: 77 % der maximal möglichen Leistung
- Grundlüftung: 54 % der maximal möglichen Leistung

Diese Regelung gilt nur für die Zuluft, abluftseitig können wesentlich höhere Luftmengen vonnöten sein (z.B. WC, Bad).

11.7.5 Fazit

Von einem Einsatz von klassischen Befeuchtungsanlagen in Lüftungstechnischen Anlagen ist vor allem aufgrund der damit verbundenen Risiken in kleineren Anlagen für Wohnhäuser abzuraten (es existieren auch keine Anbieter derartiger Anlagen).

Ein neues Konzept stellt die Erhöhung der relativen Luftfeuchte mittels Speichermassenswärmetauscher dar – mangels Praxisdaten kann jedoch nicht auf die Effektivität und mögliche hygienische Risiken eingegangen werden.

Eine nachträgliche Erhöhung der Luftfeuchtigkeit in Innenräumen wird, unter der Voraussetzung einer gut gewarteten Lüftungstechnischen Anlage und der Verwendung emissionsarmer Materialien für den Innenbereich außer in medizinisch indizierten Sonderfällen im Allgemeinen nicht als notwendig erachtet. Sinkt die relative Luftfeuchtigkeit längerfristig unter 30 Prozent ab, sind eventuell Maßnahmen wie z.B. raumbezogene Lösungen oder Verringerung der Leistung der Anlage sinnvoll, jedoch auch mit der nötigen Vorsicht zu betrachten.

Bei Maßnahmen zur Erhöhung der Luftfeuchtigkeit in Innenräumen sind in jedem Fall Situationen zu vermeiden, die lokal (in Nähe von gegebenenfalls vorhandenen kalten Bauteilen) zu einer relativen Luftfeuchtigkeit von über etwa 80 % führen. Zusätzlich sind Situationen zu vermeiden, in denen eine für den Menschen als unbehaglich empfundene hohe relative Luftfeuchtigkeit im unmittelbaren Wohnbereich von etwa 70 % überschritten werden. Längerfristig gesehen sollten die Werte nicht über 60 % liegen, da dies das Milbenwachstum begünstigen würde.

11.7.6 Luftfeuchte – Forschungsbedarf

Die Auswirkungen auf die Raumluftfeuchte der zum Teil starken Verringerung der relativen Luftfeuchte durch Erhöhung des Luftwechsels, verursacht durch Lüftungsanlagen sollte durch repräsentative Studien, welche entsprechende Messungen in ausgeführten Anlagen beinhalten, näher beleuchtet werden.

Die Konzepte zur Erhöhung der relativen Luftfeuchte mittels Speichermassenwärmetauscher wären in Hinblick auf hygienische Fragestellungen durch Studien, welche auch Messungen in ausgeführten Anlagen beinhalten, näher zu untersuchen. Mögliche Risiken dieser Technologie sollten erfasst werden.

Der Luftfeuchteverlauf in Holzleichtbauten mit industrietrockneten Baumaterialien wäre in der ersten Zeit nach Errichtung über eine Forschungsarbeit zu erfassen.

11.8 Veränderungen der Luftionenkonzentrationen durch kontrollierte Wohnraumbelüftungsanlagen

Es dürfte nach dem derzeitigen Stand des Wissens eher unwahrscheinlich sein, dass die relativ geringen bzw. möglicherweise gar nicht vorhandenen Unterschiede in den Konzentrationen von Luftionen zwischen Häusern mit kontrollierten Wohnraumbelüftungsanlagen und konventionellen Häusern von gesundheitlicher Bedeutung sind. Da die befragten österreichischen Experten es allerdings für möglich bzw. wahrscheinlich halten, dass es in Passivhäusern gegenüber natürlich belüfteten Gebäuden zu einer Verringerung der negativen Ionen kommt, sollten repräsentative Messungen durchgeführt werden. Sollten signifikante Unterschiede in der Luftionenkonzentrationen gefunden werden, wäre es interessant, die Auswirkungen etwa auf die kognitive Performance zu untersuchen.

Teilweise werden für die Verringerung bzw. Veränderung der Ionenkonzentration vor allem Gegebenheiten im Raum selbst, wie z.B. elektrostatisch geladene Flächen, angenommen.

Technische Ionenquellen im Raum werden von unabhängigen Experten eher als ein Schritt in die falsche Richtung angesehen (Ausnahme: Prof. Fischer, Graz), da die Ionenverteilung einer technischen Ionenquelle stark von der Ionenverteilung der Außenluft abweicht.

Zusammenfassend wird eine technische Veränderung der Konzentration an Luftionen auf Grund des derzeitigen Wissens als nicht zielführend erachtet.

11.9 Regelung der Lüftungstechnischen Anlage

Der Großteil der Lüftungstechnischen Anlagen in Wohnungen wird mittels voreingestellten Parametern gesteuert, eine Regelung der Luftmengen kann durch eine manuell oder über die Zeit geregelte Veränderung der Leistung der Ventilatoren erfolgen. Vereinzelt werden für die automatische Regelung der Luftmengen in Lüftungstechnischen Anlagen in Wohnungen Regelungen über die relative Luftfeuchtigkeit bzw. über den Lüftungsparameter CO₂ angeboten. Regelungen über die relative Luftfeuchtigkeit gehen von der Tatsache aus, dass der Mensch durch seine Lebensvorgänge Luftfeuchtigkeit erzeugt, die bei Überschreitung eines voreingestellten Schwellenwertes zum Ansprechen von Feuchtesensoren und in der Folge zu einer Erhöhung des Luftwechsels führt (Schiedel 2004).

Für größere Lüftungstechnische Anlagen wird CO₂ wegen seiner guten Indikatoreigenschaften für die Belastung der Luft mit anthropogenen Emissionen schon seit langem als Leitparameter

sowie Regelgröße eingesetzt, über die die Menge an zuzuführender Außenluft bestimmt wird (Turiel und Rudy 1982; Fehlmann et al. 1993), der Einsatz von CO₂-Sensoren in kleineren Anlagen ist jedoch mit einigen Schwierigkeiten verbunden. Ein derartiges Regelkonzept würde eine sorgfältige Planung der Messstrategie und eine aufmerksame, verlässliche Kontrolle, Wartung und Betreuung der Messsonden und Regelstrecken voraussetzen, da sonst erhebliche Fehler und eine unzureichende Funktion der Lüftungstechnischen Anlagen die Folge sind (Bearg 1993). Ist nur ein Sensor vorhanden, stellt sich die Frage nach der Situierung dieses Fühlers (Wohnraum oder Schlafzimmer). CO₂-Sensoren wären daher prinzipiell gut für die Steuerung von Lüftungstechnischen Anlagen geeignet, werden jedoch in der Praxis aus finanziellen Gründen in einfachen Anlagen nur selten eingesetzt.

Neuere Überlegungen gehen dahin, außer CO₂ auch andere Parameter über Sensoren mitzuerfassen und somit eine komplexere Basis für die Regelung der Anlagen zu haben (Bischof und Witthauer 1993). Es ergeben sich ähnliche Einschränkungen wie für CO₂-Sensoren, wobei bei derartigen Sensoren zusätzlich eine geringe Spezifität besteht.

11.9.1.1 Luftmengenregelung – Forschungsbedarf

Möglichkeiten der luftqualitätsabhängigen Luftmengenvariation mittels CO₂- oder Feuchte-regelungen wären durch Studien, welche Modellrechnungen sowie Messungen in ausgeführten Anlagen beinhalten, näher zu beleuchten. Die technische Sinnhaftigkeit sowie die ökonomischen Grenzen dieser Technologie sollten erfasst werden.

11.10 Abschließende Einschätzung

11.10.1 Allgemeines

Unter Berücksichtigung aller bekannten Tatsachen scheinen eindeutig die positiven gesundheitlichen Effekte von kontrollierten Wohnraumbelüftungsanlagen in Wohnhäusern zu überwiegen, dies jedoch nur unter der Voraussetzung fachgerechter Planung, Errichtung und Wartung der Anlage, die ein effizientes Hygienemanagement beinhaltet. Diese Einschätzung wird auch von internationalen Studien unterstützt. So konnte z.B. gezeigt werden, dass der Einbau von kontrollierten Wohnraumbelüftungsanlagen vor allem in der ersten Phase von neu errichteten Gebäuden im Durchschnitt zu einer signifikanten Verbesserung bestimmter Beschwerden führte (Leech et al. 2004). Von solchen Effekten dürften nicht nur auf Chemikalien überempfindliche Menschen betroffen sein.

Einfachere Lüftungsanlagen ohne zentrales Zuluftsystem können zwar nicht alle Vorteile dieser aufwändigeren Technologie lukrieren (z.B. Filterung von Allergenen, Energieeinsatz), gegenüber rein natürlicher Belüftung scheinen auch hier unter Berücksichtigung aller bekannter Tatsachen die positiven Effekte zu überwiegen. Bestimmte potentielle Risiken von kontrollierten Wohnraumbelüftungsanlagen werden hier konzeptionsbedingt vermieden (z.B. Luftleitungsnetz des Zuluftsystems).

Generell existiert keine übereinstimmende Expertenmeinung darüber, ob sich Situationen mit kontrollierten Wohnraumbelüftungsanlagen in Bezug auf Luftionen überhaupt von Situationen mit rein natürlicher Belüftung unterscheiden und, wenn diese Frage mit „ja“ zu beantworten ist, welche möglichen gesundheitlichen Konsequenzen daraus resultieren würden. Punktuelle Untersuchungen, die allerdings nur in einigen Passivhäusern durchgeführt wurde, konnte keine Unterschiede in der Ionenkonzentration gegenüber üblicherweise in natürlich belüfteten Räumen gemessenen Konzentrationen ausmachen.

Vor allem für empfindliche Bevölkerungsgruppen wie Allergiker oder MCS-Patienten sind Lüftungstechnische Anlagen in Wohnhäusern generell als empfehlenswert einzuschätzen. Bei Pollen-Allergikern ist allerdings auf eine möglichst umfassende Expositionsvermeidung zu achten, die nur von kontrollierten Wohnraumbelüftungsanlagen mit Filterung der Zuluft erreicht werden kann. Gegenüber Standardausführungen wären bei empfindlichen Bevölkerungsgruppen Ausführungsvarianten mit speziellen Vorkehrungen gegen das Auftreten bestimmter kritischer Noxen zu wählen. Beispiele dafür wären die Wahl einer höherwertigen Filterqualität bei der Filtereinheit nach dem Belüftungsgerät oder eine luftfeuchtegesteuerte Leistungsregelung der Anlage (bzw. raumbezogene Lösungen oder gegebenenfalls nach Ausräumen hygienischer Bedenken neuere Systeme der Befeuchtung wie Speicher-massenwärmetauscher), um zu niedrige Luftfeuchten zu verhindern.

Eine Überprüfung anlagentechnischer und hygienischer Parameter (Abnahmemessung) vor Bezug der Wohnung wäre in allen Fällen dringend zu empfehlen.

11.10.2 Schadstoffmessungen

11.10.2.1 Forschungsbedarf

Die angeschnittene Problematik von Feinstaub-Partikel, verursacht durch Lüftungsanlagen sollte durch repräsentative Studien, welche auch entsprechende Messungen in ausgeführten Anlagen beinhalten, näher beleuchtet werden.

11.10.2.2 Regelwerke

Ein eigenes Regelwerk zur Vorgangsweise bei der Durchführung von Schadstoffmessungen in Wohnhäusern nach Errichtung bzw. nach Sanierungen wäre wünschenswert. In diesem Regelwerk sollte zwischen Gebäuden mit und ohne Lüftungstechnischen Anlagen unterschieden werden.

Dieses Regelwerk kann im Zuge der Erstellung einer ÖNORM ausgeführt werden.

11.10.3 Überblick über positive und negative humantoxische Wirkungen verschiedener energiesparender Maßnahmen

Die Folgen energiesparender Maßnahmen in Hinblick auf Gesundheit und Wohlbefinden von Personen können im Einzelfall nur situativ beurteilt werden. Im Folgenden wird anhand verschiedener typischer Szenarien versucht, Einschätzungen der Auswirkungen von energiesparenden Maßnahmen darzustellen.

Ein „–“ in der Spalte Auswirkung sagt aus, dass es sich um eine in der Regel negativ auf den Benutzer auswirkende Folge der energiesparenden Maßnahme handelt, ein „+“ in der Spalte Auswirkung sagt aus, dass die Folge der energiesparenden Maßnahme einen eher positiven Einfluss besitzt.

Folge der Maßnahme	Auswirkung	Anmerkung
Geringere Abfuhr von anthropogenen Luftverunreinigungen	–	Vor allem in der kalten Jahreszeit, sonst oft auch in den Nachtstunden; generell bei lärmbelasteten Standorten
Geringere Abfuhr von abiotischen und biogenen Luftverunreinigungen	–	Vor allem in der kalten Jahreszeit, sonst oft auch in den Nachtstunden; generell bei lärmbelasteten Standorten
Geringere Abfuhr von Feuchte	–	Schimmel bei hoher intramuraler Feuchteproduktion in der kalten Jahreszeit und Wärmebrücken
	–	Bessere Wachstumsbedingungen für Hausstaubmilben
	+	Bei geringer intramuraler Feuchteproduktion in der kalten Jahreszeit Anhebung der Luftfeuchte auf physiologisch verträgliche Werte
Geringerer Eintrag von Allergenen und Partikel aus dem Außenbereich	+	bei stark staubbelasteten Standorten

Tabelle 11: Mögliche Auswirkungen energiesparender Maßnahmen im Wohnbau – Maßnahme: Einbau dichter Fenster bei natürlich belüfteten Gebäuden

Folge der Maßnahme	Auswirkung	Anmerkung
Verstärkte Abfuhr von anthropogenen Luftverunreinigungen	+	Vor allem in der kalten Jahreszeit, sonst oft auch in den Nachtstunden; generell bei lärmbelasteten Standorten
Verstärkte Abfuhr von abiotischen und biogenen Luftverunreinigungen	+	Vor allem in der kalten Jahreszeit, sonst oft auch in den Nachtstunden; generell bei lärmbelasteten Standorten
Verstärkte Abfuhr von Feuchte	+	Vermeidung von Schimmel bei hoher intramuraler Feuchteproduktion in der kalten Jahreszeit und Wärmebrücken
	+	Schlechtere Wachstumsbedingungen für Hausstaubmilben
	–	Bei geringer intramuraler Feuchteproduktion in der kalten Jahreszeit mögliche Absenkung der Luftfeuchte auf physiologisch unverträgliche Werte
Verringerter Eintrag von Allergenen und Feinstaub aus dem Außenbereich	+ (-)	(bei einfachen Entlüftungsanlagen verstärkter Eintrag)

Tabelle 12: Mögliche Auswirkungen energiesparender Maßnahmen im Wohnbau – Maßnahme: Einbau von einfachen Entlüftungsanlagen bzw. von kontrollierten Wohnraumbelüftungsanlagen ohne Befeuchtung der Außenluft

Folge der Maßnahme	Auswirkung	Anmerkung
Eintrag von Feinstäuben	–	Durch unzureichende Filterklasse
Verschmutzung des Luftleitungssystems	–	Durch Baustaub, unzureichende Filterklasse, keine Reinigungsmöglichkeit, Falschluff am Filter
Verkeimung der Luftfilter	–	Durch Kondensation, zu lange Wechselintervalle etc.
Verschmutzung der Luftfilter	–	Durch zu lange Wechselintervalle
Verstärkter Eintrag von Radon aus der Bodenluft bei LEWT ^a	–	Bei undichter Verrohrung des LEWT in Radonrisikogebieten
Verstärkter Eintrag von Radon aus dem Kellerbereich in die Zuluft	–	Bei ungünstigen Druckverhältnissen und gegenüber Radon undichten Kellerkonstruktionen in Radonrisikogebieten
Verkeimung des LEWT	–	Bei unzureichender Kondensatabfuhr und/oder mangelnder Reinigungsmöglichkeit bzw. falscher Materialauswahl

^a Luft-Erdreichwärmetauscher

Tabelle 13: Zusätzliche Risiken bei Einbau bzw. Vorhandensein von schlecht geplanten, errichteten oder gewarteten kontrollierten Wohnraumbelüftungsanlagen

12 LITERATUR

Ad-hoc Arbeitsgruppe (1996): Richtwerte für die Innenraumluft: Basisschema. Bundesgesundheitsblatt 39: 422-426

Ad-hoc Arbeitsgruppe (1997): Richtwerte für die Innenraumluft: Pentachlorphenol. Bundesgesundheitsblatt 40: 234-236

Ad-hoc-Arbeitsgruppe (1997): Richtwerte für die Innenraumluft: Kohlenmonoxid. Bundesgesundheitsblatt 40: 425-428

Ad-hoc Arbeitsgruppe (1998): Richtwerte für die Innenraumluft: Stickstoffdioxid. Bundesgesundheitsblatt 41: 9-12

AgBB (2004): Vorgehensweise bei der gesundheitlichen Bewertung der Emissionen von flüchtigen organischen Verbindungen (VOC und SVOC) aus Bauprodukten. AgBB – Ausschuss zur gesundheitlichen Bewertung von Bauprodukten. Internet 15.07.2004, <http://www.umweltdaten.de/daten/bauprodukte/agbb-bewertungsschema2003.pdf>

Ager BP, Tickner JA (1983): The control of microbial hazards associated with air-conditioning and ventilation. Ann. Occup. Hyg 27: 341-358

AGÖF (2004): AGÖF-Orientierungswerte für Inhaltsstoffe von Raumluft und Hausstaub. In: Umwelt, Gebäude und Gesundheit. Innenraumhygiene, Raumluftqualität und Energieeinsparung, 7. Fachkongress der Arbeitsgemeinschaft Ökologischer Forschungsinstitute (AGÖF), München 4.-5.3.2004: 24-39

AK-Innenraumluft (2004): Richtlinie zur Bewertung der Innenraumluft, Vorschläge zum Richtlinienenteil "Toluol" bzw. „CO₂ als Lüftungsparameter“, erarbeitet vom Arbeitskreis Innenraumluft am Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, unpubliziert

Albrechtsen O, Clausen V, Christensen FG, Jensen JG, Moeller T (1978): The influence of small atmospheric ions on human well being and mental performance. Int. J. Biometeor. 22: 249-262

Amt der OÖ. Landesregierung (2003): Rechenblatt zur Berechnung der CO₂-Konzentrationen in Schulräumen. Unpubliziert, auf Anfrage als excel-file verfügbar

Andersson K, Fjällström P, Andersson B, Nilsson C, Sandström M (1999): Emission of volatile organic compounds from the indoor application of water-based paints containing linseed oil. Proc. INDOOR AIR '99, 8th International Conf. on Indoor Air Quality and Climate. Edinburgh 1999, Vol. 5: 167-172

Apte MG, Fisk WJ, Daisey JM (2000): Associations between indoor CO₂ concentrations and sick building syndrome symptoms in U.S. office buildings: An analysis of the 1994-1996 BASE study data. Indoor Air 10: 246-257

ARGEBAU (1994): Richtlinie für die Bewertung und Sanierung PCB-belasteter Gebäude

ARGUK (2004): Homepage des ARGUK-Umweltlabors. Internet: <http://www.arguk.de/infos/eulaninfo.htm>, Stand 10.10.2004

Arlan LG, Neal JS, Morgan MS, Vyszynski-Moher DL, Rapp CM, Alexander AK (2001): Reducing relative humidity is a practical way to control dust mites and their allergens in homes in temperate climates. J. Allergy Clin. Immunol. 107: 99-104

Ärztinnen und Ärzte für eine gesunde Umwelt (2003): Wohnen und Gesundheit. Hrsg.: Verein Ärztinnen und Ärzte für eine gesunde Umwelt, Wien

Asbest-Verordnung (1990): Bundesgesetzblatt f. d. Rep. Österreich, VO des BM für Umwelt, Jugend und Familie vom 26.6.1990

ASHRAE (1989): ASHRAE Standard 62 – 1989: Ventilation for acceptable indoor air quality. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta, GA

Ast-V (1998): Arbeitsstättenverordnung. Bgbl. II, Nr. 368/98

Bakó-Biró Z, Wargocki P, Weschler CJ, Fanger PO (2004): Effects of pollution from personal computers on perceived air quality, SBS symptoms and productivity in offices. Indoor Air 14: 178-187

Balfanz E et al. (1992a): Innenraumlufthuntersuchungen auf polychlorierte Biphenyle im Zusammenhang mit dauerelastischen Dichtungsmassen. In: Schadstoffbelastung in Innenräumen, VDI Schriftenreihe Band 19, Düsseldorf: 205-212

Balfanz E et al. (1992b): Meßtechnik und Bewertung von halogenorganischen Verbindungen im Innenraum. In: Schadstoffbelastung in Innenräumen, VDI Schriftenreihe Band 19, Düsseldorf: 63-74

Barron MD, Dreher JJ (1964): Effects of electric fields and negative ion concentrations on test pilots. Aerospace Med. 35: 20-23

Batterman S, Peng CY (1995): TVOC and CO₂-concentrations as indicators in indoor air quality studies. Am. Ind. Hyg. Assoc. J. 56: 55-65

B.A.U.C.H. (1991): Analyse und Bewertung der in Raumlufth und Hausstaub vorhandenen Konzentrationen der Weichmacherbestandteile Diethylhexylphthalat und Dibutylphthalat. Eigenverlag Verein für Umweltchemie, Berlin

Bauproduktenrichtlinie (1988): Richtlinie des Rates vom 21. Dezember 1988 zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedstaaten über Bauprodukte (89/106/EWG)

Baudisch C, Prösch J (2000): DDT- und Lindanexposition nach Anwendung von Holzschutzmitteln. Umweltmedizin in Forschung und Praxis 5: 161-166

Bearg DW (1993): Indoor Air Quality and HVAC Systems. CRC Press, Boca Raton

Belazzi T (2004): Datenbankgestütztes Chemikalienmanagement zur Minimierung der VOC-Belastung der Innenraumlufth. In: Österr. Institut für Baubiologie und -ökologie (Hrsg.): Gesunde Raumlufth. Schadstoffe in Innenräumen – Prävention und Sanierung. Internationaler Kongress, MessezentrumWienNeu, 12.-13.2.2004. IBO-Verlag, Wien: 47-50

Benn CS, Melbye M, Wohlfahrt J, Bjorksten B, Aaby P (2004): Cohort study of sibling effect, infectious diseases, and risk of atopic dermatitis during first 18 months of life. Brit. Med. J. 328:1223

Bergsmann O (1993): Elektro-Bio-Meteorologie. In: Machalek A, Stacher A (Hrsg.): Wetterfähigkeit und Wetterempfindlichkeit. Wiener Internationale Akademie für Ganzheitsmedizin, Schriftenreihe Band 12. Facultas Universitätsverlag, Wien

Bernstein D (1998): The scientific and health related reasons for fiber classification by the EU. In: VDI Berichte 1417 – Sicherer Umgang mit Fasermaterialien. VDI Verlag, Düsseldorf: 111-128

BGA (1977): Bewertungsmaßstab für Formaldehyd in der Raumlufth. Deutsches Bundesgesundheitsamt. BGA-Pressedienst 19/77 vom 12.10.1977

- BGA (1984):** Formaldehyd. Gemeinsamer Bericht des BGA, der BAU und des UBA, 1.10.1984
- BGA (1992):** Schreiben vom 29.09.1992. Deutsches Bundesgesundheitsamt. Anlage der Pressemitteilung der GAL Hamburg vom 19.11.1992
- BGA (1993):** Raumklimabedingungen in Schulen, Kindergärten und Wohnungen und ihre Bedeutung für die Bestimmung der Formaldehydkonzentration. Kommission Innenraumlufthygiene des BGA. Bundesgesundheitsblatt 36: 2/93
- BgVV (2000):** Gesundheitliche Bewertung von Permethrin in Wollteppichen. Bundesinstitut für gesundheitlichen Verbraucherschutz und Veterinärmedizin, heute: Bundesinstitut für Risikobewertung. Stellungnahme vom Dezember 2000. Internet vom 02.02.2005: <http://www.bgvv.de/cd/237>
- BICO (2005):** Produktunterlagen der Fa. BICO zu Lüftungsampel. Internet vom 06.03.2005. <http://www.lueftungsampel.at>
- Binder M, Obenland H, Maraun W (2004):** Chloranisole als Verursacher von schimmelähnlichem Geruch in älteren Fertighäusern. Tagungsband des 7. Fachkongresses der Arbeitsgemeinschaft Ökologischer Forschungsinstitute (AGÖF) vom 4.-5.3.2004, München: 112-121
- Birnbaum LS, Staskal DF (2004):** Brominated flame retardants: cause for concern? Environmental Health Perspectives 112: 9-17
- Bischof W, Witthauer J (1993):** Mixed gas sensors – strategies in non-specific control of IAQ. Proc. INDOOR AIR '93, 6th Internat. Conf. on Indoor Air Quality and Climate. 4 - 8 July 1993, Helsinki, Finland, Vol. 5: 39-44
- Bischof W (2001):** Intramurale biologische Luftverunreinigungen – Expositionen und Prediktoren. I: Hygienemanagement im Innenraum. VDI-Berichte 1603, VDI-Verlag Düsseldorf
- Bischof W, Koch A, Gehring U, Fahlbusch B, - HE, Heinrich J (2002):** Predictors of High Endotoxin Concentrations in the Settled Dust of German Homes. Indoor Air 12: 2-9
- Blackhall K, Appleton S, Cates CJ (2003):** Ionisers for chronic asthma. Cochrane Airways Group: Cochrane Database Syst. Rev. 2003, 3, CD002986
- Blessing R, Derra R (1992):** Holzschutzmittelbelastungen durch Pentachlorphenol und Lindan in Wohn- und Aufenthaltsräumen. Staub-Reinhaltung der Luft 52: 265-271
- BMLFUW (2004):** Richtlinie zur Bewertung der Innenraumluft. Hrsg: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Akademie der Wissenschaften – Kommission Reinhaltung der Luft. Eigenverlag des BMLFUW, Blau-Weiße Reihe (Loseblattsammlung)
- BMU (2005):** Begrenzung von Radon in Gebäuden. Internet vom 02.06.2005. <http://www.bmu.de/strahlenschutz/doc/6402.php>
- BMUJF (1989):** Photooxidantien in der Atmosphäre – Luftqualitätskriterien Ozon. Österreichische Akademie der Wissenschaften, Kommission Reinhaltung der Luft, Hrsg. Bundesministerium für Umwelt, Jugend und Familie
- BMUJF (1997):** Flüchtige Kohlenwasserstoffe in der Atmosphäre – Luftqualitätskriterien VOC, Band 2. Österreichische Akademie der Wissenschaften, Kommission Reinhaltung der Luft, Hrsg. Bundesministerium für Umwelt, Jugend und Familie, Eigenverlag
- BMUJF (1998):** Stickstoffoxide in der Atmosphäre. Luftqualitätskriterien NO₂ – Wirkungen auf den Menschen. Österreichische Akademie der Wissenschaften, Kommission Reinhaltung der

Luft, Band 17, Neubearbeitung 1998, Hrsg. Bundesministerium für Umwelt, Jugend und Familie, Eigenverlag

Bolsaitis P, Ludwig JF, McCarthy JF (1993): A scoping report on air duct cleaning and related issues. Proc. INDOOR AIR '93, 6th Internat. Conf. on Indoor Air Quality and Climate. 4 - 8 July 1993, Helsinki, Finland, Vol. 6: 333-337

Bolte G, Bischof W, Borte M, Lehmann I, Wichmann H-E, Heinrich J for the LISA Study Group (2003): Early endotoxin exposure and atopy development in infants: Results of a birth cohort study. Clin. Exp. Allergy 33: 770-776

Bornehag CG, Blomquist G, Gyntelberg F, Jarvholm B, Malmberg P, Nordvall L, Nielsen A, Pershagen G, Sundell J (2001): Dampness in Buildings and Health. Nordic interdisciplinary review of the scientific evidence on associations between exposure to dampness in buildings and health effects (NORDDAMP). Indoor Air 11: 72-86

Brasche S, Heinz E, Hartmann T, Richter W, Bischof W (2003): Vorkommen, Ursachen und gesundheitliche Aspekte von Feuchteschäden in Wohnungen. Bundesgesundheitsblatt-Gesundheitsforschung-Gesundheitsschutz 46: 683-693

Braun-Fahrländer C (2003a): Environmental exposure to endotoxin and other microbial products and the decreased risk of childhood atopy: evaluating developments since April 2002. Curr. Opin. Allergy Clin. Immunol. 3: 325-329

Braun-Fahrländer C (2003b): Allergien und Allergene im Innenraum. In: Ärztinnen und Ärzte für eine gesunde Umwelt (Hrsg.): Wohnen und Gesundheit. Wien

Braun-Fahrländer C, Gassner M, Grize L, Takken-Sahli K, Neu U, Stricker T, Varonier HS, Wüthrich B, Sennhauser FH (2004): No further increase in asthma, hay fever and atopic sensitisation in adolescents living in Switzerland. Eur. Respir. J. 23: 407-413

Brown VM, Cockram AH, Crump DR, Gardiner D (1990): Investigations of the volatile organic compound content of indoor air in homes with an odorous damp proof membrane. Proc. INDOOR AIR '90, 5th Internat. Conf. on Indoor Air Quality and Climate. 29 July - 3 August 1990, Toronto, Canada, Vol. 3: 557-580

Bundesimmissionsschutzgesetz (1990): 2. VO zum Bundesimmissionsschutzgesetz: Verordnung zur Emissionsbegrenzung von leichtflüchtigen Halogenkohlenwasserstoffen. BGBl. I S. 2694, BGBl. III S. 2129-8-2-3. Deutschland

BUWAL (1997): Luftqualität in Innenräumen, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Schriftenreihe Umwelt Nr. 287

CEPHEUS Austria (2001): Endbericht Thermie-Programm BU/027/97

Clausnitzer KD, Jahn K (1997): Zur Notwendigkeit der Überprüfung und Reinigung von Lüftungsanlagen in Wohngebäuden. Bremer Energie-Institut (Hrsg.), Bundesverband des Schornsteinfegerhandwerks (ZIV), Sankt Augustin/Bremen

COST (1990): Indoor air pollution by formaldehyde in european countries. Report No. 7, COST Project 613, Commission of the European Communities

Damberger B, Tappler P, Twrdik F (2004): Luftströmungen in Gebäuden – Kleine Ursache – große Wirkung. In: Österr. Institut für Baubiologie und -ökologie (Hrsg.): Gesunde Raumluf. Schadstoffe in Innenräumen – Prävention und Sanierung. Internationaler Kongress, MessezentrumWienNeu, 12.-13.2.2004. IBO-Verlag, Wien: 63-68

Daniell W, Camp J, Horstman S (1991): Trial of a negative ion generator device in remediating problems related to indoor air quality. J. Occup. Med. 33: 681-687

Darby et al. (2004): Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *BMJ* (Vol. 330, No. 7485: 223-228)

Davis PJ (2001): Molds, toxic molds, and indoor air quality, California Research Bureau, California State Library CRB Note Vol. 8, No.1: 1-17

De Bortoli, Knöppel et al. (1986): Concentrations of selected organic pollutants in Indoor and outdoor air in northern Italy. *Environment International* 12: 343-350

Deleanu M (1977): Veränderungen der Luftionisation in Arbeitsräumen. *Staub-Reinh. Luft* 37: 459-461

Dessauer F (1931): Zehn Jahre Forschung auf dem medizinisch-physikalischen Grenzgebiet. Thieme, Leipzig 1931

Devos M et al. (1990): Standardized human olfactory thresholds, Oxford University Press

DGAI/AWMF (2004): AWMF-Leitlinien-Register Nr. 061/016: Allergieprävention – Leitlinien – Leitlinien nach Fächern – Allergologie. Deutsche Gesellschaft für Allergologie und klinische Immunologie (DGAI)/ Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften (AWMF). Internet vom 02.04.2004: <http://www.awmf-online.de>

DIBt (1996): Richtlinie für die Bewertung und Sanierung schwach gebundener Asbestprodukte in Gebäuden (Asbest-Richtlinie). Fassung Jänner 1996, Deutsches Institut für Bautechnik 3/1996

DIN EN 779 (2004): Partikel-Luftfilter für die allgemeine Raumlufttechnik - Anforderungen, Prüfung, Kennzeichnung

DIN EN 12097 (2004): Lüftung von Gebäuden – Luftleitungen; Anforderungen an Luftleitungsbauteile zur Wartung von Luftleitungssystemen

Dirnagl K (1985): Wettereinflüsse auf Befinden und Krankheit. In: Oepen I: An den Grenzen der Schulmedizin. Eine Analyse umstrittener Methoden. Deutscher Ärzteverlag, Köln

Dolezalek H (1985): Remarks on the physics of atmospheric ions (natural and artificial). *Int. J. Biometeor.* 29: 211-221

Doll R et al. (1972): Mortality of gas workers – final report of a prospective study. *Brit. J. Industr. Med.* 29: 394-406

Douwes J, Dubbeld H, van Zwieten L, Wouters I, Doekes G, Heederik D, Steerenberg P (1997): Work relates acute and (sub-)chronic airways inflammation assessed by nasal lavage in compost workers. *Ann. Agric. Environ. Med.* 4: 149-151

Douwes J, Doekes G, Heinrich J, Koch A, Bischof W, Brunekreef B (1998): Endotoxin and β -1,3-glucan in house dust and the relation with home characteristics: a pilot Study in 25 German Houses. *Indoor Air* 8: 255-263

Drexel C (2005): persönliche Mitteilung

ECA (1992): Ventilation Requirements in Buildings. European Concerted Action – Indoor Air Quality & its Impact on Man. Commission of the European Communities, Joint Research Centre. ECA-Report No 11

ECA (1993): Biological particles in Indoor Environments European Concerted Action – Indoor Air Quality & its Impact on Man. Commission of the European Communities, Joint Research Centre. ECA-Report No 12

ECA (1997): Total Volatile Organic Compounds (TVOC) in Indoor Air Quality Investigations. European Concerted Action – Indoor Air Quality & its Impact on Man. Commission of the European Communities, Joint Research Centre. ECA-Report No 19

Eder W, Gamper A, Oberfeld G, Riedler J. (1998): Prevalence and severity of bronchial asthma, allergic rhinitis and atopic dermatitis in Salzburg school children. Wien. Klin. Wochenschr. 110: 669-677

Eder W, Klimecki W, Yu L, von Mutius E, Riedler J, Braun-Fahrlander C, Nowak D, Martinez FD, ALEX Study Team (2004): Toll-like receptor 2 as a major gene for asthma in children of European farmers. J. Allergy Clin. Immunol. 113: 482-488

Eichmeier J (1964): Eigenschaften und biologische Wirkungen atmosphärischer Kleinionen. Umschau 14: 420-422

Eicke-Henning W (2000): Wohnungslüftung, Feuchte und Schimmel in Wohnungen - ein neues Problem Gesundheitsingenieur 121: 69-81

Energie Tirol (2001): Energiesparen durch richtiges Lüften. Broschüre der Energie Tirol, 2. Auflage. Eigenverlag

Erdmann CA, Steiner KC, Apte MG (2002): Indoor carbon dioxide concentrations and sick building syndrome symptoms in the BASE study revisited: Analyses of the 100 building dataset. Proc. INDOOR AIR '02, 9th Internat. Conf. on Indoor Air Quality and Climate. 30 June - 05 July 2002, Monterey, USA, Vol. 3: 443-448

EXPOLIS (2005): Air Pollution Exposure Distributions of Adult Urban Populations in Europe. Internet vom 02.06.2005: <http://www.ktl.fi/expolis>.

Fahy O, Senechal S, Pene J, Scherpereel A, Lassalle P, Tonnel AB, Yssel H, Wallaert B,

Tsicopoulos A (2002): Diesel exposure favors Th2 cell recruitment by mononuclear cells and alveolar macrophages from allergic patients by differentially regulating macrophage-derived chemokine and IFN-gamma-induced protein-10 production. J. Immunol. 168: 5912-5919

Fehlmann J, Wanner HU (1993): Indoor climate and indoor air quality in residential buildings. Indoor Air 3: 41-50

Fehlmann J, Wanner HU, Zamboni M (1993): Indoor air quality and energy consumption with demand controlled ventilation in an auditorium. Proc. INDOOR AIR '93, 6th Internat. Conf. on Indoor Air Quality and Climate. 4 - 8 July 1993, Helsinki, Finland, Vol. 5: 45-50

Feist W (2003): Konsequenzen für die Wohnungslüftung. In: Einfluss der Lüftungsstrategie auf die Schadstoffkonzentration und -ausbreitung im Raum. Protokollband Nr. 23: 63-84

Fiedler K (1995): Nichtionisierende elektromagnetische Felder („Elektrosmog“). Wohnmedizin 33, Oktober: 5-10

Fiedler K (1998): Luftfeuchtigkeit und Gesundheit. Wohnmedizin 36: 67-69

Fiedler K, Hoyer H (1996): Logistische Regressionsanalysen zum Einfluss von Wohnumwelt, Wohnhygiene und Lebensweise auf die Häufigkeit und Dauer akuter respiratorischer Erkrankungen bei Kleinkindern. Zentralbl Hyg Umweltmed 198: 204-214

Fingerhut MA, Halperin WE, Marlow DA, Piacitelli LA, Honchar PA, Sweeney MH, Greife AL, Dill PA, Steenland K, Surada J (1991): Cancer mortality in workers exposed to 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin. N. Engl. J. Med. 324: 212-218

Finnegan MJ, Pickering CA, Burge PS (1984): The sick building syndrome. Brit. Med. J. 289: 1573-1575

Fischer G, Kobinger W (1991): Arbeitsmedizinische Ergebnisse bei künstlicher Luftionisation. Atemw.-Lungenkrkh. 17, 1. Beiheft: B78-B80

Flannigan B, Morey PR (1996): ISIAQ Task Force 1: Towards Guidelines for Control of Moisture. Problems affecting Indoor Air Quality. Indoor Air Quality in Practice, Moisture and Cold Climate Solutions

Fletcher AM, Pickering CAC, Custovic A, Simpson J, Kennaugh J, Woodcock A (1996): Reduction in humidity as a method of controlling mites and mite allergens. The use of mechanical ventilation in British domestic dwellings Clin. Exp. Allergy 26: 1051-1056

Flückiger B (1999): Hygienische Aspekte von Luftansaug-Erdregistern. 3. Passivhaustagung, 19.-20.02.1999 Bregenz

Formaldehydverordnung (1990): Verordnung des Bundesministers für Umwelt, Jugend und Familie vom 12. Februar 1990 über Beschränkungen des Inverkehrsetzens und über die Kennzeichnung formaldehydhaltiger Stoffe, Zubereitungen und Fertigwaren, BGBl. Nr. 194/1990

Friedmann H (2004a): Radon in Österreich. Physikalische Grundlagen und Vorkommen. In: Österr. Institut für Baubiologie und -ökologie (Hrsg.): Gesunde Raumluf. Schadstoffe in Innenräumen – Prävention und Sanierung. Internationaler Kongress, MessezentrumWienNeu, 12.-13.2.2004. IBO-Verlag, Wien: 183-186

Friedmann H (2004b): Internet vom 14.07.2004: http://www.univie.ac.at/Kernphysik/oenrap/j_mittel.gif

Friedmann M, Haber P (1982): Wirkung negativ geladener Luftionen auf die Regulation von Atmung und Kreislauf unter dosierter körperlicher Belastung sowie auf die Reaktionszeit. Wien, med. Wochenschr. 132: 101-105

Gassel RP (2003): Innenraumbehaglichkeit. Wohnmedizin 41: 57-60

Gehring U, Douwes J, Doekes G, Koch A, Bischof W, Fahlbusch B, Richter K, Wichmann H-E, Heinrich J; INGA Study Group. Indoor Factors and Genetics in Asthma (2001): Beta-(1,3)-glucan in house dust of German homes: housing characteristics, occupant behavior, and relations with endotoxins, allergens, and molds. Environ. Health Perspect. 109: 139-44

Gehring U, Bischof W, Borte M, Herbarth O, Wichmann H-E, Heinrich J for the LISA study group (2004): Levels and predictors of endotoxin in mattress dust samples from East and West German homes. Indoor Air 14: 284-292

Geissler S (2004): Persönliche Mitteilung. Ergebnisse des Workshops „Passivhaus und Gesundheit“ im Rahmen des Kongresses „Gesunde Raumluf. Schadstoffe in Innenräumen – Prävention und Sanierung“. MessezentrumWienNeu, 12.-13.2.2004, Wien

Gillespie J (2004): Endotoxin: a link between the indoor environment and early childhood wheezing. 3rd International Conference on Children's Health and the Environment, London 31.3.-2.4.2004

GIRL (1998): Feststellung und Beurteilung von Geruchsimmissionen – Geruchsimmissions-Richtlinie. Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen. Internet vom 06.03.2005. http://www.stua-lp.nrw.de/3/form3/girl_040921.doc

Gränz A, Lischinig H, Fischer G (1985): Anwendung von Ionengeneratoren zur Luftgüteverbesserung in Wohnhabitaten und zur unterstützenden Therapie bei Erkrankungen der Luftwege. notabene medici 15: 490-495

Greml A, Blümel E, Kapferer R, Leitzinger W (2004): Technischer Status von Wohnraumbelüftungsanlagen. Hrsg: BM für Verkehr, Innovation und Technologie, Eigenverlag

Grenzwerteverordnung 2003 (GKV 2003): Verordnung des Bundesministers für Wirtschaft und Arbeit über Grenzwerte für Arbeitsstoffe und über krebserzeugende Arbeitsstoffe, BGBl. II Nr. 253/2001 i.d.F. BGBl. 184/2003

Grillot R, Patat S, Perdrix A, Croize J (1990): Contamination of air systems: 1987-88 assessment and prospects of the Grenoble Intervention Group. *Aerobiologia* 6: 58-65

Gross, Heinrich J, Fahlbusch B, Jäger L, Bischof W, Wichmann H-E (2000): Indoor determinants of Der p 1 and Der f 1 concentrations in house dust are different. In: *Clinical & Experimental Allergy* Volume 30 March 2000 Issue 3: 376

Hansen D, Volland G, Krause G, Zoeltzer D (2000): Determination and occurrence of phosphorous compounds (POC) in house dust and indoor air. *Otto Graf Journal* 11: 201-209

Harving H, Korsgaard J, Dahl R (1994a): Clinical efficacy of reduction in house-dust mite exposure in specially designed, mechanically ventilated 'healthy' homes. *Allergy* 49: 860-870

Harving H, Korsgaard J, Dahl R (1994b): House-dust mite exposure reduction in specially designed, mechanically ventilated 'healthy' homes. *Allergy* 49: 713-718

Heinrich J, Gehring U, Douwes J, Koch A, Fahlbusch B, Bischof W, Wichmann H-E (2001): Pets and vermin are associated with high endotoxin levels in house dust. *Clinical & Experimental Allergy* 31: 1839-1845

Heinrich J, Bolte G, Hölscher B, Douwes J, Lehmann I, Fahlbusch B, Bischof W, Weiss M, Borte M, Wichmann H-E on behalf of the LISA study group. (2002): Allergens and endotoxin on mothers' mattresses and total IgE in cord blood of neonates. *European Respiratory Journal* 20: 617-623

Heinzow B (1993): Organische Verbindungen/Pentachlorphenol. In: Wichmann H-E, Schlipkötter H-W, Fülgraff G (Hrsg.): *Handbuch der Umweltmedizin*. ecomed, Landsberg/Lech

Heudorf U, Angerer J (2000): Humanbiomonitoring auf PAK-Metaboliten im Urin von Kindern aus Wohnungen mit PAK-haltigem Parkettkleber. Ergebnisse aus der umweltmedizinischen Sprechstunde des Frankfurter Gesundheitsamtes. *Umweltmedizin in Forschung und Praxis* 5: 218-226

Hirsch T (1999): Indoor allergen exposure in West and East Germany: a cause for different prevalences of asthma and atopy? *Rev. Environ. Health* 14: 159-168

Honeywell (2005): Beschreibung des Messwertgebers AQS51/61. Internet vom 06.03.2005: http://www.hga.honeywell.de/e_katalog/index.html

Horn W, Ullrich D, Seifert B (1998): VOC emissions from cork products for indoor use. *Indoor Air* 8: 39-46

HOVAL (2005): Prospekt der Fa. Hoval, Produkt Hoval HomeVent. Internet vom 15.02.2005: http://www.hoval.com/contents/download/homeevent_handbuch.pdf

Huber G, Wanner HU (1982): Raumluftqualität und minimale Lüftungsraten. *Ges Ing* 103: 207-210

Hutter H-P, Moshhammer H, Wallner P, Damberger B, Tappler P, Kundi M (2002): Volatile organic compounds and formaldehyde in bedrooms: results of a survey in Vienna, Austria. *Proc. INDOOR AIR '02, 9th Internat. Conf. on Indoor Air Quality and Climate*. 30 June - 05 July 2002, Monterey, USA, Vol. 2: 239-243

Hutter H-P, Moshhammer H, Kundi M, Wallner P, Neuberger M (2002): Moulds in housing: visual inspection and spore counts comparison - implications for future strategies in the public health setting. *Central European Journal of Public Health* 10: 93-96

Hutter H-P, Moshhammer H, Wallner P, Damberger B, Tappler P, Kundi M (2003): Health complaints after moving into a new office building: results of measurements and investigations of employees. Healthy Buildings 2003: Proceedings of ISIAQ 7th International Conference, Singapore, 7.-11.12.2003: 65-69

Hutter H-P, Moshhammer H, Wallner P, Tappler P, Kundi M (2004): Flammenschutzmittel, Phthalate und multiple Symptome bei Beschäftigten in einem neuen Bürogebäude. 3. Fachdialog: „Chemie in Innenräumen – ein Auslöser für MCS? 15.06.2004, Wien, Tagungsband

IARC (2004): Overall Evaluations of Carcinogenicity to Humans; as evaluated in IARC Monographs Volume 88. Internet vom 12.12.2004: <http://www-cie.iarc.fr/monoeval/crthgr01.html>

IBN (2002): Stellungnahme zu Studie Münzenberg & Thumulla. Zeitschrift Wohnung & Gesundheit. Institut für Baubiologie & ökologie Neubeuern.

IG-L (2001): 62. Bundesgesetz, mit dem das Immissionsschutzgesetz-Luft geändert und das Smogalarmgesetz aufgehoben wird. Ausgegeben am 6. Juli 2001

ISO 7730 (1994): Moderate Thermal Environments – Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort. International Standardization Organization.

Jachan C (2003): Hygienischer Tauglichkeitsnachweis und Optimierung der bauphysikalischen Performance von Gebäuden in Passivbauweise. Dissertation am Institut für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz – Abt. Bauphysik E 206. Technische Universität Wien

Jacob B, Schulz R, Zorn C, Lehmann I, Schötzau A, Heinrich J, Sierig, G, Diez U, Bader A, Fahlbusch B, Weiß M, Jäger L, Herbarth O, Schaaf B, v. Berg A, Wichmann H-E, Borte M (1999): LISA – Einfluß von Lebensbedingungen und Verhaltensweisen auf die Entwicklung von Immunsystem und Allergien im Ost-West-Vergleich. Gesundheitswesen 61: A100-A101

Jensen B, Wolkoff P, Wilkins CK, Knudsen H (1993): Characterisation of linoleum, Part 1+2. Proc. INDOOR AIR '93, 6th Internat. Conf. on Indoor Air Quality and Climate. 4 - 8 July 1993, Helsinki, Finland, Vol. 2: 443-454

Jorde W, Schata M (1979): Inhalation unipolarer Ionen. Atemw.-Lungenkrkh. 5: 443-453

Jamriska M, Morawska L, Ensor DS (2003): Control strategies for sub-micrometer particles indoors: model study of air infiltration and ventilation. Indoor Air 13: 96-105

Kabesch M, von Mutius E (2002): Prävention bei Asthma bronchiale im Kindesalter. Dtsch. Med. Wochenschr. 127: 1506-1508

Keller R, Senkpiel K, Ohgke H (1998): Geruch als Indikator für Schimmelpilzbelastungen in natürlich belüfteten Innenräumen – Nachweis mit analytischer MVOC-Messung. In: Gesundheitliche Gefahren durch biogene Luftschadstoffe, Schriftenreihe des Instituts für Medizinische Mikrobiologie und Hygiene der medizinischen Universität zu Lübeck, Heft 2: 161-170

Kersten W, von Wahl PG (1989): Schimmelpilzallergie. Allergologie 12: 174-178

Kimura S, Ashiba M (1939): Influence of air lacking light ions and the effect of its artificial ionization upon human beings in occupied rooms. Jp. J. Med. Sci. 7: 1-12

Kislinger J, Zelger T, Obermayer J (2003): Passivhauskindergarten mit heilpädagogischer Integrationsgruppe. Projektbericht im Rahmen der Projektlinie „Haus der Zukunft“. Internet: www.hausderzukunft/results.html/id2088 vom 25.09.2004

Klenø JG, Wolkoff P (2002): Eye Irritation from exposure to ppb-levels of limonene oxidation products. Proc. INDOOR AIR '02, 9th Internat. Conf. on Indoor Air Quality and Climate. 30 June - 05 July 2002, Monterey, USA, Vol. 2: 602-607

Koch HM, Rossbach B, Drexler H, Angerer J (1993): Internal exposure of the general population to DEHP and other phthalates – determination of secondary and primary phthalate monoester metabolites in urine. Environ. Res. 93:177-185

Kociba R (1984): Evaluation of the carcinogenic and mutagenic potential of 2,3,7,8-TCDD and other chlorinated dioxins. Banbury Rep. 18: 73-84

Kommission Human-Biomonitoring des Umweltbundesamtes (2003): Abschätzung der zusätzlichen Aufnahme von PCB in Innenräumen durch die Bestimmung der PCB-Konzentrationen in Plasma bzw. Vollblut. Bundesgesundheitsblatt – Gesundheitsforschung – Gesundheitsschutz 46: 923-927

König H (1986): Unsichtbare Umwelt. 5. Aufl. Eigenverlag, München

Kopiske G (2004): Forschungsprojekt LUQAS II: Lüftungsampel – Versuch einer einfachen Bewertung von Innenraumluf mit einem Luftqualitäts- und Feuchtesensor. In: Umwelt, Gebäude und Gesundheit. Innenraumhygiene, Raumlufqualität und Energieeinsparung, 7. AGÖF Fachkongress, München 4.-5.3.2004: 291-297

Krämer U, Koch T, Ranft U, Ring J, Behrendt H. (2000): Traffic-related air pollution is associated with atopy in children living in urban areas. Epidemiology 11: 64-70.

Krämer U, Heinrich J, Wjst M, Wichmann H-E (1999): Age of entry to day nursery and allergy in later childhood. Lancet 353: 450-454

Kraus G (2004): persönliche Mitteilung

Krause C, Chutsch M, Henke M, Huber, M, Kliem, C, Leiske, M, Mailahn, W, Schulz, C, Schwarz, E, Seifert, B, Ullrich, D (1991): Messung und Analyse von Umweltbelastungsfaktoren in der Bundesrepublik Deutschland – Umwelt und Gesundheit. Band IIIc: Wohn-Innenraum: Raumluf. Berlin, Institut für Wasser-, Boden- und Lufthygiene, Bundesgesundheitsamt. WaBoLu-Hefte 4/91

Kröling P (1991): Luftionisation: Nützlich, schädlich oder unwirksam? Atemw.-Lungenkrkh. 17, 1. Beiheft: B87-B92

Kröling P (1985): Natural and artificial produced air ions: a biological relevant climatic factor? Int. J. Biometeor. 29: 233-242

Kundi M (2004): Health effects from phthalates: epidemiological evidence. Ökobiotikum 2004, Suppl. 1: 14-16

Künzel H (1982): Lüftung in Wohnungen. Fenster Fassade 9: 174-179

Kurz H, Riedler J (2003): Zunahme allergischer Erkrankungen im Kindesalter - aktuelle Hypothesen und mögliche Prävention. Wiener Medizinische Wochenschrift 153: 50-58

Leech JA, Raizenne M, Gusdorf J (2004): Health in occupants of energy efficient new homes. Indoor Air 14: 169-173

Lehmann I, Rehwagen M, Diez U, Seiffart A, Rolle-Kampczyk U, Richter M, Wetzig H, Borte M, Herbarth O (2001): Enhanced in vivo IgE production and T cell polarization to the type 2 phenotype in association with indoor exposure to VOC: results of the LARS study. Int. J. Hyg. Env. Health 204: 201-211

Linsel G (2001): Bioaerosole – Entstehung und biologische Wirkungen. In: Tagungsband "Sicherer Umgang mit biologischen Arbeitsstoffen und Zytostatika", Braunschweig, 12.03.-13.03.2001

Livanova LM, Levshina IP, Nozdracheva LV, Elbakidze MG, Airapetiants MG (1998): The protective action of negative air ions in acute stress in rats with different typological behavioral characteristics (in Russian). Zh. Vyssh. Nerv. Deiat. Im. I. P. Pavlova 48: 554-557

Livanova LM, Elbakidze MG, Airapetiants MG (1999): Effect of the short-term exposure to negative air ions on individuals with vegetative disorders (in Russian). Zh. Vyssh. Nerv. Deiat. Im. I. P. Pavlova 49: 760-767

Llamas M, Siemers U, Weis N (2004): Forschungsprojekt Lüftungsampel: Überprüfung eines Luftqualitätssensors und Luftwechsellmessungen in bewohnten Innenräumen und in Schulen. In: Umwelt, Gebäude und Gesundheit. Innenraumhygiene, Raumluftqualität und Energieeinsparung, 7. AGÖF Fachkongress, München 4.-5.3.2004: 298-307

Loidl D, Pagani A (1996): Untersuchungen zum Emissionsverhalten organischer, nicht textiler-Fußbodenbeläge. Fortschrittsbericht Chemie und Kunststoffe, Österreichisches Kunststoffinstitut, Band 10

Lukassowitz I (1990): Polychlorierte Biphenyle in der Innenraumlufte. Bundesgesundheitsblatt 33: 492-499

Luoma M, Battermann S.A. (2001): Characterisation of Particulate Emissions from Occupant Activities in Offices. Indoor Air 11, No. 1: 35-48

Maes W (2004): persönliche Mitteilung

Manz A, Berger J, Waltsgott H (1982): Zur Frage des Berufskrebses bei Beschäftigten der Gasindustrie (Cohortenstudie). Forschungsbericht Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Unfallforschung, Dortmund

Marth E (2004): persönliche Mitteilung

Martkainen PJ, Asikainen, A., Nevalainen, A., Jantunen, M., Pasanen, P. und Kalliokoski, P. (1990): Microbial growth on ventilation filter materials. Proc. INDOOR AIR '90, 5th Internat. Conf. on Indoor Air Quality and Climate. 29 July - 3 August 1990, Toronto, Vol. 3: 203-206

Mersch-Sundermann V (2001): Lindan. In: Böse-O-Reilly S, Kammerer S, Mersch-Sundermann V, Wilhelm M (Hrsg.): Leitfaden Umweltmedizin, 2. Auflage. Urban und Fischer, München, Jena

Mersch-Sundermann V, Kevekordes S (2001a): Holzschutzmittel. In: Böse-O-Reilly S, Kammerer S, Mersch-Sundermann V, Wilhelm M (Hrsg.): Leitfaden Umweltmedizin, 2. Auflage. Urban und Fischer, München, Jena

Mersch-Sundermann V, Kevekordes S (2001b): Pyrethroide. In: Böse-O-Reilly S, Kammerer S, Mersch-Sundermann V, Wilhelm M (Hrsg.): Leitfaden Umweltmedizin, 2. Auflage. Urban und Fischer, München, Jena

Möhner M (2003): Risikobewertung aus arbeitsmedizinisch-epidemiologischer Sicht am Beispiel des Schneeberger Lungenkrebses. Bundesgesundheitsblatt – Gesundheitsforschung – Gesundheitsschutz 46: 592-602

Molhave L (1991): Volatile organic compounds, indoor air quality and health. Indoor Air 1: 357-376

Monaco RP, Acker CA (1963): Psychophysiological effects of ionized air on psychiatric patients. Newsl. Res. Psych. 5: 22-25

Möritz M, Peters H, Nipko B, Weist K, Rüden H. (2001): Mikroorganismen und Endotoxine in Raumluftechnischen Anlagen. Gesundheits-Ingenieur – Haustechnik – Bauphysik – Umwelttechnik 122, Heft 1: 3-15

Moser M (2004): Luftionen am Wasserfall. Referat bei den Salzburger Wassertagen, 13.-14. Mai 2004

Müller-Limroth (1977), Gertis et al. (1979): zit. in Luftqualität in Innenräumen (1997) Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Schriftenreihe Umwelt Nr. 287

Münzenberg U, Thumulla J (2002): Raumlufqualität in Passivhäusern. In: Wohnung + Gesundheit 12/02 Nr.105

Nagda NL, Hodgson M (2001): Low relative humidity and aircraft cabin air quality. Indoor Air 11: 200-214

Nakane H, Asami O, Yamada Y, Ohira H (2002): Effect of negative air ions on computer operation, anxiety and salivarychromogranin A-like immunoreactivity. Int. J. Psychophysiol. 46: 85-89

Neubert R, Golor G, Maskow L, Helge H, Neubert D (1994): Evaluation of possible effects of 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin and other congeners on lymphocyte receptors in Callithrix jacchus and man. Exp. Clin. Immunogenet. 11: 119-27

Nevalainen A, Willeke K, Liebhaber F, Pastuszka J (1993): Bioaerosol Sampling. In: Willeke, K.; Baron, P. A. (ed.): Aerosol Measurement – Principles, Techniques, and Applications. Van Nostrand Reinhold, New York: 471-492

Oberfeld G, Eder W, Gamper A, Riedler J (1999): Die Beziehung zwischen selbstberichteten Symptomen von bronchialer Hyperreagibilität und Rhinokonjunktivitis und verschiedenen Risikofaktoren bei 12- bis 15-jährigen Schülern in Salzburg (ISAAC Studie 1995 und 1996). Atemw.-Lungenkrkh. 25: 339-342

Ohgke H, Senkpiel K, Beckert J (1993): Experimental evaluation of microbial growth and survival in air filters. Proc. INDOOR AIR '93, 6th Internat. Conf. on Indoor Air Quality and Climate. 4 - 8 July 1993, Helsinki, Vol. 6: 521-526

ÖBIG (1995): Luftverunreinigungen in Innenräumen. Im Auftrag des Bundesministeriums für Gesundheit, Sport und Konsumentenschutz. Österreichisches Bundesinstitut für Gesundheitswesen. Wien

ÖNORM EN 779 (2003): Partikel-Luftfilter für die allgemeine Raumluftechnik – Bestimmung der Filterleistung

ÖNORM 13779 (2005): Lüftung von Nichtwohngebäuden – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen an Lüftungs- und Klimaanlageanlagen

ÖNORM B 8110-2 (2003): Wärmeschutz im Hochbau. Teil 2: Wasserdampfdiffusion und Kondensationsschutz

ÖNORM H 6000-3 (1989): Lüftungstechnische Anlagen; Grundregeln, hygienische und physiologische Anforderungen für den Aufenthaltsbereich von Personen

ÖNORM H 6021 (2003): Lüftungstechnische Anlagen – Reinhaltung und Reinigung

ÖNORM H 6038 (2002): Lüftungstechnische Anlagen – Kontrollierte Wohnraumlüftung mit Wärmerückgewinnung. Planung, Montage, Prüfung, Betrieb und Wartung

ÖNORM M 5700 (2004): Messen von Innenraumluf-Verunreinigungen

ÖNORM M 5700-1 (2002): Messen von Innenraumluf-Verunreinigungen – Gaschromatographische Bestimmung organischer Verbindungen – Teil 1: Grundlagen

ÖNORM M 5700-2 (2002): Messen von Innenraumluf-Verunreinigungen – Gaschromatographische Bestimmung organischer Verbindungen – Teil 2: Aktive Probenahme durch Anreicherung auf Aktivkohle – Lösungsmittlextraktion

ÖNORM M 5700-3 (2004): Messen von Innenraumluf-Verunreinigungen – Gaschromatographische Bestimmung organischer Verbindungen – Teil 3: Aktive Probenahme durch Anreicherung auf Sorbenzien – Thermodesorption

ÖNORM M 9405 (1993): Messung von Asbestfaserkonzentrationen in der Luft

ÖNORM S 5280-1 (1998): Radon – Messverfahren und deren Anwendungsgebiete

ÖNORM S 5280-2 (2003): Radon – Technische Vorsorgemaßnahmen bei Gebäuden

ÖNORM S 5280-3 (2005): Radon – Sanierungsmaßnahmen an Gebäuden

ÖNRAP (2001): Österreichisches Radonprojekt. <http://www.univie.ac.at/Kernphysik/oenrap/welcome.htm>

Otto M, von Mühendahl KE (2003): Pyrethroide. Kinderumwelt GmbH. Internet vom 01.02.2005: <http://www.allum.de>

Owen MK, Ensor DS, Sparks LE (1992): Airborne particle sizes and sources found in indoor air. Atmospheric Environment, 26A: 2149-2162

Panzhauser E et al. (1987): Formaldehydbelastung in österreichischen Wohnungen. Archivum Oecologiae Hominis, Wien

Pasanen (1992): Airborne mesophilic fungal spores in various residential environments. Atmospheric Environment, 26A: 861-2868

PCP-Richtlinie (1997): Richtlinie für die Bewertung und Sanierung Pentachlorphenol (PCP)-belasteter Baustoffe und Bauteile in Gebäuden. Deutsches Institut für Bautechnik. Mitteilungen DIBt. 1/1997

PCP-Verordnung (1991): Bundesgesetzblatt f.d. Rep. Österreich, Verordnung des BM für Umwelt, Jugend und Familie vom 5.2.1991

Pellika M, Jantunen MJ, Kalliokoski P, Pitkänen E (1986): Ventilation and Bioaerosols. Ventilation '85, Toronto, Elsevier Science

Perez-Maldonado IN, Diaz-Barriga F, de la Fuente H, Gonzalez-Amaro R, Calderon J, Yanez L (2004): DDT induces apoptosis in human mononuclear cells in vitro and is associated with increased apoptosis in exposed children. Environ. Res. 94: 38-46

Pettenkofer M von (1858): Über den Luftwechsel in Wohnungen. Cotta, München.

Phillips G, Harris GJ, Jones MW (1964): Effects of air ions on bacterial aerosols. Int. J. Biometeor. 8: 27-37

Pfluger R (2003): Lüftthygiene im Passivhaus. In: Einfluss der Lüftungsstrategie auf die Schadstoffkonzentration und -ausbreitung im Raum. Protokollband Nr. 23: 45-61

Plieninger P (1998): Ester und Ether mehrwertiger Alkohole in der Raumluf – eine repräsentative Untersuchung in 200 Berliner Haushalten. In: Gebäudestandard 2000: Energie und Raumlufqualität, 4. AGÖF Fachkongress in Nürnberg: 220-224

Pluschke P, Bolzer W, Nix N, Schelle G (1996): The contamination of a primary school building by chlornaphtalenes – chemical analysis and risk assessment. Proc. INDOOR AIR '96, 7th Internat. Conf. on Indoor Air Quality and Climate, Nagoya, Japan, Vol. 3: 71-76

Pluschke P (1996): Luftschadstoffe in Innenräumen. Springer

Poland A, Glover E (1979): An estimate of the maximum in vivo covalent binding of 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin to rat liver protein ribosomal RNA and DNA. Cancer Res. 39: 3341-3344

Pott F, Heinrich U (1993): Staub und Staubinhaltsstoffe/Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAH). In: Wichmann H-E, Schlipkötter H-W, Fülgraff G (Hrsg.): Handbuch der Umweltmedizin, Loseblatt-Sammlung. ecomed, Landsberg/Lech

Produktsicherheitsbeirat BMFJK (1985): Empfehlung des Produktsicherheitsbeirats des Bundesministeriums für Familie, Jugend und Konsumentenschutz für Formaldehyd in Wohnräumen. Sitzungsprotokoll vom 4.3.1985

Ranson C von, Belitz HD (1992): Untersuchungen zur Struktur-Aktivitätsbeziehung bei Geruchsstoffen, 2. Mitteilung: Wahrnehmungs- und Erkennungsschwellenwerte sowie Geruchsqualitäten gesättigter und ungesättigter aliphatischer Aldehyde. Lebensmittel-Untersuchung und Forschung

Rat von SV (1987): Luftverunreinigungen in Innenräumen. Der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen. Sondergutachten Mai 1987. Verlag Kohlhammer Stuttgart, Mainz

Recknagel W, Sprenger E, Schramek ER (1999): Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik. Herausgegeben von Ernst Rudolf Schramek, 69. Auflage, R. Oldenbourg Verlag München, Wien

Reilly T, Stevenson IC (1993): An investigation of the effects of negative air ions on responses to submaximal exercise at different times of day. J. Hum. Ergol. (Tokyo) 22: 1-9

Reiss J (1986): Schimmelpilze, Lebensweise Nutzen Schaden Bekämpfung. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg

Reiter R (1985): Frequency distribution of positive and negative small ion concentrations. Int. J. Biometeor. 29: 223-231

Rietschel H (1994): Raumklimatechnik, Band 1 – Grundlagen. 16. Auflage, herausgegeben von Horst Esdorn, Springer-Verlag Berlin

Ring J (1996): Neurodermitis. Expertise zur gesundheitlichen Versorgung und Vorsorge bei Kindern mit atopischem Ekzem. Studienreihe Allergie und Umwelt. ecomed, Landsberg

Rohr AC, Weschler CJ, Koutrakis P, Spengler JD (2003): Generation and quantification of ultrafine particles through terpene/ozone reaction in a chamber setting. Aerosol Science and Technology 37: 65-78

Rohracher H, Kukovetz B, Ornetzeder M, Zelger T, Enzensberger G, Gadner J, Zelger J, Buber R (2001): Akzeptanzverbesserung bei Niedrigenergiehaus-Komponenten. Endbericht einer Studie im Auftrag des BM für Verkehr, Innovation und Technologie im Rahmen des Haus der Zukunft

Rohregger G (2004): Belüftung in Schlafräumen – CO₂ und Luftqualität. In: Österr. Institut für Baubiologie und -ökologie (Hrsg.): Gesunde Raumluf. Schadstoffe in Innenräumen – Prävention und Sanierung. Internationaler Kongress, MessezentrumWienNeu, 12.-13.2.2004. IBO-Verlag, Wien: 89-95

Römpf (1995): Chemie Lexikon (CD-ROM). Stuttgart/New York; Georg Thieme Verlag

Roßkamp E (1992): Polychlorierte Biphenyle in der Innenraumluf – Sachstand. Bundesgesundheitsblatt 9: 434

Ruth JH (1986): Odor thresholds and irritation levels of several chemical substances: a review. Am. Ind. Hyg. Assoc. J. 47: A142-A151

Rylander R, Fogelmark B (1997): (1-3)- β -D-Glucan in Some Indoor Air Fungi. Indoor Built Environ. 6: 291-294

Ryushi T, Kita I, Sakurai T, Yasumatsu M, Isokawa M, Aihara Y, Hama K (1998): The effect of exposure to negative air ions on the recovery of physiological responses after moderate endurance exercise. Int. J. Biometeorol. 41: 132-136

Sagunski H (1996): Richtwerte für die Innenraumluft: Toluol. Bundesgesundheitsblatt 39: 416-421

Sagunski H (1998): Richtwerte für die Innenraumluft: Styrol. Bundesgesundheitsblatt 41: 392-398

Sagunski H, Roßkamp E (2002): Richtwerte für die Innenraumluft: Tris(2-chlorethyl)phosphat. Bundesgesundheitsblatt – Gesundheitsforschung – Gesundheitsschutz 45: 300-306

Sagunski H, Heinzow B (2003): Richtwerte für die Innenraumluft: Bicyclische Terpene. Bundesgesundheitsblatt – Gesundheitsforschung – Gesundheitsschutz 46: 346-352

Sagunski H (2004): Umgang mit innenraumbezogenen Beschwerden (Schwerpunkt Geruchswahrnehmungen). In: Österr. Institut für Baubiologie und -ökologie (Hrsg.): Gesunde Raumluft. Schadstoffe in Innenräumen – Prävention und Sanierung. Internationaler Kongress, Messezentrum Wien Neu, 12.-13.2.2004. IBO-Verlag, Wien: 129-134

Sagunski H, Heger W (2004): Richtwerte für die Innenraumluft: Naphthalin. Bundesgesundheitsblatt – Gesundheitsforschung – Gesundheitsschutz 47: 705-712

Salthammer T, Fuhrmann F (1996): Emission of Monoterpenes from wooden furniture. Proc. INDOOR AIR '96, 7th Internat. Conf. on Indoor Air Quality and Climate, Nagoja, Japan, Vol. 3: 607-612

Salthammer T, Bednarek M, Fuhrmann F (1999): Effect of climatic parameters on the release of VOC from UV-cured furniture coatings. Proc. INDOOR AIR '99, 8th Internat. Conf. on Indoor Air Quality and Climate. Edinburgh, Scotland, Vol. 5: 99-104

Salthammer T (2000): Verunreinigung der Innenraumluft durch reaktive Substanzen – Nachweis und Bedeutung von Sekundärprodukten. Teil III-6.4.2 des Handbuch für Bioklimatologie und Lüftthygiene, 4. Erg.Lfg. 12/2000

Saracci R, Kogevinas M, Bertazzi PA, Buene de Mesquita BH, Coggon D, Green LM, Kauppinen T, L'Abbe KA, Littorin M, Lynge E, Mathews JD, Neuberger M, Osman J, Pearce N, Winkelmann R (1991): Cancer mortality in workers exposed to chlorophenoxy herbicides and chlorophenols. Lancet 338: 1027-1032

SARAH (1998): Forschungsprojekt Sanierung radonbelasteter Häuser. Endbericht. Gefördert vom BMWA, Projekt Nr. F1375

Schechter A, Pavuk M, Papke O, Ryan JJ, Birnbaum L, Rosen R (2003): Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in U.S. mothers' milk. Environ. Health Perspect. 111: 1723-1729

Schiedel (2004): Verkaufsunterlagen der AERA-Bedarfslüftung. Fa. Schiedel, Nussbach. Stand 16.07.2004

Schleibinger H et al. (2002): Ziel- und Richtwerte zur Bewertung der VOC-Konzentrationen in der Innenraumluft – ein Diskussionsbeitrag. Umweltmedizin in Forschung und Praxis 7: 139-147

Schleibinger H, Marchl D, Laußmann D, Braun P, Brattig C, Mangler M, Eis D, Nickelmann A, Rüden H (2004): MVOC – zum Nachweis von Schimmel ungeeignet In: Umwelt, Gebäude und Gesundheit. Innenraumhygiene, Raumluftqualität und Energieeinsparung, 7. AGÖF Fachkongress, München 4.-5.3.2004: 104-111

Schmidt S (2004): Checkliste der Empfehlungen zur Hausstaubmilbensanierung. Kinderumwelt GmbH, Internet vom 10.02.2004: <http://www.allum.de>.

Schneider J, Rödelberger K, Weitowitz H-J (2003a): Staub und Staubinhaltsstoffe/Asbest. In: Wichmann H-E, Schlipkötter H-W, Füllgraff G (Hrsg.): Handbuch der Umweltmedizin, 26. Erg.-Lfg. 4/03. ecomed, Landsberg/Lech

Schneider U, Oetli F, Quiring B et al. (2003b): Themenwohnen Musik: Entwicklung eines urbanen Stützpunktes für Musiker. Berichte aus Energie- und Umweltforschung 03/2003. BVMVIT, Wien

Schneiders T (1994): Zur hygienischen Luftqualität in Wohngebäuden bei der Konditionierung der Zuluft mittels Erdwärmetauscher. Technische Hochschule Aachen

Schnieders J (2003a): Wirkung von Position und Art der Lüftungsöffnungen auf den Schadstoffabtransport. In: Einfluss der Lüftungsstrategie auf die Schadstoffkonzentration und -ausbreitung im Raum. Protokollband Nr. 23: 85-123

Schnieders J (2003b): Lüftungsstrategien und Planungshinweise. In: Einfluss der Lüftungsstrategie auf die Schadstoffkonzentration und -ausbreitung im Raum. Protokollband Nr. 23: 145-176

Schriever E, Marutzky R (1990): VOC Emissions of coated parquetered floors. Proc. INDOOR AIR '90, 5th Internat. Conf. on Indoor Air Quality and Climate. 29 July - 3 August 1990, Toronto, Canada, Vol. 1: 551-556

Schriever E, Marutzky R (1991): Geruchs- und Schadstoffbelastung durch Baustoffe in Innenräumen – Eine Literaturstudie. WKI - Bericht Nr. 24, WKI - Braunschweig

Schulze-Darup B (2002): Passivhaus-Projektbericht: Energie und Raumlufthqualität. Fürth. Zusammenfassung IBO magazin 1/2003: 12-15

Sedlbauer K (2001): Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen. Dissertation Universität Stuttgart

Seifert B (1990a): Flüchtige Organische Verbindungen in der Innenraumlufth. Bundesgesundheitsblatt 33: 111-115

Seifert B (1990b): Regulating Indoor Air. Proc. INDOOR AIR '90, 5th Internat. Conf. on Indoor Air Quality and Climate. 29 July - 3 August 1990, Toronto, Canada, Vol 5: 35-50

Seifert B (1999): Richtwerte für die Innenraumlufth – Die Beurteilung der Innenraumlufthqualität mit Hilfe der Summe der flüchtigen organischen Verbindungen (TVOC-Wert). Bundesgesundheitsblatt – Gesundheitsschutz – Gesundheitsforschung 42: 270-278

Senkpiel K, Ohgke H, Beckert J (1994): Kinetik der Auskeimung von Schimmelpilzsporen auf Baustoffen in Abhängigkeit von deren Gleichgewichts-, Material-, und Oberflächenfeuchte. Gesundheitsingenieur – Haustechnik – Bauphysik – Umwelttechnik. 115, 2: 77-85

Seppänen OA, Fisk WJ, Mendell MJ (1999): Association of ventilation rates and CO₂ concentrations with health and other responses in commercial and institutional buildings. Indoor Air 9: 226-252

Skatsche R, Kobinger W, Fischer G (1988): Einfluss künstlich erzeugter negativer Kleinionen auf psychophysische Aktivitäten von Büroangestellten. Zbl. Arbeitsmed. 38: 358-363

Sollinger S, Levsen K (1992): Methoden zur Charakterisierung der Emissionen aus textilen Bodenbelägen. In: Schadstoffbelastung in Innenräumen, Tagung der Ges. deutscher Chemiker und der Komm. Reinhaltung der Luft im VDI: 264-280

SSK (1994): Empfehlungen der österreichischen Strahlenschutzkommission betreffend Richtwerte für die Radonkonzentration in Innenräumen, in: Radon in Österreich 1993; Forschungsberichte des Bundesministeriums für Gesundheit, Sport und Konsumentenschutz, Sektion III, Wien

SSK_DE (2004): Auswertung der vorliegenden Gesundheitsstudien zum Radon – Stellungnahme der Strahlenschutzkommission. 24.Juni 2004

Stavrovskaja IG, Sirota TV, Saakian IR, Kondrashova MN (1998): Optimization of energy-dependent processes in mitochondria from rat liver and brain after inhalation of negative air ions (in Russian). Biofizika 43: 766-771

Stephen, FR, McIntyre DA, Lane A, Raw GJ, Wiech CR, Frederick J (1997): Ventilation and house air tightness: effect on indoor temperature and humidity in Southampton, U.K. Building Services Eng. Res. 18: 141-147

Studnicka M, Hackl E, Pischinger J, Fangmeyer C, Haschke N, Kuhr J, Urbanek R, Neumann M, Außener T (1997): Traffic-related NO₂ and the prevalence of asthma and respiratory symptoms in seven year olds. Eur. Respir. J.10: 2275-2278

Sulman FG, Levy D, Lunkan L (1976): Wetterfühligkeit und ihre Beziehung zu Sferics, Ionen und Elektrofeldern. Z. Phys. Med. 6: 229-238

Tappler P, Gann M (1992): Formaldehydbelastung in österreichischen Innenräumen im Zeitraum 1990-1992. In: Tagungsband der 12. Jahrestagung des IBO "Sick Building Syndrom": 153-160

Tappler P, Boos R, Fiala F (1994): Emissions of volatile organic compounds from textile floor coverings. In: Healthy Buildings '94, Proc. 3th Internat. Conf. of Healthy Buildings, Budapest 1994, Vol. 1: 237-242

Tappler P, Damberger B (1996): Interzonal airflow from garages to occupied zones as one reason for building related illness: three case studies using tracer gas measurements. Proc. INDOOR AIR '96, 7th International Conference on Indoor Air Quality and Climate. Nagoya, Japan, Vol. 4: 119-124

Tappler P, Sulzner M, Scheidl K, Damberger B, Burtscher I (1997): Formaldehyd und Luftwechsel in österreichischen Fertigteilhäusern. IBO Eigenverlag

Tappler P (2004a): Ist Natur gesund? Mögliche Raumluftprobleme durch Naturstoffe. In: Österr. Institut für Baubiologie und -ökologie (Hrsg.): Gesunde Raumluf. Schadstoffe in Innenräumen – Prävention und Sanierung. Internationaler Kongress, MessezentrumWienNeu, 12.-13.2.2004. IBO-Verlag, Wien: 209-216

Tappler P (2005): persönliche Mitteilung

Temnov AV, Sirota TV, Stavrovskaja IG, Kondrashova MN (2000): Self-organization of mitochondrial associates and effects of negative air ions (in Russian). Biofizika 45: 83-88

Terman M, Terman JS, Ross DC (1998): A controlled trial of timed bright light and negative air ionization for treatment of winter depression. Arch. Gen. Psychiatry 55: 875-882

Turiel I, Rudy JV (1982): Occupant-generated CO₂ as an indicator of ventilation rate. ASHRAE Transactions 88:197-210

Twrdik F (2005): persönliche Mitteilung

UBA (1994): Zur Problematik künstlicher Mineralfasern. Deutsches Umweltbundesamt, GBW 52/1994

UBA (1995): Biologische Innenraumlufthverunreinigungen. Bekanntmachung der Kommission Innenraumlufthygiene des Umweltbundesamtes. Bundesgesundhbl. 7/95: 284-287

UBA (2002): Leitfaden zur Vorbeugung, Untersuchung, Bewertung und Sanierung von Schimmelpilzwachstum in Innenräumen. Internet vom 14.10.2003: <http://www.uba.de>

UBA (2005): Umwelt Survey 1998. Internet vom 06.03.2005: <http://www.umweltbundesamt.de/survey/us98/biozide.htm>

UFZ (2003): Renovieren in der Schwangerschaft – ein Gesundheitsrisiko für das Kind. UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle. www.ufz.de – Presse – Pressemitteilungen 2003 – 13.01.2003

Universität zu Lübeck (2003): Internet vom 11.03.2003: <http://www.uni-luebeck.de> – Pressemitteilungen – Archiv 2003 –

Varga A (1981): Grundzüge der Elektrobioklimatologie. E. Fischer, Heidelberg

VDI 4300 Blatt 2 (1997): Messen von Innenraumlufthverunreinigungen – Meßstrategie für polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAH), polychlorierte Dibenzo-p-dioxine (PCDD), polychlorierte Dibenzofurane (PCDF) und polychlorierte Biphenyle (PCB). Hrsg: Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) im VDI und DIN – Normenausschuss

VDI 4300 Blatt 3 (1997): Messen von Innenraumlufthverunreinigungen - Meßstrategie für Formaldehyd. Hrsg: Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) im VDI und DIN – Normenausschuss

VDI 4300 Blatt 4 (1997): Messen von Innenraumlufthverunreinigungen – Meßstrategie für Pentachlorphenol (PCP) und -Hexachlorcyclohexan (Lindan) in der Innenraumlufth. Hrsg: Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) im VDI und DIN – Normenausschuss

VDI 4300 Blatt 6 (2000): Messen von Innenraumlufthverunreinigungen – Messstrategie für flüchtige organische Verbindungen (VOC). Hrsg: Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) im VDI und DIN – Normenausschuss

VDI 4300 Blatt 7 (2001): Messen von Innenraumlufthverunreinigungen – Bestimmung der Luftwechselzahl in Innenräumen. Hrsg: Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) im VDI und DIN – Normenausschuss

VDI 4300 Blatt 8 (2001): Messen von Innenraumlufthverunreinigungen – Probenahme von Hausstaub. Hrsg: Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) im VDI und DIN – Normenausschuss

VDI 4300 Blatt 9 Entwurf (2003): Messen von Innenraumlufthverunreinigungen – Messstrategie für Kohlendioxid. Hrsg: Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) im VDI und DIN – Normenausschuss

VDI 6022 Blatt 1 (2005): Hygiene-Anforderungen an Raumlufthtechnische Anlagen. Hrsg: VDI-Gesellschaft Technische Gebäudeausrüstung (TGA)

VDI 6022 Blatt 2 (2004): Hygiene-Anforderungen an Raumlufthtechnische Anlagen – Hygieneschulung. . Hrsg: VDI-Gesellschaft Technische Gebäudeausrüstung (TGA)

VOCBASE (1996): Odor thresholds, mucous membrane irritation thresholds and physicochemical parameters of volatile organic compounds. Nat. Inst. Occup. Health, Denmark, Datenträger

Von Ehrenstein OS, von Mutius E, Illi S, Baumann L, Bohm O, von Kries R (2000): Reduced risk of hay fever and asthma among children of farmers. Clin. Exp. Allergy. 30:187-193.

Von Mutius E, Martinez FD, Fritzsche C, Nicolai T, Reitmeir P, Thiemann H (1994): Skin test reactivity and number of siblings. *Brit. Med. J.* 308: 692-695

Von Mutius E (2001): The increase in asthma can be ascribed to cleanliness. *Am. J. Respir. Crit. Care. Med.* 164:1106-1107; discussion 1108-1109

Von Pettenkofer M (1858): Über den Luftwechsel in Wohnungen. Cotta, München

Wagner HM, Höpfe P (1998): Anorganische Gase/Ozon. In: Wichmann H-E, Schlipkötter H-W, Fülgraff G (Hrsg.): *Handbuch der Umweltmedizin*, 13. Erg.-Lfg. 5/1998. ecomed, Landsberg/Lech

Wallace LA, Pellizari E et al. (1986): Personal exposure, indoor-outdoor relationships, and breath levels of volatile organic compounds in New Jersey. Total exposure assessment methodology (TEAM) study. In: *Environment International* 12: 369-387

Wang TC (1975): A study of bioeffluents in a college classroom. *ASHRAE Transactions* 81: 32-44

Wanner HU (1975): Untersuchungen über den Einfluss von Luftionen auf Verunreinigungen der Luft. *Z. Chem. Rundschau* 23: 17-18

Wantke F, Demmer CM, Tappler P, Götz M, Jarisch R (1996): Exposure to gaseous formaldehyde induces IgE-mediated sensitization to formaldehyde in school-children. *Clin. Exp. Allergy* 26: 276-280

Wantke F, Focke M, Hemmer W, Bracun R, Wolf-Abdolvahab S, Tschabitscher M, Gann M, Tappler P, Götz M, Jarisch R (2000): Formaldehyde and phenol exposure during an anatomy dissection course: sensitizing potency of formaldehyde in medical students. *Allergy* 55: 84-87

Wargocki P, Wyon DP, Sundell J, Clausen G, Fanger PO (2000): The effects of outdoor air supply rate in an office on perceived air quality, Sick Building Syndrome (SBS) symptoms and productivity. *Indoor Air* 10: 222-236

Warner JA, Frederick JM, Bryant TN, Weich C, Raw GJ, Hunter C, Stephen FR, McIntyre DA, Warner JV (2000): Mechanical ventilation and high-efficiency vacuum cleaning: a combined strategy of mite and mite allergen reduction in the control of mite-sensitive asthma. *J. Allergy Clin. Immunol.* 105: 75-83

Watanabe I, Noro H, Ohtsuka Y, Mano Y, Agishi Y (1997): Physical effects of negative air ions in a wet sauna. *Int. J. Biometeorol.* 40: 107-112

Werner M, Topp R, Wimmer K, Richter K, Bischof W, Wjst M, Heinrich J (2003): TLR4 gene variants modify endotoxin effects on asthma. *J. Allergy Clin. Immunol.* 112: 323-30.

Weschler CJ, Shields HC (1999): Indoor ozone/terpene reactions as a source of indoor particles. *Atmos. Environ.* 33: 2301-2312

WHO (1989): Indoor Air Quality: organic pollutants. Euro Reports and Studies No. 111. World Health Organisation, Regional Office for Europe, Copenhagen

WHO (1993): Polychlorinated Biphenyls and Terphenyls. Environmental Health Criteria 140. Geneva

WHO (2000a): Air Quality Guidelines for Europe. Second Edition. WHO Regional Publications, European Series, No. 91. World Health Organisation (WHO), Regional Office for Europe, Copenhagen

WHO (2000b): Flame Retardants: Tris(2-butoxyethyl) Phosphate, Tris(2-ethylhexyl) Phosphate and Tetrakis(hydroxymethyl)Phosphonium Salts. Environmental Health Criteria 218, WHO Geneva

Wichmann H-E, Wahn U (2004): Allergische Atemwegserkrankungen. In: Wichmann H-E, Schlipkötter H-W, Fülgraff G (Hrsg.): Handbuch der Umweltmedizin, 28. Erg.-Lfg. 4/04. ecomed, Landsberg/Lech

Wickens K, Douwes J, Siebers R, Fitzharris P, Wouters I, Doekes G, Mason K, Hearfield M, Cunningham M, Crane J (2003): Determinants of endotoxin levels in carpets in New Zealand homes. *Indoor Air* 13: 128-135

Wickman M, Emenius G, Egmar AC, Axelsson G, Pershagen G (1994): Reduced mite allergen levels in dwellings with mechanical exhaust and supply ventilation. *Clin. Exp. Allergy* 24: 109-114

Wills-Karp M, Santeliz J, Karp CL (2001): The germless theory of allergic disease: revisiting the hygiene hypothesis. *Nat. Rev. Immunol.* 1: 69-75

Witten J, Sagunski H, Wildeboer B (1997): Richtwerte für die Innenraumlufth: Dichlormethan. *Bundesgesundheitsblatt* 40: 278-284

Witthauer J, Horn H, Bischof W (1993): Raumlufthqualität – Belastung, Bewertung, Beeinflussung. Verlag C.F. Müller, Karlsruhe

Witthauer J, Schwab R, Herzog V, Bischof W (1999): Chemical Contaminants in Office Air – Results from a Study in 14 German Office Buildings. *Proc. INDOOR AIR '99, 8th Internat. Conf. on Indoor Air Quality and Climate.* Edinburgh, Scotland

Wittsiepe J, Wilhelm M (2001): Dioxine und Furane (PCDD/F). In: Böse-O-Reilly S, Kammerer S, Mersch-Sundermann V, Wilhelm M (Hrsg.): Leitfaden Umweltmedizin, 2. Auflage. Urban und Fischer, München, Jena

Wolkoff P, Clausen PA, Jensen B, Nielsen GD, Wilkins CK (1997): Are we measuring the relevant indoor pollutants? *Indoor Air* 7: 92-106

Wolkoff P, Clausen PA, Wilkins CK, Hougaard KS, Larsen ST, Nielsen GD (1999): Formation of strong airway irritants in terpene/ ozone mixtures. *Proc INDOOR AIR '99, 8th Internat. Conf. on Indoor Air Quality and Climate.* Edinburgh, Scotland, Vol. 4: 495-500

Wolkoff P (2004): Are we measuring the right indoor things? In: Österr. Institut für Baubiologie und -ökologie (Hrsg.): Gesunde Raumlufth. Schadstoffe in Innenräumen – Prävention und Sanierung. Internationaler Kongress, MessezentrumWienNeu, 12.-13.2.2004. IBO-Verlag, Wien: 31-36

Woodfield M, Hall D (1994): Odour measurement and control – an update. AEA Technology, Nat. Environmental Technology Centre

Yazdanbakhsh M, Kremsner PG, van Ree R (2002): Allergy, parasites, and the hygiene hypothesis. *Science* 296 (5567): 490-494

Zimmermann G, Schlatter C (1995): Organische Verbindungen/Polychlorierte Biphenyle. In: Wichmann H-E, Schlipkötter H-W, Fülgraff G (Hrsg.): Handbuch der Umweltmedizin, ecomed, Landsberg/Lech

Zober A, Messerer P, Huber P (1990): Thirty-four-year mortality follow-up of BASF employees exposed to 2,3,7,8-TCDD after the 1953 accident. *Int. Arch. Occup. Environ. Health* 62: 139-157