



Fraunhofer Institut
Bauphysik

Bauaufsichtlich anerkannte Stelle
für Prüfung, Überwachung und
Zertifizierung
Zulassung neuer Baustoffe, Bauteile
und Bauarten
Forschung, Entwicklung, Demonstra-
tion und Beratung auf den Gebieten
der Bauphysik

Institutsleitung
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerd Hauser
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Sedlbauer

Raumklima und Schülerleistung

Durchgeführt im Auftrag der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU)
Osnabrück

Der Bericht umfasst
38 Seiten Text
5 Tabellen
10 Abbildungen

Prof. Klaus Sedlbauer
Dr. Andreas Holm
Dr. Runa Hellwig

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
2	Methodische Vorgehensweise im Vorhaben	5
2.1	Luftqualität (Kohlendioxid-Konzentration)	5
2.2	Gemessene Werte von Kohlendioxid-Gehalten in Schulen	7
2.3	Einfluss auf die Leistungsfähigkeit	7
2.4	Normative Regelung und empfohlene Anforderungen	17
3	Thermisches Raumklima	19
3.1	Einfluss auf die Leistungsfähigkeit	20
3.2	Vertikaler Temperaturgradient	23
3.3	Einflussnahmemöglichkeit	24
3.4	Normative Regelung und empfohlene Anforderungen	25
4	Hygrisches Raumklima	26
4.1	Normvorgaben und technische Regeln zur Schimmelpilz- Beurteilung	27
4.2	Bauphysikalische Ursachen für Schimmelpilze in Wohnräumen	27
4.2.1	Wärmebrücken, Ecken und Schränke	27
4.2.2	Feuchteproduktion im Raum	29
4.2.3	Lüftung	29
5	Schallschutz und Raumakustik	30
5.1	Festlegung der Anforderungen Schallschutz	31
5.2	Festlegung der Anforderungen Raumakustik	32
6	Licht	32
7	Zusammenfassung	34
8	Literatur	35

Abbildungsverzeichnis

Bild 1:	Einfluss des Kohlendioxidgehalts der Raumluft auf verschiedene Krankheitssymptome [Erdmann, Apte 2004].	10
Bild 2:	Einfluss der Außenlufttrate auf die Leistungsfähigkeit von Probanden bei verschiedenen Leistungstests [Wargocki et al. 2000].	12
Bild 3:	Zusammenhang von Außenlufttrate und prozentualer Leistungssteigerung pro $36 \text{ m}^3/\text{hPerson}$ [Sepänen et al. 2006].	13
Bild 4:	Einfluss von Außenlufttrate auf Geschwindigkeit und Fehlerquote bei Leistungstests [Wargocki et al 2006].	15
Bild 5:	Zusammenhang von Außenlufttrate und Schülerleistungen bei Mathematik- (links) und Leseaufgaben (rechts) vor (oben) und nach der Adjustierung auf soziodemographische Größen (unten). [Shaughnessy et al. 2006].	16
Bild 6:	Anzahl der Unzufriedenen in Abhängigkeit vom Kohlendioxidgehalt der Raumluft über Außenluftkonzentration [VDI 4300-7]	18
Bild 7:	Leistungsfähigkeit und Fehlquoten von Schülern bei verschiedenen Raumtemperaturen [Wargocki, Wyon 2006].	23
Bild 8:	Unzufriedene aufgrund von vertikalem Temperaturunterschied zwischen Fuß und Kopf [DIN EN ISO 7730].	24
Bild 9:	Schematische Darstellung eines Raumes mit Angabe der sich einstellenden Innenoberflächentemperaturen in Wandmitte, in den Ecken mit bzw. ohne Schrank und die sich bei einer Raumlufttemperatur von $20 \text{ }^\circ\text{C}$ bei einer Außenlufttemperatur von $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ ergebenden relativen Feuchten an diesen Stellen bei einer angenommenen Raumluftfeuchte von 50 % (grüne Ziffern) bzw. 60 % (rote Ziffern). Der Wärmedurchlasswiderstand für die Wand beträgt im Regelquerschnitt mit $4,5 \text{ m}^2\text{K/W}$.	28
Bild 10:	Prozentsatz von „stimmt“ – Antworten auf die Aussage „Meine Mitschüler sind oft sehr laut“ in Abhängigkeit von der Nachhallzeit im Klassenraum. [Klatte et al. 2006]. $\text{NH } 1 \leq 0,65$ s $0,65 < \text{NH } 2 \leq 0,95$ s $\text{NH } 3 > 0,95$ s	30

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Überschreitungshäufigkeit der Kohlendioxid-Konzentration im Sommer und Winter in niedersächsischen Klassenräumen [Grams et al. 2004]	7
Tabelle 2:	Empfohlene Bereiche für CO ₂ -Konzentration sowie erforderliche Luftvolumenströme je Person und ein gering verschmutztes Gebäude nach [prEN DIN 15251].	17
Tabelle 3:	Zielvorgaben und Mindestanforderungen an dauernd benutzte Innenräume im Hinblick auf CO _a . [Boos et al. 2006] 1-MWg = maximaler gleitender Stundenmittelwert dCO ₂ = Differenz Innenraumluftkonzentration minus Außenluftkonzentration	19
Tabelle 4:	Zulässige operative Raumtemperaturen nach pr DIN EN 15251 für verschiedene Anforderungskategorien.	25
Tabelle 5:	Relative Innenluftfeuchte bei unterschiedlichen Außenlufttemperaturen durch Erwärmen auf 20 °C von 80 % feuchter Außenluft bei jeweils gleichbleibender absoluter Feuchte.	29

1 Einleitung

In Deutschland gibt es mehr als 40.000 Schulen. Bedingt durch sinkende Schülerzahlen werden zukünftig eher vorhandene Schulgebäude weiter betrieben als neue gebaut. Nach einer unterdurchschnittlichen Sanierungsrate in den letzten Jahren wartet eine Vielzahl von Schulgebäuden bundesweit auf eine solche Sanierung [BINE 2006].

Die gesellschaftliche Bedeutung einer optimalen Ausbildung wird allenthalben betont. Neben der Qualität der Lehre rücken dabei zunehmend die Lehr- und Lernbedingungen in den Bildungseinrichtungen ins Blickfeld. Nicht nur der Verbesserung des energetischen Standards soll die Sanierung dienen, vor allem soll sie auch die Lern- und Lehrbedingungen der Schüler und Lehrer optimieren. Das Wohlbefinden von Personen in ihrem Umfeld und ihre Leistungsfähigkeit werden durch eine große Anzahl von Faktoren beeinflusst. Einer dieser Faktoren ist das Raumklima, das sich wiederum aus thermischem, akustischem, visuellem und olfaktorischem (Luftqualität) Raumklima zusammensetzt. Von bauphysikalischer Seite kann hier ein wesentlicher Beitrag geleistet werden. Im Folgenden sind derzeit geltende Anforderungen sowie mögliche Zusammenhänge zwischen den einzelnen Raumklimaparametern und der Leistungsfähigkeit anhand einer umfangreichen Auswertung nationaler und internationaler Veröffentlichungen und Normen zusammenfassend dargestellt.

2 Methodische Vorgehensweise im Vorhaben

2.1 Luftqualität (Kohlendioxid-Konzentration)

Die Luftqualität in Innenräumen wird durch ihre Verunreinigung mit Schad- und Geruchsstoffen bestimmt. In Räumen mit hoher Belegungsdichte wie etwa in Klassenräumen werden diese Luftverunreinigungen hauptsächlich durch den Menschen verursacht. Der Mensch belastet die Raumluft durch die Abgabe von Stoffwechselprodukten wie Wärme, Wasser, Kohlendioxid und bestimmten flüchtigen organischen Verbindungen, so genannten VOCs (Volatile Organic Compounds). Diese Verbindungen machen sich nur zum Teil durch Geruch bemerkbar. Maßgebend für die Höhe der Belastung des Innenraums sind die Anzahl der Personen und die Aktivität der Raumnutzer. Mit der Aktivität einer Person steigt proportional zur Abgabe von Kohlendioxid auch die Abgabe anderer belastender Stoffe. Der Kohlendioxidgehalt der Raumluft wird daher schon seit 150 Jahren, auch aufgrund seiner einfachen Messbarkeit, als Indikator für die Luftqualität in Räumen verwendet. Ungeeignet ist dieser Indikator in Räumen, in denen es noch andere Kohlendioxidquellen gibt, oder die Luftverunreinigung hauptsächlich durch die Materialien im Raum oder die Außenluft verursacht wird.

Kohlendioxid an sich ist nahezu geruchsneutral und ungiftig. Erst ab bestimmten Konzentrationen hat es eine direkte physiologische Wirkung auf den Körper. Das Atemzentrum des Menschen wird hauptsächlich über die Partialdruckdifferenz des Kohlendioxids in der Luft und im Blut geregelt. Nur wenn die Druckdifferenz genügend groß ist, kann das Kohlendioxid in den Alveolen der

Lunge nach außen diffundieren [Schmidt et al. 2005]. Bereits ab einem Kohlendioxidgehalt von 0,2 Vol% (2.000 ppm [parts per million]) setzt nach [Müller-Limmroth 1977 zitiert in BUWAL 1997] die Atemregulation im Gehirn ein. Das Atemvolumen und die Atemfrequenz des Menschen werden erhöht, damit wieder genügend Kohlendioxid aus dem venösen Blut an die Außenluft abgegeben werden kann. Nach anderen Quellen kommt es erst ab 1,0 Vol% (10.000 ppm) zu einer physiologischen Wirkung auf den Menschen. Sicher ist jedoch, dass mit zunehmendem Kohlendioxidgehalt Kopfschmerzen und Schwindel, später auch Atemnot und Bewusstlosigkeit auftreten. Ab Konzentrationen von 8,0 bis 10,0 Vol% (80.000 - 100.000 ppm) kommt es zu Lähmungserscheinungen und schließlich tritt der Tod ein. Um eine dauerhafte Schädigung durch Kohlendioxid auszuschließen, sollen Arbeitnehmer über eine Dauer von acht Stunden maximal einer Konzentration von 0,5 Vol% (5.000 ppm) ausgesetzt sein. Kurzzeitig höhere Werte sind jedoch zugelassen. Die üblicherweise in Innenräumen auftretenden Konzentrationen stellen daher kein unmittelbares Gesundheitsrisiko dar. Zur Beurteilung der Luftqualität bewegt man sich in eher niedrigen Konzentrationsbereichen.

Der erste, der die Luftqualität mit Hilfe von Kohlendioxidmessungen bestimmte, war der Arzt Max von Pettenkofer (1818 - 1901). In mehreren Versuchen hat er den Kohlendioxidgehalt der Luft in Schulen, Krankenhäusern, Kneipen und Wohnräumen gemessen und mit dem Geruchseindruck der Raumnutzer verglichen. Er kam zu dem Ergebnis, dass „jede Luft als schlecht und für einen beständigen Aufenthalt als ungeeignet zu erklären [ist], welche in Folge der Respiration und Perspiration der Menschen mehr als 1 pro mille Kohlenensäure enthält.“ [Pettenkofer, 1858]. Dieser Wert entspricht 1.000 ppm (0,1 Vol%) und gilt noch heute als maximaler Wert für eine gute Raumluftqualität (Pettenkofer-Wert).

Ähnliche Versuche führte [Wanner 1982] in einem Testraum durch. Auch er verwendete zur Beurteilung der Belastung der Raumluft durch den Menschen die Parameter Geruch und Kohlendioxidgehalt. In einer Klimakammer wurden mehrere Versuche mit unterschiedlicher Personenzahl, Tätigkeit der Personen und Luftwechselzahl durchgeführt. Dabei wurde kontinuierlich der Kohlendioxidgehalt gemessen. Um die Gerüche im Versuchsraum beurteilen zu können, verglichen Testpersonen alle 15 Minuten die unverdünnte Raumluft mit zwei verschiedenen Pyridin-Konzentrationen. Zusätzlich wurden die Testpersonen gefragt, ob die Geruchsintensität als störend empfunden wurde. Dabei wurde in allen Versuchen ein starker Zusammenhang zwischen Kohlendioxidgehalt und Geruchsintensität der Raumluft festgestellt. Mit einer Geruchsbelästigung muss nach Wanner aber erst ab einer Kohlendioxidkonzentration von 0,15 Vol% (1500 ppm) gerechnet werden. Diese Diskrepanz zu Pettenkofer liegt wohl daran, dass sich die hygienischen Bedingungen in den letzten hundert Jahren wesentlich verbessert haben. Nach einer Schätzung der Behörde für Arbeit, Gesundheit und Soziales in Hamburg kann der Wert sogar noch etwas höher liegen, solange er deutlich unter 0,2 Vol% (2.000 ppm) bleibt [Forschner, Koss 1997].

Die Grenzwerte 0,1 Vol% und 0,15 Vol% finden sich auch in sehr vielen Veröffentlichungen zum Thema Raumluftqualität [u.a. Bauer 2003, Muss 2004, Schumann 1994, Schulze et al. 1994] und in der Normung wieder. Im Leitfaden für Innenraumlufthygiene in Schulgebäuden wird vom Umweltbundesamt ge-

fordert, dass die Kohlendioxidkonzentration in Schulräumen 0,15 Vol% nicht dauerhaft überschreitet [Umweltbundesamt 2000]. Ebenso ist in der nicht mehr gültigen [DIN 1946-2] der Grenzwert mit 0,15 Vol% festgelegt, die Einhaltung von 0,1 Vol% aber empfohlen.

2.2 Gemessene Werte von Kohlendioxid-Gehalten in Schulen

In verschiedenen Studien wurden in jüngster Zeit die CO₂-Gehalte in Klassenräumen in Querschnittsaufnahmen dokumentiert. [Fromme et al. 2006] untersuchten unter anderen Raumluftparametern auch den Kohlendioxid-Gehalt von bayerischen Klassenräumen in zwei Messperioden (im Winter und im Sommer). Die Messungen im Winter in 92 Klassenräumen an 46 Schulen ergab Tagesmediane von 0,06 bis 0,42 Vol%. 92% der Tagesmediane überschritten den Pettenkofer-Wert von 0,1 Vol% und noch 60% der Tagesmediane einen Wert von 0,15 Vol%. Während der Sommermessungen in 76 Klassenräumen an 38 Schulen überschritten nur 28 % der ermittelten Mediane (0,05 bis 0,19 Vol%) den Pettenkofer-Wert aber nur noch 9% einen Wert von 0,15 Vol%.

Ähnliche Überschreitungshäufigkeiten der Kohlendioxid-Gehalte ergaben sich bei einer Untersuchung des Niedersächsischen Landesgesundheitsamtes [Grams et al. 2004]. Auch in Berlin ergaben sich gemittelte Kohlendioxid-Konzentrationen für einen Unterrichtstag im Bereich von 0,05 bis 0,42 Vol%. Der Median über alle Messwerte ergab sich zu 0,16 Vol%. Der Pettenkofer-Wert von 0,1 Vol% wurde in ca. 90% der Klassenräume überschritten [ILAT].

Tabelle 1:
Überschreitungshäufigkeit der Kohlendioxid-Konzentration im Sommer und Winter in niedersächsischen Klassenräumen [Grams et al. 2004]

	Sommer (22 Messtage)	Winter (36 Messtage)
Unterschreitung von 0,15 Vol% (1.500 ppm)	In 68% der Fälle (15 Messtage)	In 11% der Fälle (4 Messtage)
Überschreitung von 0,15 Vol% (1.500 ppm)	In 32% der Fälle (7 Messtage)	In 89% der Fälle (32 Messtage)

2.3 Einfluss auf die Leistungsfähigkeit

Studien aus den letzten Jahren lassen zudem Rückschlüsse zu, dass die Luftqualität nicht nur einen Einfluss auf das sensorische Empfinden und die Behaglichkeit, sondern auch auf die Gesundheit und die Leistungsfähigkeit der Raumnutzer hat.

Mikrobielle Verunreinigungen in der Innenluft können gerade bei Kindern ernsthafte Gesundheitsprobleme verursachen. Ziel einer Studie von [Fox et al. 2003] war es zu untersuchen, ob sich der Gehalt an Bakterien in belegten und nicht belegten Klassenzimmern unterscheidet. Dazu wurden Kohlendioxidgehalt, Temperatur, Luftfeuchte und Konzentration an Bakterien und Staub in sieben Klassenräumen und an zwei Stellen außerhalb des Gebäudes gemessen.

Dabei stellten sie fest, dass in den Klassenzimmern während der Anwesenheit von Schülern wesentlich mehr Bakterien und Staub in der Luft und zudem die Zusammensetzung der Bakterien vollkommen anders war. So ist z. B. der Anteil eines Aminosuckers, der sich in den Zellwänden der meisten Bakterien befindet, in belegten Klassenzimmern etwa 6-mal so hoch wie in unbelegten Klassenzimmern. Der Bakteriengehalt der Außenluft war geringfügig höher als in unbelegten Klassenräumen. Während der Anwesenheit der Schüler lagen die Kohlendioxidwerte zwischen 0,1 Vol% und 0,174 Vol%. In drei Klassenräumen wurden am Ende des Unterrichts regelmäßig 0,25 Vol% überschritten. Die Außenluft enthielt 0,044 ppm. Diese Studie zeigt deutlich, dass sich der Anteil an Bakterien durch die Anwesenheit von Schülern erhöht. Es kann jedoch nicht daraus abgeleitet werden, wie stark der Bakterien- und Staubgehalt in der Luft durch den einzelnen Schüler ansteigt. In einer Regressionsanalyse fand man den stärksten Zusammenhang zum Luftwechsel und Kohlendioxidgehalt der Luft. Dies war jedoch zu erwarten, da der Kohlendioxidgehalt hauptsächlich von der Belegungsdichte des Raumes abhängt.

In einer Studie von [Meyer et al. 1999] wurden 11.978 Angestellte und Schüler aus 75 öffentlichen Schulen in Kopenhagen zu gebäudespezifischen Krankheitssymptomen wie Irritationen an Augen, Nase und Haut, Verstopfung der Nasen, Kopfschmerzen und Konzentrationsschwierigkeiten befragt. Zudem interessierte die Forscher die Häufigkeit der auftretenden Symptome. Durch die Ergebnisse der Befragung konnten jeweils 10 Schulen mit den geringsten und häufigsten Prävalenzen der genannten Symptome ausgewählt werden. In diesen Schulen wurden dann Untersuchungen zu Luftqualität, Raumtemperatur, Feuchte und Schimmelbefall durchgeführt. Der Staub am Boden und in Luftauslässen wurde auf den Gehalt von Interleukin 8 untersucht, um das Infektionsrisiko des Staubes beurteilen zu können. [Meyer et al. 1999] fanden signifikante Zusammenhänge zwischen den gemessenen Werten und den Ergebnissen der Befragung. Die Schulen mit der geringsten Prävalenz hatten eine niedrigere Raumtemperatur ($p=0,01$, ca. 1,1 K), ein größeres Raumvolumen ($p=0,04$) von durchschnittlich 7,1 statt 5,9 m³ pro Person und das geringste Infektionsrisiko im Staub. Zudem stellte sich bei der Auswertung heraus, dass bei den „besten“ Schulen nur 20% der untersuchten Räume eine mechanische Lüftung hatten, während unter den „schlechtesten“ Schulen 52% der Räume mechanisch belüftet wurden.

Zwischen 1994 und 1998 wurden in den USA Daten aus 100 Bürogebäuden zum Thema Luftqualität und gebäudespezifische Krankheitssymptome (buildingrelated illness) gesammelt. Jedes Gebäude wurde während einer Woche im Winter und im Sommer untersucht. Gleichzeitig wurden Fragebögen bezüglich Gewohnheiten, Umgebung und Gesundheit an die Nutzer verteilt. Die geschilderten Krankheitssymptome wurden nur als gebäudespezifisch beurteilt, wenn sie außerhalb des Gebäudes nicht auftraten. Durch die Auswertung mit multivariaten Regressionsmodellen konnten [Erdmann, Apte 2004] einen signifikanten Zusammenhang zwischen dem Kohlendioxidgehalt der Luft, also der Luftqualität, und Symptomen an Schleimhäuten ($p=0,007$) sowie dem Atemsystem der Nutzer ($p=0,11$) feststellen. Die Gruppe mit der besten Luftqualität diente dabei immer als Referenzgruppe. Damit bestätigten sich auch die Ergebnisse einer früheren Auswertung mit nur 41 Bürogebäuden [Apte et al. 2000]. Die Zusammenhänge in der neueren Auswertung waren jedoch etwas schwächer. Die Symptome, für die ein Zusammenhang mit der Luftqualität gefunden wur-

de, waren im einzelnen trockene Augen, Halsschmerzen, verstopfte Nasen, Niesen, Kurzatmigkeit, Beklemmungsgefühl, Husten und Keuchen. Es wird deutlich, dass diese Zusammenhänge schon bei Kohlendioxidkonzentration unter 1000 ppm erkennbar, wenn auch teilweise nicht besonders ausgeprägt sind. Apte und Erdmann kamen zu dem Ergebnis, dass sich im Schnitt die Symptome um ca. 65 – 85 % verbessern lassen, wenn die in den USA empfohlene Luftqualität für Büroräume, die einem personenbezogenen Luftwechsel von $36 \text{ m}^3/(\text{hPerson})$ und einem Kohlendioxidgehalt von etwa 0,087 Vol % entspricht, auf nahezu Außenluftqualität verbessert wird. Ob dies jedoch realistisch durchführbar ist, wird auch von Apte und Erdmann bezweifelt.

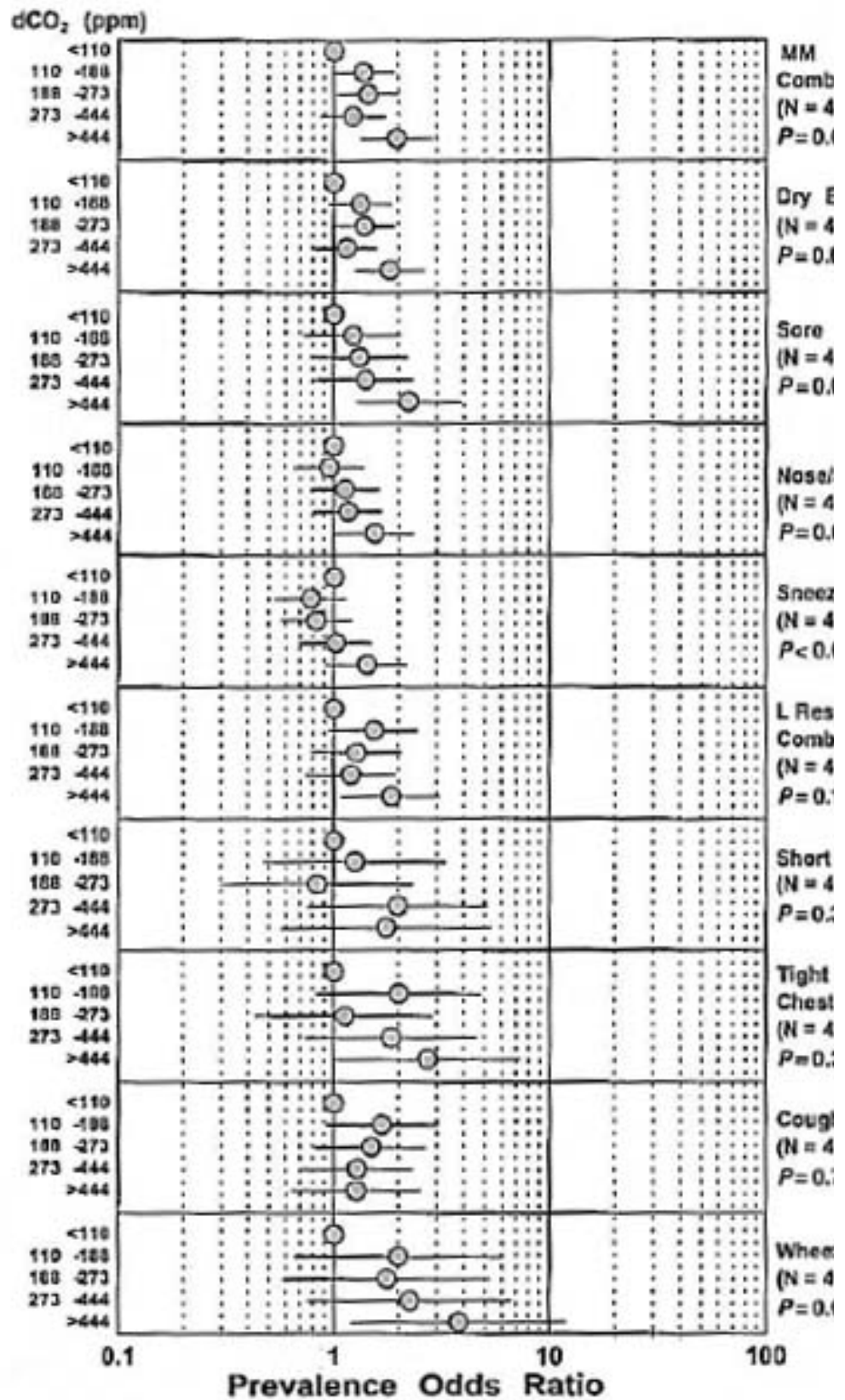


Bild 1:
Einfluss des Kohlendioxidgehalts der Raumluft auf verschiedene Krankheits-
symptome [Erdmann, Apte 2004].

Im ProKlimA-Projekt [Kruppa et al. 2002, Bischof et al. 2003] wurde die Gesundheit und Leistungsfähigkeit von Personen in 14 deutschen Bürogebäuden in Abhängigkeit von physikalischen, chemischen, mikrobiologischen und arbeitswissenschaftlichen Einflussgrößen untersucht. Ein Zusammenhang zwischen den raumklimatischen Einflussgrößen und der sensorischen Befindlichkeit konnte konsistent nur für eine Belastung durch VOCs (Volatile Organic Compounds) gefunden werden. Jedoch lag der Anteil der befindlichkeitsgestörten Personen in Gebäuden, die mit einer raumluftechnischen Anlage ausgestattet waren, um ca. 15 Prozentpunkte höher als in den frei belüfteten Gebäuden.

[Milton et al.2000] untersuchten den Zusammenhang von Außenluftzufuhr zu krankheitsbedingten Fehltagen von 3.720 Angestellten eines großen Herstellers in den USA. Mitarbeiter mit 43 m³/hPerson (12 l/sPerson) Frischluftzufuhr melden sich um 35% häufiger kurzzeitig krank als Mitarbeiter mit 86 m³/hPerson (24 l/sPerson). Mit höherer Luftzufuhr ergaben sich CO₂-Werte von ca. 0,06 Vol% im Raum. Mit geringerer Luftzufuhr ca. 0,08-0,09 Vol%. Der Luftaustausch wurde repräsentativ durch den CO₂-Gehalt am Ende des Tages an zwei Tagen bestimmt. Die Ergebnisse implizieren, dass bei der Gruppe mit niedrigerer Lüftungsrate etwa 5 Fehltag im Jahr durch die schlechtere Luftqualität begründet sind.

Eine ähnliche Untersuchung führten [Shendell et al. 2004] von 2000 bis 2002 an Schulen in Washington und Idaho durch. Es wurden 434 Klassenzimmer an 22 verschiedenen Schulen untersucht, von denen fast alle über eine mechanische Lüftung verfügten. Die Kohlendioxidkonzentration wurde zweimal pro Klassenraum kurzzeitig während des Unterrichts gemessen. Es ergab sich ein signifikanter Zusammenhang zwischen Kohlendioxidkonzentration und der Fehlzeit von Schülern ($p < 0,05$). Bei einem Anstieg um 0,1 Vol% stieg die Fehlzeit der Schüler um 10 – 20 %. Im Versuch lagen in 45 % der Klassenräume trotz mechanischer Belüftung die Kohlendioxidkonzentrationen über 0,1 Vol%.

Eine dänische Studie von [Wargocki et al. 2000] konnte allerdings keine Wirkung unterschiedlicher Außenluftmengen auf Gesundheit oder typische Symptome des Sick Building Syndroms erkennen. Es wurde aber ein Einfluss auf die Leistungsfähigkeit von Personen festgestellt. In Testräumen nahmen 30 Probanden an Leistungstests teil, die normale Büroarbeit wie Texte tippen und ähnliches simulierten. Mit zunehmender Außenluftmenge nahm die Geruchintensität ($p < 0,02$), die Anzahl der Unzufriedenen ($p < 0,05$) und das Gefühl von Trockenheit in Mund und Rachen ($p < 0,0006$) deutlich ab. Schwierigkeiten beim Denken nahmen ab ($p < 0,001$) und das allgemeine Wohlbefinden ($p < 0,0001$) verbesserte sich. Die Leistung der Probanden in den Tests verbesserte sich stetig mit steigender Luftwechselrate. Es zeigte sich, dass jede Verdopplung der Außenluftzufuhr von 11 m³/hPerson (3 l/sPerson) bis 110 m³/hPerson (30 l/sPerson) durchschnittlich eine Leistungssteigerung von 1,7% bewirkt.

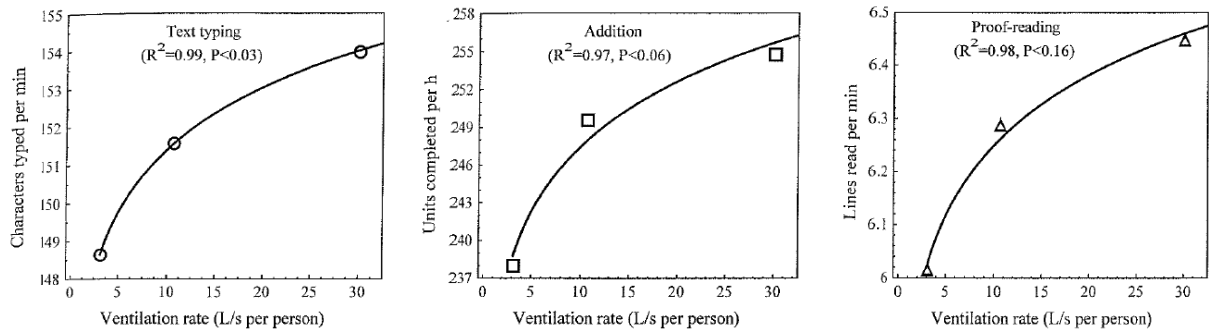


Bild 2:
Einfluss der Außenluftfrate auf die Leistungsfähigkeit von Probanden bei verschiedenen Leistungstests [Wargocki et al. 2000].

Ein ähnlicher Effekt wurde bei einem vergleichbaren Versuch von [Wargocki et al. 1999] erzielt, als bei konstanter Außenluftfrate ein alter Teppich als Quelle für eine mögliche Luftverunreinigung aus dem Raum entfernt wurde. Sind jedoch Personen die Hauptverunreinigungsquelle im Raum, kann man nur die Belegungsdichte verringern bzw. das Raumvolumen pro Person erhöhen. Da dies in Schulen in den meisten Fällen nicht möglich ist, bleibt nur eine Erhöhung der Außenluftfrate, um die Luftqualität zu verbessern.

[Sepänen et al. 2006] führten eine übergreifende statistische Auswertung der neuesten Studien seit dem Jahr 2000 zur Wechselwirkung zwischen Luftqualität und Arbeitsleistung im Büro durch (Bild 3). Diese Studie zeigt auf, was eine Steigerung der Außenluftfrate um $36 \text{ m}^3/\text{hPerson}$ (10 l/sPerson) im Schnitt einen geringen Anstieg der Leistung um 1 – 3 % bewirkt. Allerdings ist die Leistungssteigerung bei geringeren Luftmengen größer als bei sehr hohen Luftmengen.

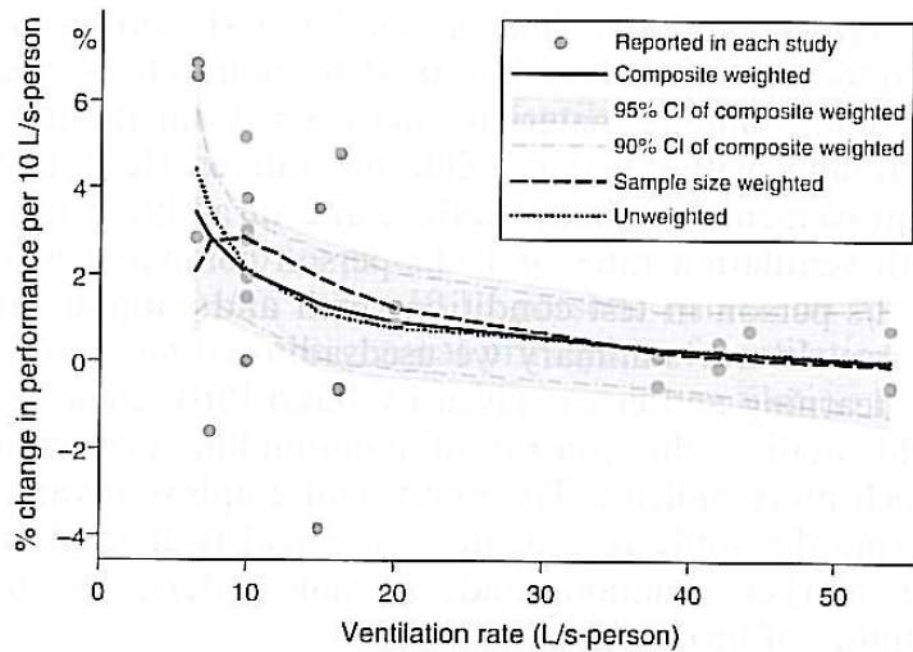


Bild 3:
Zusammenhang von Außenlufttrate und prozentualer Leistungssteigerung pro 36 m³/hPerson [Sepänen et al. 2006].

Bild 3 zeigt auch, dass die Streuung der Einzelmesswerte sehr groß ist. Die Ergebnisse der einzelnen Studien wurden unterschiedlich gewichtet, je nach Anzahl der Versuchsteilnehmer, Anzahl der Ergebnisse pro Versuch und ihrer Nähe zu realen Arbeitsbedingungen. Reaktionstests wurden daher niedriger gewichtet als Tests, die normale Arbeitsabläufe simulierten.

Eine frühere Auswertung von [Sepänen et al. 1999] über 20 verschiedene Studien befasste sich mit dem Zusammenhang von Außenlufttraten und Kohlendioxidkonzentration mit der Gesundheit der Raumnutzer. In fast allen Studien wurde eine Verbesserung von einem oder mehreren Krankheitssymptomen und der Luftqualität bis zu einer Außenlufttrate von 36 m³/hPerson (10 l/sPerson) festgestellt. In manchen Studien wurde diese Verbesserung sogar bei noch höheren Außenlufttraten bis 72 m³/hPerson (20 l/sPerson) wahrgenommen. Etwa in der Hälfte der Studien, die sich mit dem Kohlendioxidgehalt der Luft beschäftigen, wurde auch unter 0,08 Vol% noch eine Verringerung des Auftretens von SBS-Symptomen festgestellt.

Allgemein gibt es allerdings sehr wenige Untersuchungen zur Raumluftqualität, die sich direkt auf Schulen beziehen. Zu diesem Ergebnis kamen auch [Mendell, Heath 2005]. Sie fassten die wissenschaftlichen Erkenntnisse zum Einfluss von Luftqualität auf Leistungsfähigkeit und Gesundheit von Schülern in einer Literaturstudie zusammen. Dabei fanden sie jedoch nur wenige Studien im Umfeld von Schulen und nur eine Studie, bei der die Außenlufttrate der Klassenzimmer Untersuchungsgegenstand war, wie z. B. [Myhrvold et al. 1996]. Die meisten Studien wurden zur Beurteilung von Arbeitsplatzsituationen in Bürogebäuden durchgeführt. Mendell und Heath schlossen daraus, dass auch in Schulen Bestandteile in der Luft vorhanden sein müssen, die Gesundheit und Leistungsfähigkeit negativ beeinflussen.

[Myhrvold et al. 1996] untersuchten Zusammenhänge zwischen Kohlendioxidkonzentrationen in Klassenzimmern sowohl mit der Gesundheit der Schüler, als auch mit deren Leistung. In der Studie wurden Luftaustausch, CO₂, VOCs, Lufttemperatur und -feuchte, Strahlungsasymmetrie und Luftgeschwindigkeit gemessen. Die Schüler erhielten Fragebögen zu ihrem gesundheitlichen Empfinden und zum sozialen Klima in der Klasse und nahmen zusätzlich an drei Reaktionstests (Swedish Performance Evaluation System) teil.

Ausgewertet wurden die Daten von 22 Klassenräumen in 5 verschiedenen Schulen. Aus den gemessenen Kohlendioxidkonzentrationen wurden Tagesmittelwerte gebildet. Etwa die Hälfte der Schüler hielt sich in Klassenräumen mit einem Tagesmittelwert von 0 – 0,099 Vol% auf, etwa 25% der Schüler waren in Räumen mit 0,1 – 0,149 Vol% und die restlichen 25% in Räumen mit Werten von 0,15 – 0,4 Vol%. Die gesundheitlichen Angaben der Schüler wurden in zwei Gesundheitsindizes eingeteilt. Health Index 1 umfasste Kopfschmerzen, Müdigkeit, Konzentrationsschwierigkeiten und unangenehmen Geruch, Health Index 2 beinhaltete vor allem die Irritationen der oberen Atemwege (Augen, Nase, Rachen). Ausgewertet wurden nur die Angaben und Tests der 15 bis 20 jährigen Schüler, da Schüler unter 15 Jahren, unabhängig von der Luftqualität, schlechter in den Leistungstests abschnitten. Bei der Auswertung ergab sich ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Kohlendioxidkonzentration in den Klassenräumen und der Leistung der Schüler. Der stärkste Zusammenhang wurde zum Health Index 1 ermittelt und nur ein relativ schwacher Zusammenhang zum Health Index 2. Verminderte Leistung trat bereits in der Gruppe Schüler auf, die in Räumen mit CO₂-Gehalten von 0,1 – 0,149 Vol% aufhielten. Gesundheitssymptome traten vermehrt bei CO₂-Gehalten in der Gruppe auf, die sich in Räumen mit 0,15 Vol% bis 0,4 Vol% aufgehalten hatten. Aufgrund der Darstellung der Arbeit lässt sich jedoch nicht klären, ob so genanntes Confounding – der Einfluss von Störgrößen – durch das Studiendesign und den Auswertalgorithmus ausgeschlossen bzw. berücksichtigt wurden. So kann beispielsweise eine Verbesserung der Raumluftqualität durch erhöhte Lüftung mit der Neugestaltung des Klassenzimmers durch neue Möbel, Renovierung oder auch eine verbesserte Akustik einhergegangen sein. Es ist nicht dargestellt, ob die gemessenen hohen Kohlendioxid-Konzentrationen mehrheitlich aus Messungen vor der Sanierung und die niedrigeren Werte aus Messungen nach der Sanierung stammen. Nicht dargestellt ist, in welcher Größenordnung die gefundenen signifikanten Einflüsse auf die Gesundheit liegen.

In Dänemark [Wargocki und Wyon 2006] wurde erst vor kurzen eine Studie durchgeführt, um den Effekt schlechter Innluftqualität und hoher Innentemperaturen auf die Leistungsfähigkeit von Schülern zu messen. Es wurden fünf unabhängige Studien in sechs identischen Klassenräumen, ausgestattet mit Lüftungsanlage (mit neuen Filtern je Woche) und regelbaren Kühleinheiten pro Klassenzimmer, in einer dänischen Gesamtschule durchgeführt. In den ersten drei Versuchen wurde die Zuluftmenge von 11 auf 32 m³/hPerson (9 l/s Person) erhöht, was einem Kohlendioxidgehalt von 0,11 bis 0,078 Vol% entsprach. Zwei Versuche fanden im Sommer und ein Versuch im Winter statt.

Jedes Experiment wurde gleichzeitig in zwei Klassenräumen über zwei Wochen ausgeführt, wobei ein Raum immer als Referenzraum unbehandelt blieb. Nach einer Woche wurden die Bedingungen getauscht (Cross-Over-Design). Die Schüler waren 10-12 Jahre alt. Als Leistungstests während der Versuchphase wurden acht schulähnliche Aufgaben gestellt (Lesen, Mathematik, etc.).

Die 10 minütigen Übungen wurden in den normalen Tagesablauf eingebaut. Die Fenster durften wie üblich geöffnet werden. Die Lüftungsraten wurden über kontinuierliche Kohlendioxidmessungen bestimmt. Die Studie erbrachte das Ergebnis, dass eine Verdopplung der Außenlufttrate die Arbeitsgeschwindigkeit um durchschnittlich 8% verbessert. Bei Aufgaben, bei denen sich die Verbesserung der Leistungsfähigkeit durch einen hohen Außenluftvolumenstrom signifikant zeigte, betrug die Steigerung sogar 14%. Es wurde allerdings kein messbarer Einfluss auf die Fehlerquote festgestellt (Bild 4). Der Einfluss von Luftqualität und Temperatur war aber größer als bei ähnlichen Versuchen in Büroräumen. Das kann bedeuten, dass Kinder entweder empfindlicher gegenüber Umgebungsbedingungen sind, oder Erwachsene gelernt haben, unter Leistungsdruck unabhängiger von Umgebungsbedingungen zu arbeiten. Im Vergleich zu anderen Studien wurden hier die Schüler als ihre eigenen Kontrollen verwendet. Dies macht die Ergebnisse der Studie sehr glaubhaft.

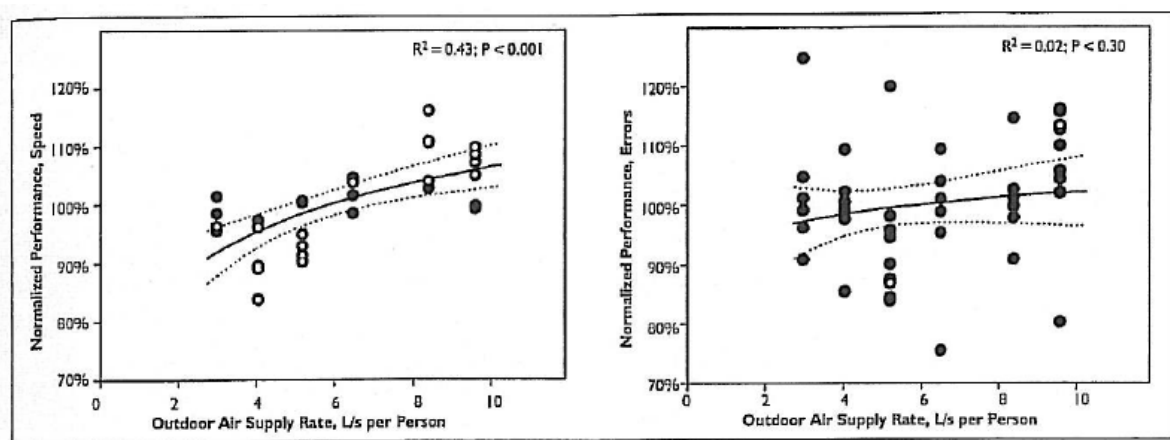


Bild 4:
Einfluss von Außenlufttrate auf Geschwindigkeit und Fehlerquote bei Leistungstests [Wargocki et al 2006].

In einer schwedischen Studie machte [Smedje et al.1996] eine Umfrage unter Schülern der 7. Klasse von 39 zufällig ausgewählten Schulen, um einen eventuellen Zusammenhang von schlechter Raumluftqualität und verminderter Leistung zu bestätigen. 21 % der Befragten hatten demnach das Empfinden, durch schlechte Raumluft in ihren Klassenzimmern in der Leistung beeinträchtigt zu sein. Daraufhin sind in 28 Klassenräumen Untersuchungen zur Luftqualität durchgeführt worden. Es wurden Temperatur, Luftfeuchte, Kohlendioxid, Formaldehyd, VOCs (Volatile organic compounds) und der Gehalt von Bakterien und Schimmelpilzsporen gemessen. Zusätzlich wurden Aufzeichnungen zu Konstruktion, Material, Raumgröße und Anzahl der zu öffnenden Fenster gemacht. Auch das persönliche Umfeld der Schüler wurde in die Studie mit einbezogen. In 29 % der Klassenräume lag die Kohlendioxidkonzentration über 0,1 Vol%. Die Klassenräume mit ausschließlich freier Lüftung hatten die höchsten Werte. Der stärkste Zusammenhang zwischen empfundener Leistungsminde- rung wurde allerdings zum Faktor Stress in der Schule gefunden. Ein relativ starker Einfluss zeigte sich auch durch allgemeine Unzufriedenheit und Nah-

lungsmittelallergien. Ein Zusammenhang wurde auch mit der Raumluftqualität, der Konzentration von Schadstoffen wie Formaldehyd, Bakterien und Schimmelpilzsporen sowie der Luftwechselrate festgestellt. Fraglich ist jedoch, inwieweit das persönliche Empfinden einer Leistungsminderung, einer tatsächlichen Leistungsminderung entspricht.

[Shaughnessy et al. 2006] werteten deshalb die Ergebnisse eines Standardtests in Mathematik und Lesen am Ende des Schuljahres aus und verglichen sie mit den Luftwechselraten in den Klassenzimmern. Ausgewertet wurden nur die Tests der 5. Klassen von 54 Schulen eines Schuldistrikts in den USA. Die Ergebnisse wurden dann mit den Ergebnissen in anderen Schuldistrikten verglichen und eingestuft. Die Kohlendioxidkonzentrationen in den Klassenräumen wurden über 4 – 5 Stunden an einem typischen Schultag gemessen und daraus die Luftwechselrate bestimmt. Die Luftwechselraten lagen zwischen 3 m³/hPerson (0,9 l/sPerson) und 42 m³/hPerson (11,7 l/sPerson) und wurden zur Auswertung in vier Gruppen eingeteilt (Einteilung der Gruppen: 25., 50. und 75. Perzentil). Zusätzlich wurden Daten zum sozialen Umfeld der Schüler erhoben, um einen etwaigen Einfluss auf die Ergebnisse auszuschließen. Zwischen den Ergebnissen in Mathematik und der Außenluftfrate konnte ein mäßiger, aber signifikanter Zusammenhang ($p < 0,1$) gefunden. Zu den Ergebnissen beim Lesen konnte kein signifikanter Zusammenhang hergestellt werden. In der angepassten Regressionsanalyse sind die Regressionskurven wellenartig und lassen die Ergebnisse etwas unsicher erscheinen. Die Autoren führen dies auf die geringe Datensatzgröße und eine größere Ansammlung der Messwerte bei niedrigen Außenluftfraten zurück.

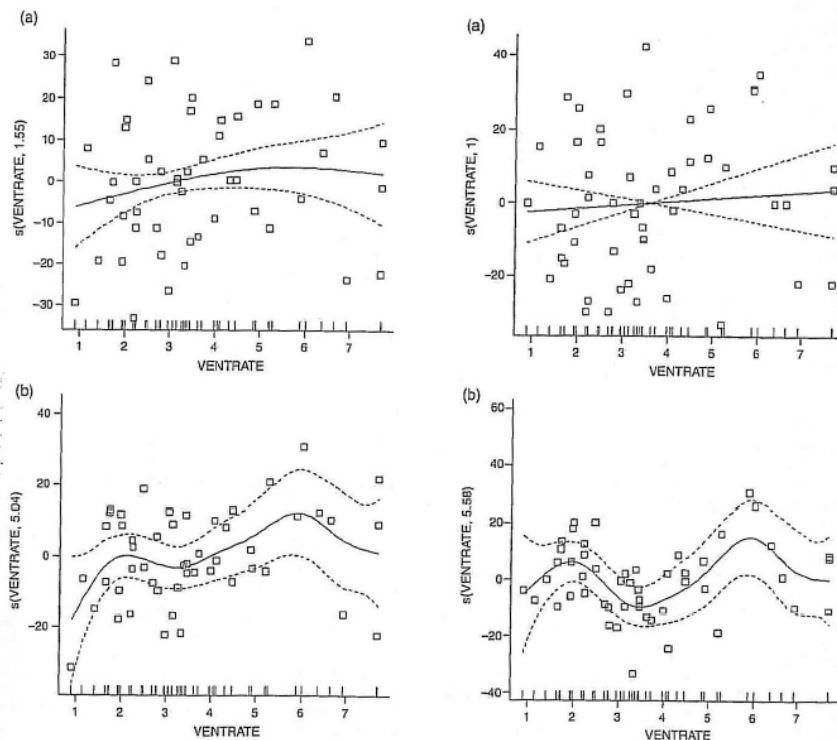


Bild 5:
Zusammenhang von Außenluftfrate und Schülerleistungen bei Mathematik- (links) und Leseaufgaben (rechts) vor (oben) und nach der Adjustierung auf soziodemographische Größen (unten). [Shaughnessy et al. 2006].

Verschiedene Feldstudien wurden durchgeführt, um den Einfluss der Luftqualität – in den meisten Studien über die Leitgröße Kohlendioxid gemessen – auf die Gesundheit und Leistungsfähigkeit von Personen zu untersuchen. Wenige der Studien untersuchten Kinder. Um die Leistungsfähigkeit von Personen zu beurteilen, werden in den Studien unterschiedliche Verfahren angewendet. Es gibt Reaktions- und Leistungstests, die die Qualität und Quantität der erbrachten Leistung messen. In anderen Studien wird lediglich die Fehlzeit oder das subjektive Empfinden der einzelnen Personen beurteilt. Die Zusammenhänge zu einer objektiv messbaren Leistungsfähigkeit sind jedoch sehr komplex und nicht abschließend zu beurteilen.

2.4 Normative Regelung und empfohlene Anforderungen

In der neuen [prEN 15251] existieren drei Kategorien für die Raumlufthqualität. Die Maximalwerte werden mit 0,08; 0,1 und 0,14 Vol% für gute, mittlere und mäßige Luftqualität angegeben. Über 0,14 Vol% ist die Raumlufthqualität nicht mehr akzeptabel (Tabelle 2). Die hier dargestellten Werte gelten für eine Außenluftkonzentration von 0,04 Vol%. Im amerikanischen [ASHRAE Standard 62] wird für Schulen ein Grenzwert von 0,1 Vol% angegeben. Auch in der noch nicht vollständig veröffentlichten österreichischen Richtlinie zur Bewertung der Innenraumlufth wird sich der Richtwert nach [Twrđik, Tappler 2004] im Bereich von 0,08 bis 0,1 Vol% bewegen. In frei belüfteten Räumen soll der Kohlendioxidgehalt dauerhaft nicht höher als 0,19 Vol% sein.

Tabelle 2:
Empfohlene Bereiche für CO₂-Konzentration sowie erforderliche Luftvolumenströme je Person und ein gering verschmutztes Gebäude nach [prEN DIN 15251].

	Kategorie	Werte	Gültigkeit
Kohlendioxidkonzentration innen bei 400 ppm Außenluftkonzentration	II	0,08-0,10 Vol%	Nicht-Wohngebäude
	III	0,10 -0,14 Vol%	
Lüftungsbedarf für Personen	II	25 m ³ /hPerson	Klassenräume
	III	15 m ³ /hPerson	
Lüftungsbedarf für gering verschmutzte Gebäude (zusätzlich)	II	2,5 m ³ /hm ²	
	III	1,5 m ³ /hm ²	

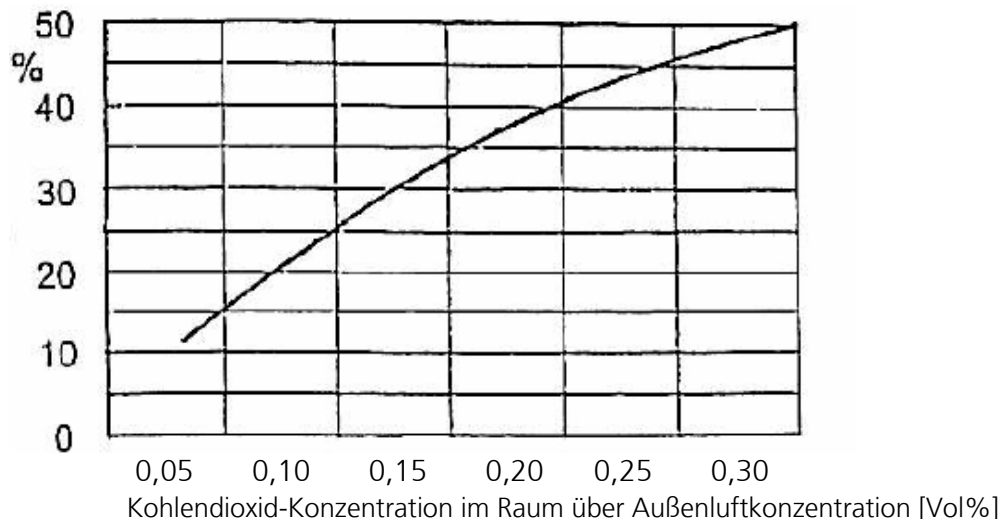


Bild 6:
Anzahl der Unzufriedenen in Abhängigkeit vom Kohlendioxidgehalt der
Raumluft über Außenluftkonzentration [VDI 4300-7]

Nach [VDI 4300-7] sind allerdings bereits bei 0,1 Vol% (0,06 Vol% über Außenluft) 20 % der Raumnutzer unzufrieden mit der Raumluft (Bild 6). Um den Prozentsatz der Unzufriedenen auf 10 % zu reduzieren, dürfte sogar ein Wert von 0,07 Vol% nicht überschritten werden. Diese Kurve zeigt allerdings auch, wie problematisch es ist, einen bestimmten Maximalwert für den Indikator Kohlendioxid anzugeben, da sich die Raumluftqualität und die Zufriedenheit der Raumnutzer stetig und nicht an einem bestimmten Punkt verschlechtert.

Die aufgeführten Untersuchungen zum Einfluss auf die Leistungsfähigkeit begründen die in [prEN 15251] festgelegten Maximal-Werte für die Kohlendioxid-Konzentration in Klassenräumen. Bei Außenluftkonzentrationen von 0,04 Vol% sollte ein Wert von 0,14 Vol% nicht andauernd überschritten werden. Werte unter 0,1 Vol% sind anzustreben.

In [Boos et al. 2006] wird folgende praktische Verfahrensweise vorgeschlagen: Ziel ist, dass in dauernd benutzten, frei belüfteten Innenräumen sowohl die Beurteilungswerte (dCO_2 : Differenz zwischen CO_2 -Konzentration innen und außen) als auch die gleitenden Stundenmittelwerte im Beurteilungszeitraum unter dem Wert von $dCO_2 = 0,06$ Vol% liegen (etwa 0,1 Vol% absolut, spezielle bis hohe Raumluftqualität). Die gleitenden Stundenmittelwerte dürfen in dauernd benutzten, frei belüfteten Innenräumen im Beurteilungszeitraum den Wert von $dCO_2 = 0,1$ Vol% nicht überschreiten (etwa 0,14 Vol% absolut, mindestens mittlere Raumluftqualität). Kein Beurteilungswert in dauernd benutzten, frei belüfteten Innenräumen darf im Bezugszeitraum den Wert von $dCO_2 = 0,15$ Vol% überschreiten (etwa 0,19 Vol% absolut, mindestens niedrige Raumluftqualität).

In mechanisch belüfteten Innenräumen sollen sowohl die Beurteilungswerte als auch die gleitenden Stundenmittelwerte im Beurteilungszeitraum unter dem Wert von $dCO_2 = 0,04$ Vol% liegen (etwa 0,08 Vol% absolut, spezielle Raum-

luftqualität). Die gleitenden Stundenmittelwerte dürfen in dauernd genutzten, mechanisch belüfteten Innenräumen im Beurteilungszeitraum den Wert von $dCO_2 = 0,06 \text{ Vol\%}$ nicht überschreiten (etwa $0,1 \text{ Vol\%}$ absolut, mindestens hohe Raumluftqualität). Kein Beurteilungswert in dauernd genutzten, mechanisch belüfteten Innenräumen darf im Bezugszeitraum den Wert von $0,1 \text{ Vol\%}$ überschreiten (etwa $0,14 \text{ Vol\%}$ absolut, mindestens mittlere Raumluftqualität).

Tabelle 3:

Zielvorgaben und Mindestanforderungen an dauernd benutzte Innenräume im Hinblick auf CO_a . [Boos et al. 2006]

1-MWg = maximaler gleitender Stundenmittelwert

dCO_2 = Differenz Innenraumluftkonzentration minus Außenluftkonzentration

Raumluftqualität	dCO_2 [Vol%]	Frei belüftete Innenräume	Mechanisch belüftete Innenräume
Speziell	<0,04	Zielbereich: Beurteilungswerte <0,06Vol%	Zielbereich: Beurteilungswerte <0,04Vol%
Hoch	0,04 – 0,06		Mindestvorgabe: 1-MWg <0,06 Vol%
Mittel	0,06 - 0,10	Mindestvorgabe: 1-MWg <0,10 Vol%	Mindestvorgabe: Alle Beurteilungswerte <0,10 Vol%
Niedrig	0,10 - 0,15	Mindestvorgabe: Alle Beurteilungswerte <0,15 Vol%	
Sehrniedrig	> 0,15		

Um eine ausreichende bis angenehme Luftqualität zu erreichen benötigt man nach [prEN 15251] einen Außenluftvolumenstrom von 15 bis 25 m^3/h Person für Klassenräume. Für gering verschmutzte Gebäude werden zusätzlich 1,5 bis 2,5 m^2/hm^2 Grundfläche benötigt. Bei einer Belegung von 29 Schülern und einem Lehrer pro Schulraum mit einer Grundfläche von 60 m^2 (2 m^2 /Schüler) entspricht das einem Außenluftvolumenstrom von 540 bis 900 m^3/h .

3 Thermisches Raumklima

Thermische Behaglichkeit hängt im Wesentlichen von sechs Einflussgrößen ab. Diese sind der Aktivitätsgrad des Menschen und dessen Bekleidungsituation, Lufttemperatur und Strahlungstemperatur der umgebenden Wände, Luftgeschwindigkeit und Luftfeuchte. Aufgrund der Nutzungsart der Unterrichtsräume mit überwiegend sitzender Tätigkeit wird von ein Aktivitätsgrad von 1,2 met pro Schüler ausgegangen. Der Dämmwert der Kleidung wird im Sommer mit 0,5 clo, im Winter mit 1,0 clo angenommen.

3.1 Einfluss auf die Leistungsfähigkeit

Bereits Mitte des 20. Jahrhunderts gab es Untersuchungen dazu, inwieweit Umgebungstemperaturen die Leistungsfähigkeit des Menschen beeinflussen. Die Versuche bezogen sich aber meist auf die Leistungsfähigkeit bei körperlicher Arbeit. Studien der letzten Jahre lassen Rückschlüsse zu, dass die thermischen Verhältnisse in Räumen nicht nur einen Einfluss auf die Behaglichkeit, sondern auch auf die Leistungsfähigkeit der Raumnutzer haben. Klassenräume sollen optimale Voraussetzung für die Leistungsfähigkeit der Schüler bieten. Die bisher vorliegenden Untersuchungsergebnisse – vor allem an Büroarbeitsplätzen werden in verschiedenen Quellen intensiv diskutiert [Bux 2006, Hellwig 2005, Fitzner 2004, Schädlich et al. 2006].

Bei Untersuchungen von Vernon 1936 [zitiert in Wyon 1996] in einer Munitionsfabrik zeigte sich, dass das Unfallrisiko bei der Produktion um mehr als 30% stieg, wenn die Temperaturen unter 12°C oder über 24°C lagen. Zudem erkannte er, dass leicht angehobene Temperaturen die Leistungsfähigkeit, was in diesem Versuch mit der Unfallhäufigkeit gleichgesetzt wurde, von Frauen wesentlich geringer beeinflussen als die Leistungsfähigkeit von Männern. Versuche von Pepler 1964 [zitiert in Wyon 1996] in Webereien und Kohleminen zeigten auf, dass bei normaler Luftfeuchte eine Grenztemperatur von 30°C eingehalten werden sollte, um die Leistungsfähigkeit der Arbeiter aufrecht zu erhalten.

Nach einem Versuch von [Pepler, Warner 1968] wurde bei 6 verschiedenen Temperaturen getestet wie schnell und effektiv Studenten (6 männliche und 6 weibliche) wissenschaftliche Ausdrücke und Konzepte erlernten. Aufgezeichnet wurden die Geschwindigkeit beim Lernen, die Fehlerrate und der subjektiv empfundene Aufwand beim Lernen. Alle drei Bereiche wurden signifikant durch die Temperatur beeinflusst. Die Studenten konnten die Genauigkeit und die Fehlerrate, außer bei den zwei niedrigsten Temperaturen (16,7 und 20 °C), im üblichen Bereich aufrechterhalten (d.h. die Unterschiede waren bei den wärmeren Temperaturen nicht signifikant), obwohl sie die erbrachte Leistung bei den beiden wärmsten Temperaturen (30 und 33 °C) wesentlich mehr Aufwand kostete. Auch bei der niedrigsten Temperatur war der subjektiv empfundene Aufwand sehr hoch. Bei 26,6 °C (45 % Luftfeuchte) war der empfundene Aufwand am geringsten, die Fehlerrate am niedrigsten und die Studenten lernten am schnellsten. Die weiblichen Probanden reagierten allgemein sensibler auf Änderungen in der Temperatur. Da die Versuche bei noch relativ hohen Außentemperaturen stattfanden, vermuten die Autoren, dass die Probanden durch die Gewöhnung an warme Temperaturen sensibler auf kalte Raumtemperaturen reagierten, als bei Versuchen im Winter.

Bei Versuchen von [Wyon 1975] führten je 16 männliche und weibliche Studenten im Alter von 18 bis 25 Jahren Leistungstests (Addieren, Gedächtnisübungen) mit unterschiedlicher Bekleidung durch (0,6 clo und 1,15 clo). Die Temperaturen wurden so angepasst, dass die Versuchspersonen sich thermisch neutral fühlten. Die Hauttemperatur wurde an 14 Stellen gemessen. Bei der Auswertung wurde kein Unterschied in der Leistung bei den beiden Konditionen festgestellt. Auch die Anstrengung, Aufmerksamkeit und Ermüdung waren gleich. Nur die Luftqualität wurde bei kühleren Temperaturen besser beurteilt. Es wurde kein Unterschied zwischen den bevorzugten Lufttemperaturen von Männern

und Frauen festgestellt, obwohl Männer eine signifikant höhere Hauttemperatur hatten. Die bevorzugte Lufttemperatur bei 0,6 clo war 23,2°C, bei 1,15 clo 18,7°C.

[Wyon 1979] führte später noch eine Studie mit 72 High School –Schülern durch (36 weiblich, 36 männlich). Ziel der Studie war auch hier, den Einfluss von Temperatur auf die Leistungsfähigkeit zu testen. In Vierergruppen wurden sie einer von drei verschiedenen Temperaturverläufen ausgesetzt. Die Leistungstests bestanden aus Textzusammenfassungen, Buchstabieren, Vokabeltraining, Lesen, Erinnerungsübungen, einem Reaktionstest und zwei Kreativitätstests. Die Probanden wurden zusätzlich nach ihrer Behaglichkeit gefragt. Bei 23°C waren bei den männlichen Probanden nur 5% unzufrieden (Beurteilung zu warm), bei den weiblichen Probanden jedoch 28% (Beurteilung zu kalt). Da jedoch die Personen unter realen Bedingungen ihre Kleidung hätten anpassen können, wurde daraus geschlossen, dass die Temperatur im Klassenraum auch im Sommer nicht über 23°C liegen sollte, um behaglich zu sein. Allerdings erwies sich bei der Auswertung der Testergebnisse die Behaglichkeit als schlechter Indikator für die geistige Leistungsfähigkeit der Schüler. Aufgaben, die Konzentration erforderten, wurden besser bei niedrigen Temperaturen um die 23°C ausgeführt. Bei Gedächtnisübungen und Reaktionstests wurden aber bei höheren Temperaturen bis 26°C bessere Leistungen erzielt. Der Autor schloss daraus, dass es für den Schulalltag deshalb das beste wäre, Aufgaben, die ein hohes Maß an Konzentration erfordern, auf den Vormittag zu legen, da zu der Zeit die Temperaturen im Raum noch niedriger sind. Über 26°C fiel die Leistung der männlichen Schüler stark ab. Die Leistungsfähigkeit der weiblichen Schüler wurde durch höhere Temperaturen nicht so stark beeinflusst. Aus dem Versuch lässt sich ableiten, dass die thermische Umgebung, die am behaglichsten ist, nicht unbedingt die Leistungsfähigkeit auf ein Maximum steigert.

Eine immer wieder angeführte Untersuchung wurde von [Wyon 1986] angefertigt, der Abhängigkeiten der Leistungsfähigkeit von der Raumtemperatur aufstellte. Danach ist bei sitzender Tätigkeit, leichter Kleidung und einer Raumtemperatur von 26 °C mit einer Leistungsminderung von 13 Prozentpunkten gegenüber 23 °C zu rechnen. In [Wyon et al. 1981] kann aber auch nachgelesen werden, dass die Gedächtnisleistung bei einem Temperaturanstieg von 23 °C auf 26 °C stark zunimmt, um dann bei weiter steigender Temperatur wieder abzusinken.

Nach [Schrader et al. 1983] verschlechterte sich die Aufmerksamkeit von Schülern in Klimakammer-Versuchen bei Temperaturen über 27 °C signifikant. Die feinmotorischen Fähigkeiten verbesserten sich jedoch bei höheren Temperaturen.

In dem Forschungsprojekt SCATs [Nicol, McCartney 2000] wurden subjektive und objektive Daten zu Innenraumbedingungen von 25 Gebäuden in verschiedenen Ländern Europas erhoben. Die Daten wurden auch bezüglich der selbstbewerteten Produktivität der befragten Personen in Büroräumen ausgewertet. Es wurde im Gegensatz zu den Untersuchungen von Wyon gezeigt, dass zwischen der gemessenen Lufttemperatur und der selbstbewerteten Produktivität kein Zusammenhang besteht [McCartney, Humphreys 2002]. Dagegen konnte ein Zusammenhang zwischen selbstbewerteter Produktivität und dem thermischen Präferenzvotum hergestellt werden. Die thermische Präferenz drückt aus,

ob eine Person es wärmer oder kälter wünscht oder keine Änderung gewünscht wird. Die Ergebnisse zeigen, dass ein Zusammenhang zwischen dem Bewerten einer Temperatur – also der thermischen Behaglichkeit – und der Produktivität besteht, nicht jedoch zur Temperatur selbst.

In einem Artikel von [Mendell, Heath 2005] werden noch weitere Studien zu diesem Thema aufgeführt z.B. Witterseh, 2002; Federspiel 2002 und Fang 2002 [..]. Bei den Versuchen von Witterseh [...], wurden die Temperaturen von 20°C auf 26 und dann 30°C gesteigert. Andere Umgebungsbedingungen blieben dabei konstant. Das Ergebnis in den Leistungstest blieb jedoch gleich. Die subjektiv empfundene Leistungsfähigkeit der Probanden verschlechterte sich jedoch ($p < 0,0001$). Die Probanden gaben zudem an, sich bei höheren Temperaturen schlechter konzentrieren zu können ($p < 0,01$). Federspiel untersuchte bei seinen Versuchen den Einfluss der Raumtemperaturen von 21 bis über 26 °C auf die Gesprächszeiten von Arbeitnehmern in einem Call-Center. Ein Effekt zeigte sich jedoch nur bei hohen Temperaturen über 25,4 °C. Fang konnte bei seiner Studien keinen Einfluss verschiedener Kombinationen von Temperatur und Luftfeuchte auf die Leistungsfähigkeit von Probanden feststellen, die simulierte Büroaufgaben erledigten. Das mag aber daran liegen, dass es den Probanden gestattet war, ihre Kleidung jederzeit so anzupassen, dass sie sich behaglich fühlten.

Erst vor kurzem wurde in Dänemark eine Untersuchung von [Wargocki, Wyon 2006] durchgeführt, um den Effekt hoher Innentemperaturen auf die Leistungsfähigkeit von Schülern zu messen. Es wurden fünf unabhängige Studien in sechs identischen Klassenräumen einer dänischen Gesamtschule durchgeführt. In den ersten drei Versuchen wurde die Zuluftmenge erhöht (siehe Kapitel 2 Anforderungen an die Luftqualität), in weiteren zwei Versuchen wurden die Räume einmal von 23,6 auf 20 °C, das andere mal von 24,9 auf 21,6 °C gekühlt. Die Versuche fanden in zwei aufeinander folgenden Sommern statt. Die Studie wurde im Cross-Over-Design durchgeführt. Den 10 bis 12 Jahre alten Schülern wurden während der Versuchphase acht schulähnliche Aufgaben gestellt (Lesen, Mathematik, etc.). Die 10-minütigen Übungen wurden in den normalen Tagesablauf eingebaut. Bei niedrigen Temperaturen erzielten die Schüler signifikant ($p < 0,05$) bessere Ergebnisse. Diese Ergebnisse lassen darauf schließen, dass sich bei einer Absenkung der Raumtemperatur um 1 K die Leistung in Bezug auf die Geschwindigkeit der Aufgabe um 2% steigern lässt. Bezieht man nur die signifikanten Testergebnisse mit ein, lässt sich die Leistung um 4 % verbessern. Die Raumtemperatur hatte jedoch keinen Einfluss auf die Fehlerquote bei den verschiedenen Leistungstests (Bild 7).

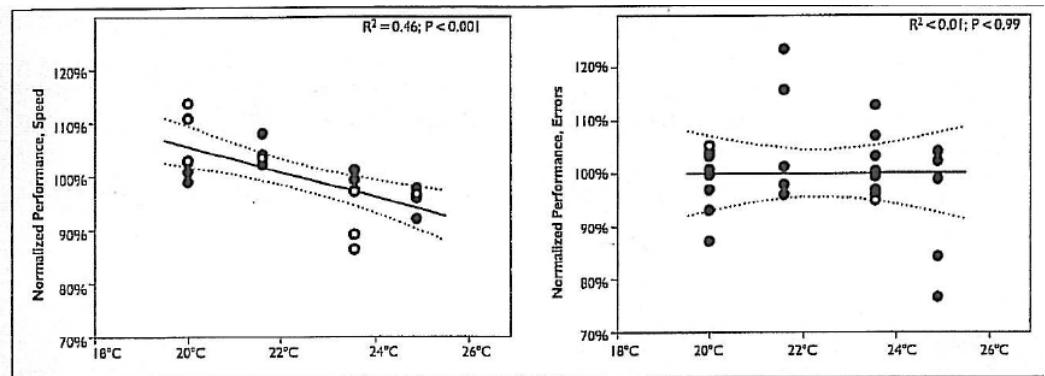


Bild 7:
Leistungsfähigkeit und Fehlquoten von Schülern bei verschiedenen Raumtemperaturen [Wargocki, Wyon 2006].

3.2 Vertikaler Temperaturgradient

Die gesamte thermische Behaglichkeit ist nicht die einzige Anforderung an eine thermische Behaglichkeit. Eine Person fühlt sich möglicherweise behaglich, was den Körper als Ganzes betrifft, und kann sich dennoch unbehaglich fühlen, wenn ein Teil des Körpers warm und ein anderer kalt ist. Daher ist eine zusätzliche Anforderung an die thermische Behaglichkeit notwendig, nämlich die, dass keine lokale thermische Unbehaglichkeit vorliegt. Eine lokale Unbehaglichkeit kann von einem asymmetrischen Strahlungsfeld, wie sie z.B. bei Einfachverglasungen auftritt oder einem vertikalen Lufttemperaturunterschied verursacht werden. Bild 8 zeigt, dass bei einer Temperaturdifferenz zwischen Knöchel und Kopf von 3 K mit ca. 6% Unzufriedenen zu rechnen ist.

Da wärmere Luft immer nach oben steigt, bildet sich im Raum meist eine vertikale Temperaturschichtung aus (Temperaturgradient). In einem Experiment von [Wyon 1996] wurden 200 Testpersonen Temperaturgradienten von 0, 2 und 4 K/m ausgesetzt. Das thermische Gesamttempfinden der Personen war jedoch immer dasselbe. Das lokale thermische Empfinden zeigte keinen Zusammenhang zum Temperaturgradienten, jedoch zum thermischen Gesamttempfinden. Daher sind zu hohe Temperaturgradienten nur problematisch, wenn dadurch die Lufttemperatur in der Atemzone relativ hoch ist, oder allgemein die Temperatur im Raum als zu niedrig empfunden wird, weil sich der Temperaturgradient aufgrund der Thermik immer umgekehrt zu den Anforderungen des Menschen (warme Füße, kühler Kopf) verhält.

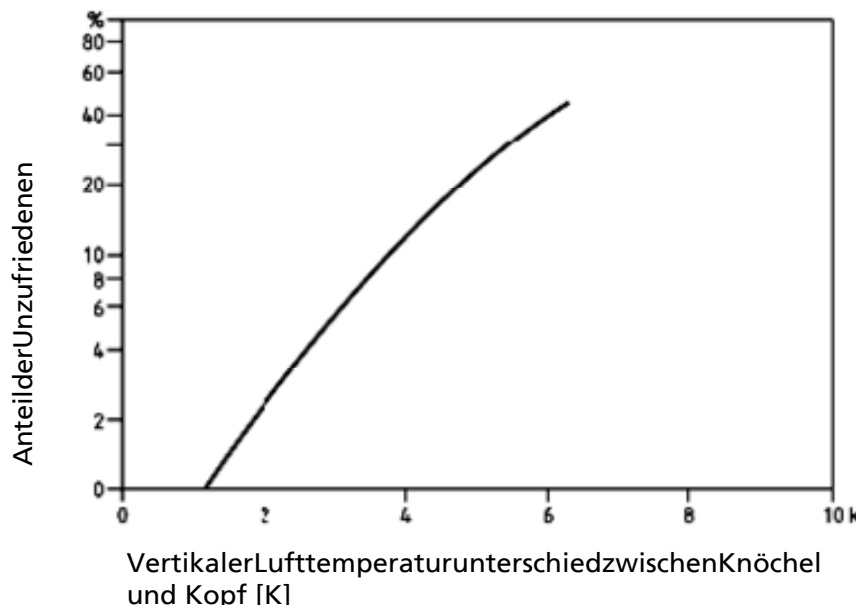


Bild 8:
Unzufriedene aufgrund von vertikalem Temperaturunterschied zwischen Fuß und Kopf [DIN EN ISO 7730].

3.3 Einflussnahmemöglichkeit

Wichtig für die Beurteilung von Unterrichtsräumen mit freier Lüftung durch Fenster ist die Tatsache, dass die für Deutschland gültigen oder bisher gültigen Normen sich alle auf Räume mit mechanischer Lüftung beziehen [DIN EN ISO 7730, DIN 1946-2]. Es hat sich gezeigt, dass in Räumen mit freier Lüftung durch eine hohe empfundene Einflussmöglichkeit des Nutzers auch extremere Temperaturen oder Luftgeschwindigkeiten als behaglich empfunden werden [de Dear et al. 1997; ISSO 74; Nicol, McCartney 2000].

Nach [Wyon 1996] erhöht eine individuelle Kontrolle der Raumtemperatur im Bereich von $\pm 3\text{K}$ die geistige Leistung bei Aufgaben, die Konzentration erfordern, um 2,7 %. Auch [Kroner et al.] stellten 1992 fest [zitiert in Wyon 1993], dass ein Einfluss in dieser Größenordnung auf die Raumtemperatur die Anzahl der Nutzerbeschwerden um 2,8 % senkt und eine durchschnittliche Leistungssteigerung von 7 % bei Routinearbeiten im Büro erwarten lässt. Da sich jedoch in einem Klassenraum sehr viele Personen befinden, ist es unmöglich, jedem Schüler eine individuelle Einflussnahme auf die Raumtemperatur zu ermöglichen.

Die empfundene Einflussnahme sinkt bei Anwesenheit vieler Personen im Raum. Zum Thema Einflussnahmemöglichkeit siehe ausführlich in [Hellwig 2005]. Dieses Potential kann in Klassenräumen also nicht genutzt werden. Daher werden die Anforderungen an das thermische Raumklima in Anlehnung an bestehende Regelungen für mechanisch belüftete Räume festgelegt.

Die bisher vorliegenden Untersuchungen zum Thema Leistungsfähigkeit und thermisches Raumklima sind teilweise widersprüchlich. Untersucht wurde bislang der Einfluss der Temperatur auf eine einmalige Leistungserbringung. Nicht untersucht ist bisher der Einfluss von dauerhaft hohen Temperaturen auf die Fähigkeit von Personen eine Leistung nicht nur einmalig zu erbringen sondern dauerhaft auf einem hohen Niveau zu halten.

3.4 Normative Regelung und empfohlene Anforderungen

Die [ASR 6 2001] gibt an, dass in Arbeitsräumen die Lufttemperatur nicht 26°C überschreiten soll. Die angeführte Grenze gilt unabhängig von der Jahreszeit, Jedoch „darf bei darüber liegenden Außentemperaturen in Ausnahmefällen die Lufttemperatur höher sein.“ Zu Höhe und Häufigkeit dieser Überschreitung wird keine Aussage getroffen.

Nach [prEN 15251] wird für Schulen ein mittleres Erwartungsniveau, also Kategorie II zugrunde gelegt. Die Anforderungen der Kategorie I nach [prEN 15251] gelten nur für besonders empfindliche Menschen wie kranke oder behinderte Personen.

Nach [pr EN 15251] und [DIN EN ISO 7730] sollte die operative Raumtemperatur im Winter zwischen 20 und 24°C und im Sommer zwischen 23 und 26°C betragen. Über- bzw. Unterschreitungen dieser Werte gemäß Kategorie III in 0 sind zulässig, sollten jedoch über lang anhaltende Zeiträume vermieden werden.

Eine weitere Einflussgröße auf die lokale Behaglichkeit bildet nach [DIN EN ISO 7730] der Lufttemperaturunterschied zwischen Füßen und Kopf. Dieser sollte kleiner 3 K sein.

Tabelle 4:
Zulässige operative Raumtemperaturen nach pr DIN EN 15251 für verschiedene Anforderungskategorien.

Kategorie	Winter	Sommer	Gültigkeit
II	20-24°C	23-26°C	Klassenräume (1,2 met; 1,0 bzw. 0,5 clo); Sommertemperaturen gelten nur für Räume mit mechanischer Kühlung
III	19-25°C	22-27°C	

Neben den in Tabelle 4 genannten anzustrebenden Temperaturbereichen sollte daher darauf geachtet werden, dass hohe Temperaturen nur kurzfristig – also mit dem Ansteigen der Außentemperatur – auftreten. Dies bedeutet vor allem im Sommer, dass eine zusätzliche Aufheizung der Klassenräume nach Schul-

schluss wirksam verhindert werden muss und bei extremen Sommerperioden für eine Auskühlung der Schulräume in der Nacht durch gesorgt werden muss. Vergleichbar mit einer Mindesttemperatur, die zu Schulbeginn erwartet wird, sollten Klassenräume im Sommer beim Betreten am Morgen Temperaturen, die unter der Außentemperatur liegen, aufweisen.

4 Hygrisches Raumklima

Die Luftfeuchte hat relativ wenig Einfluss auf die thermische Behaglichkeit. Der Mensch hat für Raumluftfeuchte selbst kein Sensorium. Die Ursachen von Klagen über trockene Luft - wie sie in Bürogebäuden selbst bei gemessenen Werten der relativen Luftfeuchte von z.B. 40 oder sogar 50% auftreten – sind noch nicht vollständig geklärt. Die Werte der relativen Luftfeuchte dürfen bezogen auf die thermische Behaglichkeit nach [pr EN 15251] zwischen 20 und 70% liegen. Sehr niedrige relative Luftfeuchten (< 15%) können über längere Zeiträume Trockenheit und eine Reizung von Augen und Atemwegen hervorrufen [DIN EN 15251]. Geringe Luftfeuchten sind aber bei den vergleichsweise hohen Belegungsdichten im Schulbetrieb nicht zu erwarten. Ist die Luftfeuchte über längere Phasen im Raum hoch und der Wärmeschutz der Außenwände gering, so besteht die Gefahr mikrobiellen Wachstums. Im Winter sollte daher die Luftfeuchtigkeit in Räumen mit schlecht gedämmten Außenwänden (dies sollte sich jedoch nach einer integralen Sanierung verbessern) nicht dauerhaft über 50% liegen [...].

Eine energetische Sanierung von Altbauten muss deshalb neben eventuell zu beseitigenden Schäden auch zu einer Verminderung von vorher vorhandenen Feuchteproblemen - wie z.B. Schimmelpilzbildung durch zu niedrige Temperaturen an der Innenoberfläche - führen. Unter Umständen jedoch kann eine energetische Sanierung auch neue Feuchteprobleme verursachen.

Zur Reduzierung von unnötig hohen Wärmeverlusten durch einen unkontrollierten Luftaustausch in Gebäuden durch Leckagen sowie zur Vermeidung von Bauschäden durch ausfallendes Tauwasser in der Baukonstruktion werden Gebäude zunehmend luftdicht gebaut. Bei unsachgemäßer manueller Fensterlüftung kann es hierbei besonders bei hohen internen Feuchtelasten zu einem Befall mit Schimmelpilzen kommen.

Bereits bei einer Unterschreitung der Temperatur der Innenoberfläche eines Bauteils, bei der die relative Feuchte der Raumluft – bei gleicher absoluter Luftfeuchte – einen Wert von 80 % erreichen würde, beginnen die Bedingungen für mikrobielles Wachstum [Diss. Sb]. Daher wird für Außenbauteile in der aktuellen Normung ein Mindestwärmedurchlasswiderstand vorgeschrieben, der neben energetischen günstigen Verhältnissen auch die Bedingungen für mikrobielles Wachstum an der Innenoberfläche dieser Bauteile verhindern soll. Im Altbau werden diese Werte oft deutlich unterschritten; daher ist bei einer Sanierung auf eine entsprechende Erhöhung des Wärmedurchlasswiderstandes mit Hilfe von zusätzlicher Dämmung auf der Außen- oder Innenseite zu gewährleisten. Insbesondere bei der Verwendung von Innendämmung müssen Wand- und Deckenanschlüsse so ausgeführt werden, dass auch hier infolge von Wärmebrückeneffekten keine hygrometrisch kritischen Verhältnisse erreicht werden.

4.1 Normvorgaben und technische Regeln zur Schimmelpilz-Beurteilung

In den gängigen Baunormen existieren neben Angaben zur Vermeidung von Tauwasser auch Kriterien zur Beurteilung von mikrobieller Aktivität an und in Bauteilen. Genannt werden 80 % relative Feuchte in DIN 4108 und DIN EN ISO 13 788 als untere Wachstumsgrenze für Schimmelpilzbildung sowie Materialfeuchtekriterien (z.B. 20 M.-%). Vergleicht man diese beide Zahlenwerte mit den kritischen Feuchten (LIM) aus, so erkennt man, dass sich die Angaben in den Isoplethensystemen für Substratgruppe II bei Temperaturen über 20 °C gut mit dem 80 %-Kriterium für Schimmelpilzbildung übereinstimmen. Der LIM für Substratgruppe I liegt etwa 4 % r.F. darunter. Bei tieferen Temperaturen bis zu 10 °C, z.B. typisch für Wärmebrücken in Altbauten, entsprechen die Normbedingungen in etwa dem LIM der Substratgruppe I. Dieser liegt nur geringfügig unterhalb des Zustandes (80 % relative Feuchte bei 12,6 °C) an einer Außenwandinnenoberfläche, ab dem mit Pilzbildung gemäß Norm gerechnet werden muss, bei 20 °C und 50 % relativer Feuchte im Raum.

4.2 Bauphysikalische Ursachen für Schimmelpilze in Wohnräumen

Bei Gerichtsprozessen beschäftigt man sich häufig mit den Ursachen für Schimmelpilzbefall in Gebäuden. Dabei steht meist die Frage im Vordergrund, ob die Baukonstruktion, also letztlich der Eigentümer, verantwortlich ist oder ob falsches Nutzerverhalten vorliegt. Prinzipiell kann Schimmelpilzbildung nur dann auftreten, wenn die Wachstumsvoraussetzungen erfüllt sind. Feuchte spielt dabei die wesentliche Rolle. Es ist bekannt, dass Feuchte- und Schimmelpilzschäden vor allem hervorgerufen werden durch:

- ungenügendes Wärmedämmniveau und Wärmebrücken,
- erhöhte Wärmeübergangswiderstände, z.B. durch vorgestellte Schränke,
- erhöhte Feuchteproduktion in Innenräumen,
- mangelhaftes Lüftungsverhalten der Bewohner
- sowie Baufeuchte in Konstruktionen.

4.2.1 Wärmebrücken, Ecken und Schränke

Wärmebrücken sind örtlich begrenzte Stellen in den Umfassungsflächen eines Gebäudes, durch die nach außen ein größerer Wärmeabfluss als in den angrenzenden Bereichen stattfindet, was zu einer Erniedrigung der inneren Oberflächentemperatur führt. Sie können durch die geometrischen Verhältnisse bedingt sein (z.B. Ecken) oder durch die Aneinanderreihung von Baustoffen unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit (z.B. Tragpfeiler in einer Wand). Die Folgen von Wärmebrücken sind (neben den höheren Energieverlusten) ein Absinken der Temperatur, eine Erhöhung der Feuchte an der Innenoberfläche und die Gefahr der Unterschreitung der Taupunkttemperatur und damit einer Schimmelpilzbildung. Bild 9 zeigt eine schematische Darstellung eines Raumes mit Angabe der sich einstellenden Innenoberflächentemperaturen in Wandmitte, in den Ecken mit bzw. ohne Schrank und die sich bei einer Raumlufttemperatur von 20 °C bei einer Außenlufttemperatur von -10 °C ergebenden relativen Feuchten an diesen Stellen bei einer angenommenen Raumluftfeuchte von 50 % (grüne Ziffern) bzw. 60 % (rote Ziffern). Der Wärmedurchlasswiderstand für die Wand beträgt im Regelquerschnitt mit 3,5 m²/KW. Man erkennt, dass bei einer ange-

nommenen relativen Raumlufffeuchte von 50 % sich in Wandmitte eine relative Feuchte von 53 % einstellt, während sich in der freien Ecke 62 %, hinter dem Schrank 55 % bzw. 78 % ergeben. Alle diese Werte sind in Bezug auf Schimmelpilzbildung aber unkritisch, wie ein Vergleich mit den Angaben der Wachstumsvoraussetzungen in [1] zeigt. Andere Verhältnisse entstehen im Fall einer auf 60 % erhöhten relativen Feuchte im Raum. Hier kann es hinter dem Schrank in der Ecke zu Pilzbildung kommen. Grund dafür ist ein erhöhter Wärmeübergangswiderstand durch das Möbelstück sowie die sich dort bemerkbar machende Wärmebrückenwirkung.

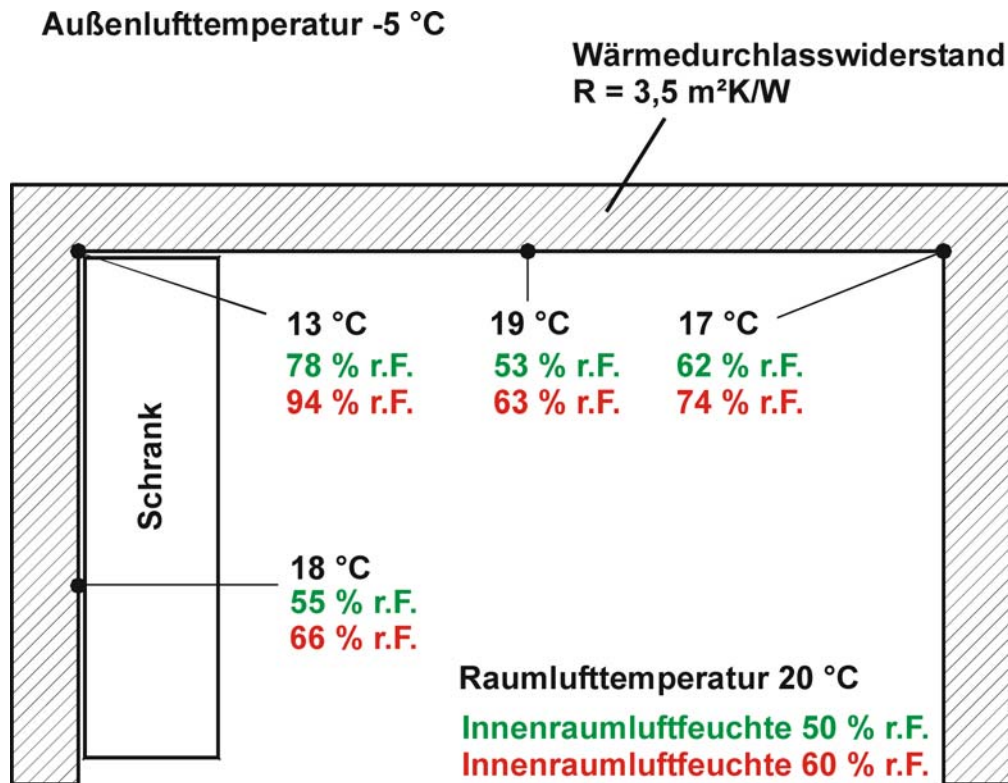


Bild 9:

Schematische Darstellung eines Raumes mit Angabe der sich einstellenden Innenoberflächentemperaturen in Wandmitte, in den Ecken mit bzw. ohne Schrank und die sich bei einer Raumlufftemperatur von 20 °C bei einer Außenlufttemperatur von -10 °C ergebenden relativen Feuchten an diesen Stellen bei einer angenommenen Raumlufffeuchte von 50 % (grüne Ziffern) bzw. 60 % (rote Ziffern). Der Wärmedurchlasswiderstand für die Wand beträgt im Regelquerschnitt mit 4,5 m²K/W.

Möbel, Gardinen und dgl. stellen kaum einen Widerstand für die Feuchte dar. Durch verringerten konvektiven und strahlungsbedingten Wärmeübergang erhöhen sich aber die Wärmeübergangswiderstände und damit die relativen Feuchten aufgrund der sich hinter den Gardinen einstellenden niedrigeren Temperaturen. Die Lösung des Problems besteht in einer besseren Dämmung der Wand bzw. der Wärmebrücken, Wegrücken des Schrankes und verringerte Feuchteproduktion im Raum sowie gute Lüftung.

4.2.2 Feuchteproduktion im Raum

Die sich an Innenoberflächen von Außenbauteilen einstellende relative Feuchte hängt nicht nur von der Temperaturdifferenz zwischen Raumluft und Oberfläche ab, sondern auch maßgeblich von der Feuchteproduktion im Wohnraum. Eine hohe Feuchteproduktion im Wohnraum führt bei gleicher Lüftung zu höheren Raumluftfeuchten und damit gekoppelt auch zu höheren Innenraumoberflächenfeuchten. Daher verwundert es nicht, dass Schimmelpilzbefall vor allem dann auftreten kann, wenn Fenster erneuert wurden, aber keine wärmetechnische Fassadensanierung erfolgte. Dabei kommt es durch die Reduktion des Luftwechsels aufgrund höherer Dichtheit der Fensterfugen zu erhöhten Feuchtelasten in den Räumen, da meist das Lüftungsverhalten nicht verändert wird. Auch wenn die Fensterindustrie moderne Fenster mit hoher Fugendichtheit herstellen kann, muss im geschlossenen Fensterzustand ein gewisser Grundluftwechsel möglich sein.

4.2.3 Lüftung

Die Lüftung des Wohnraumes stellt das wirksamste Mittel dar, um Feuchte aus dem Raum abzuführen. Vor allem im Winter enthält die Außenluft trotz hoher relativer Feuchte eine geringe absolute Feuchte. Bei Winterlüftung wird die relative Feuchte im Raum erniedrigt. Ein Beispiel soll dies verdeutlichen. Tabelle 5 zeigt bei unterschiedlichen Außenlufttemperaturen und einer typischen relativen Außenluftfeuchte von 80 % die relativen Feuchten der Luft, wenn sie auf jeweils 20 °C erwärmt wird. Beispielsweise bei –10 °C außen wird durch die Erwärmung auf 20 °C die Luftfeuchte auf 9 % gesenkt.

Tabelle 5:
Relative Innenluftfeuchte bei unterschiedlichen Außenlufttemperaturen durch Erwärmen auf 20 °C von 80 % feuchter Außenluft bei jeweils gleichbleibender absoluter Feuchte.

Außenlufttemperatur [°C]	Relative Luftfeuchte außen [%]	Absolute Feuchte ¹⁾ [g/m ³]	Relative Luftfeuchte bei 20°C [%]
-10	80	1,7	9
0		3,9	21
10		7,5	42
20		13,5	80

Beim Einbau neuer, dichter Fenster sollte beachtet werden, dass aus der insgesamt dichteren Gebäudehülle ein geringerer Luftwechsel resultiert, der durch angepasstes Lüften ausgeglichen werden muss. Andernfalls ist, besonders im Winter, mit einem Anstieg der Raumluftfeuchte zu rechnen.

Eine bedarfsgerechte Lüftung reduziert durch einen angepassten Luftaustausch die Gefahr einer Schimmelpilzbildung, ohne dass unnötig hohe Lüftungswärmeverluste verursacht werden. „Unter bedarfsgerechter Lüftung ist eine optimierte Betriebsweise zu verstehen, bei der der Luftvolumenstrom an den Bedarf angepasst wird.“ (gekürztes Zitat aus [Hartmann 2002]). Dabei ergeben sich

aufgrund der unterschiedlichen Nutzung verbunden mit unterschiedlichen Wärme-, CO₂- und Feuchtelasten für jeden Raum andere Lüftungserfordernisse.

5 Schallschutz und Raumakustik

Für kommunikationsintensive Bereiche, wie es Unterrichtsräume zweifellos sind, gelten besondere akustische Anforderungen. Ihre Vernachlässigung oder Missachtung führt zu Belastungen, Belästigungen, Beeinträchtigungen und Defiziten, die bereits vor der PISA-Studie in vielerlei Hinsicht benannt wurden [Schick, et al. 1999]. Danach bestehen eindeutige Zusammenhänge zwischen Sprachverständlichkeit und (raum-) akustischen Kenngrößen bzw. Maßnahmen [Airey, MacKenzie 1999, Lubmann, Sutherland 2001]. In einem bisher einmaligen Projekt wurde sogar der Zusammenhang zwischen kognitiver Leistung und akustischer Situation im Klassenraum eindrucksvoll belegt [Klatte et al. 2006]. Dabei lagen nicht etwa Beschwerden oder dergleichen vor. Ungeeignete akustische Bedingungen wirken also trotz scheinbarer Zufriedenheit. Konkrete und etwas subtilere Nachfragen bringen allerdings auch diese Zusammenhänge zum Vorschein. In Bild 10 ist dazu der Zusammenhang zwischen der Nachhallzeit im Klassenraum und Antworten von Schülern auf die Frage ob die Mitschüler oft sehr laut seien. In den Klassenräumen mit höherer Nachhallzeit haben fast alle Schüler diese Frage mit „stimmt“ beantwortet. Damit verblasst die Hoffnung auf Adaptivität der Kinder an schlechte Bedingungen in Klassenräumen.

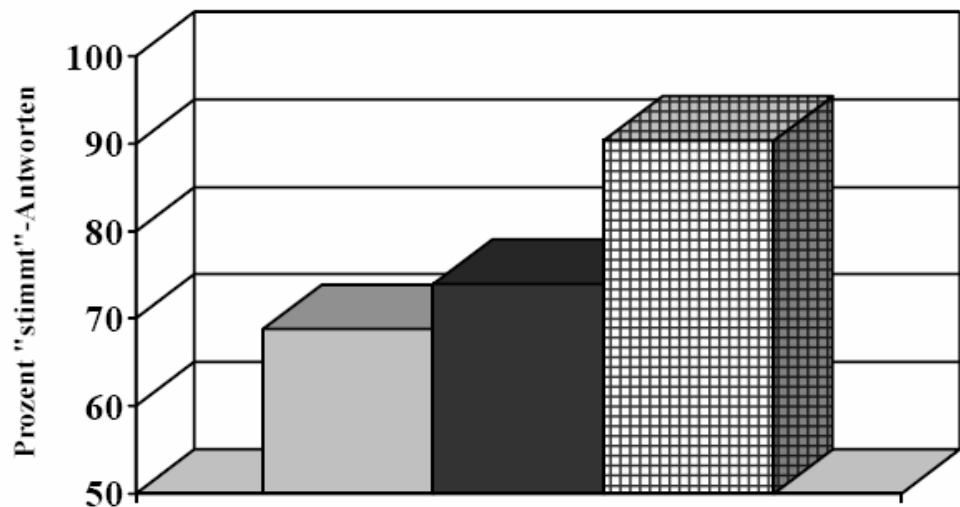


Bild 10:

Prozentsatz von „stimmt“ – Antworten auf die Aussage „Meine Mitschüler sind oft sehr laut“ in Abhängigkeit von der Nachhallzeit im Klassenraum. [Klatte et al. 2006]. NH 1 ≤ 0,65 s 0,65 < NH 2 ≤ 0,95 s NH 3 > 0,95 s

Bisher werden Klassenräume meist stark bedämpft. Dies empfiehlt beispielsweise auch die aktuelle [DIN 18041]. Auch sind Vorgaben hinsichtlich der Positionierung von Schallabsorbieren und –reflektoren bekannt [Fasold et al. 1987].

Beide Maßnahmen zusammen optimieren das Verhältnis von nützlicher zu schädlicher Stimmenergie. Damit wird – einen geringen Störpegel vorausgesetzt – eine gute Sprachverständlichkeit erreicht. Auch in der angelsächsischen Literatur [Bistafa, Bradley 2000] wird der Fokus auf eine starke Raumbedämpfung und einen geringen Störpegel (z.B. 25 dB geringer als Pegel des Sprechers in einem Meter Abstand) gelegt. Die Realität zeigt, dass die Störpegel (von außen und innen) deutlich höher sind. Dies liegt einerseits an der üblicherweise schlechten Schalldämmung nach außen (gegen Verkehrs- und Industriergeräusche) und innen (Flure, Nachbarräume), aber auch an den von Schülern selbst erzeugten Schallpegeln.

Nicht beachtet wird im aktuellen Stand der Technik für Schulen der Irrelevant Sound Effect [Klatte et al. 2004]. Dieser bedeutet, dass die „Speicherleistung“ (also die Kapazität des verbalen Arbeitsgedächtnisses) von gesprochenen Inhalten deutlich durch irrelevante (auch leise!) Hintergrundgeräusche reduziert wird. Hierzu sind für Schulen und Schüler unterschiedlichen Alters und entsprechender kognitiver Leistungsfähigkeit noch keine umsetzbaren Erkenntnisse zur Minimierung dieses Effekts vorhanden. Auch bestehen keine Methoden und Planungsregeln, die diesen Effekt berücksichtigen.

Akustische Anforderungen werden in Abhängigkeit von der Art der Nutzung jedes Raumes so formuliert, dass im Falle ihrer Einhaltung aus akustischer Sicht optimale Lern- und Lehrbedingungen in der Schule herrschen. Dies betrifft in erster Linie die Unterrichtsräume der Schule, in denen man täglich über Zeiträume von Stunden störungs- und ermüdungsfrei arbeiten können muss. Dazu müssen Störungen von außerhalb, aber auch innerhalb des betreffenden Raumes auf ein realistisches Minimum reduziert werden. Störungen von außerhalb werden durch die Einhaltung von Anforderungen an den Schallschutz vermieden, während Störungen von innerhalb über die Einhaltung von raumakustischen Anforderungen minimiert werden.

5.1 Festlegung der Anforderungen Schallschutz

Die Festlegung eines zulässigen Störschalldruckpegels erfolgt in Anlehnung an die recht strengen Vorgaben von [DIN 18041]. Für alle Unterrichtsräume soll die hohe Anforderung von 30 dB(A) gelten. Aus diesen Anforderungen kann bei bekanntem Außenlärmpegel die erforderliche Schalldämmung der Außenbauteile bestimmt werden. Wird der Immissionsrichtwert tags nach [VDI 2058] für reines Wohngebiet von 50 dB(A) verwendet, ergibt sich nach [DIN 4109] ein erforderliches resultierendes Schalldämmmaß von $R'_{w, res} = 30$ dB. Auf eine Korrektur wegen des Verhältnisses von Außenbauteil- zu Raumgrundfläche wird verzichtet; sie wird als „Sicherheitsreserve“ betrachtet. Für die Außenbauteile an straßenzugewandten Seiten mit häufig an- und abschwelldem Lärm verursacht durch einzeln vorbeifahrende Fahrzeuge, soll wegen der hohen Lästigkeit ein erforderliches resultierendes Schalldämmmaß von $R'_{w, res} = 35$ dB gelten.

Für die Innenbauteile sollen hinsichtlich Luft- und Trittschallschutz die Anforderungen aus [DIN 4109] gelten: für Decken ein r_e von 55 dB und (über die Anforderung von [DIN 4109] hinausgehend) ein $L'_{n, w}$ von 46 dB; für Wände ein R'_{w} von 47 dB (zwischen Unterrichtsräumen und zu Fluren) bzw. 52 dB (zwischen Unterrichtsräumen und Treppenhäusern) bzw. 55 dB (zwischen Unter-

richtsräumen und „besonders lauten“ Räumen). Türen sollen ein R_w von 32 dB haben.

5.2 Festlegung der Anforderungen Raumakustik

Als objektive Zielgröße wird eine Soll-Nachhallzeit von $T_{Soll} = 0,45$ Sekunden formuliert. Dieser Wert ergibt sich z.B. aus der Empfehlung von [DIN 18041] für Räume mit einem Volumen von 200 m^3 und der Nutzung „Unterricht“, mit der Reduzierung der Sollnachhallzeit um weitere 20 % für Hörgeschädigte und Nicht-Muttersprachler. Bei richtiger Positionierung der zur Einhaltung der Nachhallzeit erforderlichen Absorbermenge ergibt sich im Raum ganz automatisch ein hoher Deutlichkeitsgrad und eine sehr gute Sprachverständlichkeit. Auf eine gesonderte Anforderung an den Deutlichkeitsgrad wird daher verzichtet.

6 Licht

Etwa 80 - 90% der Informationsaufnahme des Menschen erfolgt über das Auge. Der Bereitstellung eines nutzungsgerechten, lernfördernden und kommunikativen visuellen Umfelds kommt daher gerade in Schulen eine besondere Bedeutung zu. Hierbei ist das Anforderungsspektrum an die Beleuchtungsplanung und -technik mit den diversen Funktionsbereichen von Ausbildungsstätten (Klassenzimmer, Fachräume, Räume für Medienarbeit, Cafeterien, Turnhallen etc.) groß. Gezielte Tageslichtnutzung und effiziente Kunstlichtsysteme in Abstimmung mit Lichtmanagementsystemen gestatten die Erfüllung der unterschiedlichen Sehanforderungen bei gleichzeitig hoher Energieeffizienz. Bei der Sanierung von Beleuchtungsanlagen sind bauliche Parameter kaum zu variieren. Beim Austausch von Verglasungen und Sonnenschutzsystemen können die natürlichen Beleuchtungsverhältnisse im Allgemeinen dennoch signifikant bzgl. Entblendung und größerer natürlicher Raumtiefenausleuchtung (z.B. durch lichtlenkende Systeme) verbessert werden. Elektronische Vorschaltgeräte und Leuchten mit effizienter Reflektortechnik stellen Verbesserungspotenziale beim Ersatz des künstlichen Beleuchtungssystems dar. Lichtmanagementsysteme können die Betriebszeiten in Abhängigkeit des zur Verfügung stehenden Tageslichts oder bei Nichtnutzung der Räume herabsetzen und damit den Energieverbrauch senken.

Für Klassenzimmer wird im Nutzungsprofil der [DIN V 18599] ein Wertungswert der Beleuchtungsstärke von 300 lx in Höhe der Nutzebene (0,8 m über dem Fußboden) angenommen. Nach [DIN 5035-4] betragen die Mindestbeleuchtungsstärken in „Allgemeinen Unterrichtsräumen“ ebenfalls 300 lx. Durch einfallendes Tageslicht sollten die erforderlichen Werte der Beleuchtungsstärke so gut wie möglich abgedeckt werden. Einen Hinweis auf die Güte der Tageslichtversorgung liefert der Tageslichtquotient eines Raums. Eine gute Tageslichtversorgung entspricht nach [DIN V 18599 Lichtversorgung] einem Quotienten von (ermittelt in Raummitte) $DR_b \geq 6 \%$, eine mittlere $6 \% > DR_b \geq 4 \%$, eine geringe $4 \% > DR_b \geq 2 \%$ und keine Tageslichtversorgung herrscht bei Tageslichtquotienten $DR_b < 2 \%$ vor.

Daneben spielt die Blendung durch direkte oder diffuse Sonneneinstrahlung bei der Beurteilung der visuellen Behaglichkeit eine Rolle. Nach [DIN EN 12464-1]

ist die „psychologische“ Blendung durch Fenster noch nicht abschließend untersucht. Hierfür steht zurzeit kein geeignetes Blendungsbewertungsverfahren zur Verfügung. Um jedoch eine orientierende Bewertung vornehmen zu können, wird auf die Aussage der [DIN 5035-7] zurückgegriffen: „Aufgrund der positiven psychologischen Wirkung des Tageslichtes... werden in hellen Räumen durch Fenster gesehene Leuchtdichten bis 4.000 cd/m² im Allgemeinen als nicht störend empfunden...“.

7 Zusammenfassung

Schulkinder und Lehrer verbringen ca. 30%-50% ihrer Tageszeit an Schulen. Daher sind ein gesundes und angenehmes Raumklima und eine entsprechend gute Luftqualität für die Gesundheit wichtig. Eine gesunde und hygienische Innenraumluftqualität in Gebäuden war und ist daher zurecht Gegenstand aktueller öffentlicher Diskussionen. Internationale Untersuchungen wie die PISA-Studie stellen durch einen Leistungsvergleich der Schüler die Lern-Bedingungen an Schulen in Deutschland in Frage. Die Ausbildung der heranwachsenden Generation muss in einer Wissensgesellschaft den höchsten Stellenwert besitzen, da nur so eine internationale Wettbewerbsfähigkeit des Standorts Deutschland erhalten werden kann. Neben einer Qualitätssicherung in der Lehre muss auch das Schulgebäude als ein Baustein der Verbesserung der Ausbildungssituation begriffen werden. Neben einer anregenden architektonischen Gestaltung des Gebäudes wirken sich insbesondere die thermische und akustische Behaglichkeit sowie die empfundene Luftqualität auf die Leistungsfähigkeit der Schüler aus.

In einem schwedischen Sprichwort ist von den drei zur schulischen Ausbildung nötigen "Lehrern" die Rede. Der erste Lehrer, das seien die Mitschüler; der zweite Lehrer, das sei der eigentliche Lehrer; der dritte Lehrer aber, das sei der Raum. Der dritte Lehrer ist also die Kunst, eine Schule so zu gestalten, dass darin in idealer Weise gelehrt und gelernt werden kann.

8 Literatur

- [1] Apte et al. 2000 Apte, M. G.; Fisk, J. W.; Daisey, J. M.: 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*, 2000. 10, 246-257.
- [2] ASHRAE Standard 62 ASHRAE Standard 62: Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. 2001.
- [3] ASR 2001 Arbeitsstättenrichtlinie ASR 6 – Raumtemperaturen: Zu §6 Abs. 1 und 3 der Arbeitsstättenverordnung. Ausgabe Mai 2001.
- [4] Bauer 2003 Bauer: Kohlendioxid-Messungen in der Schule, Wohnung + Gesundheit, 2003, 109, 33-34
- [5] Bischof et al. 2003 Bischof W.; Bullinger-Naber, M.; Kruppa, B.; Schwab, R.; Müller, B.H.: Expositionen und gesundheitliche Beeinträchtigungen in Bürogebäuden – Ergebnisse des ProKlimA-Projektes. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2003.
- [6] BUWAL 1997 Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (Hrsg.): Luftqualität in Innenräumen, Schriftenreihe Nr. 287 – Luft, Bern, 1997
- [7] Bux 2006 Bux, K.: Klima am Arbeitsplatz. Stand arbeitswissenschaftlicher Erkenntnisse – Bedarfsanalyse für weitere Forschungen. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Forschungsprojekt F1987, 2006
- [8] de Dear et al. 1997 de Dear, R., Brager, G., Cooper, D.: Developing an adaptive model of thermal comfort and preference – Final report. ASHRAE RP-884, 1997.
- [9] DIN 18005 DIN 18005-1: Schallschutz im Städtebau; Berechnungsverfahren.
- [10] DIN 18041 DIN 18041 2004-05: Hörsamkeit in kleinen bis mittelgroßen Räumen. Beuth, 2004.
- [11] DIN 18041 DIN 18041: 2004-05: Hörsamkeit in kleinen bis mittelgroßen Räumen.
- [12] DIN 1946-2 DIN 1946-2: Raumluftechnik: Gesundheitstechnische Anforderungen (VDI- Lüftungsregeln), BeuthVerlag, Berlin, 1994.
- [13] DIN 4109 DIN 4109: Schallschutz im Hochbau, Anforderungen und Nachweise.
- [14] DIN 4108 DIN 4108: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden. Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz (2001 - 03).
- [15] DIN EN ISO 140-4 DIN EN ISO 140-4: Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen; Teil 4: Messung der Luftschalldämmung zwischen Räumen in Gebäuden (ISO 140-4: 1998); Deutsche Fassung EN ISO 140-4: 1998. Dezember 1998.
- [16] DIN EN ISO 3382 DIN EN ISO 3382: Messung der Nachhallzeit von Räumen mit Hinweis auf andere akustische Parameter. März 2000.
- [17] DIN EN ISO 7730 DIN EN ISO 7730: Ermittlung des PMV und des PPD und Beschreibung der Bedingungen für thermische Behaglichkeit. Beuth, Berlin, 2006.
- [18] DIN-EN-ISO 13 788 Berechnung der Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchten und Berechnung der Tauwasserbildung im Bauteilinneren (2001 – 11).
- [19] Erdmann, Apte 2004 Erdmann C. A.; Apte M. G.: Mucous membrane and lower respiratory building related symptoms in relation to indoor carbon dioxide concentrations in the 100- building BASE dataset. *Indoor Air*, 2004, 14, 127-134.

- [20] Fitzner 2004 Fitzner, K.: Einfluss des Raumklimas auf die Produktivität, HLH, Bd.55 (2004), 59-60.
- [21] Forschner, Koss 1997 Forschner, S.; Koss, G.: Beurteilung und Erfordernisse der natürlichen Raumlüftung. Gesundheitswesen, 59 (1997), 577-582.
- [22] Fox et al. 2003 Fox, A.; Harley, W.; Feigley, C.; Salzberg, D.; Sebastian, A.; Larsson, L.: Increased levels of bacterial markers and CO₂ in occupied school rooms. J. Environ. Monit., 2003, 5, 246-252.
- [23] Fromme et al. 2006 Fromme, H.; Dietrich, S.; Kiranoglu, M.; Twardella, D.; Schierl, R.; Nowak, D.; Heitmann, D.; Körner, W.: Frische Luft an bayerischen Schulen. Untersuchungen zur Verbesserung der Luftqualität. Vorläufige Zusammenfassung. Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit, September 2006.
- [24] Grams et al. 2004 Grams, H.; Hehl, O.; Dreesman, J.: Niedersächsisches Schulmessprogramm: Untersuchung von Einflussfaktoren auf die Raumluftqualität in Klassenräumen sowie Modellierung von Kohlendioxid-Verläufen. Niedersächsisches Landesgesundheitsamt. Projektbericht Dezember 2002 und Ergänzungen November 2004.
- [25] Hellwig 2005 Hellwig, R. T.: Thermische Behaglichkeit – Unterschiede zwischen frei und mechanisch belüfteten Bürogebäuden aus Nutzersicht. Dissertation, TU München, 2005.
- [26] ILAT Institut für Lebensmittel, Arzneimittel und Tierseuchen Berlin (ILAT) und Landesamt für Arbeitsschutz, Gesundheitsschutz und technischer Sicherheit Berlin: Dicke Luft im Klassenzimmer? Innenraumluftqualität in Berliner Schulen. Untersuchungen im Berliner Stadtgebiet 2002/2003. Ohne Jahresangabe. http://www.bbgges.de/content/fileadmin/res_bbgges/dicke-luft.pdf
- [27] ISSO 74 ISSO 74: Thermische Behaaglijkheid. Eisen voor de binnentemperatuur in gebouwen. Rotterdam 2004.
- [28] Kruppa et al. 2002 Kruppa, B.; Bischof, W.; Bullinger-Naber, M.: Positive und negative Wirkungen raumluftechnischer Anlagen auf Befindlichkeit, Leistungsfähigkeit und Gesundheit. gi Gesundheitsingenieur, 123 (2002), 2, 88-95.
- [29] Leistner, Zhou 2006 Leistner, M.; Zhou, X.: integrale Schulgebäudesanierung, 1. Zwischenbericht: Akustische Bestandsaufnahme. Zwischenbericht des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik an die Deutsche Bundesstiftung Umwelt, unveröffentlicht, 2006.
- [30] McCartney, Humphreys 2002 McCartney, K.J.; Humphreys, M.A.: Thermal comfort and productivity. Proceedings Indoor Air 2002, 822-827.
- [31] Mendell, Heath 2005 Mendell, M. J.; Heath, G. A.: Do indoor pollutants and thermal conditions in schools influence student performance? A critical review of literature. Indoor Air, 2005, 15, 27-52.
- [32] Meyer et al. 1999 Meyer, H.W., Allermann, L., Nielsen, J.B., Hansen, M.O., Gravesen, S., Nielsen, P.A., Skov, P., Gyntelberg, F.: Building conditions and building-related symptoms in the Copenhagen school study. Indoor Air '99: Proceedings of the 8th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, 2, 298-299.
- [33] Milton et al. 2000 Milton, D. K.; Glencross, P. M., Walters, M. D.: Risk of sick leave associated with outdoor air supply rate, humidification, and occupant complaints. Indoor Air, 2000, 10, 212-221.

- [34] Müller-Limmroth 1977 Müller-Limmroth, W.: Allgemeine Lüftungsanforderungen an Wohnungen aus hygienischer, physiologischer und bakteriologischer Sicht. - unveröffentlichtes Gutachten, München 1977. Lehrstuhl und Institut für Arbeitspsychologie der TU München. Zitiert in BUWAL 1997.
- [35] Muss 2004 Muss, C.: Erfahrungen mit kontrollierter Raumbelüftung an Schulen – Komfort, Energie und Kosten, IBO-Magazin, 2004, 1, 8-14.
- [36] Myhrvold et al. 1996 Myhrvold, A. N.; Olsen, E.; Lauridsen, Q.: Indoor environment in school – pupils health and performance in regard to CO₂ concentrations. Proceedings of Indoor Air'96: The 7th International conference on Indoor Air Quality and Climate, 4, 369-374.
- [37] Nicol, McCartney 2000 Nicol, F.; McCartney, K.: Smart controls and thermal comfort project. Final report. Oxford Brooks University School of Architecture. 2000.
- [38] Pepler, Warner 1968 Pepler, R. D.; Warner R. E.: Temperature and Learning: An Experimental Study. ASHRAE Annual Meeting, Research Report No. 2089 RP-57, Lake Placid, New York, 24. -26. Juni 1968, 211-219
- [39] Pettenkofer 1858 Pettenkofer, Max von: Über den Luftwechsel in Wohngebäuden. Literarisch-artistische Anstalt der J. G. Cotta'schen Buchhandlung, München, 1858
- [40] prEN 15251 CEN/TC 156: prEN 15251, CEN/TC 156 N780: Indoor environmental parameters for assessment of energy performance of buildings- addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics. 2006-05
- [41] Schmidt et al. 2005 Schmidt, R. F.; Lang, F.; Thews, G.: Physiologie des Menschen, Springer-Verlag, Heidelberg, 2005
- [42] Schrader et al. 1983 Schrader, G.; Bischof, W.; Horn, H.: Mentale Leistung unter variierten-Raumklimabedingungen. Stadt- und Gebäudetechnik, 37 (1983), 7, 212-214
- [43] Schulze et al. 1994 Schulze, H.; Rudloff, F.; Schuschke, G.: Lüftungsprobleme in Wohnungen und Schulen in den neuen Bundesländern. VDI Berichte, Nr. 1122, 1994, 889-898.
- [44] Schumann, 1994 Schumann, M.: Kohlendioxid in Innenräumen. VDI Berichte, Nr. 1122, 1994, 253-268.
- [45] Seppänen et al. 1999 Seppänen, O.; Fisk, J. W.; Mendell, M. J.: Association of Ventilation Rates and CO₂ Concentrations with Health and Other Responses in Commercial an Institutional Buildings. Indoor Air, 1999, 9, 226-252.
- [46] Seppänen et al. 2006 Seppänen, O.; Fisk, J. W.; Lei, Q. H.: Ventilation and performance in office work. Indoor Air, 2006, 16, 28-36.
- [47] Shaughnessy et al. 2006 Shaughnessy, R. J.; Haverinen-Shaughnessy, U.; Nevalainen, A.; Moschandreas, D.: A preliminary study on the association between ventilation rates in classrooms an student performance. Indoor Air, 2006, 16, 465-468.
- [48] Shendell et al. 2004 Shendell, D. g.; Prill, R.; Fisk, W. J.; Apte, M. G.; Blake, D.; Faulkner, D.: Associations between classroom CO₂ concentrations and student attendance in Washington and Idaho. Indoor Air, 2004, 14, 333-341.
- [49] Smedje et al. 1996 Smedje, G., Norback, D., Edling, C.: Mental performance by secondary school pupils in relation to the quality of indoor air. Indoor Air '96, The 7th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, 1, 413-419.
- [50] Twardik, Tappler 2004 Twardik, F.; Tappler. P.: Gute Luft zum Lernen? Vortrag auf dem Kongress: Gesunde Raumluft – Schadstoffe in Innenräumen – Prävention und Sanie-

- rung. Wien, 2004. IBO-Verlag (Hrsg.), 2004, 165-173
- [51] Umweltbundesamt 2000 Umweltbundesamt: Leitfaden für Innenraumlufthygiene in Schulgebäuden. 2000.
- [52] VDI 4300-7 VDI 4300-7: Messen von Innenraumluftverunreinigungen. Bestimmung der Luftwechselzahl in Innenräumen. Verein deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 2001.
- [53] Wanner 1982 Wanner, H. U.: Belastung der Raumluftdurch den Menschen (Kohlendioxid, Gerüche), aus: Aurand, K.; Seifert, B.; Wenger, J.(Hrsg.): Luftqualität in Innenräumen, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart – New York, 1982, 11-16
- [54] Wargocki et al. 1999 Wargocki, P.; Wyon, D. P.; Baik, Y. K.; Clausen, G.; Fanger, P. O.: Perceived Air Quality, Sick Building Syndrome (SBS) Symptoms and Productivity in an Office with Two Different Pollution Loads. *Indoor Air*, 1999, 9, 165-179.
- [55] Wargocki et al. 2000 Wargocki, P.; Wyon, D. P.; Sundell, J.; Clausen, G.; Fanger, P. O.: The Effects of Outdoor Air Supply Rate in an Office on Perceived Air Quality, Sick Building Syndrome (SBS) Symptoms and Productivity. *Indoor Air*, 2000, 10, 222-236.
- [56] Wargocki, Wyon 2006 Wargocki, P.; Wyon, D. P.: Research report on effects of HVAC on student performance. *ASHRAE Journal*, Oktober 2006, 22-28.
- [57] Wyon 1979 Wyon, D. P.: The effects of moderate heat stress on mental performance. *Scand. J. work environ. & health*, 1979, 5, 352-361
- [58] Wyon 1986 Wyon, D.P.: The effects of indoor climate on productivity and performance. *VVS & Energi; Organ för VVS-Tekniska Föreningen*, 3, (1986), 59-65.
- [59] Wyon 1993 Wyon, D. P.: Healthy buildings an their impact on productivity. *Proceedings of Indoor Air '93*, 6, 3-13
- [60] Wyon 1996 Wyon, D. P.: Indoor Environmental Effects on Productivity. *Indoor Air Quality '96 / Paths to Better Building Environments / Keynote Adress*, 5-15
- [61] Wyon et al. 1975 Wyon, D. P.; Fanger, P. O.; Olesen, B. W.; Pedersen, C. J. K.: The mental performance of Subjects Clothed for Comfort at Two Different Air Temperatures. *Ergonomics*, 1975, 18-4, 359-374.
- [62] Wyon et al. 1981 Wyon, D.P.; Andersen, I.; Lundquist, G.R.: The effects of moderate heat stress on mental performance. Chapter 16 in: Cena, K.; Clark, J. A. (Ed.) *Bioengineering, Thermal Physiology and Comfort*. Elsevier, Amsterdam, Oxford, New York, 1981.
- [63] Sedlbauer K. Sedlbauer, K.: Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen. Dissertation Universität Stuttgart (2001).

E [1] DIN EN ISO 13 788 – Berechnung der Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchten und Berechnung der Tauwasserbildung im Bauteilinneren (2001 – 11).