

# Messungen zur raumklimatischen und lufthygienischen Situation in Klassenräumen und Kindergärten in Frankfurt

Dr. Katrin Steul

Hygiene und Umweltmedizin

Gesundheitsamt Frankfurt am Main

# Gliederung

- Anfänge der Innenraumlufthygiene
- Parameter
  - CO<sub>2</sub>
  - Feinstaub
- Studien zur Innenraumluftqualität in Schulen
- Untersuchungen des Frankfurter Gesundheitsamtes
- Spezifikum: Passivhaus(schulen)
- Initiativen
- Zusammenfassung



## Der „Vater der Innenraumlufthygiene“

- Max von Pettenkofer, 1818-1901
- Doktor der Medizin, Chirurgie, Geburtshilfe
- Apotheker, Chemiker und erster Hygieniker
- Begründete in seiner Zeit als Leiter des ersten Münchner Hygieneinstituts die Münchner Kanalisation und eine sichere Trinkwasserverordnung
- Forschte über periodische Eigenschaften von chemischen Elementen
- Entdeckte Kreatinin, Methode zur Zementherstellung und Amalgam Füllung
- Erfindung des „Suppenwürfels“ zusammen mit Justus von Liebig
- Nachweismethoden für Zucker, Harnbestandteile und Arsen
- Disput mit Robert Koch; Cholera
- Epidemiologe und Wegbereiter der Umweltmedizin
- CO<sub>2</sub> Innenraumluftwert: Pettenkofer Zahl



# Pettenkofer Zahl

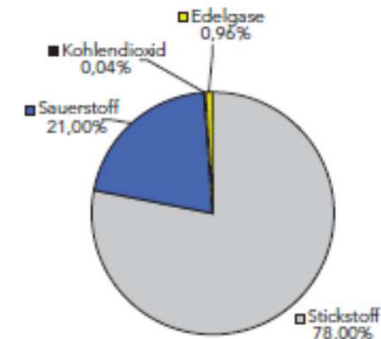


- Bezeichnet den maximal zu tolerierenden CO<sub>2</sub> Gehalt in Innenräumen (0,1%)=1000 ppm
- „Ich bin auf das Lebendigste überzeugt, dass wir die Gesundheit unserer Jugend wesentlich stärken würden, wenn wir in den Schulräumen die Luft stets so gut und rein erhalten würden, dass ihr Kohlensäuregehalt nie über ein Promille anwachsen könnte...“ (Pettenkofer, 1858)
- Die CO<sub>2</sub>-Konzentration der Außenluft liegt bei etwa 400 ppm.

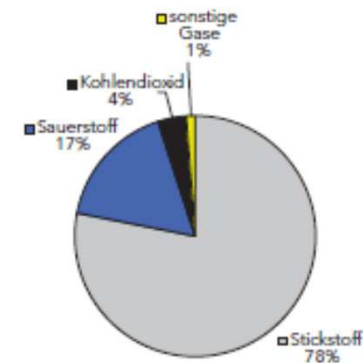
# CO<sub>2</sub>, Kohlenstoffdioxid

- Farb- und geruchloses Gas
- 400 ppm in Umgebungsluft
- Entsteht bei Verbrennung von kohlenstoffhaltigen Substanzen unter Sauerstoffzufuhr
- Abbauprodukt der Zellatmung
- Im Innenraum: Abhängig von Anzahl der Menschen, Aktivität, Luftwechsel; Verbrennungsvorgängen
- (aus: Frische Luft für frisches Denken, Neue Unterrichtsqualität in unseren Klassenräumen, Hess. Kultusministerium)

Die Luft ist ein Gasgemisch:



Die vom Menschen ausgeatmete Luft ist aufgrund der Stoffwechselprozesse anders zusammengesetzt.



Durch diese Atemluft steigt der Kohlenstoffdioxid-Anteil in einem ungelüfteten Raum über akzeptable Grenzwerte hinaus.

# Leitwerte für CO<sub>2</sub> in Innenraumlufte

(aus: Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumlufte, Bundesgesundheitsblatt 2008)

Mitteilung der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte der Innenraumlufthygiene-Kommission des UBA

Tabelle 1: Leitwerte für die Kohlendioxidkonzentration in der Innenraumlufte (NN, 2008a)		
CO <sub>2</sub> -Konzentration [ppm]	Hygienische Bewertung	Empfehlung
< 1000	Hygienisch unbedenklich	Keine weiteren Maßnahmen
1000–2000	Hygienisch auffällig	Lüftungsmaßnahmen intensivieren, Außenluftvolumenstrom bzw. Luftwechsel erhöhen, Lüftungsverhalten überprüfen und verbessern
> 2000	Hygienisch inakzeptabel	Belüftbarkeit des Raumes prüfen ggf. weitergehende Maßnahmen prüfen

## Studien in Deutschland

- (aus: Bundesgesundheitsblatt (2008)  
Gesundheitliche Bewertung von  
Kohlendioxid in der Innenraumluft,  
Mitteilungen der Ad-hoc Arbeitsgruppe  
Innenraumrichtwerte)

Anzahl Räume	Median (ppm)	>1000ppm (%)	>2000ppm (%)	Zeit-raum	Ort
90	1412	82	30	Winter 04/05	München
50	728	29	5	Sommer 05	München
39	1600	80	17	Winter 02/03	Berlin
220	1654	86	32	Winter 05/06	Erfurt
19	1459	79	23	Winter 05/07	BW, Stuttgart
18	820	36	3	Sommer 06	BW, Stuttgart
36	1510	89		Winter 01/02	Hannover
22	581	32		Sommer 01/02	Hannover



# Feinstaub





# Feinstaub

- Engl. particulate matter, PM
- Seesalz und Mineralteilchen aus Vulkanausbrüchen und Bodenerosionen, Rußpartikel (Abgase) und schwermetallhaltige Partikel aus industriellen Prozessen
- Viren, Sporen, Pollen, Bakterien und Pilze
- Gesundheitsrisiko abhängig davon, wie tief sie eindringen und wie lange sie verbleiben
- Masseinheit Gewicht pro Volumeneinheit ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
- Auch Problem der Aussenluft!
- Messung per Laserpartikelzähler (Unterscheidung 0,3-0,5; 0,5-1; 1-5; 5-20  $\mu\text{m}$ )



## Relation der Feinstaubpartikel



Quelle: Umweltbundesamt

## Studien in Deutschland

- (aus: Heudorf, U; Schlechte Luftqualität im Klassenraum – Was macht krank? Was ist zu tun?, Berufsverband der Kinder- und Jugendärzte e.V., Schwerpunktthema 2014)

**Tabelle 2: Kohlendioxid und Feinstaubbelastungen in Klassenräumen – Neuere Untersuchungen aus Deutschland (Auszug).**

Ort, Autor	Anzahl Klassenräume und Dauer der Untersuchungen	Jahreszeit und Jahr	$\bar{x} \pm sdev$	P 50	Max.
<b>Kohlendioxid:</b>			<b>ppm</b>	<b>ppm</b>	<b>ppm</b>
Berlin (Lahrz 2003)	39, Je 1 Tag	W 2002/3		1600	6000
Niedersachsen (Grams et al., 2003)	58 Tage	Alle S 2001/2 W 2004/5	1316 766 1652	581 1510	4177 1270 4177
Südbayern (Fromme 2008)	92 Klassenräume W 76 Klassenräume S	W 2004/5 S 2005	1759 890	1608 785	5359 2742
Frankfurt am Main (Heudorf 2008a)	4 Klassen, Je 15 Tage 4 Klassen, Je 5 Tage PH*	W 2006 W 2007	1473±859 1124±293	1200 1120	4850 1980
Frankfurt am Main (Heudorf, 2011)	26 Klassen, Je 1–2 Tage	W 2009	#	1254	#
Daten aus München (Fromme 2013)	14 Klassen, Je 4 Wochen		1329	1241	3135
<b>Feinstäube:</b>			<b>µg/m<sup>3</sup></b>	<b>µg/m<sup>3</sup></b>	<b>µg/m<sup>3</sup></b>
Berlin (Lahrz 2003)	40 Schulen, Berlin	W 2002/3		59	
Frankfurt am Main (Heudorf 2008b, 2009)	3 Schulen, 6 Klassenräume; 1 Woche normale Reinigung, 2 Wochen Intens. Reinigung	W 2006/7 W 2006/7	94±121 63±65	65 55	
München (Oeder et al., 2012)	6 Schulen, 4 Wochen Vgl. 6 Wohnungen Vgl. 6 x Außenluft		117±48 16,9±8,7 13,9±8,3		71-172
München (Fromme 2013)	14 Klassen, Je 4 Wochen		121	115	335

# Untersuchungen des GA (2008): Feinstaubbelastung

➤ Heudorf U, Gesundheitswesen 2008 (70: 231-238), Feinstaubbelastung in Schulen 2008

➤ **Winter 2006**

➤ 1 Innenstadtschule über 3  
Wo., 1 Außenbereichsschule

➤ 1. Woche Reinigung  
2x/Woche, 2. Woche tgl.

➤ **Winter 2007**

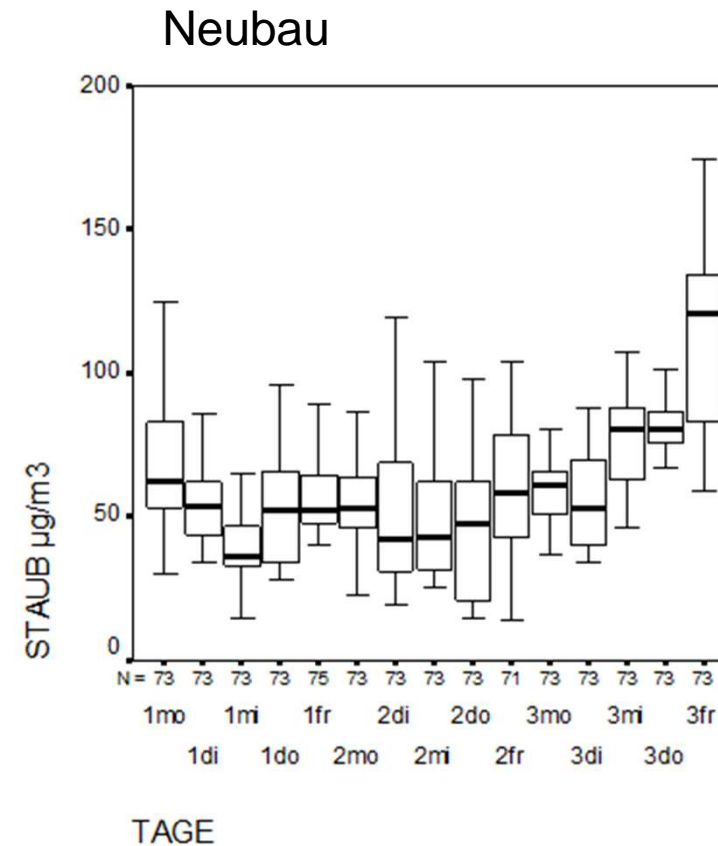
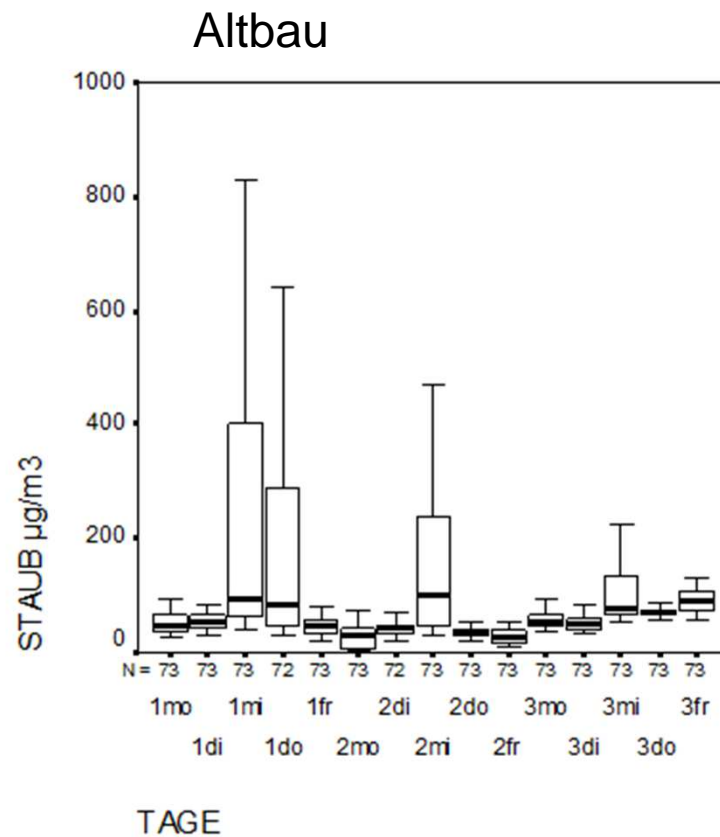
➤ Passivhausschule, tgl. Rei.

➤ 14-16m<sup>3</sup>/Person Stunde  
Luftaustausch

➤ Direktanzeigende  
Lasertechnik, Aufzeichnung  
von Tätigkeit, Personen im  
Raum, Lüftung

	Aussenbereichs- schule	Innenstadtschule	Passivhausschule			
<b>Feinstaub (µg/m<sup>3</sup>)</b>						
Mittelwert ± sdev	90±153	61±27	68±45	58±32	37±18	47±31
Median, Max.	50 (1090)	58 (175)	60 (474)	54 (234)	34 (114)	52 (133)
<b>Normale Reinigung</b>						
Mittelwert ± sdev	73±213	56±22	87±50	68±35	n.u.	n.u.
Median, Max.	58 (1090)	51 (168)	79 (286)	62 (234)	n.u.	n.u.
<b>Tägliche Reinigung</b>						
Mittelwert ± sdev	67±105	64±28	58±39	53±29	37±18	47±31
Median, Max.	48 (1060)	62 (175)	53 (474)	50 (197)	34 (114)	52 (133)

# Feinstaub in Abhängigkeit von der Aktivität



# Verteilung Feinstaub in Außen- und Innenluft

- (aus: Heudorf, U; Schlechte Luftqualität im Klassenraum – Was macht krank? Was ist zu tun?, Berufsverband der Kinder- und Jugendärzte e.V., Schwerpunktthema 2014)
- Messungen der Aussenluft in Beziehung gesetzt

**Tabelle 3: Verteilung von Partikeln unterschiedlicher Größe in der Außenluft und in der Luft in Klassenräumen – sowie Korrelationen der Partikelkonzentrationen mit der Anzahl der Personen im Raum, der Kohlendioxidkonzentration und der Lüftungsaktivität – Untersuchungen in Frankfurt am Main (Heudorf 2008b)**

Partikel	Außenluft-Partikel	Raumluft-Partikel	Verhältnis Raumluft/Außenluft
Konzentrationen	n/l	n/l	n/l
0,3–0,5 µm	100.736	44.558	0,4
0,5–< 1 µm	7.992	4.572	0,6
1–< 5 µm	2.720	3.674	1,3
≥ 5 µm	30	506	17,0
Korrelationen Partikel zu	Kohlendioxid	Personen im Raum	Lüften
	Korrelation r	Korrelation r	Korrelation r
0,3–0,5 µm	-0,457*	-0,229**	0,467**
0,5–< 1 µm	0,277**	-0,003	0,197**
1–< 5 µm	0,545**	0,212**	-0,255**
≥ 5 µm	0,603**	0,359**	-0,300**



## Besondere Situation: Passivhaus(schule)

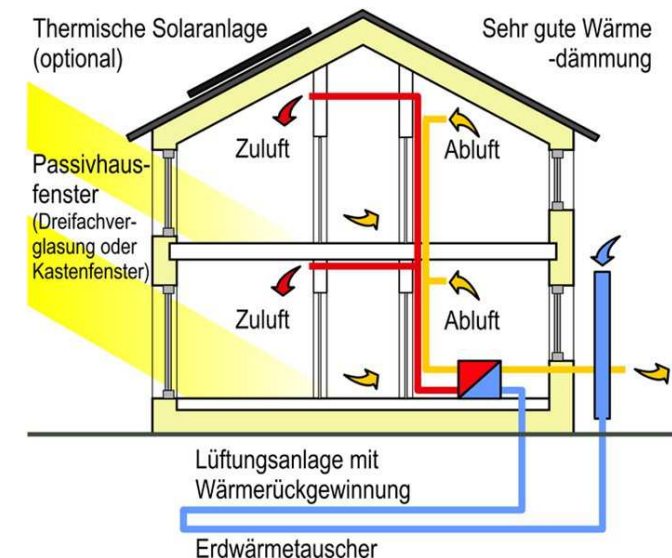
- „Ein Passivhaus ist ein Gebäude, in welchem die thermische Behaglichkeit (ISO 7730) allein durch Nachheizen oder Nachkühlen des Frischluftvolumenstroms, der für ausreichende Luftqualität (DIN 1946) erforderlich ist, gewährleistet werden kann - ohne dazu zusätzlich Umluft zu verwenden.“ (Passipedia)

- **Wärme / Heizung**

- Heizenergiebedarf eines Gebäudes  $< 15 \text{ kWh/m}^2$  und Jahr; d.h.  $1,5 \text{ l Heizöl/m}^2$  und Jahr
- Wärme der Raumnutzer reicht ab  $12 \text{ °C}$  Außentemperatur aus; dann kein weiterer Heizbedarf
- Primärenergiebedarf Strom und Heizung unter  $120 \text{ kWh/m}^2$

- **Lüftung**

- Maschinelle Grundlüftung mit Wärmerückgewinnung; Zuluft Systeme ohne Heizregister; Luftwechsel pro Person  $15 \text{ m}^3/\text{h}$ ; Fensterlüftung zusätzlich möglich
- Lüftungssystem durch Gebäudeleittechnik geregelt (1-2 h vor bis abends)





## Untersuchungen des GA (2007): Passivhaus

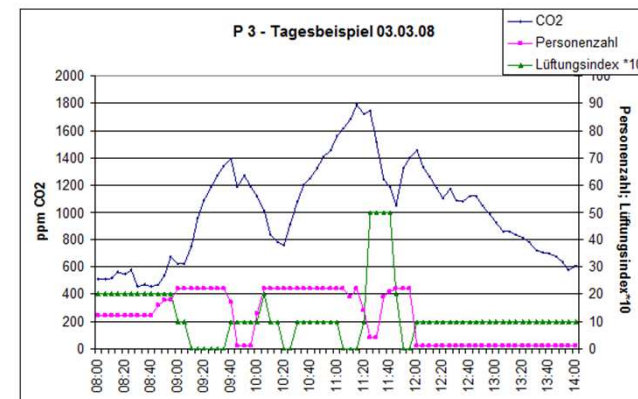
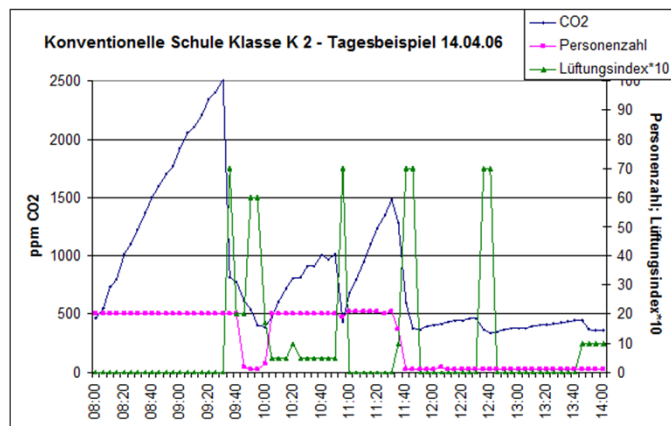
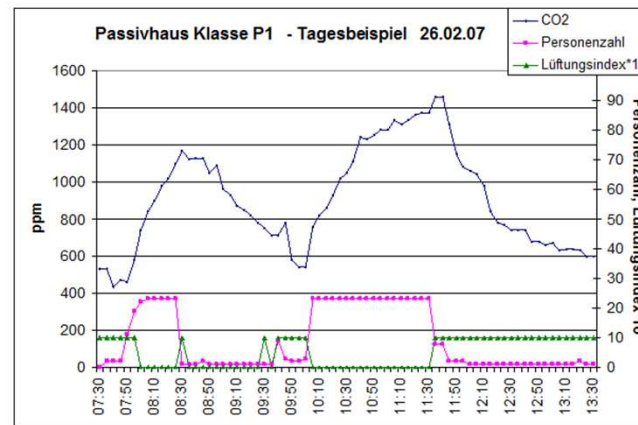
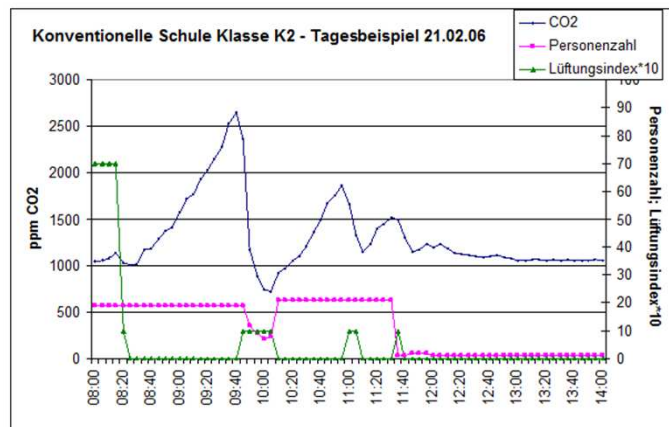
- (aus: Gesundheitswesen 2007 (69: 1-8), Bringt die Passivhausschule die Lösung der Raumlufthygienischen Probleme in Schulen?)
- Untersuchungen Herbst 2006 und Frühjahr 2007, je 3 Unterrichtstage in 2 Klassenräumen
- Mittlere Kohlendioxidbelastung Passivhausschule bei alleiniger mechanischer Lüftung vergleichbar mit konventionell gelüfteten Klassenräumen; Maximalwerte niedriger.
- Sommerphase im Mittel bei 1.127 ppm CO<sub>2</sub>, Winterphase 946 ppm
- Nur zu Unterrichtszeiten: >1.000 ppm in 2/3 der Fälle, >1.500 ppm in Sommerphase 5% der Fälle, im Winter 10%!!
- CO<sub>2</sub>-Minderungsbedarf auch in der Passivhausschule!
  - Fensterlüftung in den Pausen.
  - Erhöhung der Strömungsvolumina der Lüftungsanlage
- Cave: Ausfall der Gebäudeleittechnik: Fensterlüftung erforderlich!!

## Untersuchungen des GA (2008): Passivhaus

- (aus: Umweltmedizin in Forschung und Praxis 2008 (13(4) 219-226),  
Raumlufthygienische Probleme in Schulen – Bringen Passivhausschulen die  
Lösung?)
- Untersuchung in Frankfurter Passivhausschule (15m<sup>3</sup>/h bzw. 20m<sup>3</sup>/h; nur in  
Winterphase)
- Gemessen in Winterbetrieb in 2 Klassenräumen, jeweils 1 Woche, außerdem  
Messung in 2 Klassenräumen einer Schule mit konventioneller Lüftung
- CO<sub>2</sub> Belastung im Mittel 1.316 ppm in konventioneller Schule, 978 ppm in  
Passivhausschule
- Nur zu Unterrichtszeiten: 1.473 ppm konventionelle Schule, 1.124 ppm  
Passivhausschule
- Maximalwerte waren in konventioneller Schule deutlich höher (4.850 ppm vs.  
1.980 ppm).



# Vergleich: CO<sub>2</sub> Verlauf in konventioneller Schule vs. Passivhausschule



(aus: Umweltmedizin in Forschung und Praxis 2008 (13(4) 219-226), Raumlufthygienische Probleme in Schulen – Bringen Passivhausschulen die Lösung?)

# Untersuchung des GA (2014): Kindergärten in Passivhausbauweise

- (aus: Stadt Frankfurt am Main, Infektionen, Infektionsprävention und Hygiene 2014/2015 in Frankfurt am Main; Ziele, Zahlen, Zielerreichung)
- Sommer 2013 und Winter 2014 Untersuchung in 4 Frankfurter Kitas (Passivhausbauweise)
- Untersuchung wegen Klagen zu hoher Temperaturen; konnte bestätigt werden. Nachtklappenöffnung?
- Bei guten Lüftungsindizes auch gute CO<sub>2</sub> Werte

	Kita 1	Kita 2	Kita 3	Kita 4
CO <sub>2</sub>	400-800 ppm	500-1.240 ppm	400-1.000 ppm	400-1.000 ppm
Lüftungsindex	2-4,5	>1		
Sommer CO <sub>2</sub> max.	1.136 ppm	1.739 ppm	1.870 ppm	953 ppm
Winter CO <sub>2</sub>	2.312 ppm	1.365 ppm	3.429 ppm	1.316 ppm

# Gesetzgebung

- Die **europäische Gebäuderichtlinie** (2010/31/EU) trat 2010 in Kraft. Zu den wichtigsten Änderungen zählen: ...Alle neuen Gebäude müssen ab Dezember 2020 dem Niedrigst-Energiestandard entsprechen ... (öffentliche Gebäude ab Dezember 2018)...
- In Deutschland wird die EU-Gebäuderichtlinie in Form des **Energieeinsparungsgesetzes (EnEG)** und der **Energieeinsparverordnung (EnEV)** umgesetzt.
- Ein Niedrigst-Energiegebäude ist laut Art. 2 der Neuauflage der EU-Gebäuderichtlinie definiert als „ein Gebäude, das eine sehr hohe Gesamtenergieeffizienz aufweist. Der fast bei Null liegende oder sehr geringe Energiebedarf sollte zu einem ganz wesentlichen Teil durch Energie aus erneuerbaren Quellen — einschließlich Energie aus erneuerbaren Quellen, die am Standort oder in der Nähe erzeugt wird — gedeckt werden“.
- Wie viel Energie so ein Gebäude verbrauchen kann, welche erneuerbaren Energiequellen erlaubt sind und in welcher Nähe zum Gebäude die Energie erzeugt werden muss, muss noch in den Mitgliedsstaaten und in den EU-Institutionen diskutiert werden. Es wird nationale Definitionen von Niedrigstenergiegebäuden in jedem Land geben – in vielen Fällen wird die **Definition von Passivhäusern** als Anhaltspunkt dienen, wenn es um den Energiestandard geht.

# Initiativen

- Ist die Luft raus? Dann lass Luft rein!  
(Umweltamt, Landeshauptstadt Düsseldorf)
- Frische Luft für Frankfurter Schulen  
(Frankfurt)
- **Frische Luft für frisches Denken – Neue Unterrichtsqualität in unseren Klassenräumen (Hess. Kultusministerium, 2008)**
- Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft  
(Bundesgesundheitsblatt, 2008)

## 2. Lüften während des Unterrichts

In einem preußischen Ministerialerlass für Schulen aus dem Jahre 1889 heißt es wörtlich:

„Es ist wichtig, dass die Anstaltler angehalten werden, in den Zeiten sommerlicher Hitze ihre ernsteste Fürsorge der Lüftung der Klassenräume zu widmen. ... Schülern, welche sich der Wahrnehmung der hierdurch zeitweise für sie vermehrten Mühewaltung unzuverlässig oder säumig zeigen, sind strenge disziplinarische Maßnahmen in Aussicht zu stellen.“

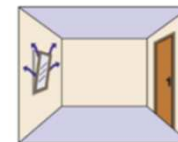
Schon damals wurde also vernünftiges Lüften angeordnet bzw. befohlen.

### Heutige Lüftungsempfehlung für eine Unterrichtsstunde

Zur Vermeidung hoher CO<sub>2</sub>-Konzentration wird eine Lüftungspause von zwei bis drei Minuten nach jeweils 20 Minuten Unterricht empfohlen. Bei Doppelstunden sind zusätzlich fünf Minuten Stoßlüftung nach der ersten Stunde erforderlich.

### Kipplüftung reicht nicht aus!

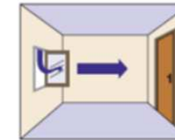
Man könnte meinen, kontinuierliche Kipplüftung reiche aus, um die Qualität der Raumluft im Klassenzimmer aufrecht zu erhalten. Diese Annahme ist falsch!



Wegen der deutlich eingeschränkten Luftströmungsverhältnisse kommt es nur im Bereich des Fensters zu einem Luftaustausch. Darüber hinaus ist die Kipplüftung aus energetischen Gesichtspunkten fragwürdig, außerdem kann der Unterricht durch eindringenden Außenlärm gestört werden.

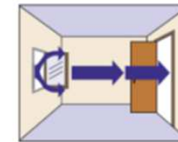
### Der Vorteil des Stoßlüftens

Bei einer Lüftung von 60 Minuten wird die Luft im Raum ca. 9–15 mal vollständig ausgetauscht. Das bedeutet, in zwei Minuten Stoßlüftung wird mindestens 1/3 der Raumluft durch Frischluft ersetzt. Beim Stoßlüften wird lediglich die Luft ausgetauscht, die Gesamtwärme des Raums bleibt aber erhalten. Dieser Vorteil kommt besonders im Winter zum Tragen.



### Querlüftung als Alternative zum Stoßlüften?

Querlüftung ist die effektivste Lüftungsart, da sie die höchste Luftwechselrate aufweist. Prinzipiell kann Querlüftung ebenso gut wie Stoßlüftung vorgenommen werden. Als problematisch erweist sich die Querlüftung allerdings in voll besetzten Klassenzimmern, weil die Schüler unangenehmem Durchzug ausgesetzt werden.



## Zusammenfassung

- Max v. Pettenkofer hat den „Fleischbrühwürfel“ erfunden...
- Reinigung verringert (Innenraum-) Feinstaubgehalt.
- Lüftung reduziert Feinstaubgehalt (PM10), nicht den Gehalt an Ultrafeinstaub.
- Lüftungsbedarf auch in Passivhausschulen.
- Grundsätzlicher Lüftungsbedarf: Alle 20 Minuten 2-3 Minuten! Nach 1 Schulstunde 5 Minuten!
- Schulen haben spezielle Problematik (Geschlossener Raum, Notwendigkeit Störungen von außen zu reduzieren). Kindergarten Untersuchung zeigte eher Problem der nächtlichen Abkühlung.



## Noch Fragen??

