

## Wohlbefinden von Kindern in Schulen – Einfluss der klimatischen Bedingungen & der Luftqualität



24. WaBoLu-Innenraumtage  
15.-17. Mai 2017, Berlin

Dr. Alexandra Schieweck  
Fraunhofer WKI  
Materialanalytik und Innenlufttechnik (MAIC)

©Helmut Herreiner

© Fraunhofer WKI



### Wohlbefinden von Kindern in Schulen

- Hohe Personenzahl bei begrenztem Raumvolumen
- Lange Aufenthaltsdauer
  - bis zu 8h/täglich
  - ~20% der gesamten Zeit/Jahr
- Körperliche Aktivität in Abhängigkeit vom Alter der Schüler
- $\text{CO}_2$ : Referenzwert für Innenluftqualität
- Hohe  $\text{CO}_2$ -Werte → schlechte Luftqualität, Anreicherung anderer Luftfremdstoffe
- Lehrer & Schüler: Lüftungstätigkeit primär gemäß thermischer Behaglichkeit

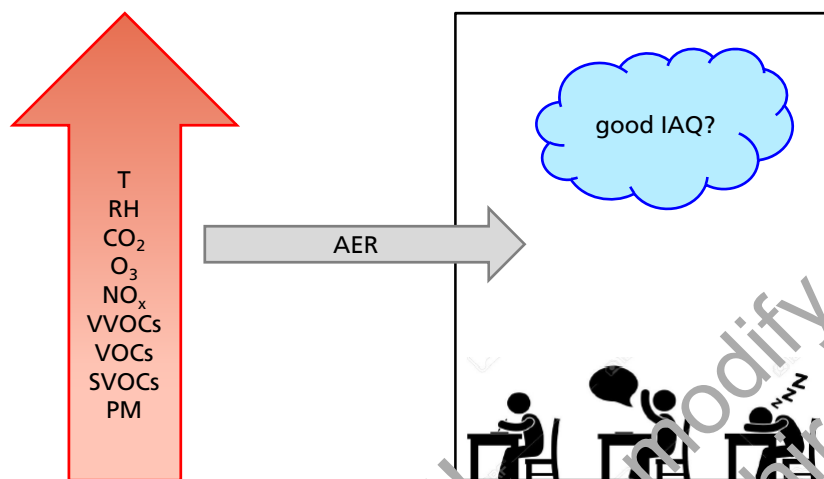


@picture-alliance/dpa/dpaweb

© Fraunhofer WKI

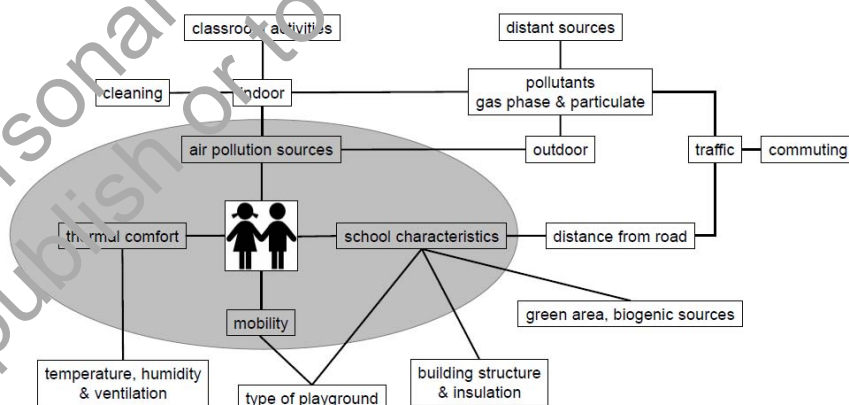


## Einfluss Außenluft-/Innenluftqualität



© Fraunhofer WKI

## Einflussfaktoren auf die Raumluftqualität in Schulen

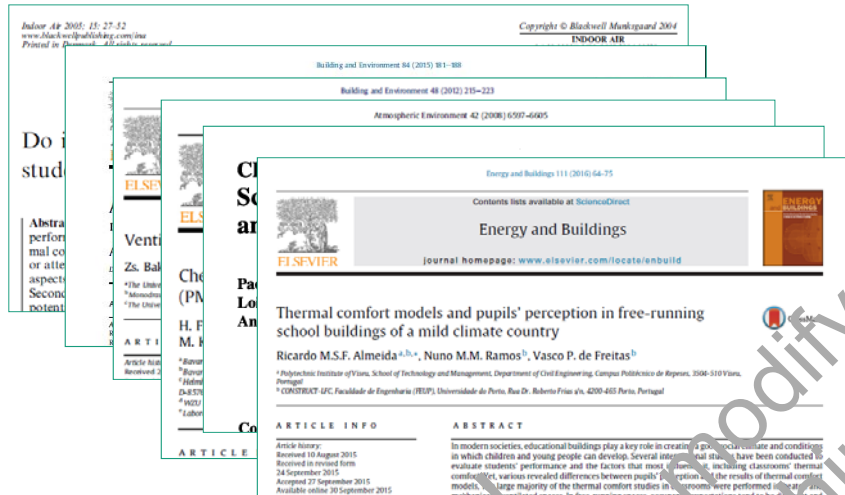


©Tunga Salthammer

Salthammer et al., 2016. *Environ Int* 94, 196-210.

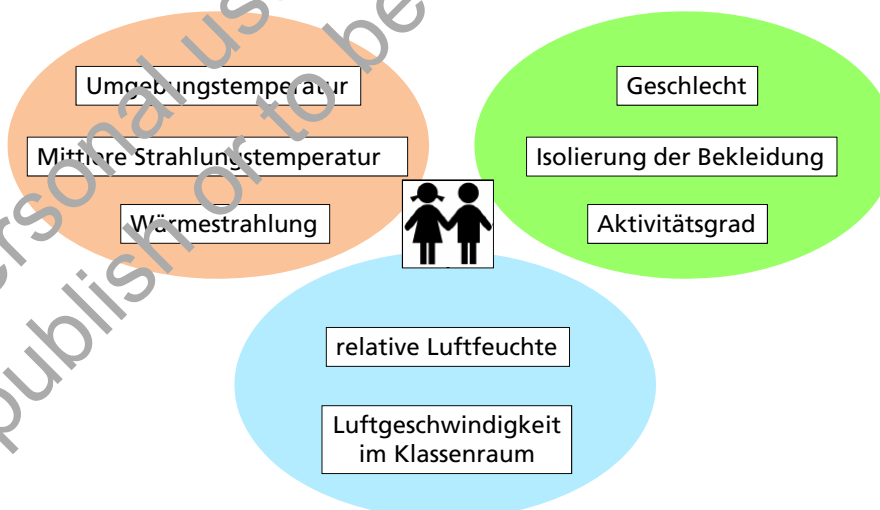
© Fraunhofer WKI

## Forschungsschwerpunkte



© Fraunhofer WKI

## Thermische Behaglichkeit - Einflussfaktoren



© Fraunhofer WKI

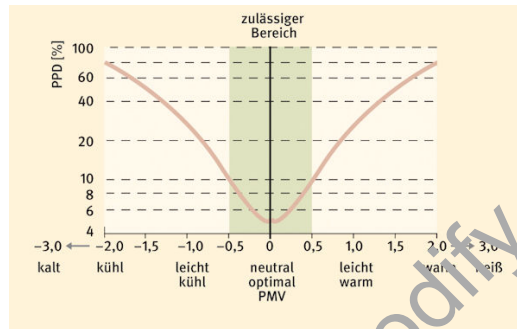
Parsons, 2002. *Human Thermal Environments*, CRC Press, Boca Raton.  
 Fabbri, 2015. *Indoor thermal comfort perception*. Springer, Heidelberg.

## Thermische Behaglichkeit - Bewertungsmodelle

Vorhergesagtes mittleres Votum  
(Predicted Mean Vote, PMV)

PMV + Prozentsatz Unzufriedener  
(Predicted Percentage Dissatisfied, PPD)

deutsch		english
heiß	+3	hot
warm	+2	warm
leicht warm	+1	slightly warm
neutral	0	neutral
leicht kühl	-1	slightly cool
kühl	-2	cool
kalt	-3	cold



Fanger

- Unabhängigkeit von regionalen & saisonalen Unterschieden
- Gleichsetzung von thermischem Empfinden und thermischer Behaglichkeit

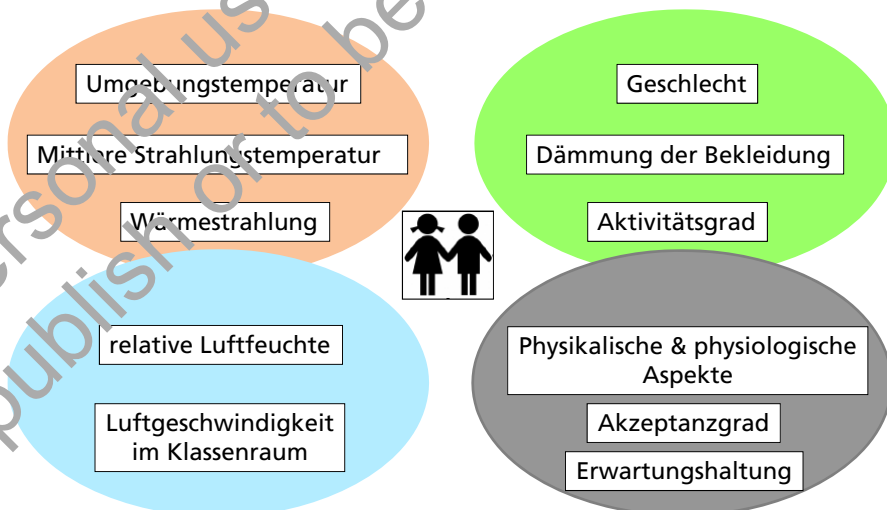
©BINE Informationsdienst

Fanger, 1970. *Thermal comfort*. McGraw-Hill, New York.

© Fraunhofer WKI

Fraunhofer  
WKI

## Thermische Behaglichkeit - Einflussfaktoren

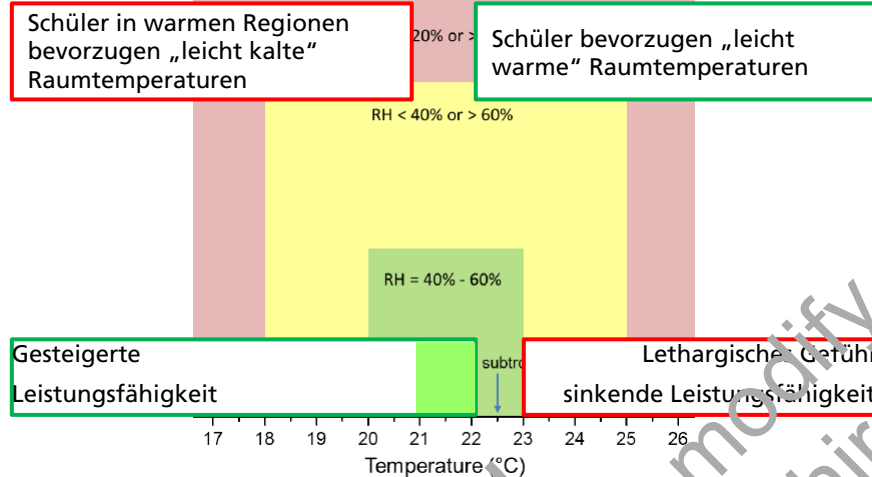


DIN EN 15251, 2012.

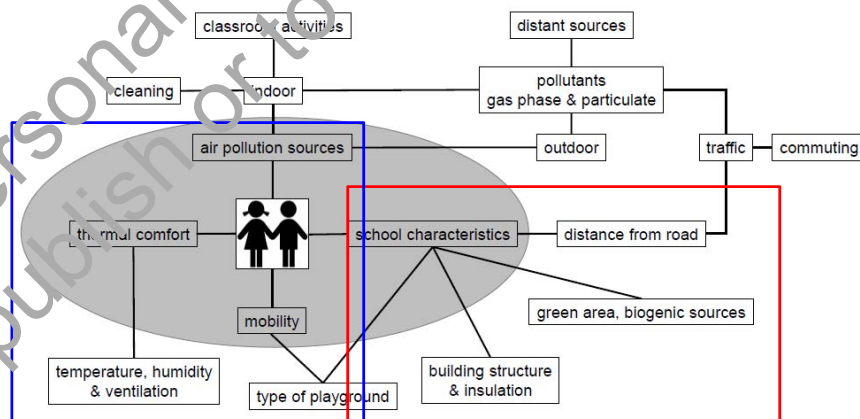
© Fraunhofer WKI

Fraunhofer  
WKI

## Thermische Behaglichkeit in Schulen

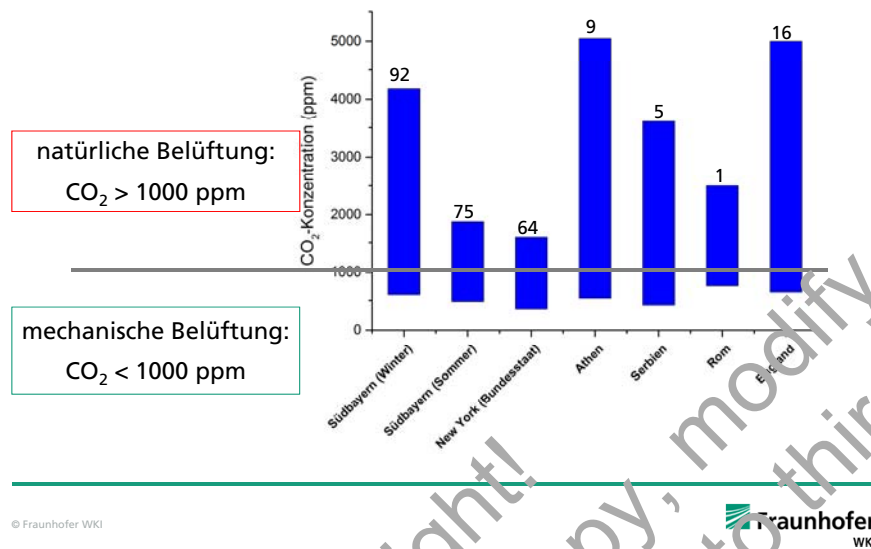


## Einflussfaktoren auf die Raumluftqualität in Schulen

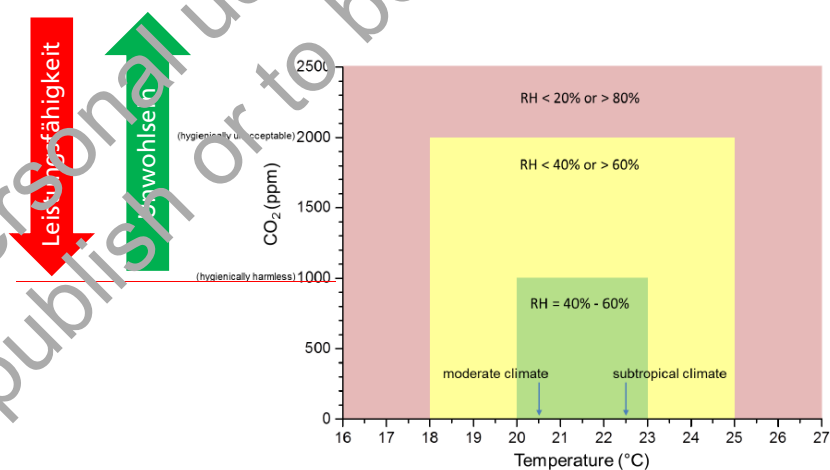


Salthammer et al., 2016. *Environ Int* 94, 196-210

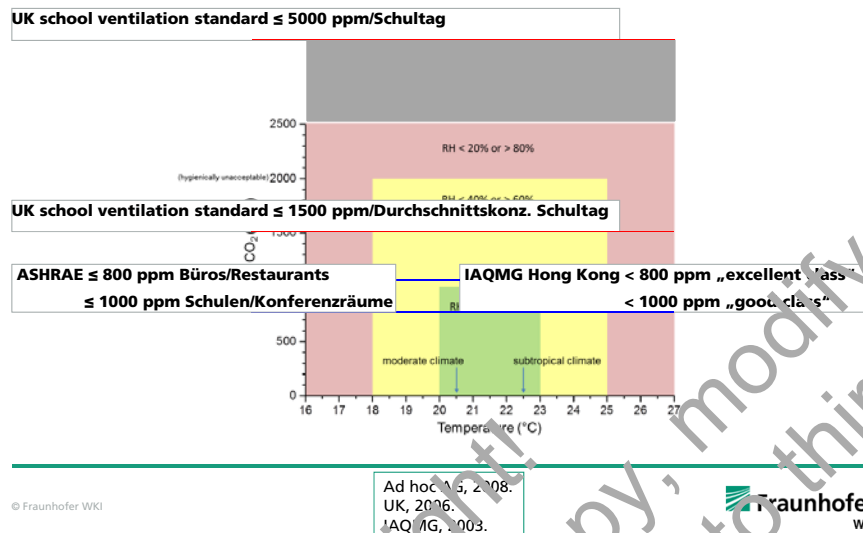
## CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in Schulen – regionale Aspekte & Einflüsse der Lüftungsart



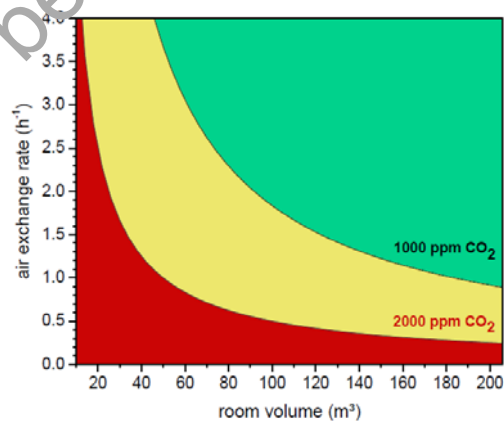
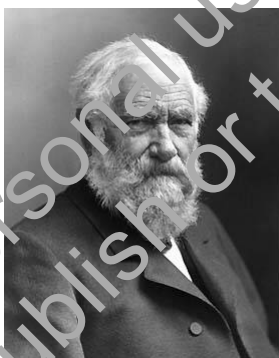
## CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in Schulen



## CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in Schulen



## CO<sub>2</sub> in Klassenräumen



CO<sub>2</sub>

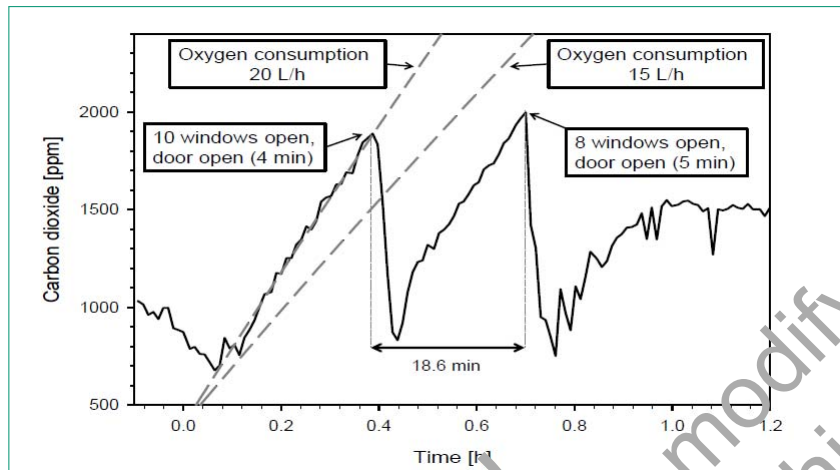
- Bewertung als Innenraumluftschadstoff oder als hygienisch relevante Größe?

© Theodor Hilsdorf / Tunga Salthammer

© Fraunhofer WKI

Fraunhofer WKI

## CO<sub>2</sub> in Klassenräumen



©Tobias Schripp

© Fraunhofer WKI

Fraunhofer  
WKI

## CO<sub>2</sub> in Klassenräumen



© Fraunhofer WKI

Fraunhofer  
WKI



## CO<sub>2</sub> in Klassenräumen – saisonale Abhängigkeit

Distribution of classroom-specific median temperature, relative humidity and carbon dioxide in indoor and outdoor air

	N	Minimum	10th Percentile	Median	90th Percentile	Maximum	Mean
<b>Winter indoor</b>							
Temperature (°C)	91	18	20	22	23	25	22
Relative humidity (%)	91	22	28	38	49	60	38
CO <sub>2</sub> (ppm)	90	598	1009	1608	2724	4172	1759
<b>Winter outdoor</b>							
Temperature (°C)	40	-8	-6	-0.6	5	12	-0.3
Relative humidity (%)	40	42	46	66	81	82	65
CO <sub>2</sub> (ppm)	40	381	385	405	467	490	414
<b>Summer indoor</b>							
Temperature (°C)	75	21	22	24	27	29	25
Relative humidity (%)	75	32	41	51	62	70	51
CO <sub>2</sub> (ppm)	75	480	570	785	1459	1875	890
<b>Summer outdoor</b>							
Temperature (°C)	76	10	12	18	24	26	19
Relative humidity (%)	76	49	52	65	85	90	66
CO <sub>2</sub> (ppm)	38	338	355	383	448	509	391

Fromme et al., 2007. *Atmos Environ* 41, 854-866.

© Fraunhofer WKI

Fraunhofer  
WKI

## PM in Klassenräumen – saisonale Abhängigkeit

- Klassenräume mit natürlicher Belüftung
- Hohe saisonale Abhängigkeit mit besonders schlechter IAQ im Winter
- Erhöhte PM-Konzentrationen korrelieren mit kleinen Raumgrößen, hoher Belegungsrate, seltener Reinigung, hoher CO<sub>2</sub>-Konzentration
- Schlechte Luftqualität auch alters-/aktivitätsabhängig (Grundschule)

Distribution of classroom-specific particulate matter concentrations in indoor air of schools using daily medians

	N	Minimum	10th Percentile	Median	90th Percentile	Maximum	Mean
<b>Winter</b>							
PM <sub>2.5</sub> (gravimetrically)	42	4.3	21.5	36.7	62.9	73.1	38.9
PM <sub>2.5</sub> (LAS) <sup>a</sup>	79	2.7	8.8	19.8	44.9	80.8	23.0
PM <sub>4</sub> (LAS)	79	12.3	27.2	63.4	120.0	243.8	71.9
PM <sub>10</sub> (LAS) <sup>a</sup>	79	16.3	43.2	91.5	168.8	313.2	105.0
<b>Summer</b>							
PM <sub>2.5</sub> (gravimetrically)	49	9.8	14.6	20.2	30.9	55.1	22.1
PM <sub>2.5</sub> (LAS) <sup>a</sup>	74	4.6	34.8	12.7	20.9	34.8	13.5
PM <sub>4</sub> (LAS) <sup>a</sup>	74	15.5	20.0	42.9	76.6	121.5	44.8
PM <sub>10</sub> (LAS) <sup>a</sup>	74	18.3	31.8	64.9	124.1	178.4	71.7
Particle number concentration (N cm <sup>-3</sup> ) <sup>a</sup>	36	2,622	3,873	5,660	10,566	12,145	6,509

<sup>a</sup>Computed using median daily values; LAS: laser aerosol spectrometer (real-time monitoring).

Fromme et al., 2007. *Atmos Environ* 41, 854-866.

© Fraunhofer WKI

Fraunhofer  
WKI

## PM in Klassenräumen

- Weiter Bereich von PM-Konzentrationen
  - Ansätze zur Reduktion und Identifizierung von verantwortlichen Faktoren dringend notwendig
- Bislang keine Studien über:
  - Ultrafeinpartikel (UFP)
  - persönliche Exposition gegenüber Partikeln, auch in Bezug auf Umgebungskonzentration
  - Beitrag der Schulexposition zur täglichen Gesamtexposition von Schulkindern

**Table 1**  
Statistics (minimum values, 1<sup>st</sup> quartile, median, 3<sup>rd</sup> quartile, and maximum values) of PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> and UFPs in the schools obtained from average values reported in the reviewed studies.

	PM <sub>10</sub> (µg m <sup>-3</sup> )		PM <sub>2.5</sub> (µg m <sup>-3</sup> )		N (# cm <sup>-3</sup> )	
	Outdoor	Indoor	Outdoor	Indoor	Outdoor	Indoor
Min	8.0	6.1	3.0	1.7	9 × 10 <sup>3</sup>	2.0 × 10 <sup>3</sup>
1 <sup>st</sup> quart.	20	45	15	12	50 × 10 <sup>3</sup>	5.0 × 10 <sup>3</sup>
Median	37	105	23	24	15 × 10 <sup>3</sup>	9.8 × 10 <sup>3</sup>
3 <sup>rd</sup> quart.	70	186	46	47	23 × 10 <sup>3</sup>	20 × 10 <sup>3</sup>
Max	828	1759	435	54	47 × 10 <sup>3</sup>	8 × 10 <sup>3</sup>

Salthammer et al., 2016, *Environ Int* 94, 196-210

© Fraunhofer WKI

Fraunhofer  
WKI

## PM in Klassenräumen

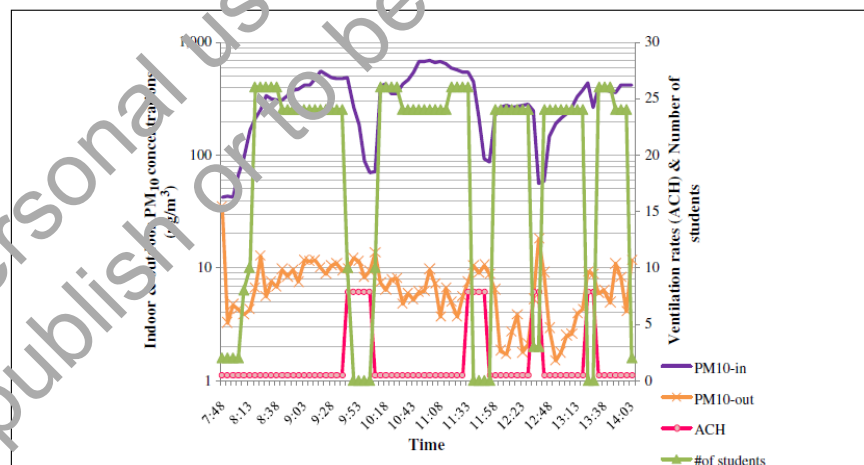


Fig. 14. Diurnal variation of indoor and outdoor PM<sub>10</sub> concentrations as a function of the number of students and the ventilation rates (8/4/13, School 1).

Dorizas et al., 2015, *Sci Total Environ* 502, 557-570.

© Fraunhofer WKI

Fraunhofer  
WKI

## Innenraumquellen für Luftfremdstoffe in Schulen

- Innenraumtypische Quellen
  - Baumaterialien
  - Mobiliar
- VOC/SVOC
  - Flammenschutzmittel
  - Polychlorierte Biphenyle (PCBs)



© Fraunhofer WKI

## Innenraumquellen für Luftfremdstoffe in Schulen

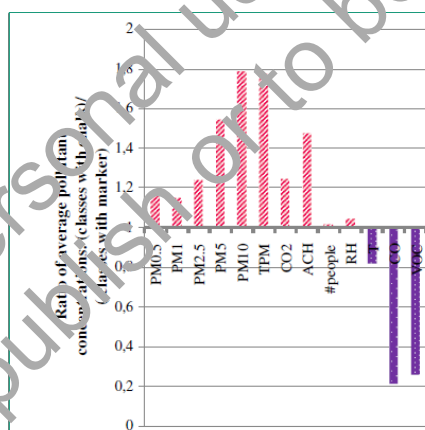


Fig. 17. Ratio of averaged values in classrooms using chalk to the ones using marker.



© Fraunhofer WKI

Dorizas et al., 2015. *Sci Total Environ* 502, 557-570.

## Gesundheitliche Auswirkungen

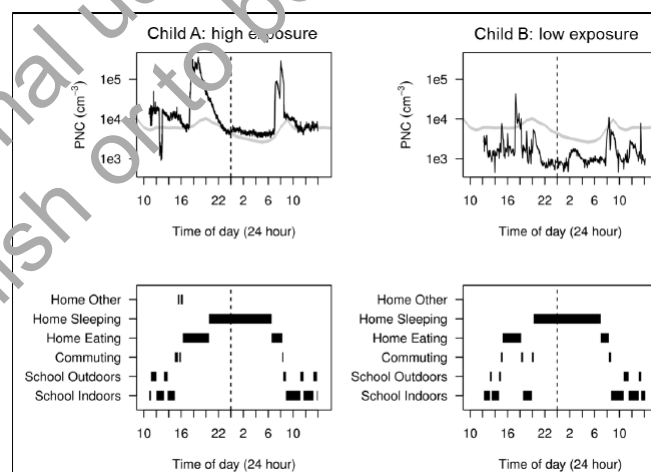
- Kinder: stärkere Exposition als Erwachsene durch höhere Inhalationsrate und höheres Aktivitätslevel
- Auswirkungen auf Atem-/Herz-Kreislauf-System nicht immer eindeutig identifizierbar
- Bronchitis-Symptome, Atemwegsentzündungen und verringerte Lungenfunktion → frühkindliche Exposition gegenüber  $PM_{2.5}$
- Verkehrsbezogene Schadstoffe → Astma, verlangsamte Lernentwicklung
- Verbesserung des Atemsystems bei 11-15 Jahre alten Schulkindern durch Verbesserung der Luftqualität ( $NO_2$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$ ) über 4 Jahre



© Fraunhofer WKI

McConnell et al. 2003. *Environ Health Perspect* 118, 1021-1026.  
 Morgenstern et al. 2008. *Am J Respir Crit Care Med* 177, 1331-1337.  
 Gauderman et al., 2015. *N Engl J Med* 372, 905-913.

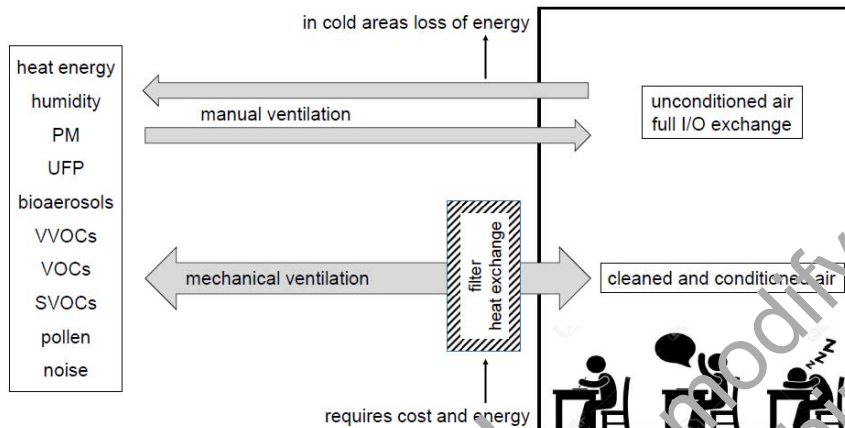
## Gesundheitliche Auswirkungen - Expositionsrouten



© Fraunhofer WKI

Mazaheri et al. 2016. *Environ Int* 88, 142-149.

## Quo vadis?



Salthammer et al., 2016, *Environ Int* 94, 196-210

© Fraunhofer WKI

Fraunhofer  
WKI

## Quo vadis?

- Zunahme der Weltbevölkerung
- Trend zu größeren Klassen
- Zunahme von Außenluftschadstoffen
  - Lüftung mit ungefilterter Luft nur noch sehr eingeschränkt möglich
- CO<sub>2</sub> als alleiniger hygienischer Leitwert nicht länger empfehlenswert

Suggested guideline values for good indoor air quality in classrooms.

Parameter	Suggested guidelines for classrooms	Comments
Temperature <sup>a</sup> (°C)	20–22 (winter) 20–24 (summer)	Bakó-Biró et al. (2012)
Rel. humidity <sup>a</sup> (%)	40–60	Bakó-Biró et al. (2012)
Air exchange <sup>b</sup>	Depending on occupant density and local conditions	DIN EN 13779 (2007)
PM <sub>10</sub> (µg m <sup>-3</sup> )	20 (annual)	WHO (2006)
PM <sub>2.5</sub> (µg m <sup>-3</sup> )	10 (annual)	WHO (2006)
O <sub>3</sub> (µg m <sup>-3</sup> )	100 (8 h mean)	WHO (2006)
SO <sub>2</sub> (µg m <sup>-3</sup> )	20 (24 h mean)	WHO (2006)
NO <sub>2</sub> (µg m <sup>-3</sup> )	40 (annual)	WHO (2010)
CO <sub>2</sub> (ppm)	<1000	Ad hoc AG (2008)
TVOC <sup>c</sup> (µg m <sup>-3</sup> )	<1000	Ad hoc AG (2007)

<sup>a</sup> Proposed by Bakó-Biró et al. (2012) on the basis of outcomes and observations made in UK schools (see also Fig. 2).

<sup>b</sup> DIN EN 13779 uses the CO<sub>2</sub> concentration for requirements for air exchange and ventilation. Good IAQ is defined by a CO<sub>2</sub> concentration <400 ppm above the outdoor level. Under consideration of occupant density, CO<sub>2</sub> exhalation and room volume Eq. (2) can be applied to calculate the air exchange rate.

<sup>c</sup> According to ISO 16000-6 (2012).

Salthammer et al., 2016, *Environ Int* 94, 196-210

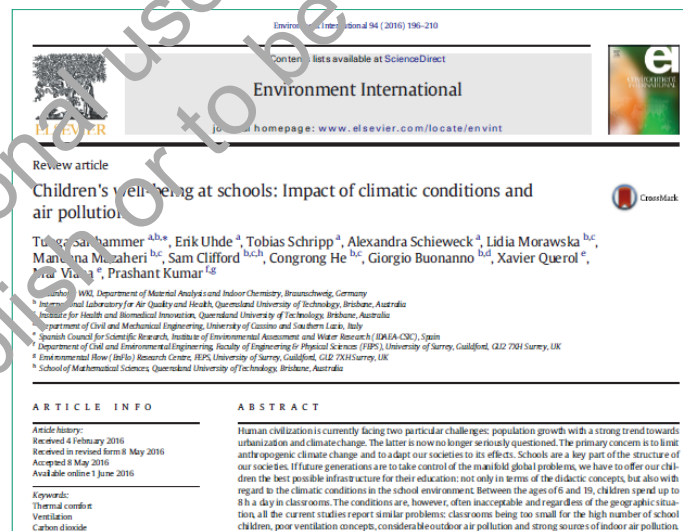
© Fraunhofer WKI

Fraunhofer  
WKI

## Zusammenfassung

- Kinder verbringen viel Zeit in Schulen
- Auswirkungen dieser Exposition können weit über das normale Maß hinausgehen, ggf. zu lebenslanger Krankheitsbelastung führen
- Gesundes und komfortables Umfeld für physisches und mentales Wachstum
- Gesundheitliche Auswirkungen: inkonsistente und limitierte Aussagen
- Forschungsbedarf hinsichtlich der Übertragung gesundheitlicher Modelle und Richtwerte von Erwachsenen auf Kinder
- Filterung von zugeführter Außenluft → Energieverbrauch von Schulen
- Erzielen einer gesunden Innenluft vor dem Hintergrund des Klimawandels
- Notwendigkeit, komplexes Schulumfeld zu verstehen, um thermisches Wohlbefinden und Lüftungsstrategien optimieren zu können

© Fraunhofer WKI



© Fraunhofer WKI



