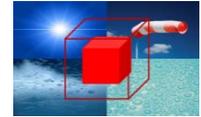
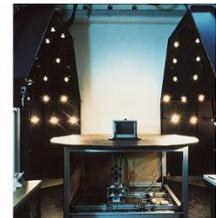
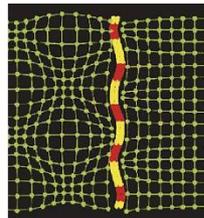
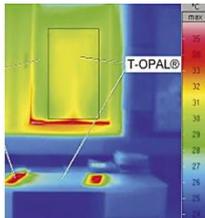
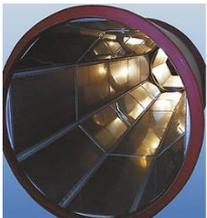


# ZUKUNFTSRAUM SCHULE



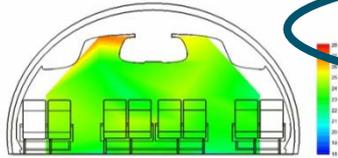
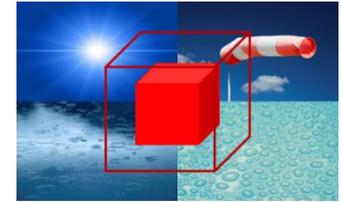
Optimierung von Lüftungskonzepten für  
Klassenräume im Bestand auf der Basis  
von in situ Messmethoden

Auf Wissen bauen



# Raumklimasysteme

## Kompetenzfelder

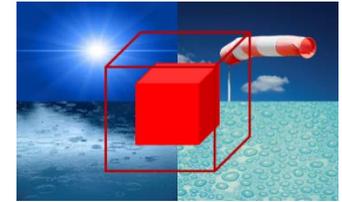


- Kombination natürlicher und mechanischer Lüftungssysteme - Hybrid Ventilation
- Raumklimakonzepte für Gebäude, Flugzeuge und Fahrzeuge
- Optimierte Wärmeübergänge zum Heizen und Kühlen
- Thermische-/Strömungs-Simulation
- Test-Design zur Validierung von Simulationsmodellen
- Tests unter realistischen Flugbedingungen im Fraunhofer Flight Test Facility
- Raumklimatische Messkonzepte und Messtechnikoptimierung
- Sensorik für die Behaglichkeitsbewertung
- Spezialmessmethoden (Tracergas, Ultraschall, Particle Image Velocimetry)
- Komfortbewertung durch Personenbefragung



# Definition

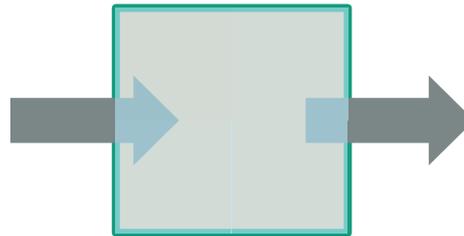
Luftwechselrate/Lüftungsrate



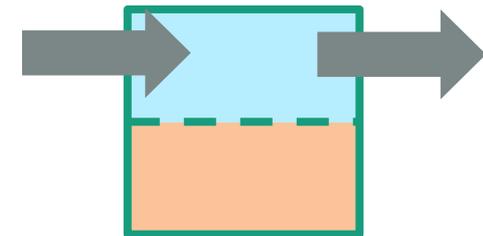
$$\text{Luftwechselrate} = \frac{\text{Luftvolumenstrom } [m^3/h]}{\text{Raumvolumen } [m^3]}$$



Perfekte  
Verdrängungslüftung



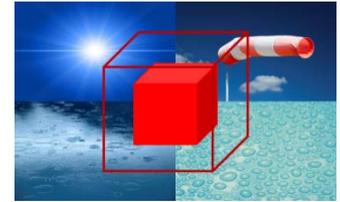
Mischlüftung



Kurzschluss-Lüftung

# Definition

## Lüftungseffektivität



Die **Lüftungseffektivität** beschreibt, wie schnell verbrauchte Luft aus einem Raum entfernt wird.

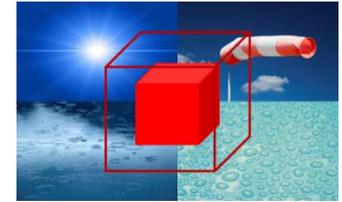
Sie wird durch das Verhältnis der Schadstoffkonzentration in der Raumluft zur Schadstoffkonzentration in der Abluft definiert:

$$VE = (C_e/C_m) \times 100\%$$

- VE = Ventilation Efficiency (Lüftungseffektivität)
- $C_e$  = Schadstoffkonzentration in der Abluft
- $C_m$  = Schadstoffkonzentration in der Raumluft

# Definition

## Lüftungseffektivität DIN EN 13779



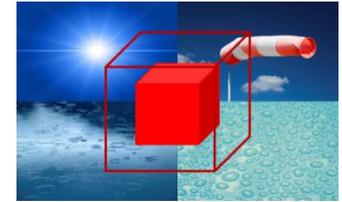
$$\varepsilon_v = \frac{c_{ABL} - c_{ZUL}}{c_{RAL} - c_{ZUL}} \quad (1)$$

Dabei ist

- $\varepsilon_v$  die Lüftungseffektivität;
- $c_{ABL}$  die Verunreinigungskonzentration außerhalb des Aufenthaltsbereichs bzw. der Abluft;
- $c_{RAL}$  die Verunreinigungskonzentration der Raumlufte (Atmungsbereich innerhalb des Aufenthaltsbereiches);
- $c_{ZUL}$  die Verunreinigungskonzentration der Zuluft.

# Definition

## Luftaustauscheffektivität



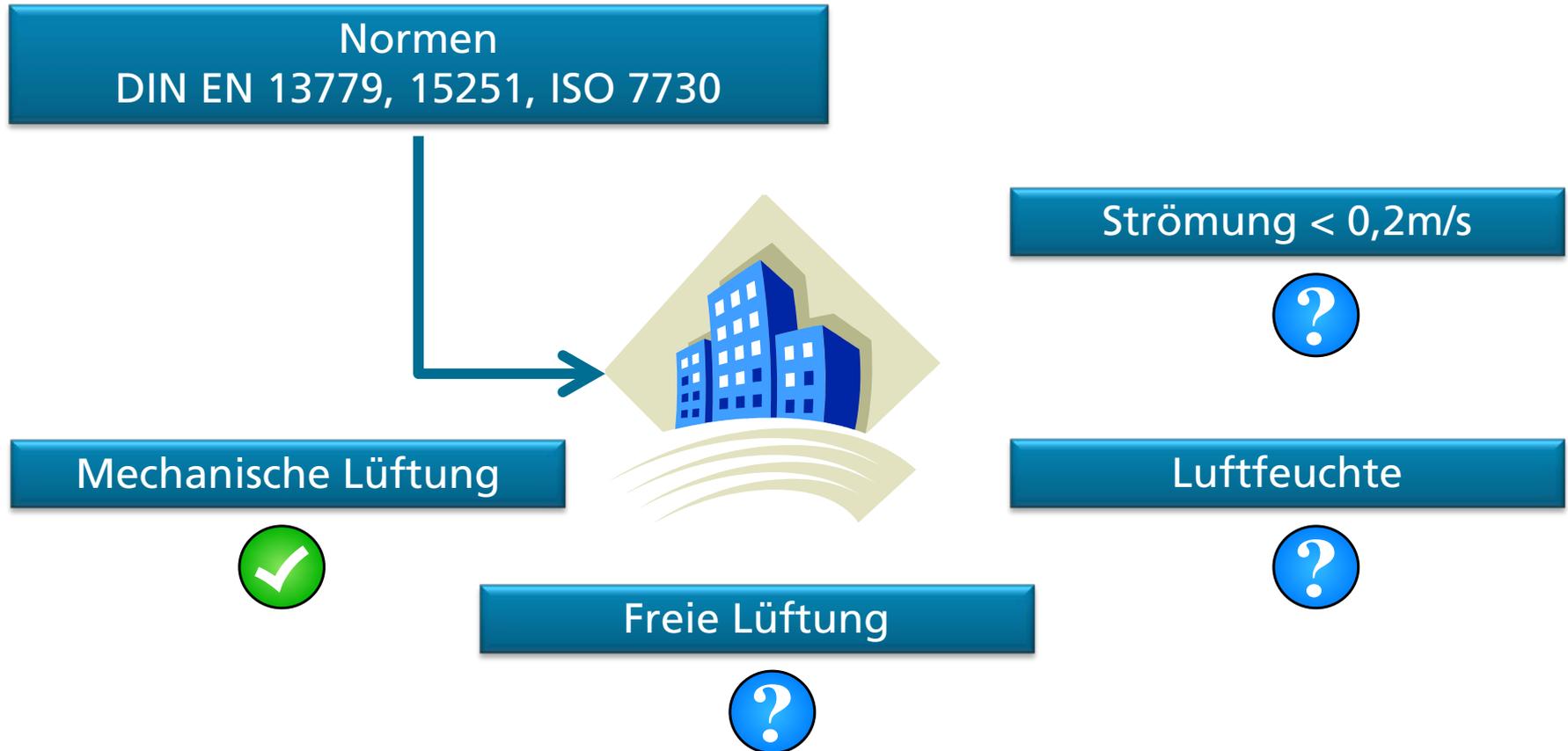
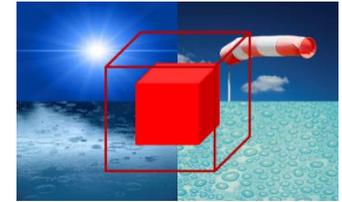
Die **Luftaustauscheffektivität** gibt Auskunft darüber, wie rasch die Raumluft ausgetauscht wird. Sie wird durch den Koeffizienten aus zugeführtem Frischluftvolumen pro Stunde und Raumvolumen definiert, der durch die doppelte durchschnittliche Verweildauer der Luft im Raum dividiert wird:

$$AE = (T_n / 2T_M) \times 100\%$$

- AE = Air Change Efficiency (Luftaustauscheffektivität)
- $T_n$  = Zugeführtes Frischluftvolumen pro Stunde geteilt durch das Raumvolumen
- $T_m$  = Durchschnittliche Verweildauer der Luft im Raum

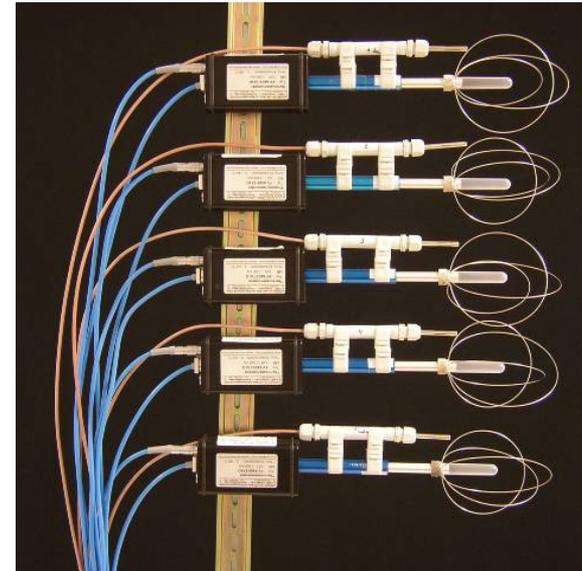
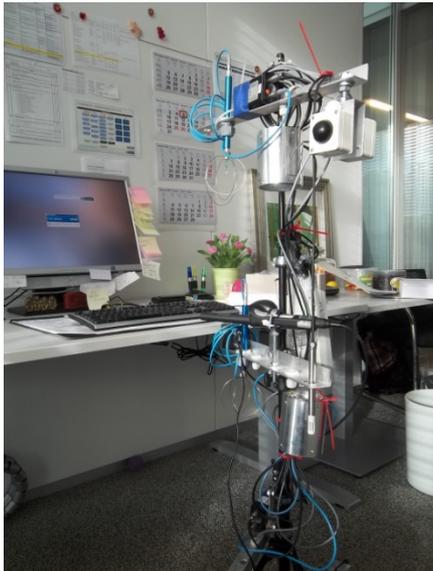
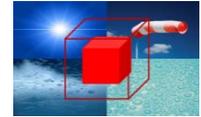
# Lüftungseffektivität

Planerische Herausforderung



# Klimaanalyse

## Klassische Methoden



Klimaanalyse eines Bürogebäudes und der Detailwirkungen im Arbeitsbereich

# Klimaanalyse

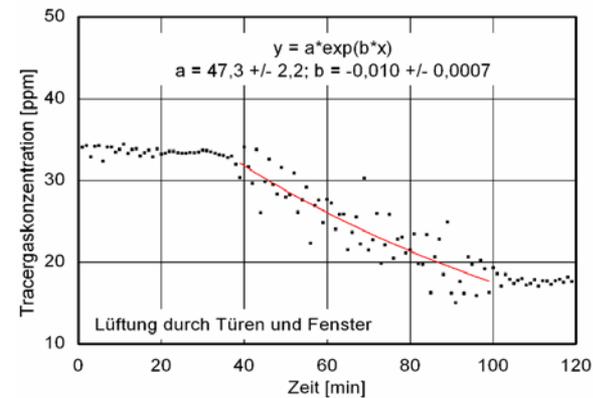
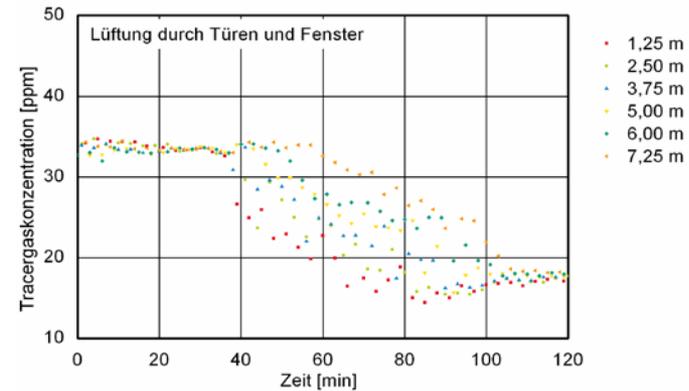
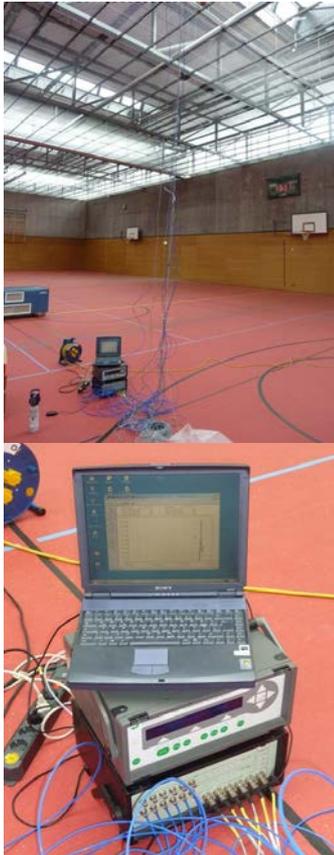
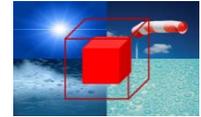
## Klassische Methoden



Strömungsanalysen mit Rauch

# Klimaanalyse

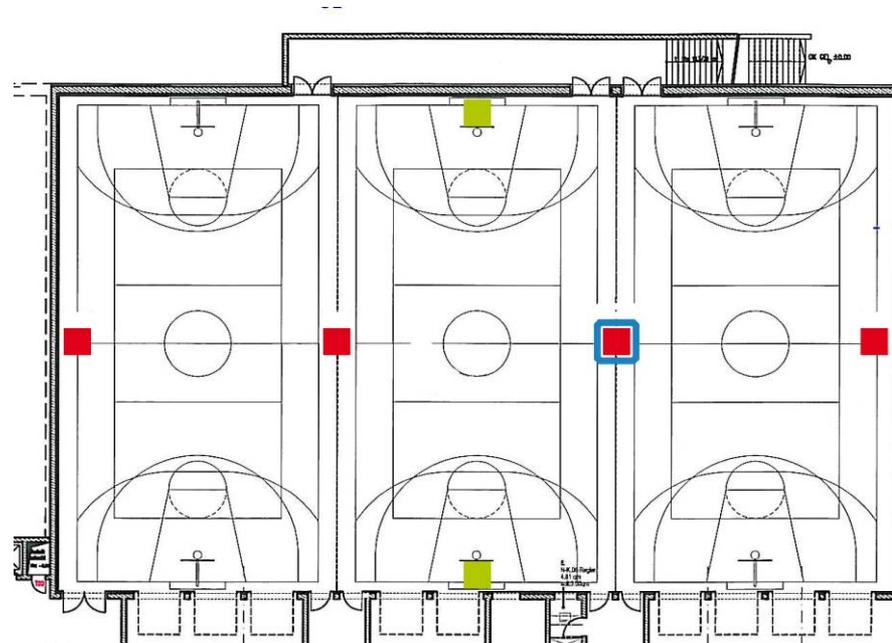
## Tracergas-Spotmessungen



Lüftungsanalyse einer Sporthalle anhand von Tracergas-Spotmessungen

# Klimaanalyse

## Tracergas-Langzeitmessungen

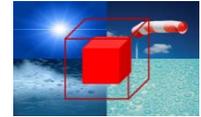


-  Langzeitmessung  
2,50 m; 5,00 m
-  Langzeitmessung  
1,25 m
-  Kurzzeitmessung  
1,25 m; 2,50 m; 3,75 m;  
5,00 m; 6,00 m; 7,25 m

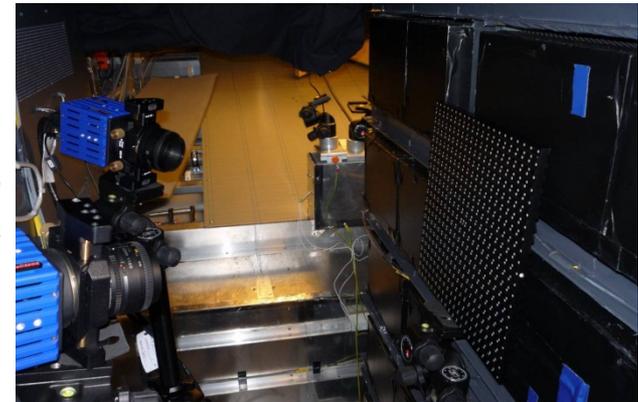
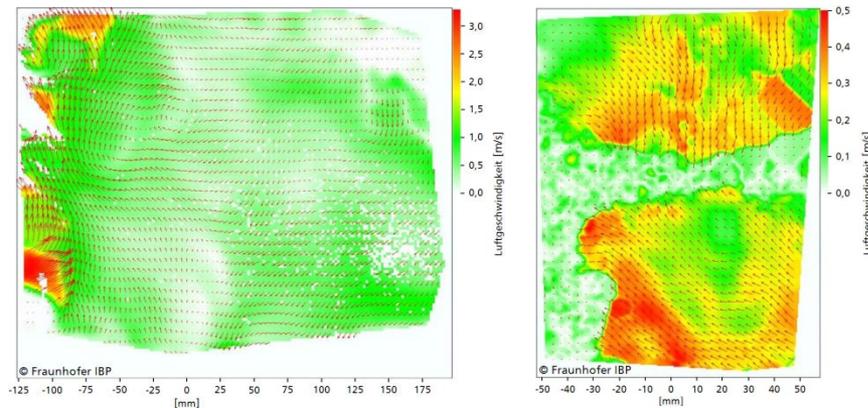
Lüftungsanalyse einer Sporthalle anhand von Tracergas-Langzeitmessungen

# Klimaanalyse

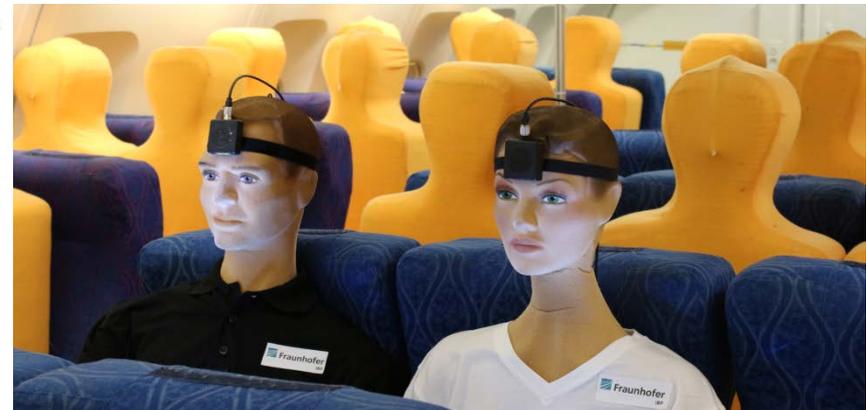
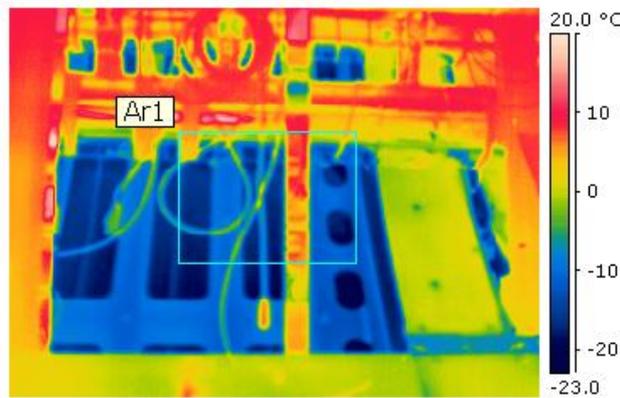
Detailanalysen im Objektbereich



## Stereoscopic Particle Image Velocimetry (PIV)

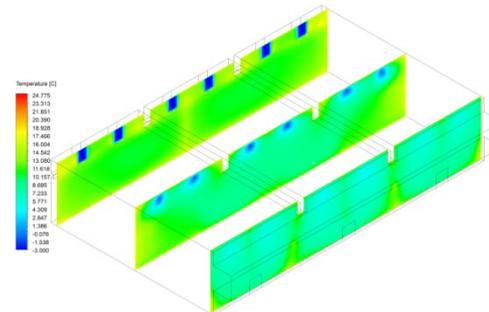
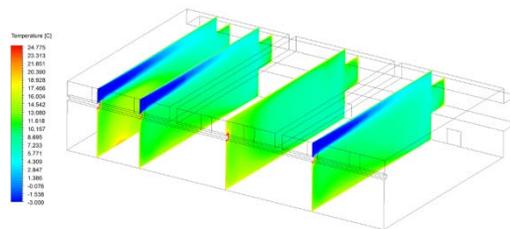
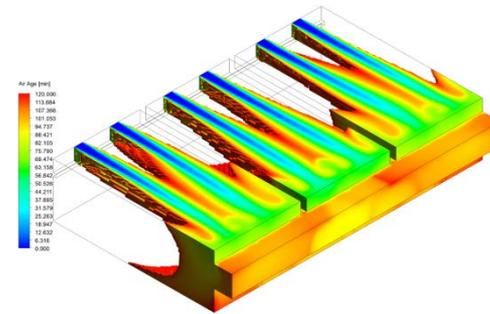
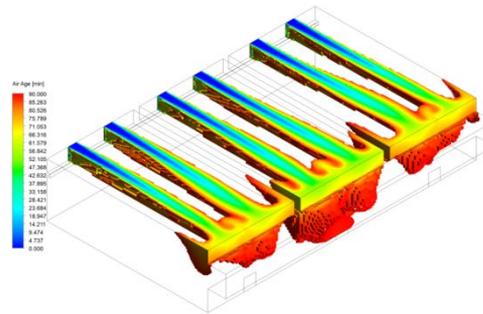
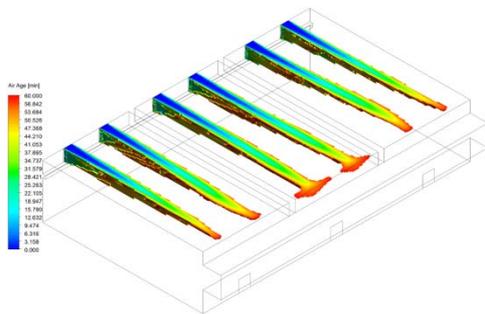
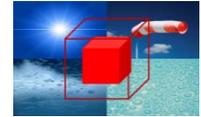


## Thermographie / Dressman



# Planungs-/Analyseinstrumente

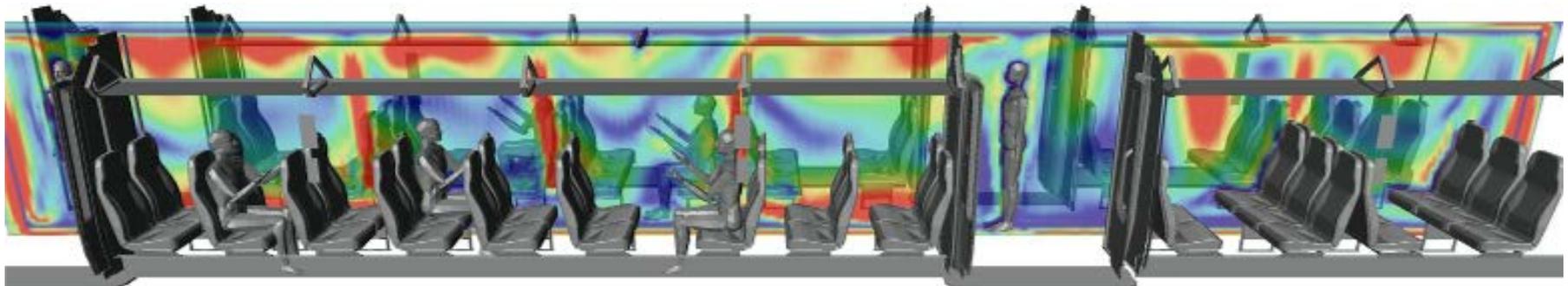
CFD



Detailanalyse zur Entwicklung des Luftalters, Strömungsanalyse und der Darstellung von Temperaturschnitten in einer Sporthalle

# Planungs-/Analyseinstrumente

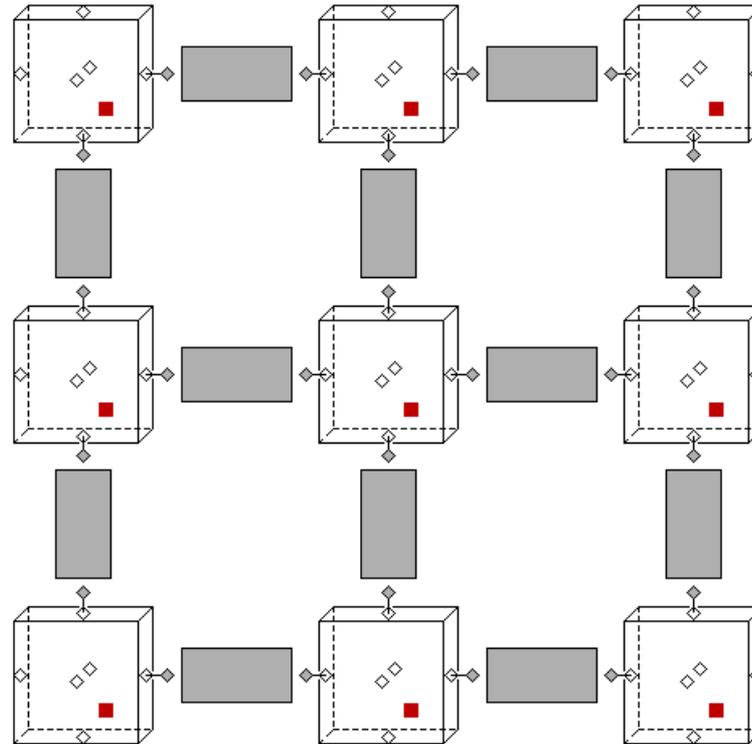
CFD



Detailanalyse zum thermischen Verhalten eines Zugabteils

# Planungsinstrumente

VEPZO



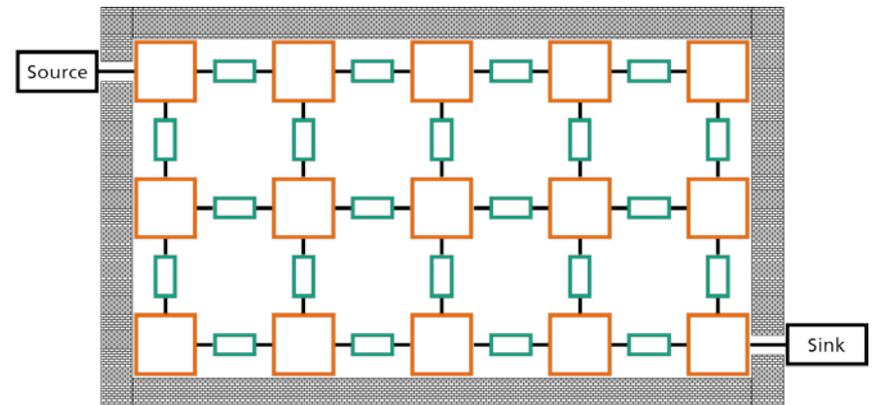
Zonales Analyse- und Planungsmodell

# Das Prinzip Zonaler Modelle

VEPZO



- Unterteilung eines Raumes in Zonen
- Erhaltungsgleichungen in Zone
  - Masse
  - Enthalpie
- Strömungsmodell
  - Berechnung des Masseflusses zwischen benachbarten Zonen
- Vorteile
  - Lokale Auflösung des Raumes
  - Schnelle Berechnung



# Strömungsmodelle

VEPZO



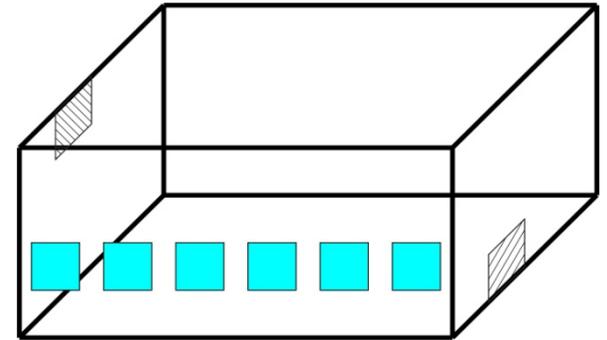
Modell	Schema	Rechenzeit	Auflösung
Einzonen		Niedrig	Nein
Multizonen		Niedrig	Niedrig
Zonal		Mittel	Mittel
CFD		Hoch	Hoch

# ANWENDUNGBEISPIEL KLASSENZIMMERLÜFTUNG

VEPZO



- Wärmequellen
  - 30 Schüler, 1 Lehrer
  - Computer
- CO<sub>2</sub> Emission durch Personen
- Hybride Lüftung
  - Fenster
  - Mechanische Lüftung
- Außenlufttemperatur: 1 °C
  
- Simuliert werden 90 Minuten ab Unterrichtsbeginn

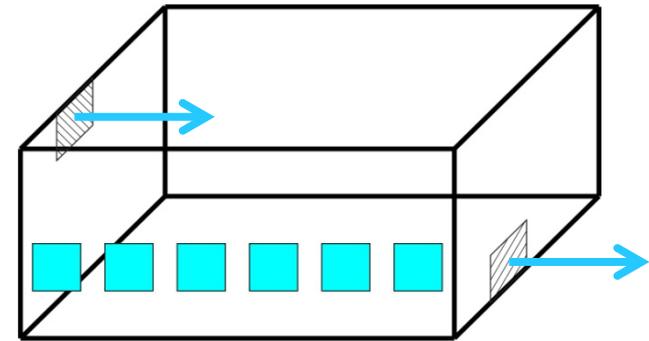


# ANWENDUNGBEISPIEL KLASSENZIMMERLÜFTUNG

VEPZO



- Wärmequellen
  - 30 Schüler, 1 Lehrer
  - Computer
- CO<sub>2</sub> Emission durch Personen
- Hybride Lüftung
  - Fenster
  - Mechanische Lüftung
- Außenlufttemperatur: 1 °C
  
- Simuliert werden 90 Minuten ab Unterrichtsbeginn



# ANWENDUNGBEISPIEL KLASSENZIMMERLÜFTUNG

VEPZO



- Kombination von Fenstern und mechanischer Lüftung
  - Thermischer Komfort
  - Ausreichende Luftqualität
  - Geringer Energiebedarf für Heizen mit mechanischer Lüftung
- Lufttemperatur im Klassenzimmer
  - 20 – 22 °C im Mittel
  - Erlaubte lokale Temperaturen von 19 – 24 °C
- CO<sub>2</sub> Gehalt < 1500 ppm

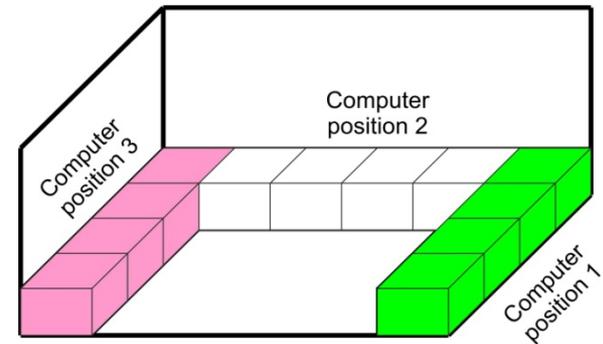
# ANWENDUNGBEISPIEL KLASSENZIMMERLÜFTUNG

Freie Parameter



Fenster: zu, gekippt, offen je Fenster  
Mechanische Lüftung: 0.001, 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6 kg/s  
Computer: 3 Positionen

→ 13122 Möglichkeiten



# ANWENDUNGBEISPIEL KLASSENZIMMERLÜFTUNG

Ergebnis für 1 °C Außenlufttemperatur



## 5 Durchläufe

- 51 bis 90 Simulationen je Durchlauf
- 28 bis 44 Minuten je Durchlauf

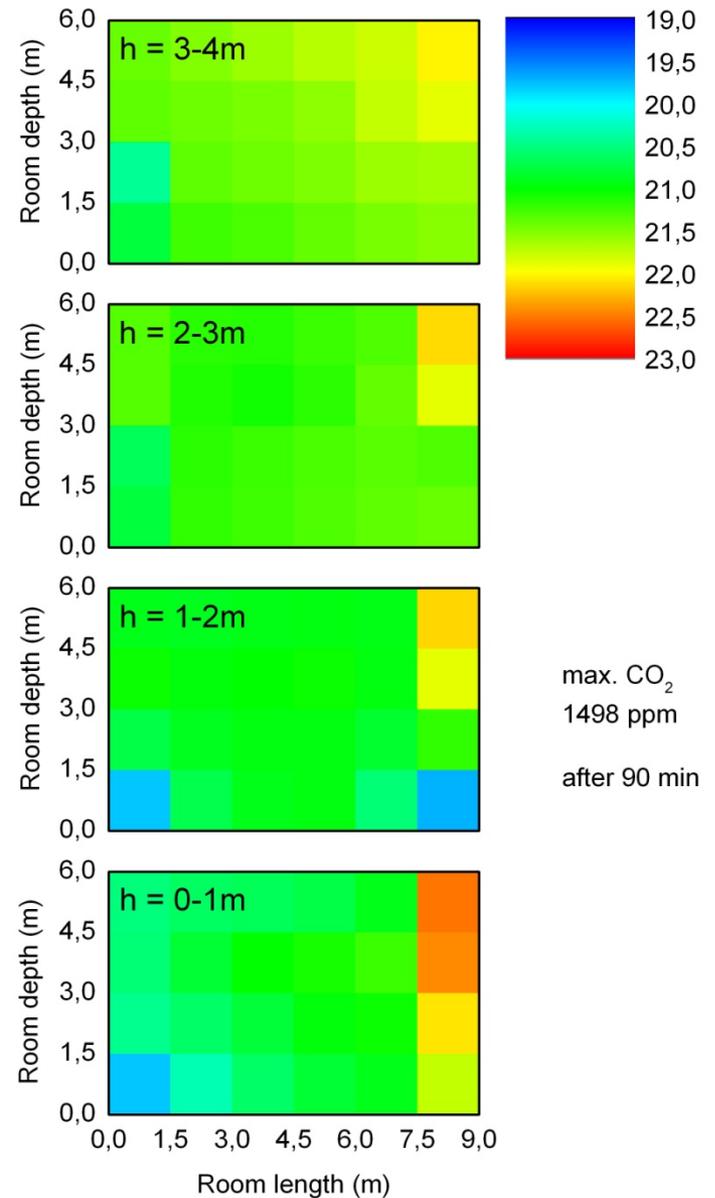
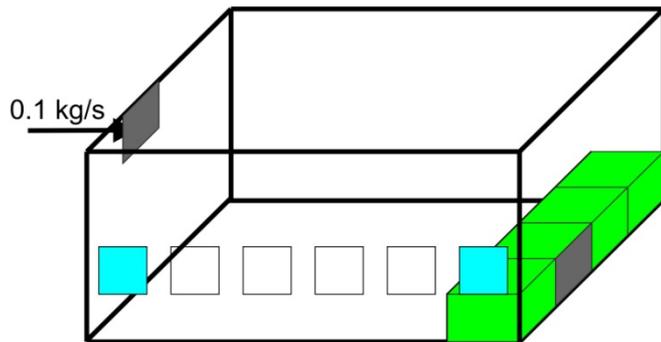
## 15 verschiedene Lösungen gefunden, grobe Kategorisierung

- 0.1 kg/s mechanisch, 2 Fenster gekippt
- 0.2 kg/s mechanisch, höchstens 1 Fenster gekippt
- 0.4 kg/s mechanisch, alle Fenster geschlossen
- Je nach Konfiguration Computerposition wichtig

# KLASSENZIMMERLÜFTUNG

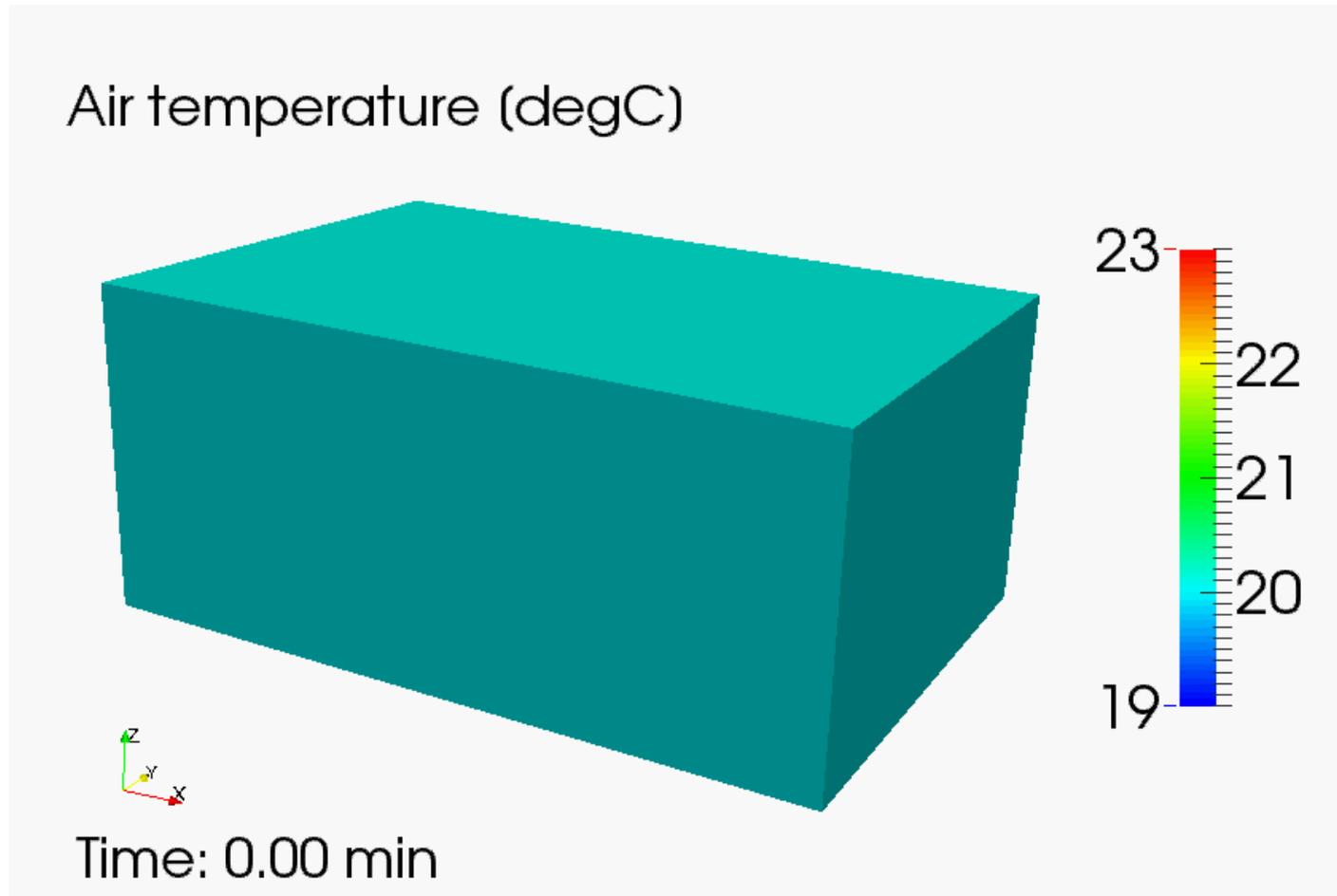
Ergebnis nach 90 Min

- Rechner rechts
- 1. und 6. Fenster gekippt
- Zuluft: 0.1 kg/s



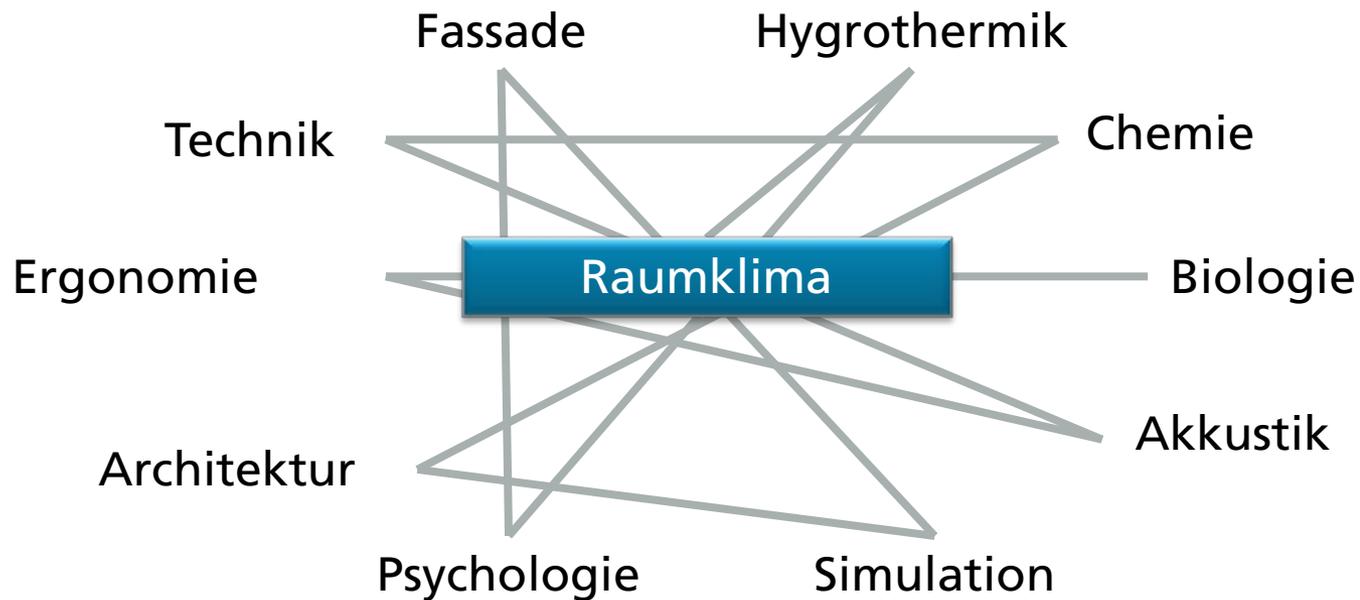
# KLASSENZIMMERLÜFTUNG

Ergebnis nach 90 Min



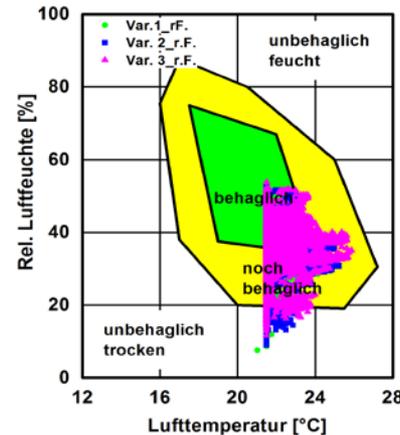
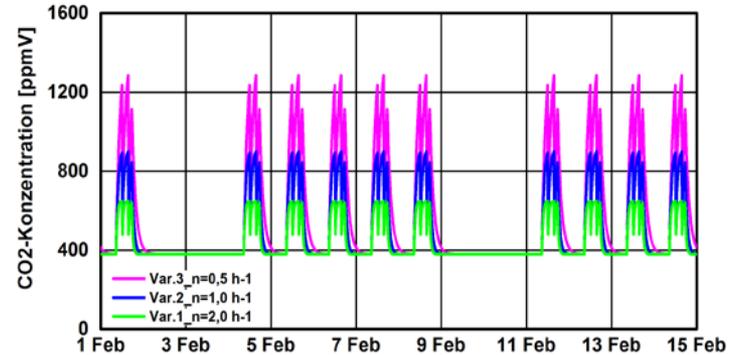
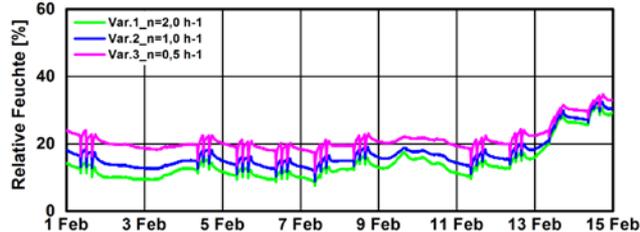
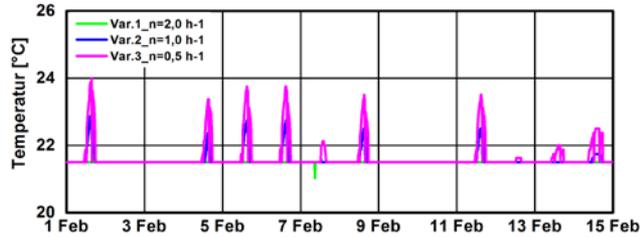
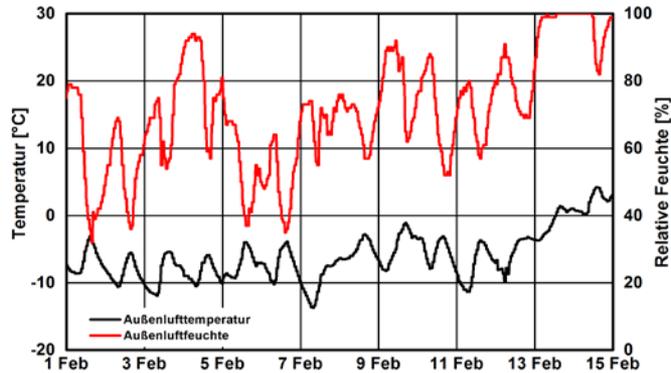
# VERNETZUNG DES WISSENS UND DER ERFAHRUNG

Interdisziplinäre Projekt- und Planungsteams



# Planungsinstrumente

## WUFI-Modell



Klimaanalyse eines Bürogebäudes und Untersuchung der Auswirkung eines reduzierten Luftwechsels auf CO<sub>2</sub> Konzentration und Luftfeuchte

# Resumee

## Optimierung von Lüftungskonzepten



- Es gibt umfangreiche Methoden, um die Lüftungssituation in situ zu beurteilen
- Modellsimulationen können helfen, Lösungsalternativen schnell und günstig abzuschätzen und Investitionen gezielt einzusetzen
- Optimal ist die Einbindung von Modellbetrachtungen bereits in der Planungsphase, vor allem für kritische bzw. multiplizierbare Bereiche

# Resumee



**Vielen Dank für ihre Aufmerksamkeit**