
Klima in Schulen, Innenraumluftthygiene und technische Performance

Prof. Dr. Klaus Peter Sedlbauer

Lehrstuhl für Bauphysik
Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt
Technische Universität München

Institutsleiter
Fraunhofer-Institut für Bauphysik
Stuttgart, Holzkirchen, Nürnberg, Rosenheim



Forschung und Innovationen in verschiedenen Bereichen



Von der
Schallplatte



zum
MP3-Player



Vom analogen
Telefon



zur
digitalen Vermitt-
lungstechnik



Von der
Glühbirne



zur
Leuchtdiode



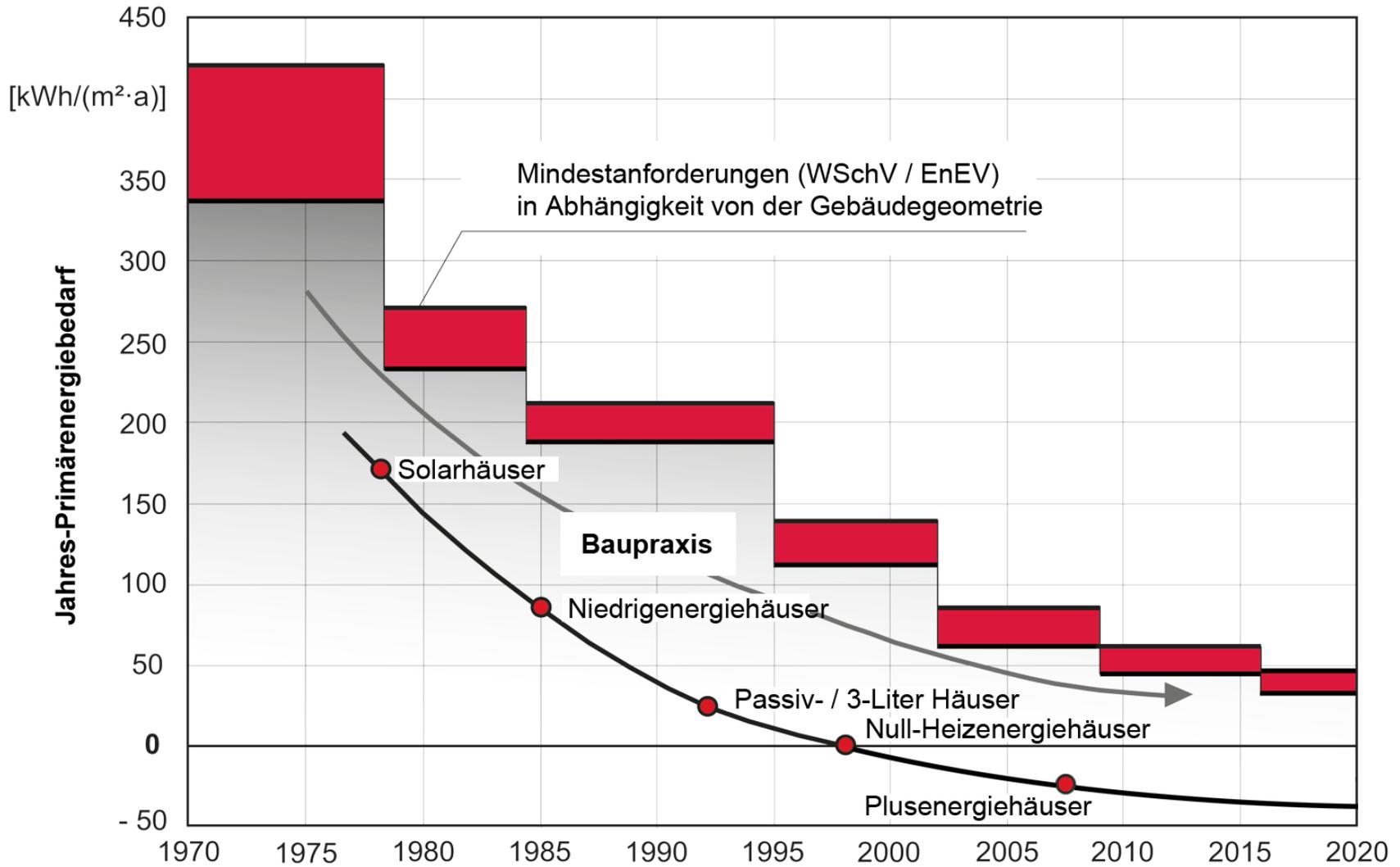
Vom Altbau



zum
Effizienzhaus-Plus



Meilensteine des energiesparenden Bauens

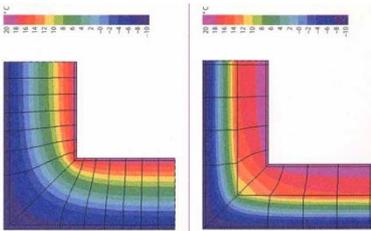


Effiziente Gebäude

Energieeinsparung durch:

passive Maßnahmen

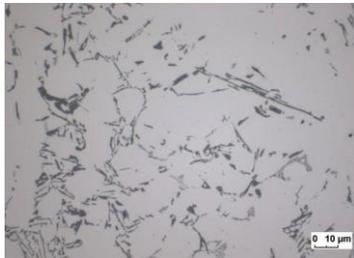
intelligente Technik



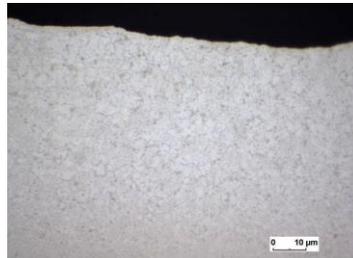
Wärmebrücken vermeiden



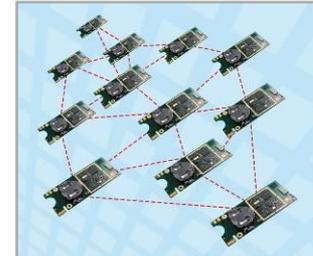
Luftdichtheiten



Neue Dämmstoffe



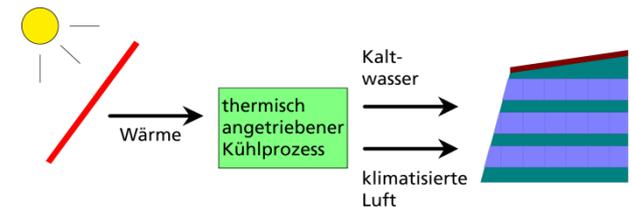
sommerlicher Wärmeschutz



Wärmerückgewinnung



Gebäudeautomation



Techniken zur solaren Klimatisierung

Aus dem Solarhaus der 1. Generation



.... wird last but not least das Plus-Energiehaus (2011 – ...)



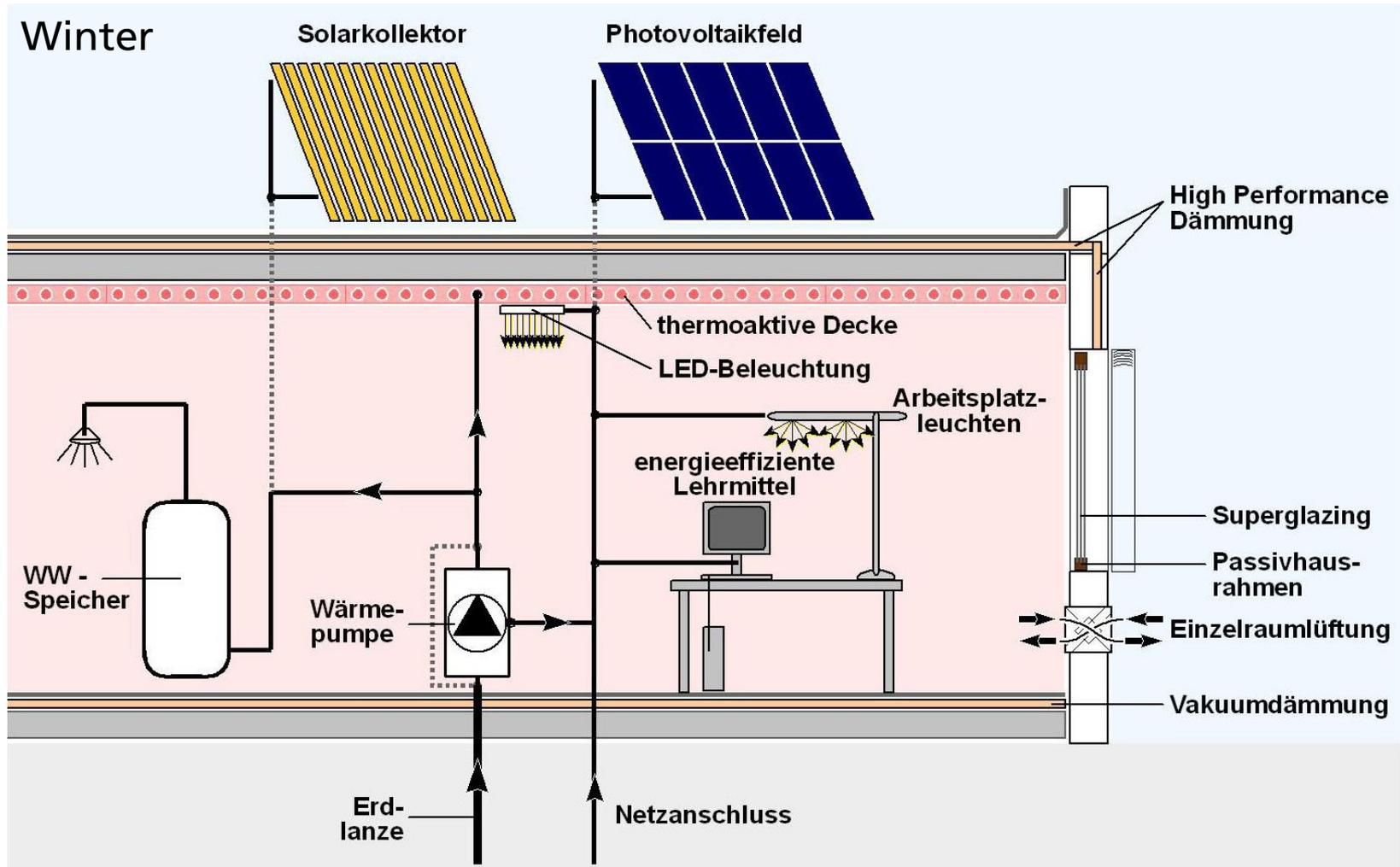
Beispiel Plusenergiehaus : Uhlandschule in Stuttgart-Zuffenhausen



Grund- und Hauptschule
443 Schüler
Alter: 6 bis 16 Jahre

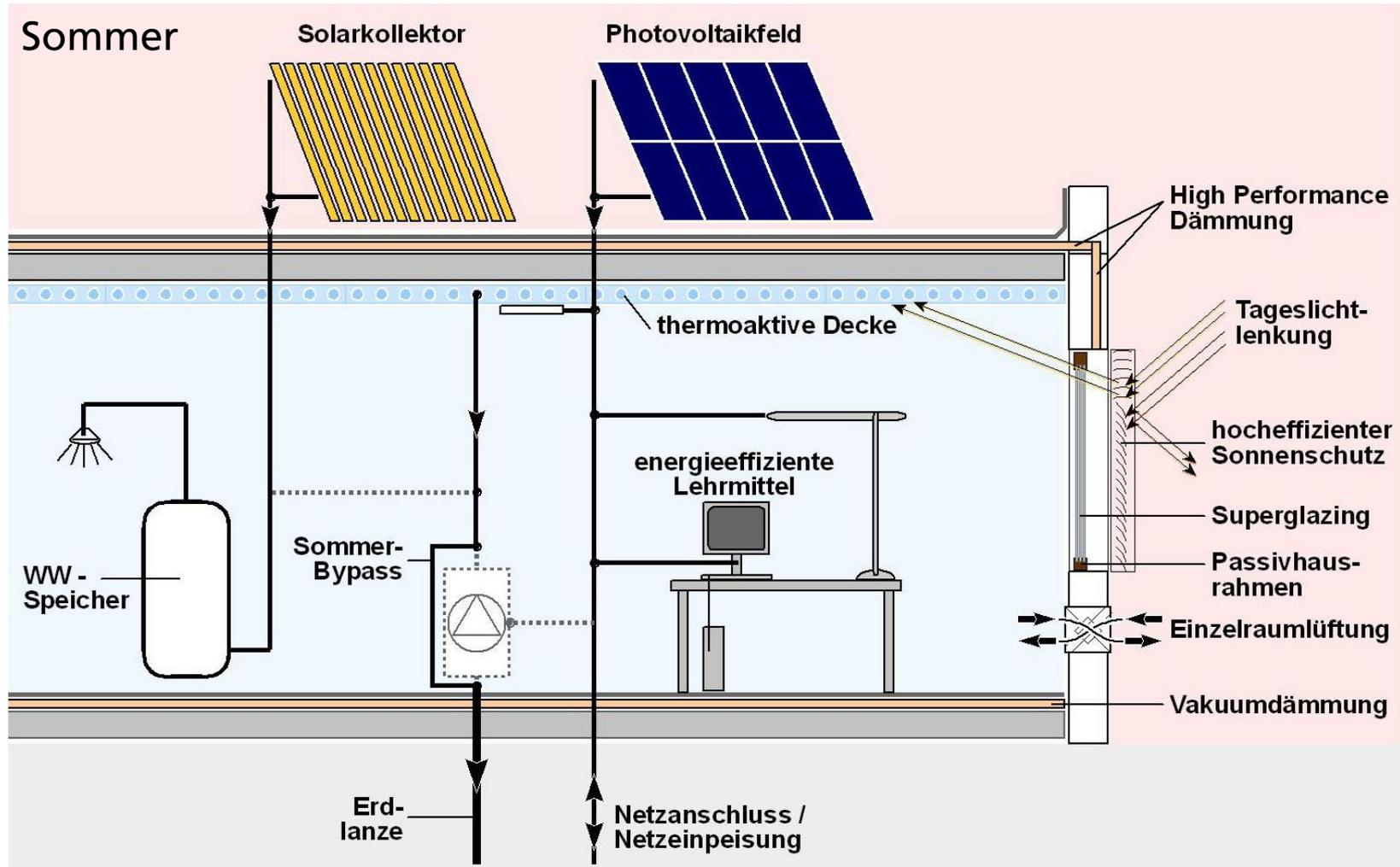
Plusenergieschule Stuttgart

Konzept zur Steigerung der Energieeffizienz



Plusenergieschule Stuttgart

Konzept zur Steigerung der Energieeffizienz



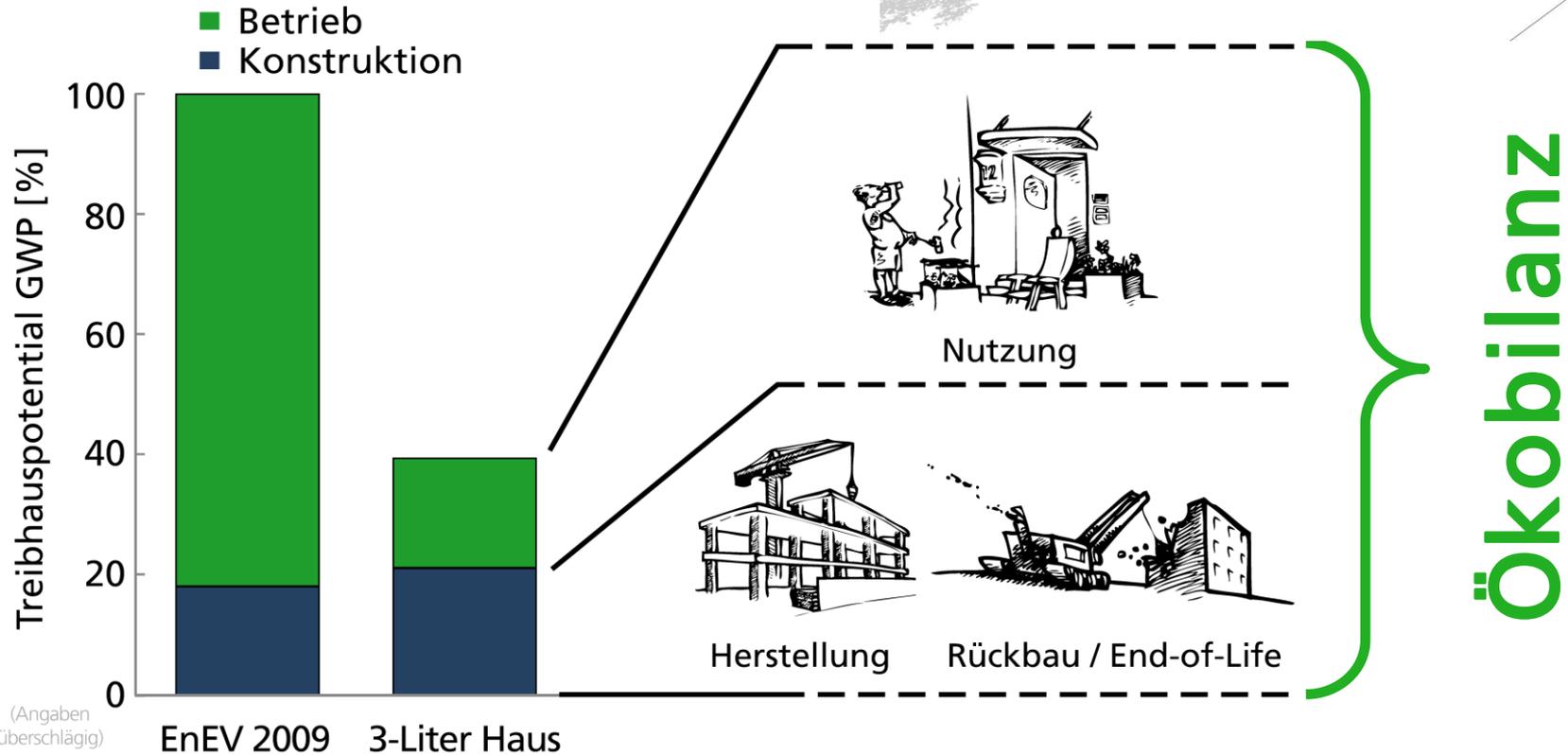
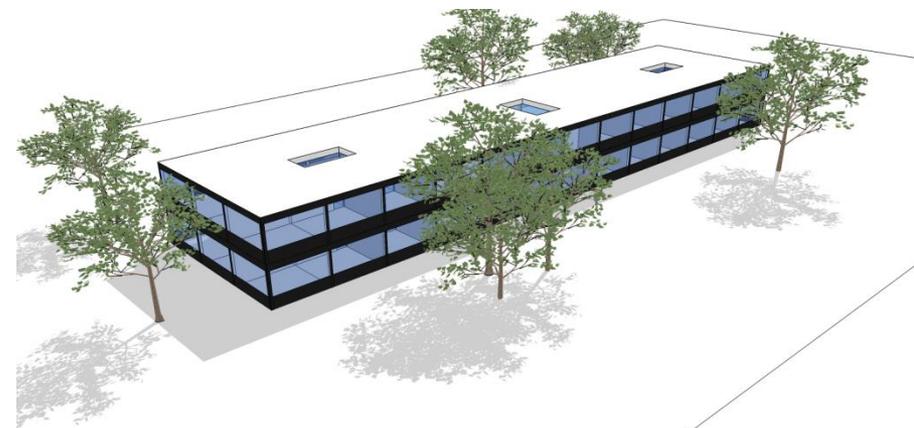
Plusenergieschulen

Beispiel: Uhlandschule, Stuttgart

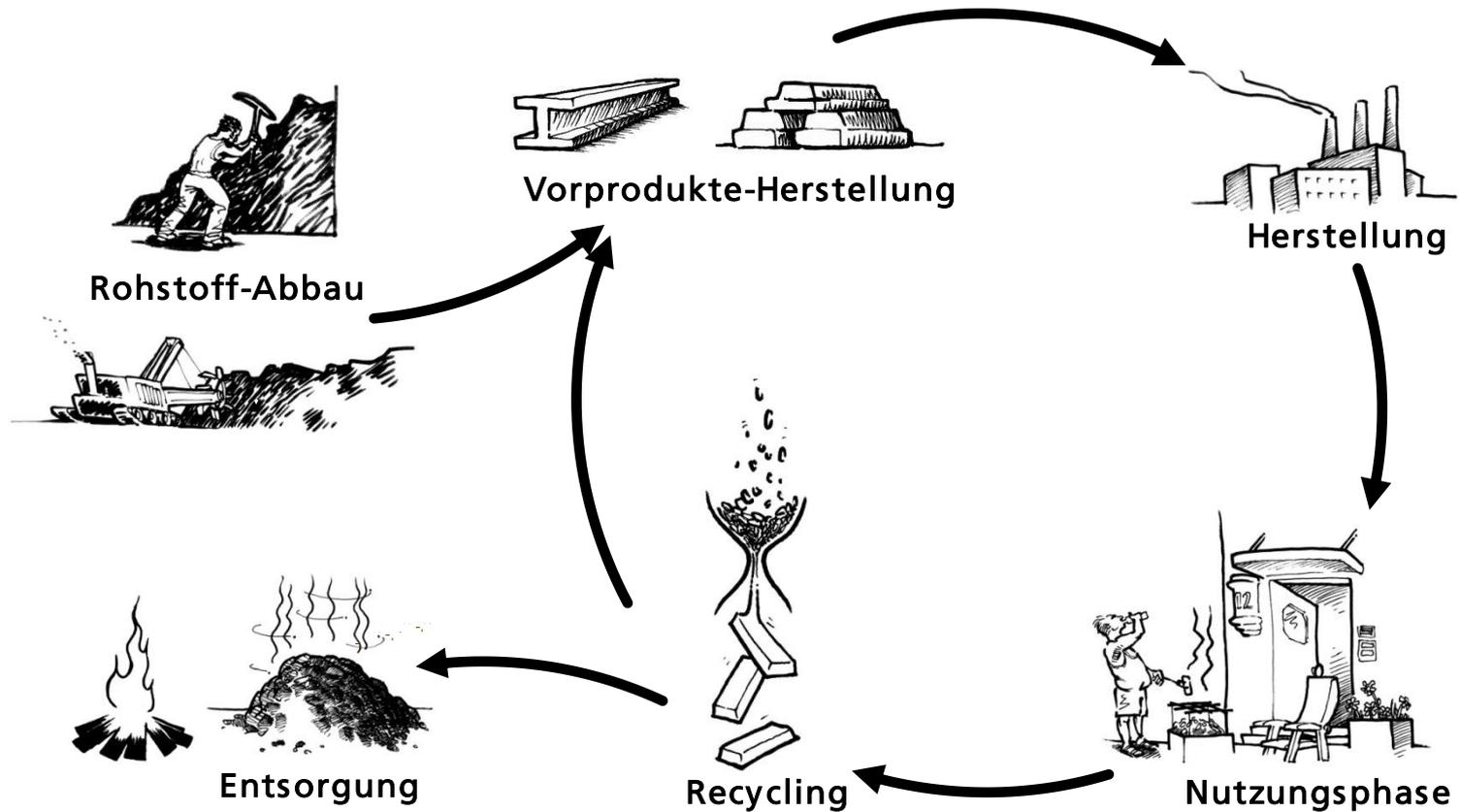
- Photovoltaikmodule auf dem Dach und an der Fassade (1.700 m²)
 - Strom für Wärmepumpen, Beleuchtungs- und Lüftungsanlagen, Hilfsstrom und Computer sowie Whiteboards
- Gebäudehülle: Wärmedämmverbundsystem und dreifach verglasten Fenstern
 - durchschnittliche U-Wert der Gebäudehülle bei 0,23 W/m²K
- Lüftungstechnik in den Fensterbrüstungen: CO₂-gesteuert. Im Sommer: Fensterlüftung (inkl. Nachlüftung)
- Präsenzgesteuerte Beleuchtung, außenliegende Jalousien mit Tageslichtlenkung
- Wissenschaftliche Begleitung durch das Fraunhofer IBP



Bedeutung der Ökobilanz



Der Lebenszyklus als Grundlage



Zertifizierung von Schulen

- Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen für Bundesgebäude (BNB)
→ Profil „Neubau Unterrichtsgebäude“
- Zertifizierungssystem der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB)
→ Profil „Neubau Bildungsbauten“
 - z.B. Atert Lycée, Luxemburg
 - z.B. Neubau Inselschule Fehmarn



Nachhaltigkeit in Schulen

Besondere bauphysikalische Anforderungen für Schulen in der Zertifizierung

■ Innenraumhygiene

- Hohe CO₂-Konzentration
- Lüftungssystem

■ Akustischer Komfort

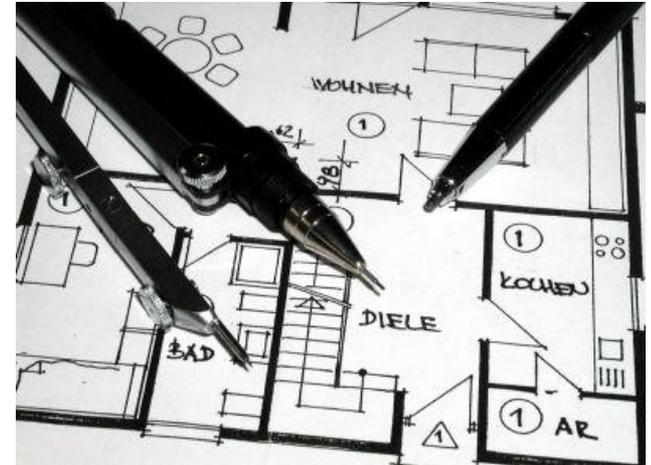
- Hohe Ansprüche an Kommunikationsbedingungen
- Berechnung der Nachhallzeit
- Was fehlt: Sprachverständlichkeit (Bezug zum Störgeräuschpegel)



Nachhaltigkeit in Schulen

Besondere Anforderungen für die Nutzung als Schule

- Vandalismusprävention
 - Gestaltung der Grundrisse → keine Nischen
 - Haptik der Oberflächen
 - Auswahl hochwertiger Materialien
 - Steigerung des Wohlbefindens



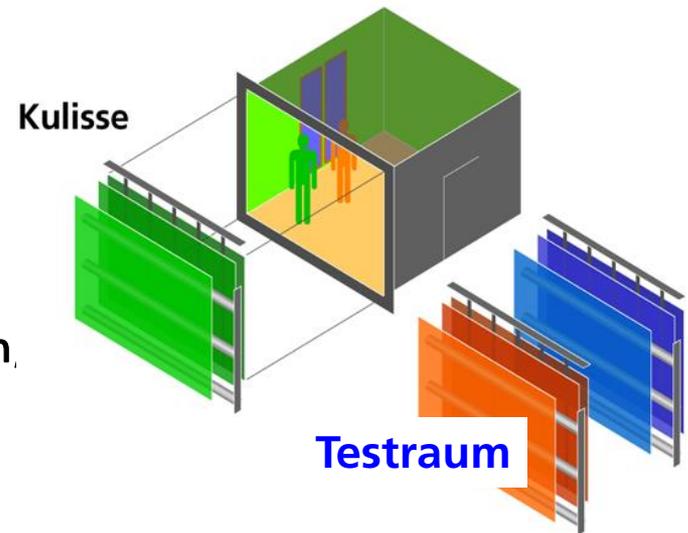
© Thomas Siepmann / pixelio.de

Forschungsschwerpunkt »Menschen in Räumen«



Innenraum hat erheblichen Einfluss auf den Nutzer

- Neue Materialien und Technologien
- Mensch-Umgebungsinteraktionsmodell
physiolog. Modellierung, Gebäudesimulation,
- Menschliche Leistungsfähigkeit
Temperatur, Licht, IAQ, ...
- Ideale Umgebungsbedingungen für
Büros, Hotels, Krankenhäuser, **Schulen**
- Schnittstelle zur Fassade



Begriffsklärung

Gesundheit (präventiv und therapeutisch):

- ➔ Gesundheit ist ein Zustand vollkommenen körperlichen, geistigen und sozialen Wohlbefindens und nicht die bloße Abwesenheit von Krankheit oder Gebrechen. (WHO vom 22. Juli 1946)

Behaglichkeit:

- ➔ Behaglichkeit ist definiert als das Gefühl, das Zufriedenheit mit dem Umgebungsklima ausdrückt. (DIN EN ISO 7730: 2006)

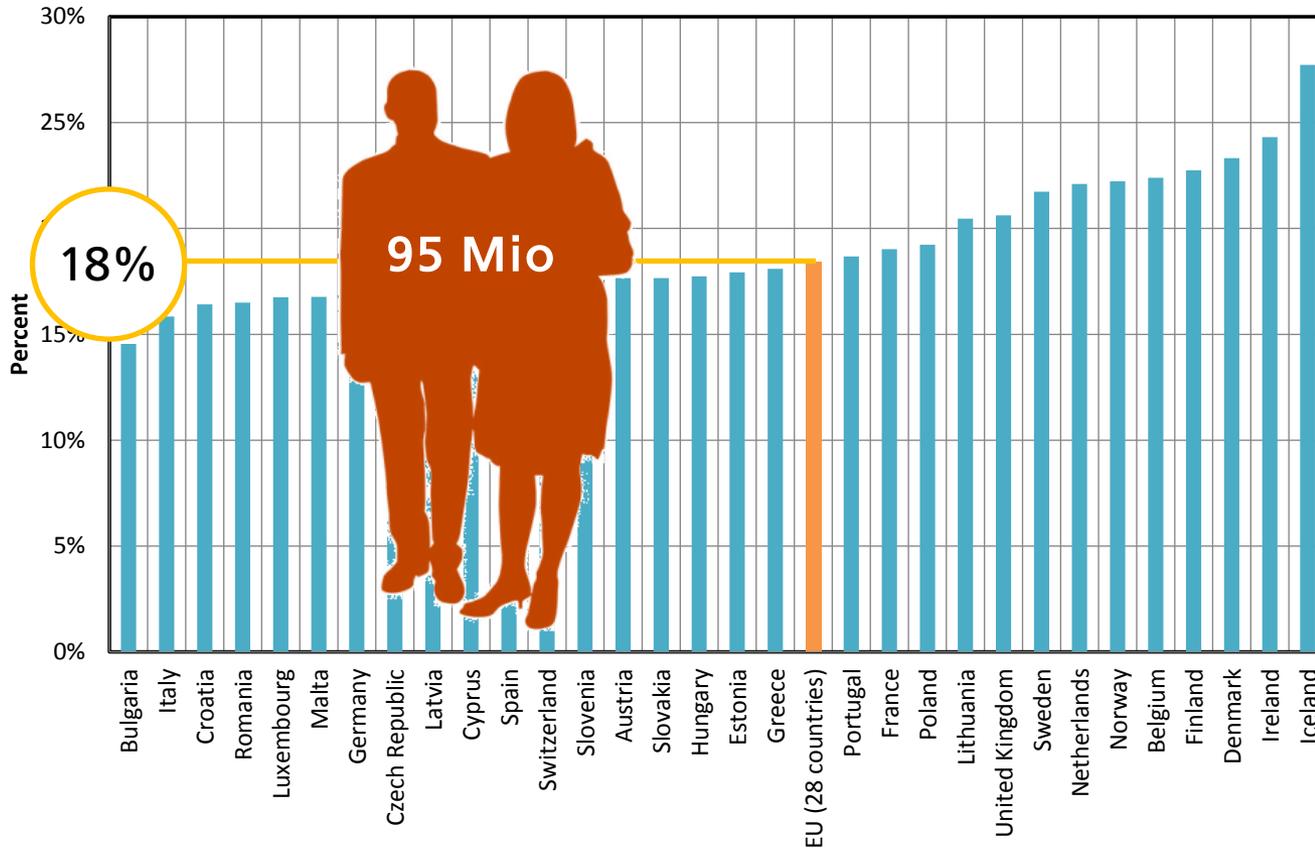
Absence of driving impulses from either field to correct the environment by behavior. (Benzinger 1979)

Leistungsfähigkeit / Produktivität:

- ➔ Leistungsfähigkeit / Produktivität bedeutet allgemein das Vorhandensein der nötigen Voraussetzungen, um eine Leistung langfristig und stabil zu erbringen.

Anteil Schüler und Studenten in Europa

Eurostat SILC Datenbank

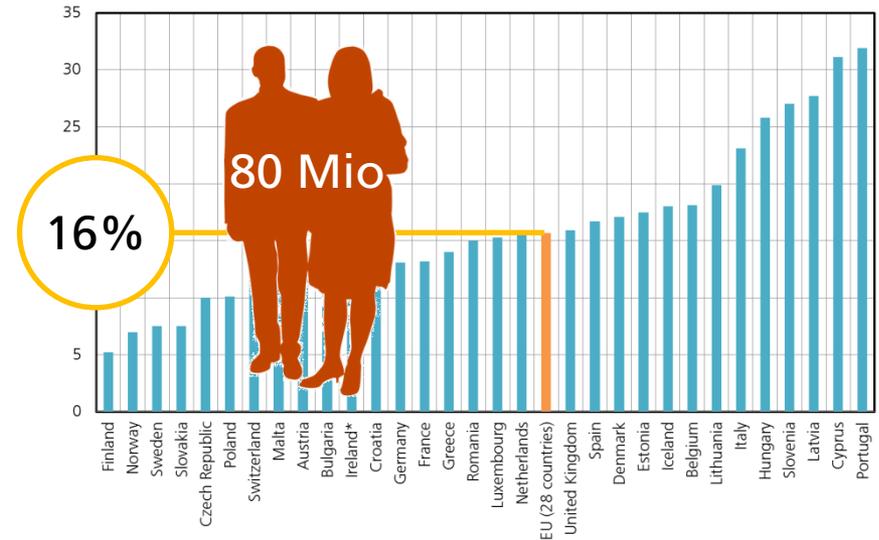


ISCED Levels 1-6
(Grundschule bis
Bachelor)

Allgemein abträgliche Lebensbedingungen

Eurostat SILC Datenbank

Feuchte und nasse Innenräume



→ Schimmelpilzbefall garantiert
(RH >75% an der befallenen Wand)

→ Wahrscheinliche
Beeinträchtigung der Atemwege
(Asthma, Husten, Bronchitis, etc.)

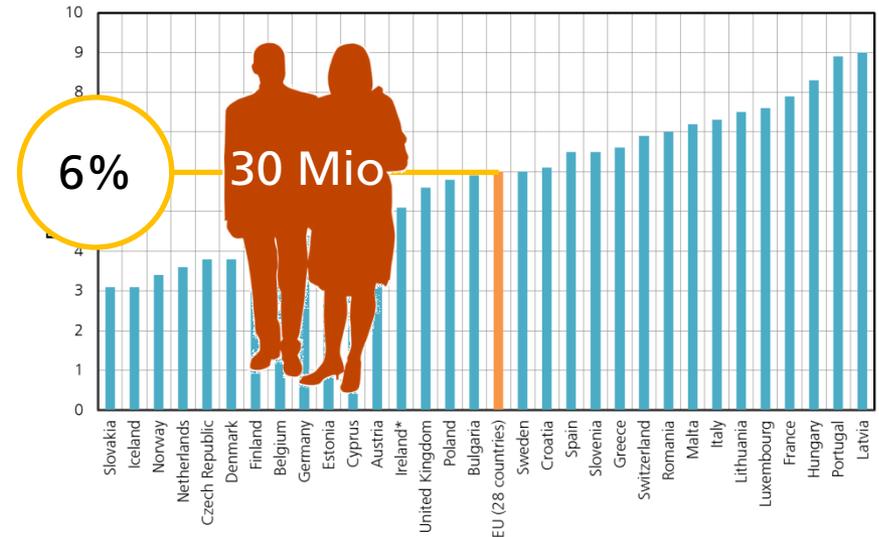
Allgemein abträgliche Lebensbedingungen

Eurostat SILC Datenbank

Zu dunkel bewertete Räume



→ Mangel an Tageslicht



→ Risiko für Erhöhung depressiver Zustände (Niedergeschlagenheit, Inaktivität, Müdigkeit, etc.)

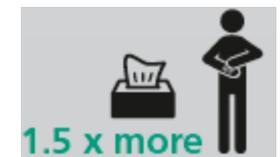
→ Geringere Leistungsfähigkeit

Einfluss der Lüftungsrate

Gesundheitssymptome



- Geringe Lüftungsraten in Gebäuden
→ erhöhtes Risiko für Atemwegserkrankungen
- Die Art der Lüftung (mechanisch oder natürlich) ist nicht Grund für eine gesundheitliche Zuträglichkeit
- Gesundheitssymptome korrelieren jedoch teils signifikant mit der Lüftungsrate:
 - unzureichend niedrige vs. empfohlene Lüftungsraten:
→ zweimal so hohes Risiko zu Keuchen (OR 2,28) oder zu Husten (2,26)²⁾
 - → etwa anderthalbfach so hohes Risiko allergische Symptome zu entwickeln (OR 1,42)³⁾



Einfluss der Lüftungsrate



- In den nordischen Ländern sind Wohnungslüftungsraten von 0,35 bis 0,5 1/h empfohlen.
 - 40-60% der Wohnungen liegen in der Praxis darunter¹⁾
- In Schulen werden üblicherweise Lüftungsraten von 8 l/s pro Person empfohlen.
 - 87% der untersuchten Klassenräume erfüllten diesen Standard nicht²⁾
- Für eine gute Luftqualität werden CO₂-Werte von weniger als 1500 ppm empfohlen.
 - In Schulen werden regelmäßig CO₂-Werte über 2100 ppm – teilweise auch bis zu 4000 ppm – berichtet.



Einfluss der Lüftungsrate

Lernerfolg in Schulen

Zunahme der Leistung:
2.2% - 15%
Arbeitsgeschwindigkeit nimmt zu

(Bako-Biro et al., 2012)

Zunahme der Leistung:
3.2% - 7.8%
Kein Einfluss auf Fehlerraten

(Petersen et al., 2015)

Zunahme der Leistung:
in 5 von 9 Tests
Kein Einfluss auf Fehlerraten

(Wargocki & Wyon 2007)

Zunahme der Leistung:
2,9% Mathematik,
2,7% Lesen

(Haverinen-Shaughnessy et al. 2011 ; Shaughnessy et al. 2006)

7,4 l/sp

Von 1 bis 8 l/sp

von 1.7 bis 6.6 l/sp

Von 3 bis 8.5 l/sp

Von 0.9 bis 7.1 l/sp
In Schritten von 1l/sp

1,0 l/sp

l/sp = liter per second and person

Einfluss des CO₂-Gehaltes

Lernfähigkeit in Schulen

Abnahme der Leistung:
5% geringere
Konzentration und
Aufmerksamkeit

(Coley et al., 2007)

Abnahme der Leistung:
Fehler im
Konzentrations-
test

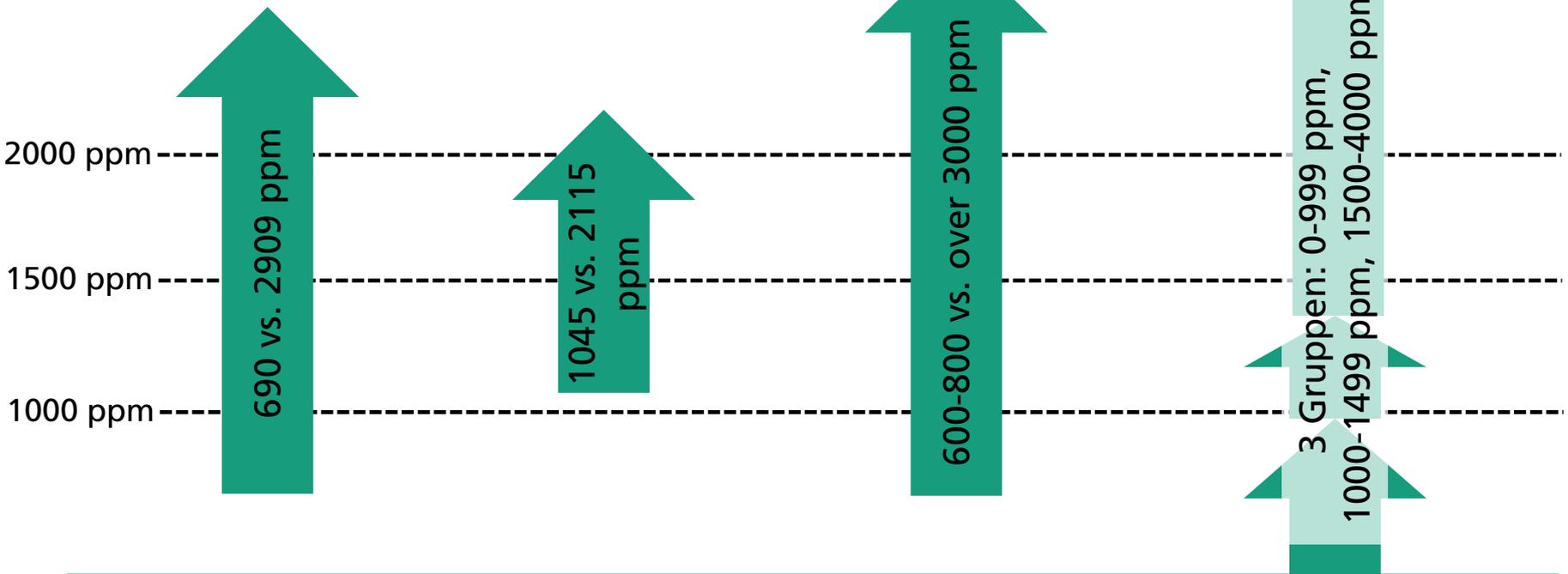
(Twardella et al., 2012)

Abnahme der Leistung
bei einem
Konzentrations-
test (d2)

(Ribic 2008)

Abnahme der Leistung
in RT-Tests

(Myhrvold et al. 1996)



*RT = reaction times of the tasks
PPM-values are means or medians

Stoßlüften im IBP Schulhaus



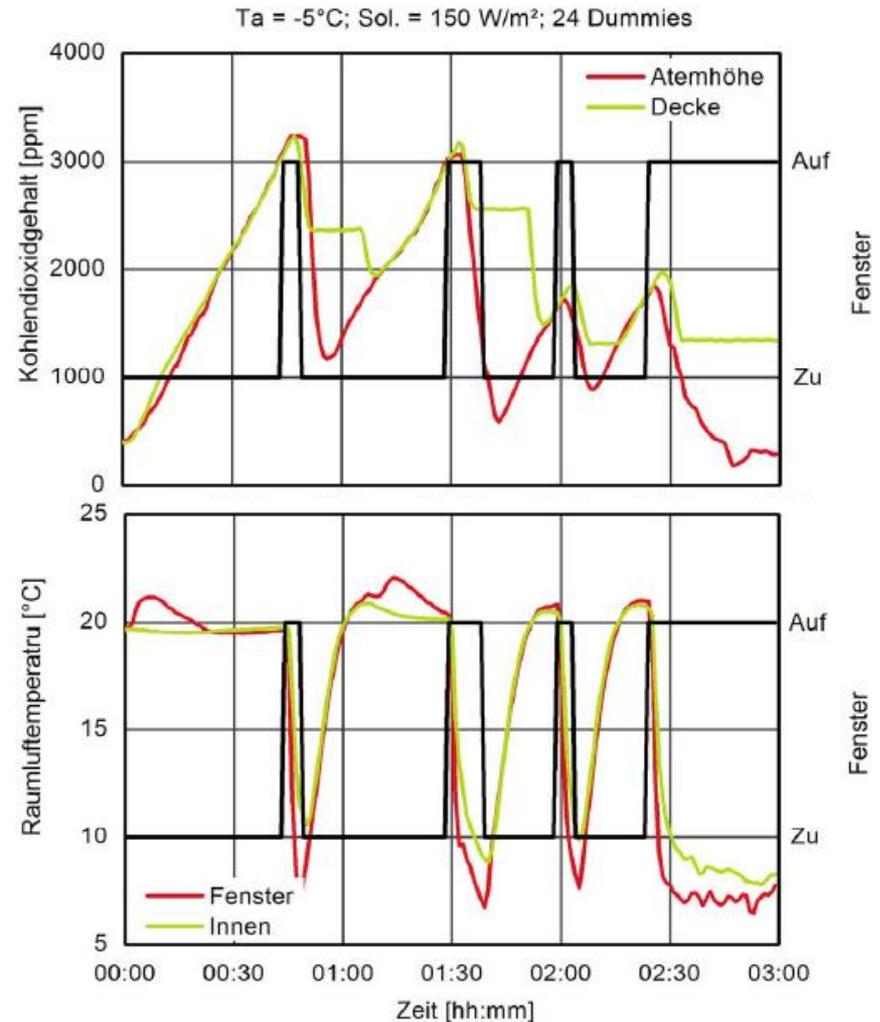
→ Stoßlüften nur in „5min-Pausen“ nach „45min-Stunde“ nicht ausreichend!

→ Eignung von Fassadenvarianten für automatisierte Fensterlüftung

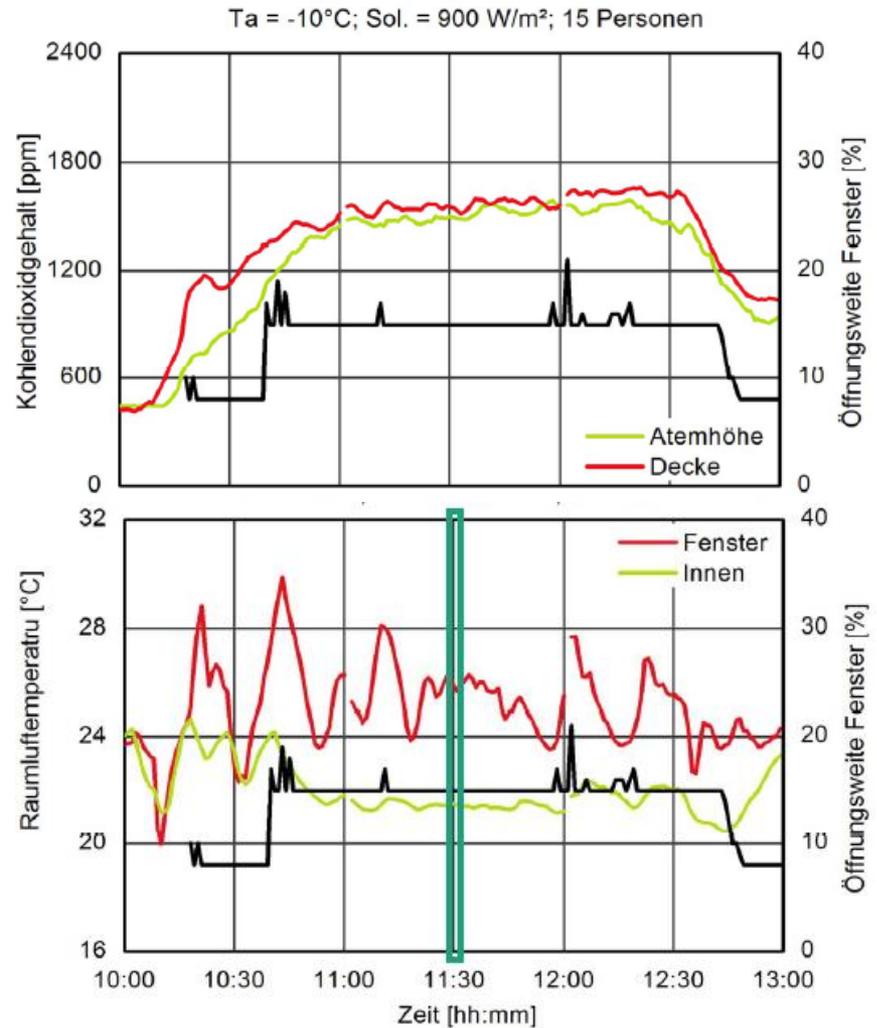
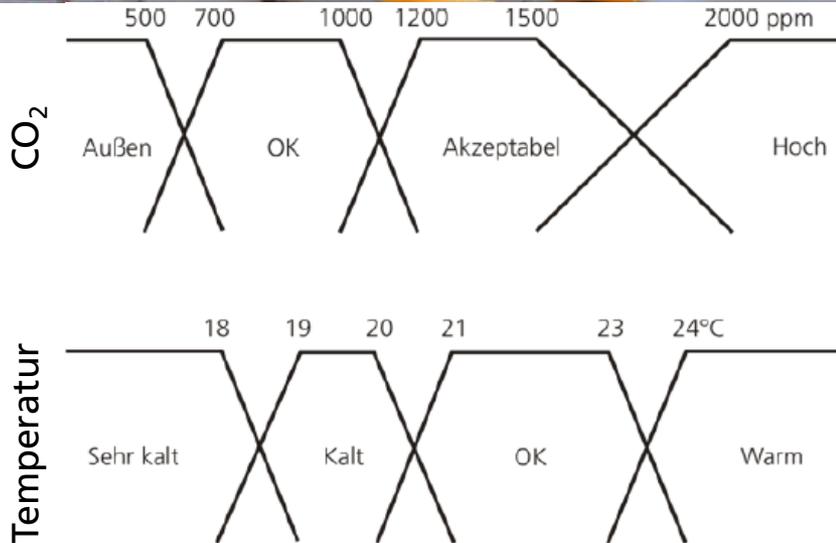
(1) Schwingflügel

(2) Kippflügel in zwei Reihen bedingt

~~(3) Kippflügel in einer Reihe nicht~~

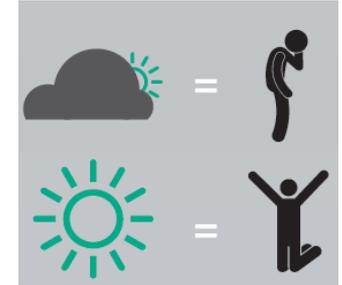


Automatisierte Fensterlüftung im IBP Schulhaus



Einfluss zu geringer Tageslichtverfügbarkeit

Lernfähigkeit in Schulen



Schüler in Räumen mit der höchsten Tageslichtverfügbarkeit zeigten eine

- 15-20% schnellere Lernfähigkeit in Mathematik
 - 23-26% schnellere Lernfähigkeit in Lesen
- als die Schüler mit der geringsten.¹⁾

Angebot von Tageslicht über ein skylight:

- assoziiert mit 19-20% Leistungsverbesserung

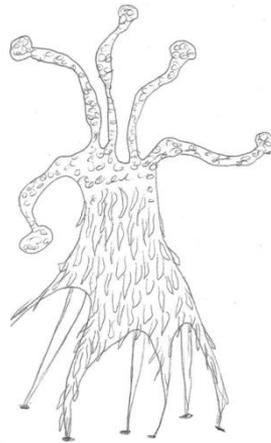
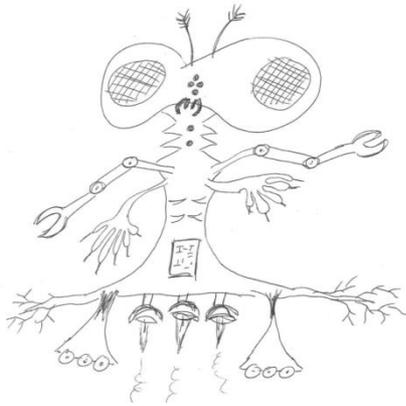
Öffenbare Fenster:

- assoziiert mit 7-8% schnellerem Fortschritt

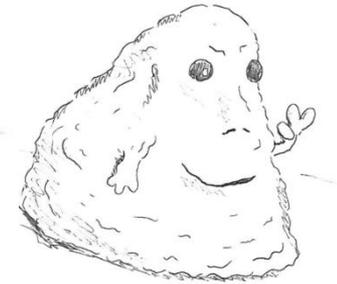
1) L. Hescong / Report HMG-R-9803 (21.7.1999)

Generierte „Aliens“ in Kreativitätsaufgaben

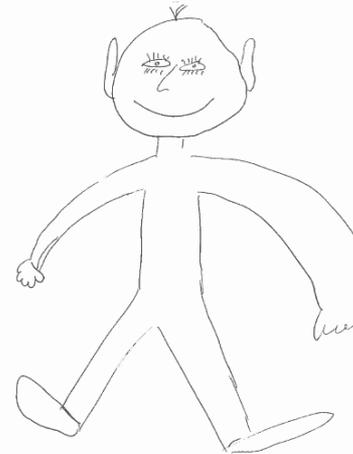
sehr kreativ



mittelmäßig
kreativ

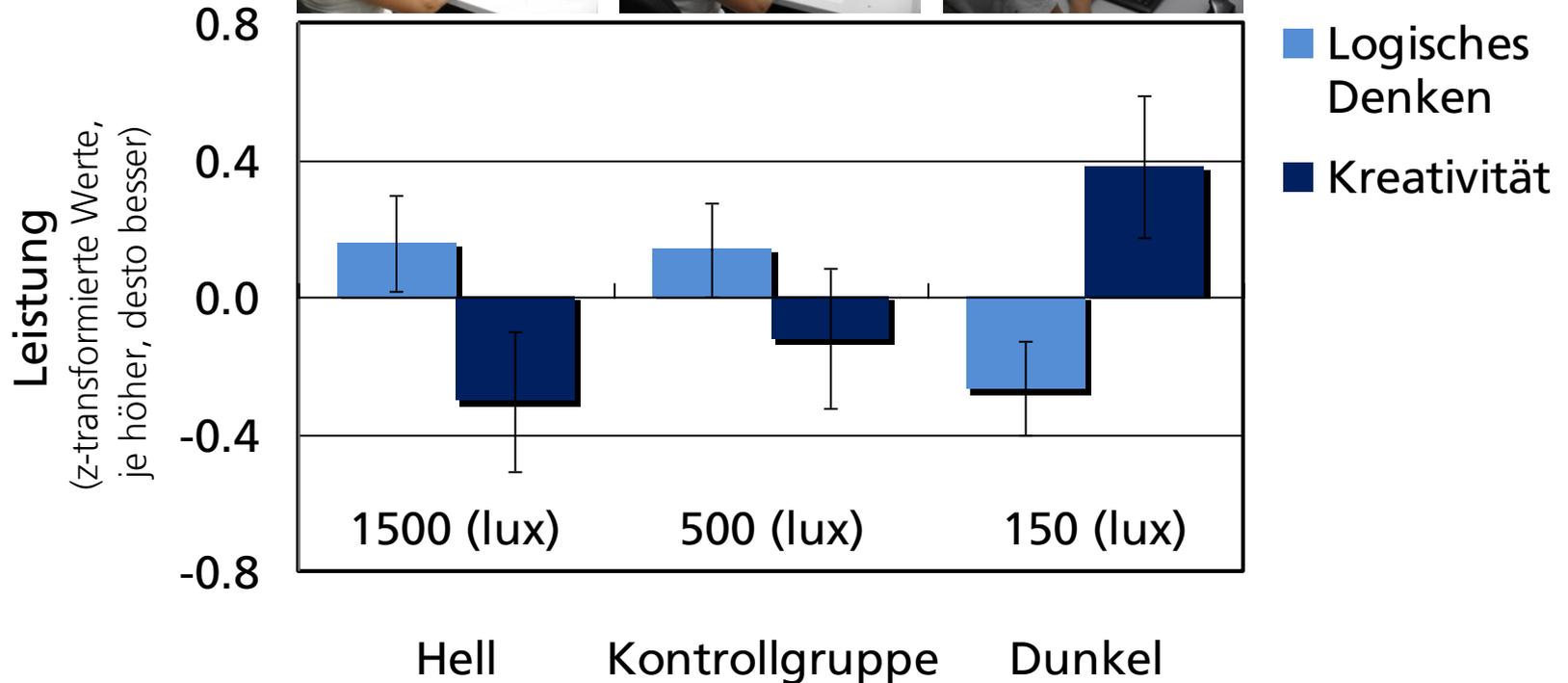


gar nicht kreativ



Steidle & Werth, 2013

Licht



Interaktion: $F(2, 138) = 9.45, p < .01, \eta_p^2 = .20$
Logisches Denken: $F(2, 137) = 3.21, p < .05, \eta_p^2 = .05,$
Kreativität: $F(2, 137) = 7.21, p < .01, \eta_p^2 = .09$

Quelle: Steidle, Hanke & Werth, under review

Dilemma bei schlechter Raumakustik

➔ Ursache / Wirkung - Spirale, + 10 dB (A)

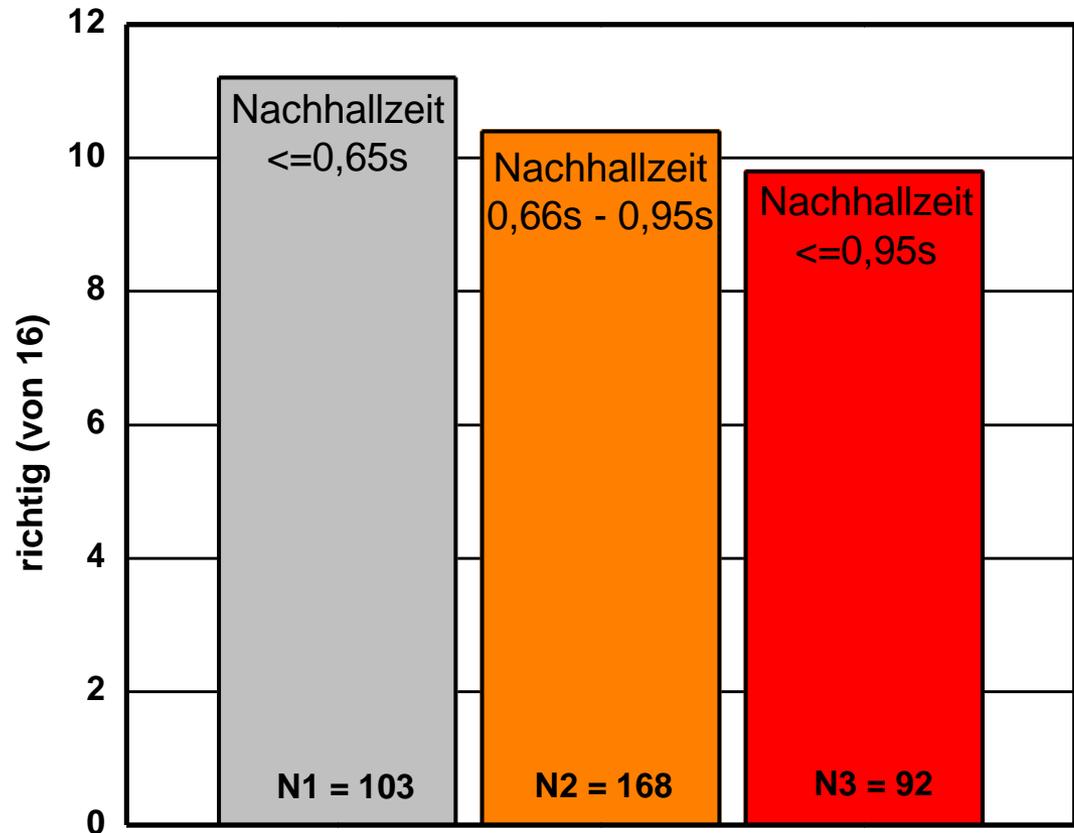


Auswirkung der Nachhallzeiten in Klassenräumen

Chronische Wirkungen unterschiedlich langer Nachhallzeiten auf kognitive Grundfunktionen

Leistung von Zweitklässlern beim Kategorisieren von Lauten.

(Test unter gleichen Nachhallbedingungen)



Akustische Wirkungsforschung, z.B. Sprachmaskierung



Noten abhängig vom Klassenraum?



Problem: Schallharte Flächen
Folge: Sprachverständlichkeit zu gering
Nachhallzeit zu groß

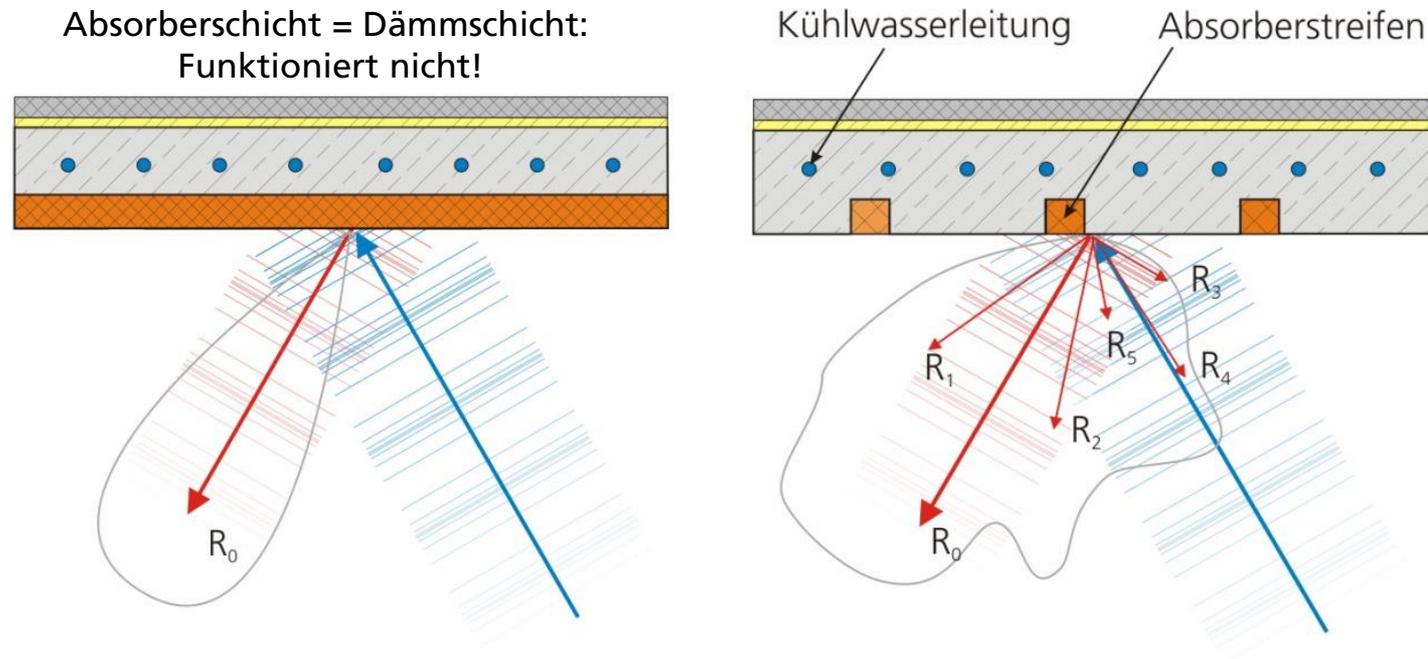
Schallabsorber

Poröse Absorberfläche reduzieren und „neu gestalten“

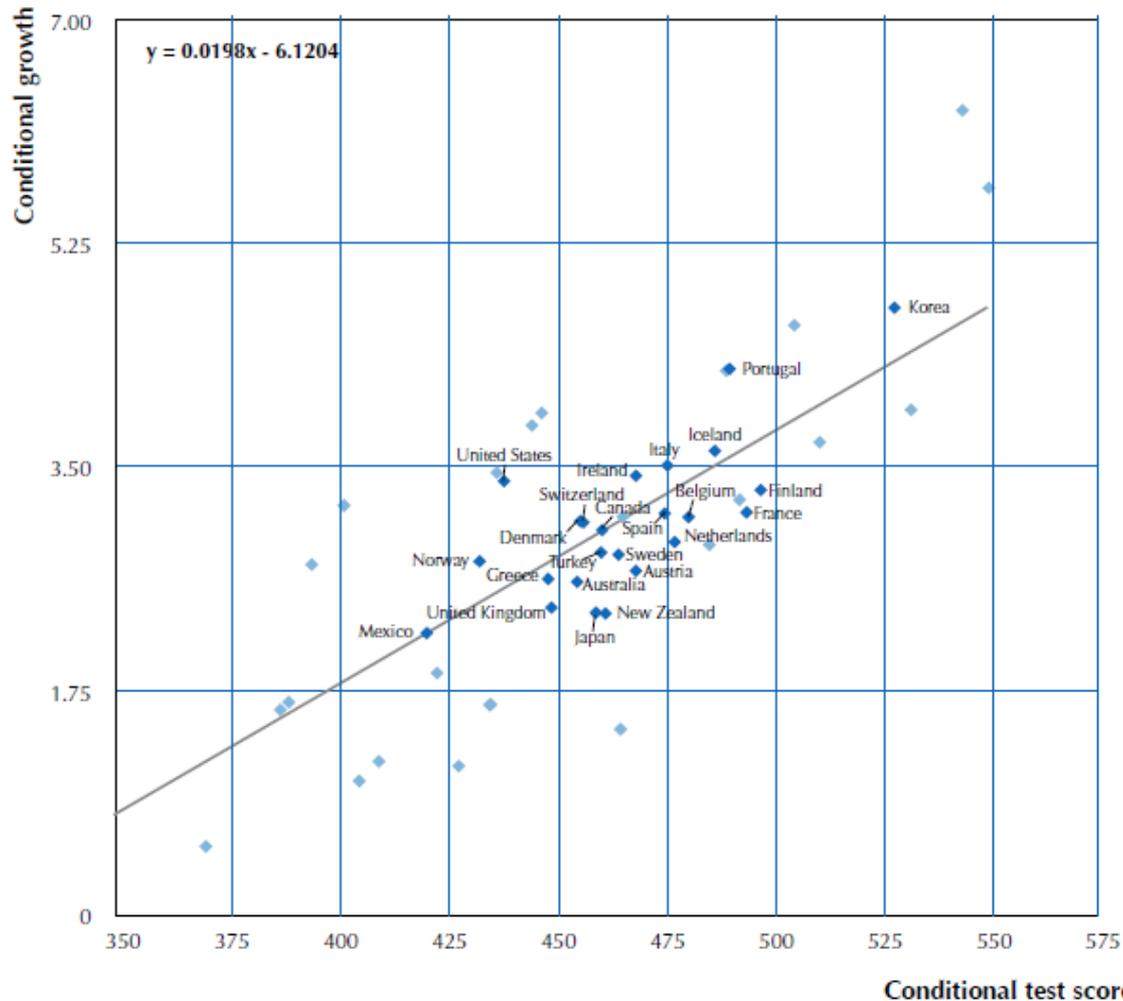


Absorberstreifen

Periodische Absorberstreifen in schallharter Fläche „versenkt“ (ggf. verputzt)



Schulische Leistung und Wirtschaftswachstum



Mittlerer PISA-score (math & science) in Europa:

- Finnland 532 (= max)
- Dänemark 499 (= median)
- Zypern 439 (= min)

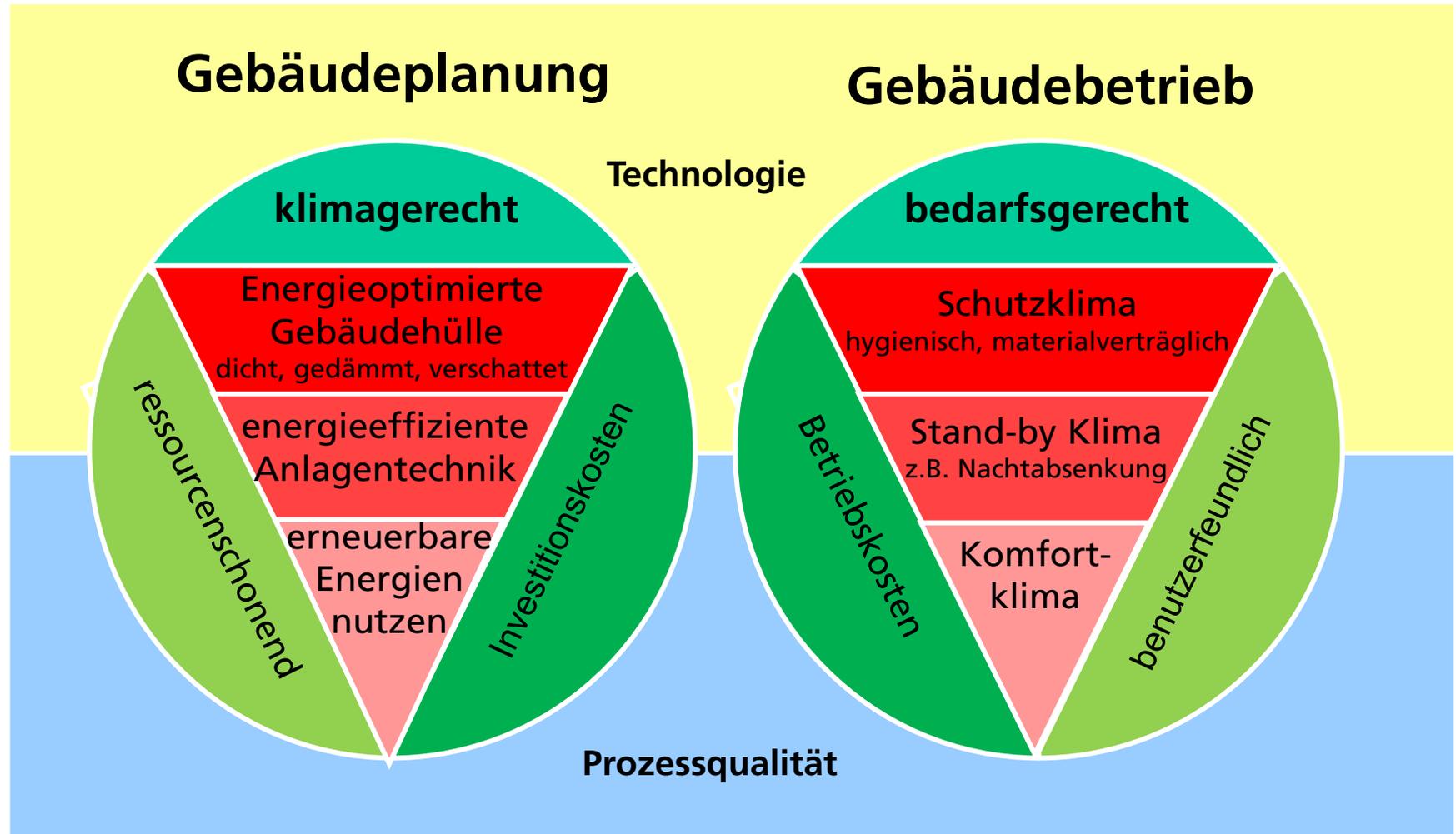
Annahme: Steigerung der Leistungsfähigkeit um 2,8% durch bessere Lüftung

→ Verbesserung des bedingten Wachstums um 6,7% bis 9,5% in Europa.

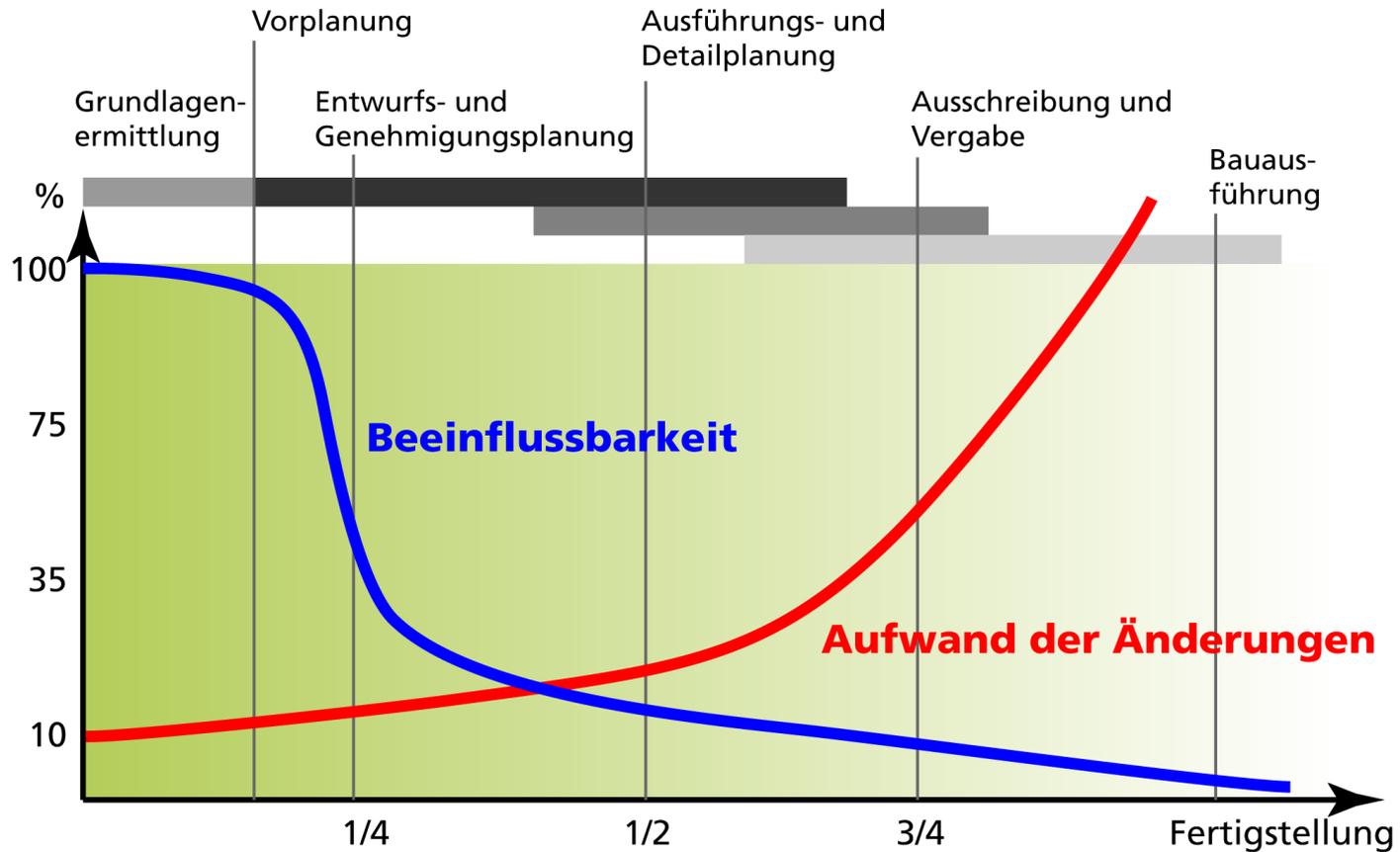
- Finnland 4,4% → 4,7%
- Dänemark 3,7% → 4,0%
- Zypern 2,5% → 2,8%

Source: OECD (2010) The High Cost of Low Educational Performance

Strategische Überlegungen

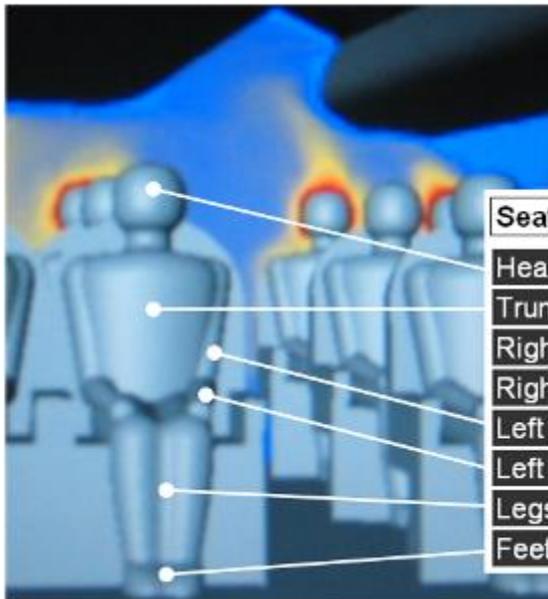
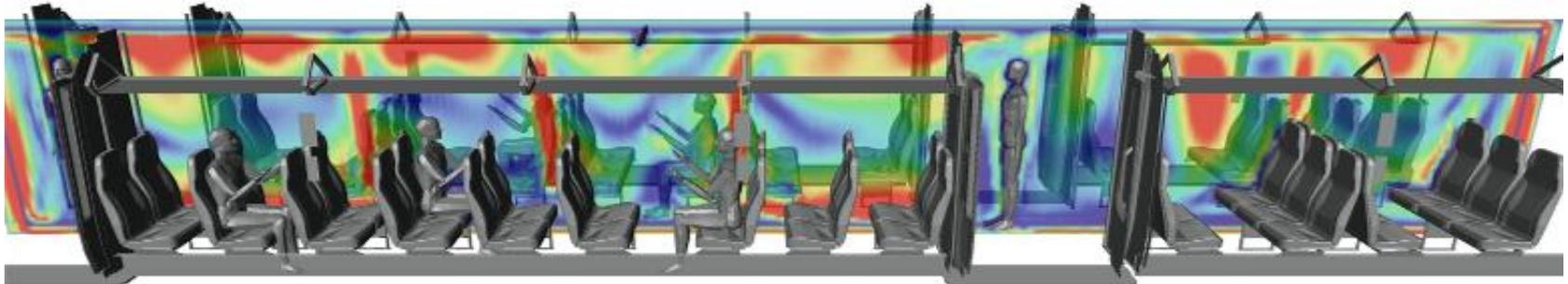


Planung – Beeinflussbarkeit vs. Aufwand im Bauprozess

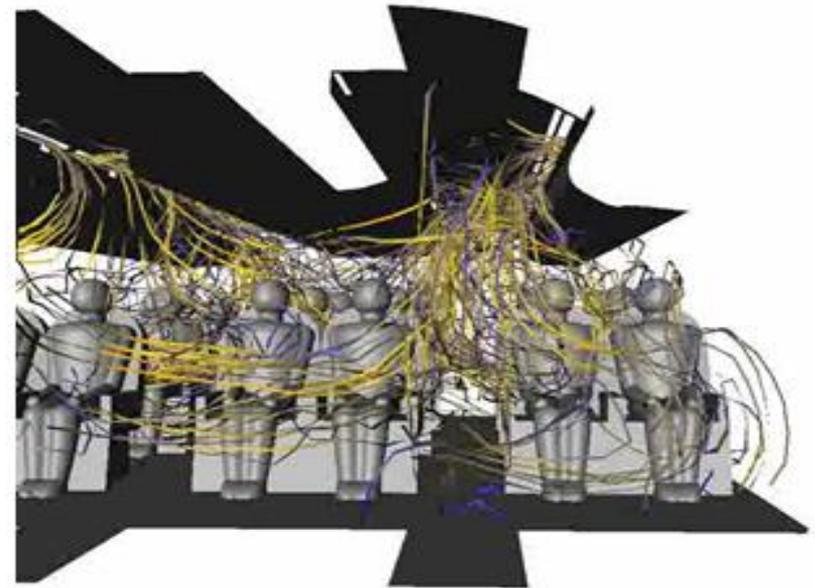


Systemlösungen

Einrichtung einer virtuellen Entwicklungsplattform – Analogie Fahrzeug



Seat 24C	vote
Head	slightly warm
Trunk	neutral
Right arm	neutral
Right hand	neutral
Left arm	slightly cool
Left hand	slightly cool
Legs	neutral
Feet	neutral



Technologische Herausforderungen

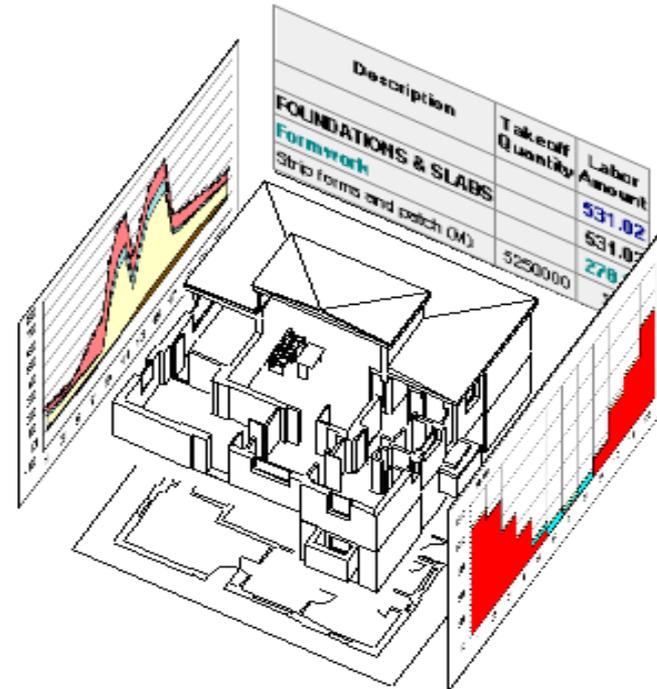
Building Information Management

Informationen über das Bauwerk (Building Information Model)

Informationen über zugehörige Prozesse (Building Information Modeling)

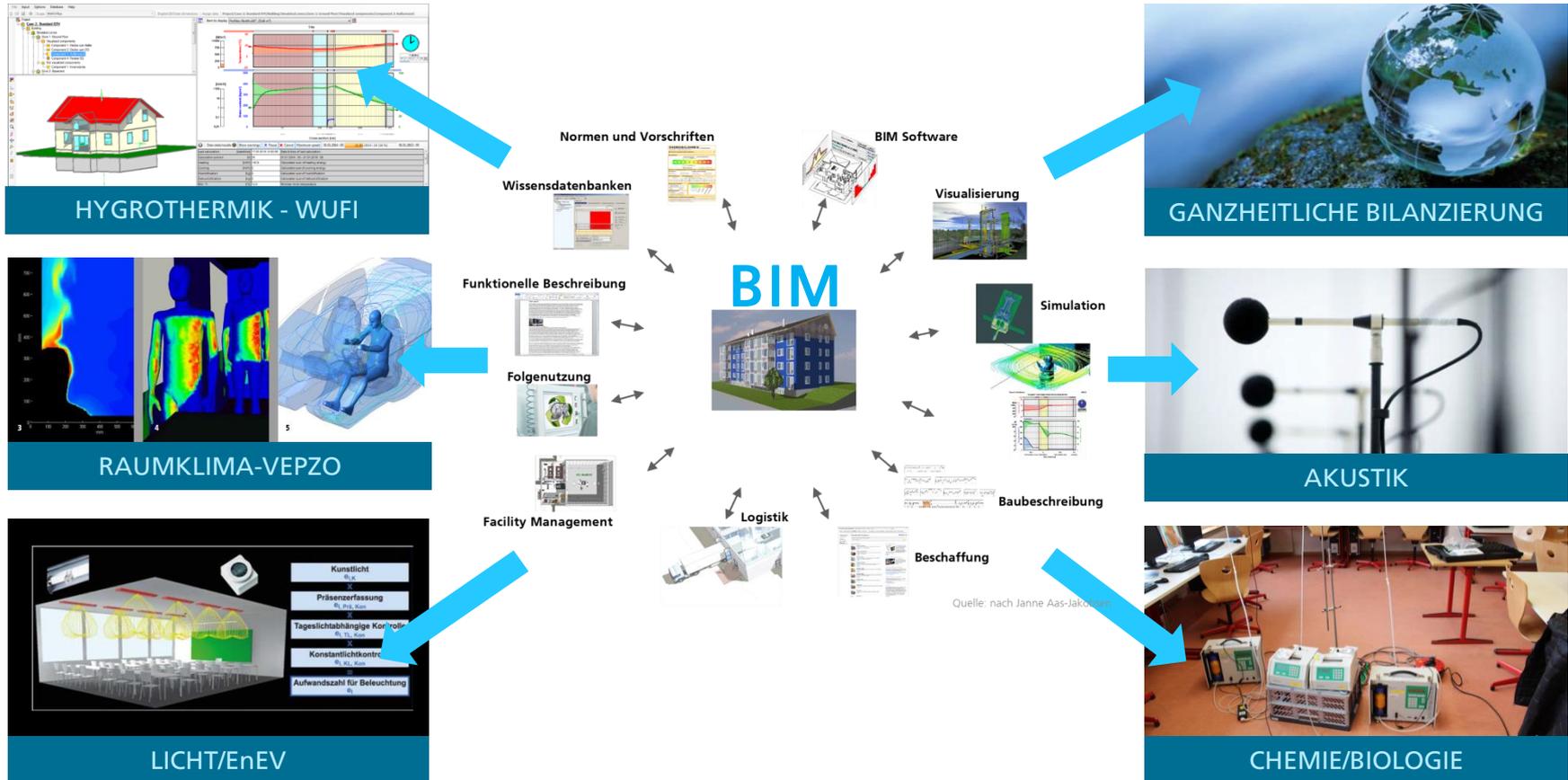
Building Information Model

- Intelligente Bauteile, 2D/3D
- Objektstruktur unabhängig von der Geometrie
- Ableitung von Massen, Lasten, Wärmebilanz, FM Daten, ...



Bauen – BIM – Building Information Modelling

- Identifizieren und Heben der Potenziale von Prozessabläufen
- Mehrwert der Methode durch Simulation der Betriebsphase



BIMiIBP

Beispiel: Schulhaus

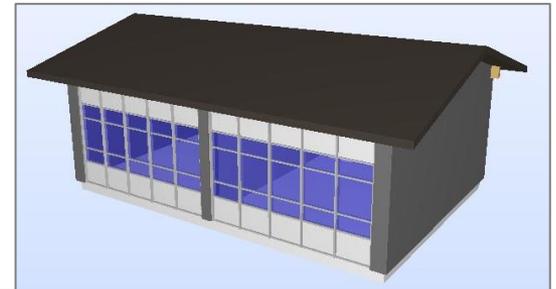
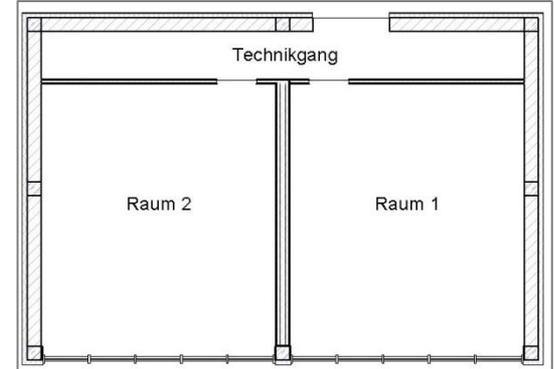
Eckdaten

Einstöckiges Schulgebäude auf dem Gelände des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik in Holzkirchen

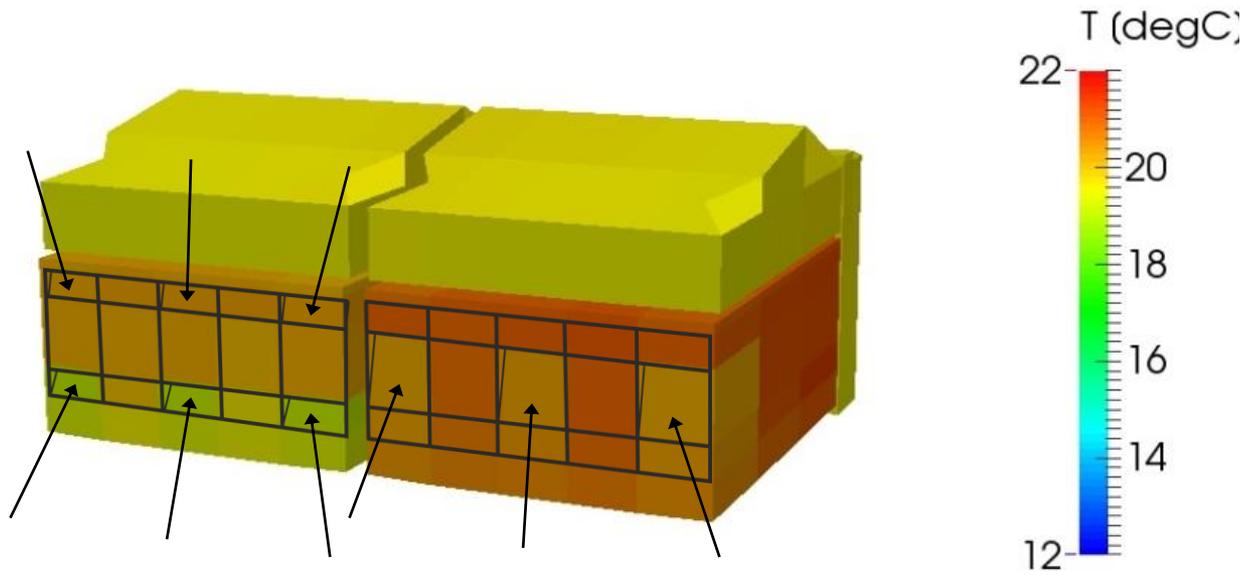
2 gleich große Klassenzimmer

Verfügbarkeit von ausführlichen Messdaten

➔ Bekannte Konstruktion erlaubt die Entwicklung und Bewertung einer Vorgehensweise in einer kontrollierten Umgebung



Time: 100 min



Temperaturverteilung im Schulhaus nach 100 min
(Variante 5)
inklusive Kennzeichnung der gekippten Fenster

Thermische Behaglichkeit nach DIN EN ISO 7730

Beschreibung durch:

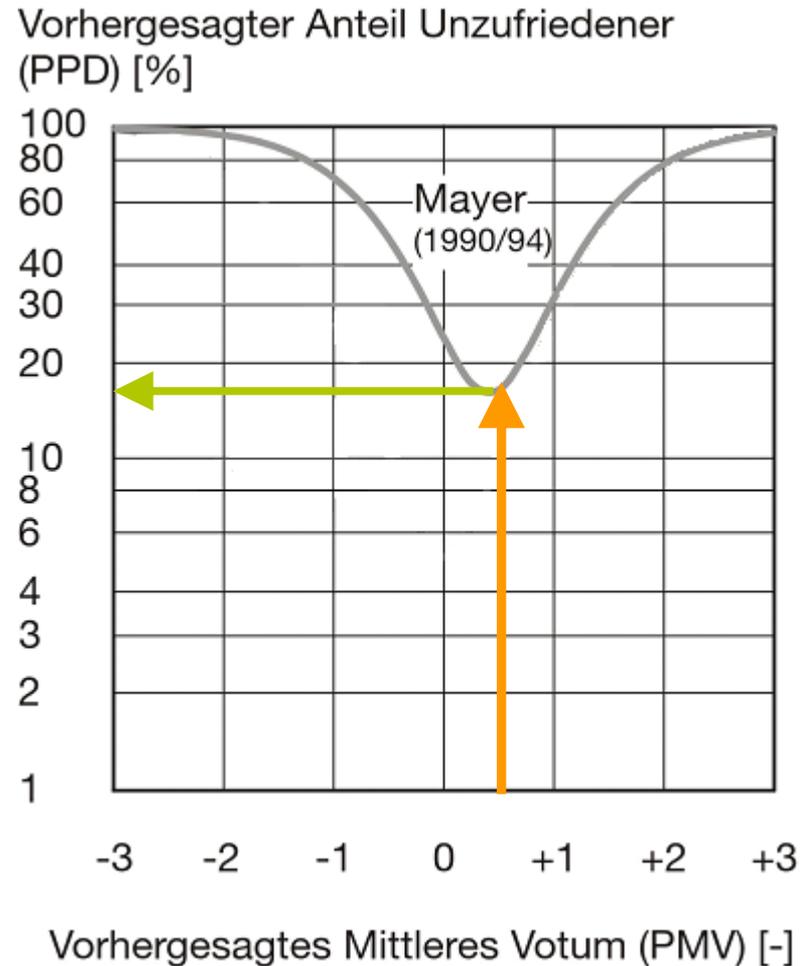
PMV: Vorhergesagtes Mittleres Votum
(Predicted Mean Vote)

PPD: Vorhergesagter Anteil Unzufriedener
(Predicted Percentage of Dissatisfied)

Aus Kombination der

- Klimaparameter
- Wärmedurchgang bei Kleidung
- Aktivität

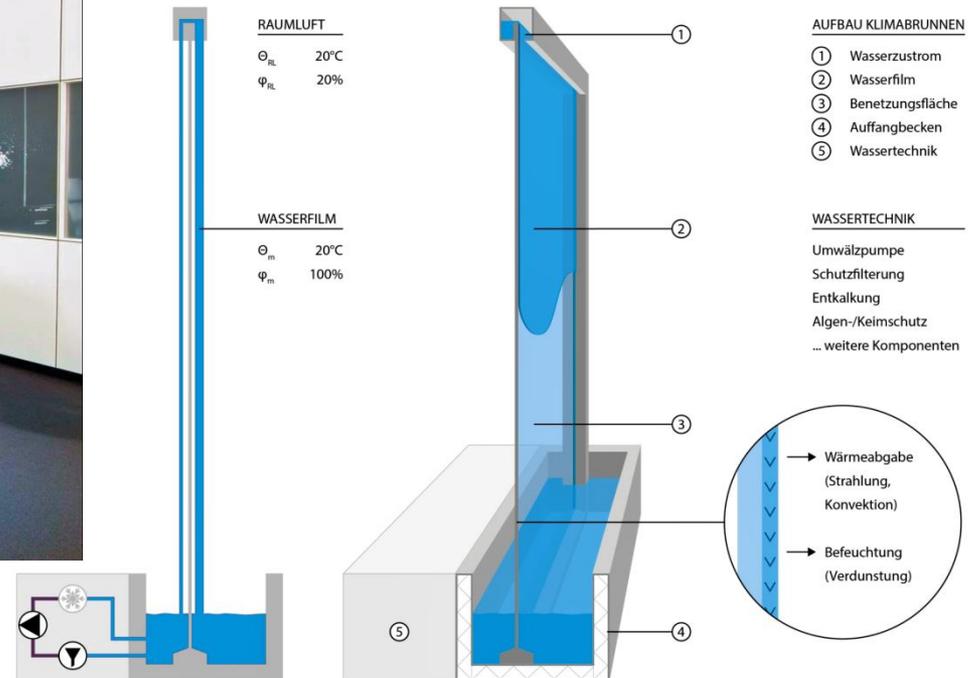
Optimale Randbedingungen:
mind. 15 % Unzufriedene



Raumluftentfeuchtung und -klimatisierung mit gekühltem Wasserfilm

Der gekühlte Wasserfilm ist in direktem Kontakt mit der Raumluft, und

- kühlt und entfeuchtet die Raumluft
- dient der Kühlung mittels Strahlungsaustausch



Zusammenfassung

Energieeffizienz ist (noch) wichtiger geworden

Weiterer Ausbau der Ganztages-Schulen

Trotz Konjunkturprogramme bleiben kommunale Sanierungslisten lang und kostenträchtig

Nachhaltiges Bauen erfordert heute **Balance** von wirtschaftlichen und ökologischen **Erfordernissen** sowie nutzerbezogenen **Bedürfnissen**

Plusenergieschule



Plusarchitektur

Raumkonzepte

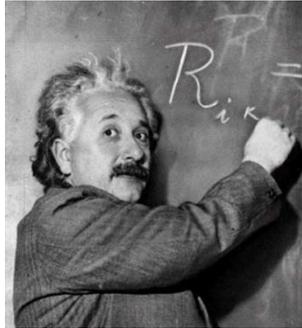


Leistung

Schulbau Integral



Nachhaltigkeit



»Die reinsten Form des Wahnsinns ist es, alles beim Alten zu lassen und gleichzeitig zu hoffen, dass sich etwas ändert.«

Albert Einstein



Vorankündigung Kongress »Zukunftsraum Schule« 2017

Der 5. Kongress **ZUKUNFTSRAUM SCHULE** findet am **14. und 15. November 2017** in der Stuttgarter Carl Benz Arena statt.

<http://www.zukunftsraum-schule.de/>

