



Bundesinstitut
für Bau-, Stadt- und
Raumforschung

im Bundesamt für Bauwesen
und Raumordnung



Zukunft Bauen

Forschung für die Praxis | Band 21

Lowtech im Gebäudebereich

Fachsymposium TU Berlin 17.05.2019



Das Fachsymposium wurde organisiert und durchgeführt von:



BBSR Referat II 7
Energieoptimiertes Bauen



Technische Universität Berlin
NATURAL BUILDING LAB –
constructive design and climate adaptive architecture
Fakultät VI | Institut für Architektur

Gender-Hinweis

In dieser Broschüre wurde zur besseren Lesbarkeit und Optik sowie aus Platzgründen lediglich die männliche Form eines Begriffs („Nutzer“, „Planer“ etc.) verwendet. Selbstverständlich bezieht sich der jeweilige Begriff auf weibliche und männliche Personen.

Nutzungshinweis/Haftungsausschluss

Sämtliche Informationen in dieser Broschüre stellen eine Hilfestellung für die Baustoffwahl nach ökologischen Kriterien dar. Sie erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit, Richtigkeit und Aktualität, stellen keine Planungsunterlagen und auch keine Produktinformation dar und ersetzen keine detaillierte Planung im Einzelfall. Die dargestellten Konstruktionsdetails dienen lediglich als Beispiel zur Veranschaulichung.

Die Verantwortlichkeit für die konkrete Planung und die Einhaltung der anerkannten Regeln der Technik liegt im Einzelfall allein beim Planer. Ein Vertragsverhältnis oder vertragsähnliches Verhältnis wird durch diese Broschüre nicht geschlossen.

Diese Broschüre wurde mit großer Sorgfalt erstellt. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann dennoch nicht übernommen werden. Für die Inhalte der Sekundärquellen sind die Autoren und der Herausgeber nicht verantwortlich.



Bundesinstitut
für Bau-, Stadt- und
Raumforschung

im Bundesamt für Bauwesen
und Raumordnung



Zukunft Bauen

Forschung für die Praxis | Band 21

Lowtech im Gebäudebereich

Fachsymposium TU Berlin 17.05.2019



Im Auftrag vom



Bundesministerium
des Innern, für Bau
und Heimat

ZUKUNFT BAU
RESSORTFORSCHUNG

Ein Projekt des Innovationsprogramms Zukunft Bau des Bundesministeriums des Innern, für Bau und Heimat (BMI), betreut vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) mit dem Aktenzeichen SWD-10.08.17.7-19.43

Grußwort

© Schafgans DGPh



Liebe Leserinnen und Leser,

der Gebäudesektor ist für rund 40 % des Endenergieverbrauchs und 14 % der CO₂-Emissionen in Deutschland unmittelbar verantwortlich. Hinzu kommen indirekte Emissionen, die beispielsweise bei der Produktion von Baustoffen und Bauteilen anfallen. Ein Weg, um den CO₂-Ausstoß und den Energieverbrauch von Gebäuden zu senken und dabei den Gebäudekomfort zu erhöhen, ist der Einsatz von Gebäudetechnik. BBSR-Forschungsprojekte und die Erfahrungen im Bundesbau zeigen jedoch, dass die Wirksamkeit ausschließlich technikzentrierter Effizienzstrategien in zunehmendem Maße infrage gestellt wird.

Der Faktor Mensch wird bei technikzentrierten Effizienzstrategien oft zu wenig berücksichtigt. Eine zunehmende und komplexer werdende Gebäudetechnik stellt viele Nutzer und Gebäudebetreiber vor Probleme. Ein möglicher Weg besteht darin, die verbaute Technik auf das unbedingt notwendige Maß zu reduzieren und bauliche Lösungen zu bevorzugen. Eine robuste, einfach zu bedienende Klimatisierung von Gebäuden sowie die Einbindung der an der Nutzung und dem Betrieb beteiligten Akteure in den Planungsprozess und den Gebäudebetrieb helfen, nicht intendierte Wirkungen von Effizienzmaßnahmen zu reduzieren. So ist es übrigens auch im energetischen Pflichtenheft des Leitfadens „Nachhaltiges Bauen“ formuliert, der für den Bund verbindlich ist.

Am 17. Mai 2019 diskutierten wir auf dem Symposium „Lowtech im Gebäudebereich“ alternative Lösungen für den Einsatz von Klimatechnik aus dem Blickwinkel von Architektur, Ingenieurwissenschaften, Ökonomie, Medizin und Technikphilosophie. Ich freue mich, dass wir Ihnen mit dieser Veröffentlichung die Erkenntnisse der Veranstaltung vorlegen können. Die hohe Zahl der Teilnehmenden unterstreicht, dass das Thema in Wissenschaft und Praxis inzwischen als wichtig wahrgenommen wird. Danken möchte ich insbesondere der Architektur-Fakultät der TU Berlin sowie der Architektenkammer Berlin, mit denen wir die Veranstaltung ausrichteten.

Auch wir als Forschungseinrichtung haben viele Erkenntnisse aus der Veranstaltung mitgenommen. Die BBSR-Studien „Nutzerkomfort durch Lowtech-Konzepte in Gebäuden“ und „Robuste, nutzerfreundliche und kostengünstige TGA in Gebäuden“ knüpfen thematisch an die Veranstaltung an. Die Ergebnisse der Studien werden im Frühjahr 2021 vorliegen.

Ich wünsche Ihnen eine interessante Lektüre.



Dr. Markus Eltges

Leiter des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR), Bonn

Inhalt

Grußwort	5
Lowtech Symposium	8
Hintergrund	8
Symposium	8
Fazit	10
Beiträge zum Thema „Lowtech im Gebäudebereich“	12
Die Folgen technikzentrierter Effizienzstrategien – Tilman Santarius	12
Gesundheitliche Aspekte von Gebäudetechnik und Architektur – Walter J. Hugentobler	24
Robuste Architektur – Thomas Auer/Laura Franke	40
Feasibility of the “22/26” Building under varying construction, occupancy and climatic conditions – Lars Junghans	54
Discussion of the “22/26” Technology – Lars Junghans	66
Hightech versus Lowtech oder einfach nur robust? – Elisabeth Endres	74
Weniger Technik – mehr Gesundheit. Die Natur macht’s! Lowtech im Gebäudebereich – Andrea Klinge	82
Interaktion statt Automation: Mehr Energieeffizienz durch nutzerzentrierte Betriebsführung von Gebäuden – Viktor Grinewitschus	98
Anhang	106
Autorinnen/Autoren	106
Abbildungsverzeichnis	110
Literaturhinweise des Herausgebers	114
Impressum	119

Lowtech im Gebäudebereich

Fachsymposium TU Berlin

17.5.2019

Hintergrund

Der voranschreitende Klimawandel und die sich rasch verringernenden Ressourcen erfordern grundlegende Änderungen menschlichen Handelns. Anders ist das 1,5-Grad-Ziel des Pariser Klimaabkommens nicht erreichbar. Gleichwohl sind Änderungen im menschlichen Handeln, trotz der bereits heute spürbaren Konsequenzen, kaum zu erkennen. Gemäß dem CO₂-Rechner des Umweltbundesamtes verursachen die Deutschen im Mittel immer noch zehnmal so viel CO₂-Äquivalent, wie sie sollten, um die planetaren Belastungsgrenzen nicht zu überschreiten.

Einer der wesentlichen Emittenten von CO₂ ist der Gebäudesektor. Weltweit ist er – je nach Betrachtungshorizont und Studie – für rund 30 bis 50 % des globalen CO₂-Ausstoßes verantwortlich. Deutschland versuchte bereits frühzeitig, den Energiebedarf von Gebäuden zu begrenzen. Die hinter uns liegenden Dekaden waren maßgeblich von den Fragen der Qualität der thermischen Gebäudehülle sowie des Energieverbrauchs zur Beheizung von Gebäuden und dem dazu erforderlichen Primärenergiebedarf geprägt. Infolgedessen stiegen und steigen die energie- und klimapolitischen Anforderungen an unsere Gebäude. Parallel dazu wachsen aber auch die Komfortansprüche der Gebäudenutzer.

Ein häufiger Ansatz, um alle bestehenden Anforderungen an unsere Gebäude zu erfüllen, ist ein erhöhter Technisierungsgrad. Dieser führt allerdings wiederum zu einem höheren Fehlerrisiko; durch die Technik einerseits und durch das Nutzerverhalten andererseits. Zunehmend gibt es daher einen Diskurs über den angemessenen Technikeinsatz und alternative Lösungen zur Realisierung zukunftsfähiger Gebäude.

Symposium

Das vom BBSR und der TU Berlin gemeinsam durchgeführte Symposium mit dem Titel „Lowtech im Gebäudebereich“ hat am 17. Mai 2019 die heute gebräuchlichen, technikzentrierten Effizienzstrategien im Bereich von Gebäuden kritisch diskutiert. Dafür wurde die derzeitige Situation aus unterschiedlichen Perspektiven betrachtet und mögliche alternative Lösungswege skizziert.

Die unerwartet hohe Anzahl von Anmeldungen für diese Veranstaltung und der aktuelle fachliche, öffentliche und politische Diskurs zur Energieeffizienz im Gebäudebereich zeigen, dass die Wirksamkeit ausschließlich technikzentrierter Effizienzstrategien in zunehmendem Maße infrage gestellt wird. Die Technisierung von Gebäuden führt dazu, dass Wirkung und Funktion moderner gebäudetechnischer Systeme immer schwieriger zu erfassen sind. So sind die Zusammenhänge zwischen der Regulierung des Innenraumklimas, dem Energieverbrauch und den daraus entstehenden Energiekosten weitgehend intransparent geworden. Gleichzeitig steigt aber die Erwartungshaltung an die Gebäudeperformance. Diese Probleme im Umgang mit modernen, hoch technisierten Gebäuden betreffen nicht nur den Nutzer, sondern gleichermaßen die Architekten, die Fachplaner und den Gebäudebetrieb.

Rebound-Effekte, wie Sie Tilmann Santarius in seinem Beitrag für diese Broschüre beschreibt, führen dazu, dass die angestrebten theoretischen Einsparungen durchgeführter Maßnahmen zur Effizienzsteigerung nicht erreicht werden. Für Gebäude bedeutet dies, dass sie häufig bedeutend höhere Energieverbräuche aufweisen, als es die Zielwerte der Planung vorgeben. Verschiedene aktuelle Studien wie zum Beispiel von der Technischen Universität München belegen in diesem Kontext, dass eine wachsende Technisierung von Gebäuden zu einem erhöhten Fehlerrisiko führt und der hohe technische Aufwand nicht die gewünschte Einsparung erzielt oder gar höher liegt als bei weniger technisierten Gebäuden. So plädieren Thomas Auer und Laura Franke für einen möglichst geringen Einsatz von Technik, die zudem langlebig und robust sein sollte.

Einen vergleichbaren Ansatz verfolgt das Ingenieurbüro Hausladen. So hat Gerhard Hausladen mit seinem Fachgebiet Bauklimatik und Haustechnik und dem Studiengang Klimadesign an der Technischen Universität München viele Jahre zu diesen Themen gearbeitet und setzt diese auch mit seinem Büro konsequent um. Das Ingenieurbüro Hausladen mit Elisabeth Endres hat das BBR im Hinblick auf eine Lowtech-Strategie für den Erweiterungsbau des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) beraten. Die Autorin fragt in ihrem Beitrag zu dieser Broschüre nach dem „Wie wenig ist genug?“.

Das Projekt „22/26“ von Baumschlager Eberle in Lustenau, Österreich, gilt als wichtiges Referenzprojekt im Bereich der Lowtech-Architektur. Es verzichtet gänzlich auf ein Heizsystem sowie Lüftungstechnik und steuert die Fensterlüftung über motorisch betriebene Öffnungsflügel. Lars Junghans war federführend an der Erarbeitung des Energiekonzepts beteiligt und stellt in seinen beiden Beiträgen die Grundprinzipien sowie mögliche Variationen des Konzepts vor.

Nahezu luftdichte Gebäudehüllen erfordern heute eine zunehmende mechanische Belüftung von Gebäuden, um die notwendige Raumlufthygiene zu erreichen. In der Folge kommt heute kaum ein neues Gebäude ohne mehr oder weniger automatisierte Lüftungstechnik aus. Menschliches Empfinden und die sich daraus ergebenden Bedarfe ans Raumklima sind aber sehr divers. Dies führt bei zunehmend automatisierten Gebäuden zu einer Unzufriedenheit der Nutzer und einem Verhalten, das dem intendierten Nutzen der Technik häufig entgegensteht. So beginnt der Nutzer, die Fenster in mechanisch belüfteten Gebäuden im Winter zu öffnen, und versucht in die Technik bzw. deren Steuerung einzugreifen. Parallel dazu steigt auch die Erwartungshaltung an Technik, was ihre eigentliche Funktion wie Energie- und Kosteneffizienz oder die Minimierung von Umweltfolgen zunehmend in den Hintergrund treten lässt. Ein Phänomen, das Andreas Kaminski aus technikphilosophischer Sicht in seinem Vortrag zum Symposium beschrieben hat.

Ein weiterer wichtiger Aspekt in diesem Zusammenhang ist die Raumluftheuchte und die sich daraus ergebenden Folgen für die Gesundheit. Bei hochdichten Gebäuden führt insbesondere die durch die Nutzung eingebrachte Feuchte oftmals zu kritischen Feuchteniveaus und Phänomenen wie Schimmelbildung. Dies ist ein wesentliches Argument für Lüftungstechnik und in konventionell errichteten Gebäuden kaum vermeidbar. Da die Nutzung von Räumen durch Menschen nur bedingt Standards folgt, werden Gebäude oftmals

FACHSYMPOSIUM
TU BERLIN 17.05.2019

09.00 Uhr Begrüßung und Einführung
Luther Fehn-Kraatz, Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI)
Markus Eltges, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
Hans-Ulrich Heiß, TU Berlin
Moderation: Helmut Krappmeier, Energiestitut Voralberg, Kunstuniversität Linz und FH Salzburg

09.30 Uhr Technikbegriff und Technikfolgen
Technik als Erwartung
Andreas Kaminski, High Performance Computing Center (HLRS) in Stuttgart
Folgen technikzentrierter Effizienzstrategien
Tilmann Santarius, TU Berlin
Diskussion

11.00 Uhr Technisierung im Gebäudebereich
Gesundheitliche Aspekte moderner Gebäudetechnik
Walter Hugentobler, Pensionierter Hausarzt
Einfach Lowtech
Thomas Auer, TU München
Diskussion

12.30 Uhr Mittagspause

14.00 Uhr Strategien im Umgang mit Technik in Gebäuden
Das Konzept 22/26 in Lustenau
Lars Junghans, University of Michigan
Robustes Bauen für den Bund – am Beispiel des Erweiterungsbaus BMU
Elisabeth Endres, Ingenieurbüro Hausladen GmbH, Kirchheim
Gesunde Gebäude aus Naturbaustoffen
Andrea Klinge, ZRS Architekten Ingenieure, Berlin
Interaktion statt Automation: Mehr Energieeffizienz durch nutzerzentrierte Betriebsführung von Gebäuden
Viktor Grinewitschus, EBZ Business School, Bochum

16.30 Uhr Kaffeepause mit Stimmungsbild

17.00 Uhr Diskussion

18.00 Uhr Get-together

LOW TECH
IM GEBÄUDEBEREICH



Abbildung 1:
Plakat Symposium

überlüftet und fallen in der Raumlufffeuchte unter die Sollwerte. So sind in mechanisch belüfteten Gebäuden Feuchten im Winter unter 30 % keine Seltenheit. Den daraus folgenden Problemen für die Gebäudenutzer widmet sich Walter Hugentobler in seinem Beitrag. So haben Scofield und Sterling bereits in den 1980er-Jahren nachgewiesen, dass zu geringe Luftfeuchten zu Virenwachstum, erhöhtem Grippeerisiko etc. führen. Dies ist auch durch aktuelle vergleichende Untersuchungen von mechanisch und natürlich belüfteten Gebäuden belegt. Die Reaktion der Lüftungsindustrie ist, das Problem mit technischer Befeuchtung der Raumluff zu verbessern und somit die Technisierung weiter zu erhöhen.

Andrea Klinge vom Büro ZRS setzt hingegen auf klimasteuernde Baumaterialien und diffusionsoffene Bauteile, um die Raumlufffeuchte stabil zu halten und auf Lüftungstechnik zu verzichten. Naturfaserdämmungen und Lehmteile führen darüber hinaus zu einem sehr guten sommerlichen Wärmeschutz.

Mit dem Titel „Interaktion statt Automation: Mehr Energieeffizienz durch nutzerzentrierte Betriebsführung von Gebäuden“ zeigt Viktor Grinewitschus in seinem Beitrag einen Lösungsweg im Umgang mit Technik, der den Techniknutzer in den Mittelpunkt stellt. Es gilt, nicht grundsätzlich auf Technik im Gebäudebereich zu verzichten, sondern die Technik stärker an den Bedürfnissen der Gebäudenutzer auszurichten. Das heißt sowohl Komplexitätsreduktion als auch Informationsdefizite im Umgang mit Technik zu vermeiden, was bspw. durch den gezielten Einsatz von intelligenten Feedbacksystemen geschehen kann, die den Techniknutzer stärker in den täglichen Gebäudebetrieb integrieren.

Dies sind nur wenige von unterschiedlichsten Ansätzen, um zu einem reduzierten Technikansatz zu gelangen. So ist der Begriff „Lowtech“ nicht eindeutig definiert und betrifft viele Felder der komplexen Planungs- und Rahmenbedingungen von Gebäuden. Gemeinhin kann Lowtech im Gebäudebereich als das Streben nach einem angemessenen Einsatz von Gebäudetechnik unter Zuhilfenahme eines ganzheitlichen Planungsansatzes gesehen werden. Im Ergebnis bedeutet dies, auf technische Lösungen zu verzichten, wenn wartungsfreie, bauliche Lösungen die gleichen Aufgaben übernehmen können. Dies gilt insbesondere für die Konzeption der thermischen Gebäudehülle, für das Lüftungskonzept und die Aktivierung von thermischen Speichermassen. Darüber hinaus sollte ein Lowtech-Konzept Anforderungen an die optimale Verortung und Zonierung der Raumnutzung – je nach Komfortanforderung, Himmelsrichtung oder baurechtlichen Gegebenheiten – stellen.

Fazit

Die Nutzung fossiler Ressourcen und die Entwicklung der Massenproduktion von Stahl, Glas und Stahlbeton haben dem Bauwesen immense Entwicklungspotenziale eröffnet. Sie waren im frühen 20. Jahrhundert Grundlage der Moderne und führten zum industriellen Bauen nach dem Zweiten Weltkrieg. Mit der Entwicklung von Gebäude- und Klimatechnik wurde es möglich, verglaste Türme in die Wüste oder an den Polarkreis zu stellen und mit den vermeintlich endlosen fossilen Ressourcen wie Öl, Kohle und Gas zu betreiben. Obwohl uns schon in den 1970er-Jahren bewusst wurde, dass mit den „Grenzen des Wachstums“ die fossilen Ressourcen endlich sind, wirkt das Denken der Moderne in aktuellen Gebäudekonzepten weiter. Spektakuläre Architekturen eines technisch Machbaren sind weiterhin ein wichtiger Maßstab der gebauten Umwelt, während Fragen der Angemessenheit, Bescheidenheit und Nachhaltigkeit häufig nicht der Gegenstand des Diskurses sind. Zukünftig wird es immer wichtiger werden, die einfachen Regeln des klimaangepassten Bauens zu befolgen. Erste

Städte lassen beispielsweise im öffentlichen Bauen einen Fensterflächenanteil von mehr als 60 % nicht mehr zu. Auch können Begrünungen zu positiven Effekten für das Gebäude- und das Stadtklima führen. Gemäß der RESCUE-Studie des Umweltbundesamtes spielen die Begrünung der Städte und der Waldumbau in Verbindung mit einer CO₂-Senke des Holzbaus eine wichtige Rolle, um bis 2050 die Klima- und Ressourcenwende zu bewältigen.

Darüber hinaus benötigen komplexe Bauaufgaben geeignete Expertise zum einfachen Bauen innerhalb inter- und transdisziplinärer Planungsteams. Dies kann zum Beispiel ein „Klimadesigner“ sein, der über Simulationen in die Gebäudekonzeption eingebunden wird. Während die Fragen der Energieeffizienz häufig zu einer Technikzentrierung geführt haben, sollten die vor uns liegenden Fragen der Ressourceneffizienz zu mehr Beachtung der klimatischen Rahmenbedingungen im Entwurf und der materiellen Konzeption klimasteuernder Materialien leiten. Wenn die Qualität der thermischen Gebäudehülle den Energiebedarf unserer Gebäude deutlich reduziert, bedarf es wesentlich weniger Technik und Ressourcen, um komfortable Aufenthaltsqualitäten im Gebäudeinneren sicherzustellen.

Schließlich sollte auch über die erwarteten Behaglichkeitsstandards gesprochen werden. „Der Nutzer muss im Sommer im Büro auch mal schwitzen dürfen, wenn er das mag“, sagt Thomas Auer in diesem Zusammenhang. Warum sollten wir im Sommer nicht höhere Temperaturen akzeptieren und warum kann man im Winter nicht 20 °C oder etwas weniger anbieten? Dies ist auch ein Gegenstand gängiger Konventionen und Gewohnheiten des Bekleidens, die hinterfragt werden müssen.

In jedem Falle muss Lowtech zusammen mit den drängenden Fragen der Nachhaltigkeit, der Ressourcenverknappung und dem Klimawandel gedacht werden. So sind ein Wandel des Lebensstils und des Konsumverhaltens notwendig, um ein Leben in den planetaren Grenzen zu ermöglichen.



Abbildung 2:
Schlussdiskussion

Autor:

Tilman Santarius

**Professur für Sozial-ökologische Transformation am Institut für
Berufliche Bildung und Arbeitslehre der Technischen Universität Berlin**

Die Folgen technikzentrierter Effizienzstrategien – Wirtschaftswachstum, Umweltverbrauch und die vielen Gesichter des Rebound-Effekts.¹

Abstract

Die weltweite Ressourcennachfrage wird immer größer. Viele Länder, darunter auch die Bundesrepublik, verfolgen daher seit vielen Jahren Politiken und Maßnahmen, um die Energie- und Ressourceneffizienz zu erhöhen. Denn wenn pro Wertschöpfungseinheit Ressourcen effizienter eingesetzt würden, so die allgemeine Logik, könnten insgesamt Ressourcen eingespart werden. Doch Effizienzsteigerungen gehen mit sogenannten Rebound-Effekten einher, die die Einsparpotenziale teilweise oder ganz zunichtemachen.

Der Rebound-Effekt ist mittlerweile ein gut erforschtes Phänomen. In den letzten zwei Jahrzehnten stieg die Zahl an Rebound-Veröffentlichungen steil an (für einen Überblick, siehe Santarius 2015a). In Deutschland hat unter anderem die Veröffentlichung des Endberichts der Enquete-Kommission Wachstum, Wohlstand, Lebensqualität im Jahr 2013 aufgezeigt, dass ein besseres Verständnis des Rebound-Effekts von zentraler Bedeutung für eine sozial-ökologische Transformation moderner Gesellschaften ist (vgl. Deutscher Bundestag 2013). Dennoch mangelt es nicht an heterogenen Einschätzungen über die quantitative Dimension des Effekts, und nach wie vor bestehen Forschungslücken. Am einen Ende des Spektrums wird konstatiert, „most of the economic growth of our Western civilization in the past 200 years stems from the rebound effect“ (Ayres/Warr 2009, S. 233). Auch andere Rebound-Forscher sind der Ansicht, Energieeffizienzsteigerungen würden regelmäßig dazu beitragen, dass die Energienachfrage in der Folge über das Ausgangsniveau hinaus ansteige – ein Phänomen, welches auch als Backfire bezeichnet wird (vgl. z. B. Brookes 1978, 1990; Saunders 1992, 2000a; u. a.). Demnach wäre es kein Zufall, dass die ökonomische Industrialisierung die größten Effizienzfortschritte seit Menschengedenken generiert und zugleich – bzw. deswegen – mit einer historisch einzigartigen Expansion der Energie-

¹ Dieser Beitrag ist eine aktualisierte und gekürzte Fassung von: Santarius, Tilman (2016): Die Grenzen der Ressourceneffizienz. Wie technische Produktivitätssteigerungen das Wachstum ankurbeln. In: Gesellschaft für Nachhaltigkeit/Institut für Nachhaltigkeit (Hrsg.): 5. Jahrbuch Nachhaltige Ökonomie. Im Brennpunkt: Ressourcenwende. Marburg, S. 123–146.

ansprüche einherging und weiterhin geht. Am anderen Ende des Meinungsspektrums wird behauptet, „the concept of a nontrivial rebound (...) is without basis in either theory or experience. It is, I believe, now widely accepted to be a fallacy (...)“ (Lovins 1988, S. 161; ähnlich auch Lovins 2011). Auch Autoren, die den Rebound-Effekt nicht prinzipiell leugnen, sind der Meinung, dass seine praktische Bedeutung eher gering sei (vgl. z. B. Schipper/Grubb 2000; Gillingham et al. 2013 u. a.). Gemäß dieser Sicht tragen Energieeffizienzsteigerungen nur unwesentlich zur wachsenden Energienachfrage moderner Gesellschaften bei.

Die folgenden Abschnitte liefern eine Typologie verschiedener Mechanismen, wie Rebound-Effekte entstehen können. Sie werden dabei allgemein definiert als effizienzbedingte Nachfragessteigerungen. Welche Mechanismen führen dazu, dass Effizienzsteigerungen zu einer Steigerung der Nachfrage und des Wirtschaftswachstums führen?

Finanzielle Rebound-Effekte

Bisher lassen sich zwei wirtschaftswissenschaftliche Forschungsstränge unterscheiden. In der Mikroökonomie werden Rebound-Effekte entlang des Zusammenhangs zwischen Effizienzsteigerungen und Energienachfrage auf der Ebene von Konsumenten und Haushalten diskutiert; in der Makroökonomie werden Rebound-Effekte entlang des Zusammenhangs zwischen Energieeffizienzsteigerungen, gesamtwirtschaftlichem Wachstum und Energieverbrauch untersucht.

Die mikroökonomische Rebound-Debatte wurde in den 1980er-Jahren von Khazzoom begonnen (vgl. Khazzoom 1980, 1987 u. a.). Nach einer technologischen Energieeffizienzsteigerung, so Khazzoom, stünde den Konsumenten im Vergleich zur vorherigen Situation mehr Einkommen zur Verfügung. Dieser Einkommenseffekt, so Khazzoom, könne zur Mehrnachfrage genutzt werden, um entweder die Nutzungsrate oder den Bestand oder den Komfort der effizienteren Güter zu steigern; beides wird heute auch als „direkter Rebound-Effekt“ bezeichnet. Ferner können Konsumentinnen und Konsumenten das Geld, das sie einsparen, in den Erwerb anderer Güter und Dienstleistungen stecken, einschließlich der Anschaffung weiterer Effizienztechnologien zur Einsparung von Energie an anderer Stelle. Dann generieren sie sogenannte indirekte Rebound-Effekte, da die Produktion und Nutzung fast aller Güter und Dienstleistungen mit Energieverbrauch einhergeht. Zusätzlich zur Mehrnachfrage aufgrund von Einkommenseffekten durch Energieeffizienzsteigerungen können die reduzierten Kosten der Nutzung auch zu einer Substitution anderer Produkte und Dienstleistungen durch die effizienter gewordenen führen. Mit Substitutionseffekten kann auch dann gerechnet werden, wenn insgesamt kein Einkommenseffekt vorliegt. In der mikroökonomischen Forschung wird die Veränderung der Nachfrage nach einer Energiedienstleistung einzig und allein auf deren Preis zurückgeführt, weswegen diese Effekte hier „finanzielle Rebound-Effekte“ genannt werden.

In den vergangenen 30 Jahren wurden mehrere Dutzend empirischer Studien publiziert, die das quantitative Ausmaß dieser Rebound-Effekte mithilfe ökonomischer Modelle oder historischer Datenreihen berechnen. Die meisten beziehen sich auf Industrieländer. Sechs Meta-Studien haben eine Auswertung dieser Untersuchungen vorgenommen (vgl. Azevedo et al. 2012; Maxwell et al. 2011; Madlener/Alcott 2011; Jenkins et al. 2011; Sorrell 2007; Greening/Greene 1998). Mit Vorsicht lässt sich daraus extrapolieren, dass direkte Rebound-Effekte bei Endkonsumenten respektive privaten Haushalten im Durchschnitt in Industrieländern mit hoher Probabilität bei circa 25 % (vgl. Greening/Greene 1998) bzw. zwischen 10 und 30 % (vgl. Sorrell 2007) verortet werden können; das heißt, 10 bis 30 % der Ressourceneinsparungen durch Effizienzgewinne werden durch den Rebound-Effekt zunichtegemacht.

Hinzu kommen indirekte Rebound-Effekte durch den Konsum aller Arten anderer Güter. Zunächst lässt sich anhand einer Faustregel ein Mindestmaß indirekter Rebound-Effekte benennen: Wenn davon ausgegangen wird, dass der Konsum aller Arten von Gütern und Energiedienstleistungen aus dem restlichen, nach Abzug direkter Rebound-Effekte übrig

bleibenden realen Einkommensgewinn durch Effizienzmaßnahmen entsprechend dem allgemeinen Ausgabenportfolio privater Haushalte bestritten wird, dann entspricht die Höhe indirekter Rebound-Effekte in etwa dem Anteil der Energieausgaben an den Gesamtausgaben der privaten Haushalte. Dieser liegt im Durchschnitt der Industrieländer zwischen 5 und 10 % (vgl. Schipper/Grubb 2000; Sorrell 2007; Santarius 2014). Erste belastbare Untersuchungen zum indirekten Rebound gelangen aber zu dem Schluss, dass indirekte Rebound-Effekte die Höhe direkter Rebounds mitunter übersteigen können – mit erheblichen Schwankungen je nach Bedarfsfeld und Einkommensgruppe (so z. B. Druckman et al. 2011; Azevedo/Thomas 2013; Chitnis et al. 2013 und 2014; Lin/Liu 2015).

Volkswirtschaftliche Rebound-Effekte

Während die finanziellen Rebound-Effekte in den 1980er-Jahren Gegenstand grundsätzlicher (mikroökonomischer) Debatten waren, ist ihre Funktionsweise heute weitgehend unumstritten; lediglich die quantitative Größenordnung wird nach wie vor debattiert. Die Bedeutung des volkswirtschaftlichen Rebound-Effekts hingegen wird bis heute von einigen grundsätzlich infrage gestellt – wohl auch deshalb, weil seine Funktionsweise nach wie vor unzureichend erforscht ist. Im Folgenden wird der volkswirtschaftliche Rebound-Effekt als energieproduktivitätsbedingter Wachstumseffekt verstanden. Wirtschaftswachstum hat offensichtlich viele Ursachen, aber der Begriff „volkswirtschaftlicher Rebound-Effekt“ nimmt nur jenen Teil des Wirtschaftswachstums in den Blick, der auf die Steigerung der Energieeffizienz zurückzuführen ist. In Lehrbüchern der Makroökonomie und der Wachstumstheorie gilt es als weitgehend unstrittig, dass Steigerungen der Arbeits- und Kapitalproduktivität eine Volkswirtschaft fitter machen und Wachstumsimpulse auslösen. Ob und wie dieser Zusammenhang auch für Steigerungen der Energieproduktivität einer Wirtschaft – sprich: der Effizienzsteigerung des Produktionsfaktors Energie – gilt, ist Gegenstand der makroökonomischen Rebound-Forschung.

Der Zusammenhang zwischen Energieeffizienzsteigerungen und Wirtschaftswachstum wurde bereits 1865 von William Stanley Jevons entdeckt (vgl. Jevons 1906), der auch als Begründer der Rebound-Forschung gilt, und in der neueren energiewirtschaftlichen Diskussion von Leonard Brookes (1978; 1990; 2000) als Erstem explizit formuliert. Ansätze einer Theorie volkswirtschaftlicher Rebound-Effekte werden seit den 1990er-Jahren vor allem von Harry Saunders entwickelt (vgl. z. B. Saunders 1992; 2000a; 2000b; 2008 u. a.). Die Debatte von Brookes über Saunders bis zu heutigen ökonometrischen Erkenntnissen volkswirtschaftlicher Rebound-Effekte wurde vor allem von Steve Sorrell und anderen strukturiert (vgl. Sorrell 2007, 2010; Sorrell/Dimitropoulos 2007, 2008; Broadstock et al. 2007).

Auch bei der Betrachtung volkswirtschaftlicher Rebound-Effekte stehen Elastizitäten im Mittelpunkt der wirtschaftswissenschaftlichen Analyse. Allerdings wird hier die Wechselwirkung von Energieeffizienz mit den Produktionsfaktoren Arbeit, Kapital und weiteren Faktoren, zum Beispiel Material, untersucht. Saunders (2000) wie auch Birol und Keppler (2000) haben das allgemeine Theorem entwickelt: Je größer die Substitutionselastizität zwischen den Produktionsfaktoren – genauer: die Energieelastizität der Substitution –, desto größer die Rebound-Effekte. Daraus lässt sich der scheinbar kontraintuitive Schluss ableiten: Je besser Energie durch Kapital ersetzt werden kann – und genau dies würde im Rahmen einer groß angelegten Effizienzrevolution geschehen –, desto größer fallen volkswirtschaftliche Rebound-Effekte aus. Allerdings muss die Allgemeingültigkeit dieses Theorems infrage gestellt werden. So meint Howard (1997), dass faktisch eher von geringen Substitutionselastizitäten (zwischen 0 und 1) ausgegangen werden sollte, nicht von einer hohen Elastizität (zwischen 1 oder > 1); dies würde den Fall von Backfire, also einem Anstieg des Energieverbrauchs über das Ausgangsniveau hinaus, ausschließen. Doch aus einer umfassenden Meta-Analyse empirischer (und theoretischer) Studien konnten Broadstock, Hunt und Sorrell (2007) keine belastbaren Aussagen über die Höhe der Energieelastizität der Substitution ziehen: „The most striking result from the analysis is the lack

of consensus that has been achieved to date, despite three decades of empirical work. (...) If a general conclusion can be drawn, it is that energy and capital typically appear to be either complements (...) or weak substitutes." (Broadstock et al. 2007, S. 51).

Zudem wäre es reduktionistisch, Substitutionselastizitäten isoliert von Produktionselastizitäten („output elasticities“) zu betrachten. Denn die Energieelastizität der Substitution hängt auch davon ab, wie stark die durch eine Effizienzsteigerung reduzierten Produktionskosten eines Guts die gesamtwirtschaftliche Nachfrage nach diesem Gut beeinflusst; mit anderen Worten, wie hoch die Produktionselastizitäten sind. Die Produktionselastizität gibt an, wie stark sich der Output einer Volkswirtschaft verändert, wenn der Einsatz eines Produktionsfaktors verändert wird. Mitunter wird anstelle des Begriffs „Produktionselastizität“ auch der anschaulichere Begriff „Produktionsmächtigkeit“ (z. B. Lindenberger et al. 2001) verwandt, es könnte – noch deutlicher – auch von ‚Wachstumsmächtigkeit‘ gesprochen werden. Und da wiederum die Summe des gesamtwirtschaftlichen Wachstums nach einer Energieeffizienzsteigerung maßgeblich die Höhe möglicher Rebound-Effekte beeinflusst, kann daraus das Theorem abgeleitet werden: je größer die Produktionsmächtigkeit des Produktionsfaktors Energie, desto größer die Rebound-Effekte. Doch auch hier liegen extrem unterschiedliche Einschätzungen über die tatsächliche Größe der Produktionsmächtigkeit des Faktors Energie vor (detaillierter Santarius 2015a).

Die ernüchternde Schlussfolgerung aus drei Jahrzehnten makroökonomischer Rebound-Forschung lautet: Die theoretische Ökonomie kann bisher keine verlässlichen Aussagen über das Austauschverhältnis von Kapital und Energie treffen. Mit wechselnden Annahmen werden stark unterschiedliche, zum Teil gegensätzliche Ergebnisse erzielt. Dieses Zwischenfazit legt nahe, dass auch Ergebnisse aus ökonometrischen Modellrechnungen zur Quantifizierung volkswirtschaftlicher Rebound-Effekte daher zwangsläufig stark gefärbt sind, da genau die oben diskutierten, offenen Annahmen in jedem Modell zuvor festgelegt werden müssen. So wundert es nicht, dass die derzeit veröffentlichten Modellierungen volkswirtschaftlicher Rebound-Effekte zu äußerst heterogenen Ergebnissen gelangen.

Industrielle Rebound-Effekte

Neben der mikroökonomischen Betrachtung konsumentenseitiger Rebounds und der makroökonomischen Diskussion volkswirtschaftlicher Rebounds werden diese Effekte auch seitens Unternehmen und in Industriesektoren hervorgerufen. Sie können als industrielle Rebound-Effekte auf der Meso-Ebene bezeichnet werden (siehe Santarius 2016). Es lassen sich vier Gründe identifizieren, warum Unternehmen aufgrund einer Energieeffizienzsteigerung ihre Nachfrage nach Energie steigern können, sodass das theoretische Einsparpotenzial entweder nicht voll erzielt wird oder die Nachfrage gar über das Ausgangsniveau ansteigt (Backfire). Erstens erfordert schon die Produktion energieeffizienterer Technologien eine Energienachfrage, die sonst nicht angefallen wäre. Diese wird in Form von grauer Energie (embedded energy) sichtbar und lässt sich mithilfe von Life-Cycle-Analysen bestimmen. Zweitens kann ein Unternehmen den zusätzlichen Profit, den es aufgrund einer effizienzsteigernden Maßnahme durch Kostensenkungen realisiert hat, in eine Ausweitung der Produktion des gleichen Gutes investieren, was einem direkten Rebound-Effekt in Form einer Expansion der Produktion gleichkommt. Drittens kann ein Unternehmen die erhöhten Profite zur Investition in neue Produkte und Dienstleistungen verwenden, was einem indirekten Rebound in Form einer Diversifizierung der Produktpalette gleichkommt (siehe auch Sorrell 2007; Jenkins et al. 2011).

Neben diesen Effekten, die Spielarten des Einkommens- und Substitutionseffekts auf Produzentenseite darstellen, können Unternehmen viertens einen Rebound-Effekt generieren, wenn sie aufgrund erwarteter Kosteneinsparungen beim Konsumenten in ein Re-Designing des herkömmlichen Produkts investieren, etwa um dieses komfortabler zu machen (siehe Santarius 2012). In diesem Fall handeln Unternehmen dann nicht in Reaktion auf ei-

nen produktionsseitigen Effekt, sondern in Erwartung eines konsumtionsseitigen Einkommenseffekts; genauer: Durch ein Re-Designing des Produkts schöpfen sie den erwarteten Einkommenseffekt auf Konsumentenseite ex ante ab. Beispielsweise wurden Effizienzsteigerungen in der Motorentechnologie in der Vergangenheit selten genutzt, um verbrauchsärmere Pkws anzubieten, sondern um bei gleichem Verbrauch pro Fahrzeugkilometer leistungsstärkere, schnellere und schwere Autos auf den Markt zu bringen. Darüber hinaus können industrielle Rebound-Effekte durch Marktpreiseffekte generiert werden, wenn zahlreiche einzelne Akteure eines Marktes kollektiv handeln (siehe ausführlicher Santarius 2016).

Bisher räumen von theoretischer Seite lediglich zwei Studien industriellen Rebound-Effekten einen eigenen Stellenwert ein (vgl. Sorrell 2007; Jenkins et al. 2011). Dem mageren Forschungsstand auf theoretischer Seite steht nur eine geringfügig befriedigendere Forschungslage auf empirischer Seite gegenüber. Bentzen (2004), Saunders (2013) und Lin/Li (2014) berechnen produktionsseitige direkte Rebounds nicht auf Firmenebene, sondern aggregiert für Industriesektoren. Mittels Zeitreihendaten kalkuliert Bentzen für das gesamte produzierende Gewerbe der USA über die Jahre 1949 bis 1999 durchschnittlich einen Rebound-Effekt von 24 %. Lin und Li berechnen einen Rebound-Effekt von 74 % für die Schwerindustrie in China anhand des Substitutionseffekts, unter Berücksichtigung asymmetrischer Elastizitäten (vgl. Lin/Li 2014). Saunders disaggregiert das US-amerikanische produzierende Gewerbe in 30 Sektoren. Wenn nur die direkte Wirkung von Energieeffizienzsteigerungen berücksichtigt wird, betragen die Rebounds im Durchschnitt aller Sektoren 120 % zwischen 1981 und 1990 sowie 60 % zwischen 1991 und 2000. Allerdings stechen einige Sektoren, vor allem die Stromerzeugung, besonders heraus; in den meisten Sektoren liegen die Effekte zwischen 30 und 60 %. Wenn allerdings auch Produktivitätssteigerungen der Faktoren Arbeit und Kapital in ihren Wirkungen auf die Energienachfrage berücksichtigt werden, dann betragen sie im Durchschnitt 649 % zwischen 1981 und 1990 sowie 172 % zwischen 1991 und 2000 (vgl. Saunders 2013). Ferner liegen für den Verkehrssektor neben diversen empirischen Untersuchungen auf Konsumentenseite auch einige wenige Untersuchungen für den Güterverkehr vor, die produktionsseitige Rebound-Effekte repräsentieren. Die empirischen Ergebnisse direkter Rebound-Effekte im Güterverkehr liegen zwischen 30 und 80 % (siehe Gately 1990; Graham/Glaister 2002; Anson/Turner 2009), also deutlich über dem Mittelwert konsumentenseitiger direkter Rebounds im Verkehrsbereich, die zwischen 1 und 30 % veranschlagt werden können (vgl. Sorrell 2007).

Motivationale Rebound-Effekte

Effizienzsteigerungen können nicht nur die technischen Eigenschaften eines Produkts sowie die Anschaffungs- und Nutzungskosten verändern, sondern auch dessen symbolischen oder gesellschaftlichen Wert. Und wenn sich der symbolische Wert von Produkten ändert, können sich wiederum die Präferenzen von Konsumenten ändern, diese zu nutzen. So können motivationale (oder „psychologische“) Rebound-Effekte entstehen, wenn technische Effizienzsteigerungen die Nutzungspräferenzen von Konsumenten bzw. – ökonomisch gesprochen – die Elastizitäten der Nutzer verändern. Beispielsweise könnten effizientere Produkte stärker nachgefragt werden als ihre konventionellen Vorgänger, weil sie keiner oder einer geringeren gesellschaftlichen Stigmatisierung unterliegen. Daher legt eine Berücksichtigung psychologischer Rebound-Effekte die Vermutung nahe, dass mikroökonomische Berechnungen das Ausmaß möglicher Rebound-Effekte auch unterschätzen könnten.

Die Erforschung motivationaler Rebound-Effekte auf der Basis eines elaborierteren Verständnisses menschlichen Verhaltens steckt noch in den Kinderschuhen. Girod und de Haan (2009), Paech (2011) sowie Otto, Kaiser und Arnold (2014) liefern erste Annäherungen an das Thema. Peters et al. (2012) zeigen mit einer Auswertung von Fokusgruppen zum Rebound-Effekt entlang der Theorie des geplanten Verhaltens und des Norm-Aktivierungs-Modells, wie Effizienzsteigerungen die Problemwahrnehmung, die emotionale und affektive Bewertung von Technologien, die sozialen Normen oder individuelle normative

Einstellungen von Konsumenten verändern können – wobei es in den meisten Fällen plausibler erscheint, dass Effizienzsteigerungen eine Zunahme und nicht eine Reduktion der Ressourcennutzung bedingen.

Santarius und Soland (2016) haben ein theoretisches Modell zur Konzeptualisierung motivationaler Effekte entwickelt, auf dessen Basis sich fünf verschiedene Formen motivationaler Verhaltenseffekte differenzieren lassen:

1. der „Effekt verringerter Konsequenzen“. Dieser entsteht, wenn der Erwerb einer energieeffizienten Technologie zu einer intensiveren Nutzung dieser Technologie führt, weil eine Neubewertung der Verhaltensmotivation zu dem Ergebnis gekommen ist, dass sich die Verhaltenskontrolle der Nutzung der Technologie vergrößert, persönliche/externe Nachteile aus der Nutzung verringert oder persönliche/externe Vorteile vergrößert haben. Die Effizienzsteigerung hat hier dazu geführt, dass sich die Einstellung („Attitude“) gegenüber der Nutzung der Technologie verändert hat;
2. der „Effekt der Diffusion von Verantwortlichkeit“. Dieser entsteht, wenn sich das Gefühl der Verantwortung bei der Nutzung einer Technologie verändert. Der Erwerb einer energieeffizienten Technologie führt dann zu einer intensiveren Nutzung dieser Technologie, wenn eine geringere Verantwortlichkeit bei der Nutzung der Technologie empfunden wird, da andere Akteure sich des Problems annehmen oder einen Teil der eigenen Verantwortlichkeit schultern. Beispielsweise könnte davon ausgegangen werden, dass die Ingenieure die Verantwortung tragen, noch effizientere Technologien zu entwickeln, oder Politikerinnen und Politiker verantwortlich seien, Effizienzstandards anzuheben. Jedenfalls kann durch den Kauf einer Effizienztechnologie das Gefühl der eigenen Verantwortung sozusagen auf andere Akteure überwältigt werden;
3. der „Effekt der moralischen Rechtfertigung“. Dieser kann bei Personen entstehen, denen die moralische Balance aus der Summe all ihrer Handlungen wichtig ist. Der Erwerb einer energieeffizienten Technologie kann dann zu einer intensiveren Nutzung dieser Technologie führen, wenn die Effizienzsteigerung die intensivere Nutzung nun moralisch rechtfertigt. Frei nach dem Motto: Jetzt habe ich ein energiesparendes Auto erworben, und nun darf ich damit auch weniger achtsam fahren. Interessanterweise konnte die Mikroökonomie bisher nicht erklären, ob und wieso der Erwerb einer effizienten Technologie möglicherweise auch zu negativen Rebound-Effekten führen – also das Niveau der Energienachfrage über das technische Einsparpotenzial hinaus senken – kann. Dies kann im Rahmen eines simplen Rational-Choice-Modells nicht erklärt werden, da jeder Einkommensgewinn oder jede veränderte Preisrelation für eine Mehrnachfrage genutzt wird. Das Modell von Santarius (2015) indessen schlägt zwei Erklärungsansätze vor, wie effiziente Technik die Handlungsmotivation in Richtung suffizienter Verhaltensweisen prägt. Diese Effekte werden positive ökologische Verhaltenseffekte genannt. So kann
4. der „Effekt sozialen Lernens“ entstehen. Hierbei führen der Erwerb einer energieeffizienten Technologie und zugleich die Beobachtung der erfolgreichen Nutzung dieser Technologie durch andere Akteure zu einer extensiveren Nutzung, weil eine Neubewertung der Verhaltensmotivation zu dem Ergebnis gekommen ist, dass nun eine größere Verhaltenskontrolle bzw. Handlungskompetenz für die suffiziente Nutzung dieser Technologie besteht. Beispiele lassen sich bei Personen finden, die in effiziente Technik investieren und zugleich bzw. damit einhergehend einen Anreiz empfinden, persönliche Energiesparrekorde aufzustellen. Und
5. es kann zu einem „Effekt gesteigerter moralischer Ansprüche“ kommen. In dem Fall kommt es zu einer verringerten Nutzung, weil der Erwerb der effizienten Technik dazu geführt hat, dass die eigenen moralischen Ansprüche gestiegen sind und negative Konsequenzen aus oder moralische Zweifel an der Nutzung der Technologie nun stärker wahrgenommen bzw. höher eingeschätzt werden (ausführlich siehe Santarius 2015a, S. 87 ff.).

Zeit-Rebound-Effekte

Die Forschung zu strukturellen Rebound-Effekten (vgl. Santarius 2015a) nimmt in den Blick, dass Energieeffizienzsteigerungen zu einer Veränderung gesellschaftlicher Zeit-Raum-Kategorien beitragen und darüber eine radikale Beschleunigung des sozialen und ökonomischen Lebens hervorrufen können, in deren Folge dann der gesamtgesellschaftliche Energieverbrauch ansteigt.

Binswanger (2001) und Jalas (2002) waren die Ersten, die die Kategorie Zeit systematisch in die Rebound-Diskussion eingeführt haben. Beide gründen ihre Erklärungsansätze auf die mikroökonomische Theory of the Allocation of Time nach Becker, in der der Faktor Zeit neben physischen Ressourcen („raw materials“), Kapital und Arbeit als ein äquivalenter Produktionsfaktor in der Produktionsfunktion von Haushalten behandelt wird. Aufbauend darauf stellt Binswanger das zentrale Postulat auf, Rebound-Effekte würden umso höher ausfallen, je knapper sich Zeit als Produktionsfaktor darstelle.

Die Entstehung von Zeit-Rebound-Effekten lässt sich zum einen auf der individuellen Handlungsebene beschreiben: Konsumenten „sparen“ Zeit bzw. führen mithilfe von zeitoptimierenden Technologien bestimmte Handlungen schneller durch, und in der frei gewordenen Zeit können sie nun weitere Aktivitäten durchführen. Ein Beispiel liefert die Erfindung der Waschmaschine: Sie hat den erforderlichen Zeitaufwand für das Waschen von Wäsche radikal verkürzt, mit dem Ergebnis, dass seitdem viel mehr Wäsche gewaschen wird. Es gibt zahlreiche Beispiele, heute vor allem aus dem Bereich der Informations- und Kommunikationstechnologien, wie effiziente Techniken zu einer Zeitersparnis und in der Folge dann zu vermehrten Aktivitäten, sprich: einer Beschleunigung des Lebenstempos beigetragen haben – oft mit einem gleichzeitigen Anwachsen des Energieverbrauchs, weil ein erhöhtes Aktionsniveau mit wachsender Stromnachfrage oder Mobilität einhergehen kann.

Zeit-Rebound-Effekte lassen sich auch auf der gesamtgesellschaftlichen Ebene als Zusammenhang zwischen steigender Energieeffizienz, der sozialen Beschleunigung und der Energienachfrage beschreiben und beispielhaft an der Geschichte des Transportwesens und der Kommunikation studieren. Es ist bereits weitläufig dokumentiert worden, wie diverse technologische Revolutionen des Reisens – von der Einführung der Eisenbahn über das Automobil bis zum Flugzeug – nicht nur zu einer Beschleunigung der Mobilität, sondern auch zu einer quantitativen Zunahme geführt haben (siehe z.B. Schivelbusch 1977; Harvey 1989; Fouquet 2008). Zweifellos hat diese technologische Beschleunigung der Mobilität wenn nicht immer einen unmittelbaren, so doch stets einen mittelbaren Einfluss auf die soziale Beschleunigung geübt, sprich: auf die Beschleunigung des Lebenstempos und gegebenenfalls auch des sozialen Wandels. Fouquet pointiert dies in der griffigen Aussage: „Each time transport services were revolutionized, becoming cheaper and faster, life and work was transformed“ (Fouquet 2008, S. 190). Allerdings sollte von einem simplen technologischen Determinismus abgesehen werden: Nicht die Erfindungen bzw. Effizienzsteigerungen der Transportmaschinen selbst, sondern die durch die Technologien angestoßenen institutionellen und strukturellen Veränderungen der Gesellschaft haben das Leben und die Gesellschaft beschleunigt (vgl. Rosa 2012). An institutionellen Veränderungen ist besonders hervorzuheben, dass sich in der Folge der durch Technologien eröffneten neuen Möglichkeiten die allgemeine Wahrnehmung der Kategorien Raum und Zeit grundständig verändert haben. Der viel zitierte Topos der „Vernichtung von Raum und Zeit“ („annihilation of space and time“) (Schivelbusch 1977, S. 16) war die Folge, wobei es institutionell genau genommen zu einer „time-space compression“ (Harvey 1989, S. 240 ff.), also einer Verdichtung der Zeit- und Raumwahrnehmung kam.

Fazit

Dieser Überblicksbeitrag hat zunächst die wesentlichen Erkenntnisse der mikro- und makroökonomischen Rebound-Forschung zusammengefasst. Sodann hat er unter der Bezeichnung „industrielle Rebound-Effekte“ vorgeschlagen, producentenseitige Rebounds stärker in den Fokus der Forschung zu stellen. Als Äquivalent zum mittlerweile umfassenden Forschungsstand über konsumentenseitige, finanzielle Rebounds sollten in Zukunft theoretische wie auch empirische Erkenntnisse zu industriellen Rebounds gewonnen werden. Schließlich würde die in der Summe aus finanziellen und industriellen Rebounds wiederum eine validere Abschätzung gesamtwirtschaftlicher Rebound-Effekte – also der Summe von Rebounds aller Ebenen – erlauben. Dabei wurde auch aufgezeigt, dass es Wechselwirkungen zwischen konsumenten- und producentenseitigen Rebounds geben kann, aus denen sich Kaskadeneffekte und Feedbackschleifen ergeben.

Aufbauend auf ökonomischer Rebound-Forschung hat der Beitrag sodann aufgezeigt, wie eine interdisziplinäre Betrachtung von Handlungslogiken und Verhaltensmotivationen den wirtschaftswissenschaftlichen Diskurs über Preis- und Substitutionselastizitäten qualifizieren könnte. Einerseits wurde eine psychologische Rebound-Theorie skizziert, die die Erklärungsansätze aus der Mikroökonomie aufgreift, aber durch weitere und umfassendere Erklärungsansätze auf der Grundlage verhaltenswissenschaftlicher Theorien erweitert und durch mehrere „motivationale Rebound-Effekte“ ergänzt. Andererseits wurde eine soziologische Rebound-Theorie begonnen, die als Replik auf die Eindimensionalität und Strukturblindheit bisheriger makroökonomischer Rebound-Forschung reagiert und aufzeigt, dass Energieeffizienzsteigerungen grundlegende Auswirkungen auf soziale Strukturen und Institutionen haben können, die ebenfalls zu einer erhöhten Energienachfrage führen können. Am Beispiel der Geschichte der Effizienzsteigerungen in der Transport-Technologie wurde gezeigt, wie „Zeit-Rebound-Effekte“ als Motor der Beschleunigungsspirale in der modernen Gesellschaft wirken können.

Die verschiedenen Funktionsmechanismen und Wirkweisen des Rebound-Phänomens zeigen die Grenzen der Strategie der Ressourceneffizienz auf. Zwar deutet die oben stehende Analyse nicht darauf hin, dass Backfire – also ein effizienzbedingtes Anwachsen der Nachfrage über das Ausgangsniveau hinaus – die Norm darstellt. Ressourceneffizienzsteigerungen können aus ökologischer Sicht also durchaus Sinn machen. Doch alleine die grobe Größenordnung der mikro- und makroökonomischen Berechnungen von Rebound-Effekten, die langfristig und in Summe mit mindestens 50 % veranschlagt werden können, legt die Schlussfolgerungen nahe, dass eine hinreichende absolute Reduktion der Energieansprüche moderner Gesellschaften nicht mit einer Effizienzstrategie alleine erreicht werden kann. Mehr noch, wird beispielsweise das Nachhaltigkeitsziel, den Primärenergieverbrauch in Ländern wie Deutschland gegenüber dem Stand von heute bis (spätestens) zum Jahr 2050 um etwa die Hälfte zu senken, durch eine Effizienzstrategie konterkariert. Daher müssen die hier aufgezeigten blinden Flecken in der Rebound-Forschung dringend geschlossen werden, um ein besseres Verständnis von Rebound-Effekten aller Arten für Forschung und Umsetzung einer sozial-ökologischen Gesellschafts-Transformation zu gewinnen.

Referenzen

Anson, Sam/Turner, Karen (2009): Rebound and disinvestment effects in oil consumption and supply resulting from an increase in energy efficiency in the Scottish commercial transport sector. Strathclyde Discussion Papers in Economics, Nr. 09–01. Glasgow: University of Strathclyde.

Ayres, Robert U./Warr, Benjamin (2009): The Economic Growth Engine. How Energy and Work Drive Material Prosperity. Cheltenham/Northampton.

Azevedo, Ines Lima/Sonnberger, Marco/Thomas, Brinda/Morgan, Granger/Renn, Ortwin (2012): The Need to Account for Consumer Behaviour in order to Develop Robust Energy Efficiency Policies. A review of the literature on the rebound effect in energy efficiency and report from expert workshop. Stuttgart: Universität Stuttgart.

Azevedo, Ines Lima/Thomas, Brinda (2013): Estimating direct and indirect rebound effects for U.S. households with input-output analysis. Part 2: Simulation. In: Ecological Economics, Nr. 86, S. 188–198.

Bentzen, Jan (2004): Estimating the rebound effect in US manufacturing energy consumption. In: Energy Economics, Nr. 26, Iss. 1, S. 123–134.

Binswanger, Mathias (2001): Technological progress and sustainable development: what about the rebound effect? In: Ecological Economics, Nr. 36, S. 119–132.

Birol, Fatih/Keppler, Jan Horst (2000): Prices, technology development and the rebound effect. In: Energy Policy, Nr. 28, S. 457–469.

Broadstock, David C./Hunt, Lester/Sorrell, Steve (2007): UKERC Review of Evidence for the Rebound Effect – Technical Report 3: Elasticity of substitution studies. Working Paper. London: UK Energy Research Centre.

Brookes, Leonard (1978): Energy policy, the energy price fallacy and the role of nuclear energy in the UK. In: Energy Policy, Nr. 6, Iss. 2, S. 94–106.

Brookes, Leonard (1990): The greenhouse effect: the fallacies in the energy efficient solution. In: Energy Policy, Nr. 18, Iss. 2, S.199–201.

Brookes, Leonard (2000): Energy efficiency fallacies revisited. In: Energy Policy, Nr. 28, S. 355–366.

Chitnis, Mona/Sorrell, Steve/Druckman, Angela/Firth, Steven K./Jackson, Tim (2013): Turning lights into flights: Estimating direct and indirect rebound effects for UK households. In: Energy Policy 55, S. 234–250.

Chitnis, Mona/Sorrell, Steve/Druckman, Angela/Firth, Steven K./Jackson, Tim (2014): Who rebounds most? Estimating direct and indirect rebound effects for different UK socioeconomic groups. In: Ecological Economics, Nr. 106, S. 12–32.

Clot, Sophie/Grolleau, Gilles/Ibanez, Lisette (2011): Do Good Deeds Make Bad People? Document de Recherche Nr. 2011–21. Montpellier: Laboratoire Montpellierain d'Economie Theoretique et Appliquée.

Deutscher Bundestag (2013): Abschlussbericht der Enquete-Kommission Wachstum, Wohlstand, Lebensqualität. Berlin.

- Druckman, Angela/Chitnis, Mona/Sorrell, Steve/Jackson, Tim (2011):** Missing carbon reductions? Exploring rebound and backfire effects in UK households. In: *Energy Policy* 39, S. 3572–3581.
- Fouquet, Roger (2008):** *Heat, Power, and Light. Revolutions in Energy Services.* Cheltenham/Northampton.
- Gately, Dermot (1990):** The U.S. demand for highway travel and motor fuel. In: *The Energy Journal*, Nr. 11, S. 59–73.
- Geißler, Karlheinz (1999):** *Vom Tempo der Welt. Am Ende der Uhrzeit.* Freiburg im Breisgau.
- Girod, Bastian/de Haan, Peter (2009):** *Mental Rebound.* Rebound Research Report, Nr. 3. Zürich: ETH.
- Graham, Daniel/Glaister, Stephen (2002):** Review of income and price elasticities of demand for road traffic. Centre for Transport Studies, Imperial College of Science, Technology and Medicine.
- Greening, Lorna/Greene, David L. (1998):** *Energy Use, Technical Efficiency, and the Rebound Effect: A Review of the Literature.* Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory.
- Harvey, David (1989):** *The Condition of Postmodernity. An Enquiry into the Origins of Cultural Change.* Cambridge.
- Howard, Richard B. (1997):** Energy Efficiency and Economic Growth. In: *Contemporary Economic Policy*, Vol XV, S. 1–9.
- Jalas, Mikko (2002):** A time use perspective on the materials intensity of consumption. In: *Ecological Economics*, Nr. 41, S. 109–123.
- Jenkins, Jesse/Nordhaus, Ted/Shellenberger, Michael (2011):** *Energy Emergence. Rebound & Backfire as Emergent Phenomena.* Oakland: Breakthrough Institute.
- Jevons, William Stanley (1906):** *The coal question: an inquiry concerning the progress of the nation, and the probable exhaustion of our coal-mines [1865].* Edited by A. W. Flux. London.
- Khan, Uzma/Dhar, Ravi (2006):** Licensing Effect in Consumer Choice. In: *Journal of Marketing Research* 43, Nr. 2, S. 259–266.
- Khazzoom, Daniel (1980):** Economic implications for mandated efficiency in standards for household appliances. In: *The Energy Journal*, Nr. 1, S. 21–40.
- Khazzoom, Daniel (1987):** Energy savings resulting from the adoption of more efficient appliances. In: *The Energy Journal*, Vol. 8, Nr. 4, S. 85–89.
- Lin, Boqiang/Li, Jianglong (2014):** The rebound effect for heavy industry: Empirical evidence from China. In: *Energy Policy* 74, S. 589–599.
- Lin, Boqiang/Liu, Hongxun (2015):** A study on the energy rebound effect of China's residential building energy efficiency. In: *Energy and Buildings* 86, S. 608–618.
- Lindenberger, Dietmar/Kümmel, Reiner (2011):** Energy and the state of nations. In: *Energy*, Nr. 36, S. 6010–6018.

Longoni, Chiara/Gollwitzer, Peter M./Oettingen, Gabriele (2014): A green paradox: Validating green choices has ironic effects on behavior, cognition, and perception. In: *Journal of Experimental Social Psychology* 50, S. 158–165.

Lovins, Amory (1988): Energy savings ... another view. In: *The Energy Journal*, Vol. 9, Nr. 2, S. 155–162.

Lovins, Amory (2011): Re: The Efficiency Dilemma. A letter in response to David Owen's article (December 20 & 27, 2010). In: *The New Yorker*, January 17, 2011.

Madlener, Reinhard/Alcott, Blake (2011): Herausforderungen für eine technisch-ökonomische Entkoppelung von Naturverbrauch und Wirtschaftswachstum unter besonderer Berücksichtigung der Systematisierung von Rebound-Effekten und Problemverschiebungen. Provisional final version of a study for the German government's study commission on Growth, Wealth, Quality of Life of 4 December 2011.

Maxwell, Dorothy et al. (2011): Addressing the Rebound Effect. A report for the European Commission DG Environment. Brussels.

Mazar, Nina/Zhong, Chen-Bo (2010): Do Green Products Make Us Better People? In: *Psychological Science*, Vol. 21, Nr. 4, S. 494–498.

Merritt, Anna C./Efron, Daniel A./Monin, Benoît (2010): Moral Self-Licensing: When Being Good Frees Us to Be Bad. In: *Social and Personality Psychology Compass* 4/5, S. 344–357.

Otto, Siegmar/Kaiser, Florian G./Arnold, Otto (2014): The Critical Challenge of Climate Change for Psychology: Preventing Rebound and Promoting More Individual Irrationality. In: *European Psychologist* 19, Heft 2, S. 96–106.

Paech, Niko (2011): Grünes Wachstum? Vom Fehlschlagen jeglicher Entkoppelungsbestrebungen: Ein Trauerspiel in mehreren Akten. In: Sauer, Thomas (Hrsg.): *Ökonomie der Nachhaltigkeit. Grundlagen, Indikatoren, Strategien*. Marburg, S. 161–182.

Peters, Anja/Sonnberger, Marco/Dütschke, Elisabeth/Deuschle, Jürgen (2012): Theoretical perspective on rebound effects from a social science point of view – Working Paper to prepare empirical psychological and sociological studies in the REBOUND project. Fraunhofer Working Paper Sustainability and Innovation, Nr. S 2/2012. Karlsruhe: Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research.

Rosa, Hartmut (2012): Beschleunigung. Die Veränderung der Zeitstrukturen in der Moderne [2005]. 9. Auflage. Frankfurt am Main.

Santarius, Tilman (2012): Der Rebound-Effekt. Über die unerwünschten Folgen der erwünschten Energieeffizienz. Wuppertal Impulse zur WachstumsWende Nr. 5. Wuppertal: Wuppertal Institut.

Santarius, Tilman (2014): Der Rebound-Effekt: ein blinder Fleck der sozial-ökologischen Gesellschaftstransformation. In: *GAIA* 23/2, S. 109–117.

Santarius, Tilman (2015a): Der Rebound-Effekt. Ökonomische, psychische und soziale Herausforderungen der Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Naturverbrauch. Marburg.

Santarius, Tilman (2015b): Micro-Macro Discrepancy and Cause-Effect Relativity in Rebound Research. In: *GAIA* 24/2, S. 85–87.

Santarius, Tilman (2016): Investigating meso-economic rebound effects: Production-side effects and feedback loops between the micro and macro level. In: *Journal of Cleaner Production*, S. 406–413.

Santarius, Tilman/Soland, Martin (2016): Towards a Psychological Theory and Comprehensive Rebound Typology. In: Santarius, Tilman/Walnum, Hans Jakob/Aall, Carlo (eds.): *Rethinking Climate and Energy Policies: New Perspectives on the Rebound Phenomenon*. New York: Springer.

Saunders, Harry D. (1992): The Khazzoum-Brookes Postulate and Neoclassical Growth. In: *Energy Journal*, Nr. 13, S.131–148.

Saunders, Harry D. (2000a): A view from the macro side: rebound, backfire, and Khazzoum-Brookes. In: *Energy Policy* Nr. 28, S. 439–449.

Saunders, Harry D. (2000b): Does predicted rebound depend on distinguishing between energy and energy services? In: *Energy Policy* 28, Iss. 6–7, S. 497–500.

Saunders, Harry D. (2008): Fuel conserving (and using) production functions. In: *Energy Economics*, Nr. 30, Iss. 5, S. 2184–2235.

Saunders, Harry D. (2013): Historical evidence for energy efficiency rebound in 30 US sectors and a toolkit for rebound analysis. In: *Technological Forecasting and Social Change*, Vol 80, Iss: 7. Sept. 2013, S.1317–1330; www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040162512003228 [Zugriff am 22.1.2020].

Schipper, Lee/Grubb, Michael (2000): On the rebound? Feedback between energy intensities and energy uses in IEA countries. In: *Energy Policy*,s Nr. 28, S. 367–388.

Schivelbusch, Wolfgang (1977): *Geschichte der Eisenbahnreise. Zur Industrialisierung von Raum und Zeit im 19. Jahrhundert*. Frankfurt.

Soland, Martin (2013): „Relax ... Greentech Will Solve The Problem!“ Socio-Psychological Models of Responsibility Denial Due to Greentech Optimism. Diss. Universität Zürich.

Sorrell, Steve (2007): *The Rebound Effect: an assessment of the evidence for economy-wide energy savings from improved energy efficiency*. London.

Sorrell, Steve (2010): Energy, Economic Growth and Environmental Sustainability: Five Propositions. In: *Sustainability*, Vol. 2, S. 1784–1809.

Sorrell, Steve/Dimitropoulos, John (2007): UKERC Review of Evidence for the Rebound Effect: Technical Report 5 – Energy Productivity and Economic Growth Studies. Working Paper. London: UK Energy Research Centre.

Sorrell, Steve/Dimitropoulos, John (2008): The rebound effect: Microeconomic definitions, limitations and extensions. In: *Ecological Economics*, Vol. 65, S. 636–649.

Virilio, Paul (1993): *Revolutionen der Geschwindigkeit*. Berlin.

Vorndran, Edgar P. (1986): *Entwicklungsgeschichte des Computers*. 2. Auflage. Berlin/Offenbach.

Autor:

Walter J. Hugentobler

Pensionierter Hausarzt, langjährige wissenschaftliche und publizistische Auseinandersetzung mit den Zusammenhängen zwischen Gesundheit, dem Innenraumklima und den Gebäuden

Gesundheitliche Aspekte von Gebäudetechnik und Architektur

Gesundheit und Gebäude – die Herausforderungen der Zukunft

Im letzten Jahrhundert war die Überzeugung stark verbreitet, dass Gebäudetechnik und Architektur einen wichtigen Beitrag zur Volksgesundheit leisten. Die deutschsprachige Zeitschrift „Der Gesundheits-Ingenieur“, herausgegeben von 1878 bis 2012, war Ausdruck dieser Haltung und illustrierte die eindrucklichen Erfolge einer sich stürmisch entwickelnden Gebäudetechnik.

Die Herausforderungen der Zukunft sind der Klimawandel, die zunehmende Verstädterung und das ungebremsste Wachstum der Bevölkerung [8]. Energieeffizienz, Nachhaltigkeit und das Bestreben, den Städten und Gebäuden den Bezug zur Natur zu erhalten, sind Lösungsansätze, die verfolgt werden. Es entspricht einem tief verwurzelten menschlichen Bedürfnis, den Naturbezug auch im urbanen Umfeld nicht ganz zu verlieren. Die positiven Auswirkungen von Parkanlagen und begrünten Fassaden auf das Wohlbefinden belegen das [22, 48]. Erkenntnisse aus der Mikrobiologie der Umwelt und der Gebäude („Microbiomes of the Built Environment“ [41]) liefern wissenschaftliche Begründungen dafür, dass der Naturbezug unverzichtbar ist für unsere Gesunderhaltung. Ohne Bezug zur Natur ist der Aufbau eines kompetenten Immun- und Allergiesystems nicht möglich. Leider ist es bisher im Gebäudesektor erst in wenigen Fällen gelungen, die Erkenntnisse in Praxistests anzuwenden und Mikrobiologen, Mediziner und Architekten dazu zu bringen, praktisch erprobte Lösungen für die Zukunft zu erarbeiten [10, 25, 26].

Mikroben – die ungebetenen Mitbewohner unserer Gebäude

Mikroben sind unsichtbare Mikroorganismen, die in unvorstellbar grosser Zahl in der belebten und unbelebten Natur präsent sind. Auch in unseren Gebäuden sind viele Trillionen Mikroben vorhanden [41]. Seit der Entdeckung der Mikroben als Krankheitserreger verwendet die Medizin ein kriegerisches Vokabular und pflegt das Feindbild von „gefährli-

chen Mikroben“ [21]. Dieses falsche Bild wird scheinbar bestätigt durch Misserfolge in der Bekämpfung der Grippe-Epidemien, Spitalinfektionen, Antibiotika-Resistenzen und die Entdeckung immer neuer mikrobieller Erreger.

Wissenschaftliche Gross-Projekte zur Erforschung des Mikrobioms des Menschen [56] und der Umwelt [24] haben gezeigt, dass das „Feindbild Mikrobe“ falsch ist. Ohne den Austausch mit den vielfältigen Mikroben unserer Umwelt ist ein gesundes Immun- und Allergiesystem, ja ein gesundes Leben, nicht möglich [12, 49, 5]. In Missachtung dieser Erkenntnis nimmt die Abschottung von unserer mikrobiellen Umwelt in „Gebäude-Biotopen“ immer weiter zu.

Neue, auf gentechnischen Nachweisen beruhende Techniken haben gezeigt, in welcher grossen Zahl und Vielfalt Mikroben in der Natur, in unseren Gebäuden, aber auch in unserem Darm, in den oberen Atemwegen und auf der Haut vorkommen. Menschen und Gebäude sind Teile einer von Mikroben geprägten Welt [12, 49, 4] (Abb. 5). Die Gesamtheit der Mikroben eines umschriebenen Lebensraumes, zum Beispiel eines Menschen oder eines Gebäudes, werden als „Mikrobiom“ bezeichnet. Das menschliche Mikrobiom beeinflusst fast alle körperlichen Vorgänge, von der Verdauung bis zur psychischen Gesundheit. Es unterstützt unsere Gesundheit, wenn es ausgewogen und diversifiziert ist, und macht uns im umgekehrten Falle krank. Der Austausch mit den Mikrobiomen anderer Menschen und den Mikroben aus der Luft, dem Erdreich, der Tier- und Pflanzenwelt ist Voraussetzung für die Aufrechterhaltung eines gesunden, ausbalancierten, individuellen Mikrobioms und den Aufbau eines kompetenten Immunsystems [12, 48, 49, 52, 26].

Ohne Kenntnisse darüber, wie unser Immunsystem seine Kompetenz im Austausch mit der Umwelt erwirbt, und ohne Wissen um die unverzichtbaren Ressourcen der Mikroben kann die Bedeutung der Gebäudeumgebung für unsere Gesundheit nicht verstanden werden.

Das Immunsystem lernt – im Gebäude und vom Gebäude

Die Kompetenz des angeborenen und des erworbenen Immunsystems basiert auf den Interaktionen mit Mikroben sowie biologischen und chemischen Stoffen aus der Umwelt. Das Wissen des angeborenen Immunsystems wird uns vererbt, während die erworbene Immunkompetenz von jedem Individuum, vor allem in den ersten zwei Lebensjahren, aufgebaut werden muss [51]. Dies geschieht durch wiederholte Kontakt-Expositionen auf den Oberflächen der Atemwege, des Verdauungstraktes und der Haut. Hier lernen immunkompetente Zellen zu unterscheiden zwischen „harmlosen“ und „schädlichen“ Mikroben und Stoffen aus der Umwelt. Die Atemwege sind besonders wichtig für diesen Lernprozess. Sie filtern unterschiedlichste Partikel aus der Atemluft und präsentieren sie den immunkompetenten Zellen auf den Schleimhäuten der Atemwege und des Darmtraktes [45, 28]. Eine Studie in zwei US-Städten hat gezeigt, dass selbst in städtischer Umgebungsluft mehr als 1.800 Bakterien-Spezies nachweisbar sind [9]. Eine andere Studie zeigte auf, dass in 1 m³ Luft praktisch unabhängig vom Ort der Probenentnahme rund 500.000 Bakterien und etwa gleich viele Viren mit gentechnischen Methoden nachweisbar sind [47]. Physische Kontakte mit den uns umgebenden Oberflächen und anderen Menschen, Essen und Trinken bringen die immunkompetenten Zellen auf der Haut und im Darm in Kontakt mit unserem Umfeld und befähigen sie, uns kompetent gegen Gefahren zu verteidigen.

Die unverzichtbaren Ressourcen der Mikroben: Wasser und essenzielle Nährstoffe

Der von Johann Wolfgang Goethe im 18. Jahrhundert vorgebrachte philosophische Gedanke „Alles ist aus dem Wasser entsprungen, alles wird vom Wasser unterhalten“ hat sich bis zum heutigen Tag bewahrheitet. Die Astrobiologie, die sich mit den Grenzbereichen organischen Lebens beschäftigt, hat nachgewiesen, dass Zellteilung nur möglich

ist, wenn Zugang besteht zu Wasser (Wasserstoff und Sauerstoff) sowie zu Kohlenstoff, Stickstoff, Schwefel und Phosphor [13]. Das Wasser als Lösungsmittel ist unverzichtbar, da es die osmotische Aufnahme der essenziellen Nährstoffe in die Zelle ermöglicht. Bakterien und Pilze sind für langfristiges Überdauern und Vermehrung auf liquides Wasser und auf die essenziellen Nährstoffe in abbaubaren organischen Materialien oder in Schmutz und Staub angewiesen. Sie können kein Wasser aus der Luftfeuchtigkeit extrahieren und sind deshalb vollständig abhängig von der Präsenz von liquidem Wasser in ihrem Umfeld. Unterhalb einer Wasseraktivität von 0.7 (Materialfeuchte, die einer Ausgleichsfeuchte bei ca. 70 % relativer Luftfeuchtigkeit entspricht) ist kein Bakterien- und Pilzwachstum mehr möglich [53, 14, 1, 11, 17].

Die Menschheit ist umgezogen – vom „Ökosystem Natur“ in „Gebäude-Biotope“

Während 350.000 Jahren Evolutionsgeschichte fand der Lernprozess unseres Immunsystems statt im direkten Austausch mit der Natur, mit den Mikroben von Luft, Gewässer, Erdreich, Tier- und Pflanzenwelt (Abb. 1). Auch die Räume in den natürlich belüfteten Häusern waren gut vernetzt mit der Mikrobenvielfalt der Natur. Fensterlüftung und undichte Bauweise, die Nähe zu Nutztieren, häuslicher Schmutz und natürliche Baumaterialien ermöglichten den permanenten Kontakt mit den Mikroben der Umwelt. Seit 200 Jahren findet dieser Kontakt mehrheitlich in immer luftdichteren Gebäuden und Verkehrsmitteln statt. Die Konsequenzen dieses Ortswechsels für unser Mikrobiom und unsere Gesundheit sind schwerwiegend und werden im Gesundheitswesen, in den Medien und in der Technik nur zögerlich erkannt [49, 4, 6].



Abbildung 1:

350.000 Jahre menschliches Immuntraining mit den vielfältigen Mikroben in der Natur wurde in den letzten Jahrzehnten abgelöst durch ein Immuntraining mit den wenig diversifizierten Mikroben, die auf den Kunststoffoberflächen unserer Gebäude überleben, in denen wir 80 % unserer Lebenszeit verbringen.

Die industriellen Revolutionen machten aus Agrargesellschaften mit dem Arbeitsumfeld „Natur“ Industriegesellschaften, in denen Arbeit, Wohnen und Freizeit zu einem großen Teil in den Gebäuden stattfindet. Die meisten von uns verbringen heute 90 % ihrer Lebenszeit in Innenräumen [32, 50]. In weniger als 200 Jahren haben Fortschritte in der Gebäudetechnik einfache Hauskonstruktionen ersetzt durch energieeffiziente, luftdicht verschlossene HIGHTECH-Gebäude. Mechanische Lüftungen mit Filterung der Aussenluft, gesteigerte Reinlichkeit und ein naturferner Lebensstil behindern heute den Austausch mit dem Mikrobiom der Natur. In unseren „Gebäude-Biotopen“ leben wir in einem permanenten Komfortklima, atmen gefilterte Aussenluft und sind umgeben von einem verarmten

Mikroben-Mix (Abb. 1). Auf den extrem sauberen und trockenen Oberflächen dominieren Keime vom menschlichen Mikrobiom und die Mikroben aus der natürlichen Umwelt geraten in die Minderheit [4, 6, 49]. – Die Frage drängt sich auf, ob der Organismus sich an eine so radikale und extrem rasch erfolgte Entwicklung folgenlos anpassen kann und was dies für die uns begleitenden Mikroben bedeutet.

Der Verlust der Mikrobenvielfalt in unserer gebauten Umwelt ist für die Entstehung von Immunkrankheiten und Allergien von grösster Bedeutung [49, 6, 4]. Wichtigstes Ziel ist es, durch wiederholte Expositionen gegenüber alten und neu in Erscheinung getretenen Mikroben und Stoffe zu lernen, was harmlos ist und nicht bekämpft werden muss [6, 51]. Autoimmunerkrankungen und Allergien basieren darauf, dass ungefährliche Substanzen fälschlicherweise mit allergischen Reaktionen und Auto-Aggression gegen körpereigene Gewebe bekämpft werden. Seit den 1980er-Jahren ist eine stetige Zunahme von Autoimmun- und Allergieerkrankungen sowie von Epidemien und Pandemien feststellbar [3]. Dieser Trend wurde ursprünglich auf „übertriebene Hygiene“ zurückgeführt sowie auf den Rückgang der Kinderkrankheiten als Folge der Impfkampagnen. Der daraus abgeleitete Begriff „Hygiene-Paradox“ erwies sich als Fehlinterpretation. Der wahre Grund ist der Verlust der Mikroben-Vielfalt in der gebauten Umwelt und damit die rückläufige Exposition gegenüber harmlosen Mikroben, den Kommensalen oder „Old Friends“, wie sie gelegentlich in der Literatur genannt werden [4, 6, 45, 48, 49].

Stressfaktor Gebäude – vom unspezifischen Stress zur Multiresistenz von Bakterien

Mikroben existieren seit vielen Millionen Jahren und führen seit jeher einen Konkurrenzkampf um die Ressourcen, bei dem ein vielfältiges Waffenarsenal zum Einsatz kommt [23, 42]. Dank ihrer kurzen Verdopplungszeit von Minuten bis Stunden, der Fähigkeit, genetische Informationen innerhalb derselben Generation horizontal auszutauschen, und häufigen Spontanmutationen nach dem Prinzip von „Versuch und Irrtum“ haben sich Bakterien im Laufe ihrer sehr langen Evolutionsgeschichte an jede erdenkliche Stresssituation und Bedrohungslage anpassen können. Die Wirkprinzipien der Antibiotika gehören längst zum Waffenarsenal, mit dem Mikroben sich gegenseitig bekämpfen [4, 18, 40]. Da wir die Antibiotika aus dem Waffenarsenal der Natur kopieren, sind wirksame Abwehrmassnahmen dort bekannt, bevor die entsprechenden Antibiotika auf den Markt kommen. Durch Selektion resistenter Stämme oder durch Übertragung der Resistenz-Genen auf die betroffene Population verlieren unsere Medikamente rasch an Wirksamkeit [15, 18, 40].

Seit einigen Jahren erforscht die Mikrobiologie das Phänomen der „Persister“ und die Frage, wie unspezifischer Stress bei Bakterien zu Multiresistenzen führt. Viele Bakterien sind befähigt, vorübergehend ihren Stoffwechsel zu reduzieren oder ganz einzustellen. Sie werden zu „Persistern“ und nehmen ihren Metabolismus wieder auf, wenn günstigere Bedingungen vorliegen. So entziehen sie sich den Angriffen durch Antibiotika und überdauern praktisch jede Stresssituation, auch Wassermangel und Nährstoffkarenz [29].

Wassermangel und Nährstoffkarenz, pH-Veränderungen, UV-Lichtexposition und starke Schwankungen der Feuchtigkeit sind unspezifische Stresssituationen, denen Mikroben in Gebäuden häufig ausgesetzt sind. Bakterien reagieren darauf mit Veränderungen von Morphologie, Zellwandaufbau, Stoffwechsel oder Genetik [7]. Experimente haben gezeigt, dass die durch Stress ausgelösten Anpassungen nicht nur spezifisch auf den verursachenden Stress ausgerichtet sind, sondern begleitet sind von Multiresistenzen gegen andere Stressoren, inklusive Antibiotika und desinfizierende Chemikalien [19, 20, 7, 46, 53]. Die verheerendsten Auswirkungen dieser Resistenzentwicklungen zeigen sich dort, wo die meisten gefährlichen Mikroben mit den schwächsten Gliedern unserer Gesellschaft

zusammentreffen, in den Spitälern. Für die Mehrzahl der sogenannten Spitalinfektionen sind sieben multiresistente Bakterien verantwortlich. Dass diese Bakterienstämme gleichzeitig auffallend trockenresistent sind [33], sollte uns zu denken geben. Es wirft die Frage auf, ob der in Spitälern ausgeprägte unspezifische Stress durch Trockenheit und Nährstoffmangel, bedingt durch die flächendeckende Verwendung von Kunststoffmaterialien und häufige, aggressive Oberflächenreinigung, am Auftreten der Multiresistenzen eine Mitschuld trägt. Die Beobachtung ist beunruhigend und zeigt, dass wir unsere Mittel gegen Bakterien wohlüberlegt einsetzen müssen [26]. Dass Trockenheit ein wichtiger Faktor ist, der in den Spitälern das Auftreten multiresistenter Bakterien fördert, wurde im „Hospital Microbiome Project“ [35, 36, 16] und noch deutlicher im Video der Forschungsleiter Jack Gilbert und Brent Stephens formuliert [https://youtube/F8QHWL_VY9M?t=19].

Hundert Jahre Baugeschichte im Kontext mit Hygiene und Mikrobenvielfalt

Fortschritte in der Gebäudetechnik haben Lebensqualität und Hygiene in unseren Gebäuden stetig verbessert. Fließendes Wasser, Toiletten und Abwasser, elektrisches Licht sowie mehr Tageslicht durch grössere Fenster führten zu einer deutlichen Verbesserung von Volksgesundheit und Lebenserwartung. In der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts waren es medizinische Fortschritte, die Entdeckung der Antibiotika und die Einführung der Impfungen, die weitere gesundheitliche Fortschritte brachten.

Ein Anstieg der Energiepreise sowie die politische Forderung nach mehr Energieeffizienz im Gebäudesektor hatte zur Folge, dass luftdichte Gebäudehüllen, neue Dämmmaterialien, mechanische Lüftungen und Luftfilterung eingeführt wurden. Zentralheizungen erlaubten die Beheizung der ganzen Gebäude und erfüllten den Wunsch der Gebäudenutzer nach einem ganzjährigen Komfortklima. Was die Nutzer als Komfortsteigerung schätzen, hatte für ihre unsichtbaren Mitbewohner, die Bakterien, Pilze und Viren, unerwartete Folgen. Der Anstieg der Heiztemperaturen um 3–5 °C, nicht bedarfsgeregelte mechanische Lüftungen, mehr Wohnfläche pro Nutzer und Änderungen im Lebensstil hatten extreme Gebäudetrockenheit zur Folge. Dies wurde von Ingenieuren und Hausbesitzern als Präventionsmassnahme gegen Kondensat, Pilz- und Bakterienwachstum begrüsst, übte aber auf die Mikroben einen permanenten Trockenheitsstress aus. Die gravierenden, unerwünschten Konsequenzen für die Mikrobenvielfalt und die Auswirkungen auf die Gesundheit der Gebäudenutzer sind Architekten, Ingenieuren und Facility-Managern nach wie vor nicht bekannt. Der Trockenheitsstress eliminiert in erster Linie die Kommensalen und Mutualisten, die für den Aufbau des Immunsystems so nützlichen „Old Friends“ [46, 48, 49, 6, 53]. Gleichzeitig selektioniert der Trockenheitsstress krank machende Mikroben mit Multiresistenzen, die sich – nun ohne Konkurrenten um die knappen Ressourcen Wasser und Nährstoffe – ungehindert vermehren können. Vermehrte Infektionskrankheiten, Autoimmunkrankheiten und Allergien sind die unerwünschten Folgen für die Gebäudenutzer [19, 20, 39, 7, 46, 49, 53].

Die Problematik wird verschärft durch den immer spärlicheren Einsatz natürlicher Baustoffe wie Ziegel, Mörtel, Kalk, Sandstein, Gips, Lehm und Holz. Ihr Ersatz durch industrielle Kunstmaterialien kommt einem Wechsel gleich von „LOWTECH“- zu „HIGHTECH“-Materialien (Abb. 2). Für Gebäudehüllen, Isolationen und Innenausbau/Mobiliar werden zunehmend Beton, Stahl, Glas und verschiedenste Polymere sowie Kunstfasern und anorganische Farben verwendet. Dies hat weitreichende und unterschätzte Konsequenzen [48, 49, 45, 4]. Natürliche und industrielle Materialien haben einen völlig unterschiedlichen Einfluss auf den Feuchtehaushalt der Gebäude und die Bedingungen für die Mikroben. Während praktisch alle Naturmaterialien porös und offenporig sind, zeichnen sich industriellen Produkte aus durch Kompaktheit und glatte, porenlose Oberflächen. Die Naturmaterialien nehmen entsprechend ihren Sorptionsisothermen Feuchte auf und geben diese in fallender Luft-



Abbildung 2:

Der Wandel von lokal-typischen Baustilen mit Natur-Materialien aus der Region zu einem urbanen Baustil mit industriellen Baustoffen ist ein wesentlicher Aspekt des Wandels von LOWTECH zu HIGHTECH.

feuchtigkeit verzögert wieder ab. Die Zeitspanne bis zum Unterschreiten der für Bakterien- oder Pilzwachstum wichtigen grenzwertigen Wasseraktivität wird als Nass-Zeit („Time of Wetness“) bezeichnet und ist in der Gebäudetechnik bisher noch wenig bekannt [1, 17].

Industrielle Materialien sind bezüglich Feuchteausaustausch inert und entweder trocken oder nass (Abb. 3). Ingenieure, Gebäudetechniker und Hygieniker begrüßen die pflegeleichten, glatten und trockenen Oberflächen der industriellen Materialien, ohne sich der gravierenden Konsequenzen bewusst zu sein, die sich für die Diversität der Mikroben und unsere Gesundheit ergeben können.

Wie lange auf Oberflächen abgelagert Mikroben vital bleiben oder sich gar vermehren können, hängt von der Konkurrenzsituation um die verfügbaren Ressourcen sowie von den Oberflächeneigenschaften ab. Kompakte, porenfreie, hydrophobe und extrem glatte Kunststoffoberflächen sind wasser- und schmutzfrei (Abb. 3). Auf solchen Oberflächen können keine harmlosen Kommensalen überdauern. Multiresistente Bakterien aber stellen auf diesen Oberflächen ihren Stoffwechsel vorübergehend ein, werden zu „Persistern“ und sind so auch mit Kulturmethoden nicht mehr nachweisbar. Nach ihrer Übertragung über die Luft oder direkten Kontakt nehmen sie im feuchten Milieu von Atemwegen oder Darm eines Infizierten ihren Stoffwechsel wieder auf und können eine Infektion auslösen (Abb. 3).

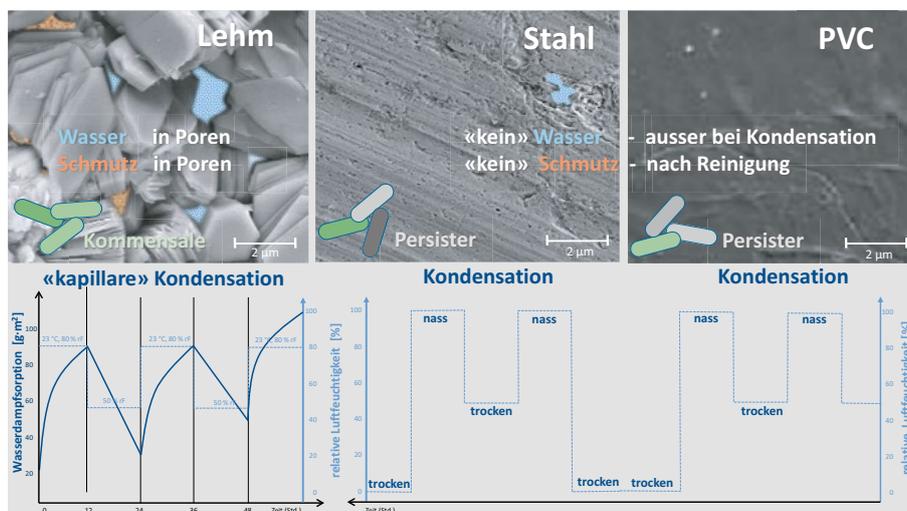


Abbildung 3:

Industrielle Baumaterialien sind pflegeleicht, trocken und sauber. Der damit verbundene Trockenheitsstress und Nährstoffmangel selektioniert die gefährlichen, multiresistenten Mikroben.

Poröse Naturmaterialien als Habitat für ein diversifiziertes Mikrobiom

Während Kondensation auf makroskopischen Oberflächen erst bei Wasserdampfsättigung möglich ist, erfolgt in porösen Materialien in Abhängigkeit vom Porendurchmesser schon ab mittlerer relativer Feuchtigkeit eine sogenannte „kapillare Kondensation“ in Poren und Hohlräumen [8] (Abb. 3). Das gespeicherte, liquide Wasser kann von Mikroben genutzt werden. Es steht in einem dynamischen Gleichgewicht mit der Luft, entsprechend den materialtypischen Sorptionsisothermen. Die große geometrische Variabilität der Poren in den Naturmaterialien führt zu einer unregelmässigen Verteilung des Wasser- und Nährstoffangebotes (Schmutzreste) auf und innerhalb des Materials [44, 4]. Unzählige Nischen mit jeweils unterschiedlichen Umgebungsbedingungen (Mikroklima und Ressourcen) fördern die Mikrobendiversität auf porösen Materialien (Abb. 3). Poröse Naturmaterialien sind entfernt vergleichbar mit dem Mikrobienhabitat „Erdreich“, in welchem Diversität und Konzentration von Mikroben so hoch sind wie sonst nirgends in der Natur [44]. Die beschriebenen Eigenschaften erklären auch, weshalb die Präsenz von porösen Naturmaterialien die Mikrobenvielfalt in Gebäuden fördert.

Gebäude sind Biotope

Gebäude sind nicht unbelebte architektonische Strukturen. Wenn Feuchteprobleme auftauchen, wird dies für jedermann an den Schimmelbelägen und Biofilmen sichtbar. Für uns unsichtbar sind jedoch auf allen Oberflächen und in der Raumluft unvorstellbar hohe Zahlen von Mikroben präsent. Dieses Wissen ist bei Architekten, Ingenieuren und dem Facility-Management noch nicht angekommen [10, 26, 39]. In Ausbildung und Praxis sollten diese Berufsleute lernen, Gebäude als belebte Ökosysteme zu verstehen, zu planen und zu unterhalten. Sie bestimmen und regeln die Randbedingungen in den „Gebäude-Biotopen“. Die Biologie der Mikroben, der Bakterien, Pilze und Viren, bestimmt im Einklang mit den Naturgesetzen die unverrückbaren Spielregeln. Wir tun gut daran, in unseren Gebäuden die Gesetze der Physik und der Biologie zu respektieren. Anstatt zu versuchen, Mikroben aus den Gebäuden fernzuhalten, sollten wir unsere Bestrebungen darauf ausrichten, die harmlosen, nützlichen Mikroben zu fördern und die gefährlichen Mikroben zu unterdrücken. An einigen Universitäten wird heute nach den besten Wegen gesucht, ein solches „Bioinformed Design“ in Gebäuden umzusetzen [10, 26, 25].

Mikroben, suspendiert in Aerosoltröpfchen und anhaftend an Begleitpartikel

Mikroben sind nicht als Einzelpartikel in der Luft und auf den Oberflächen präsent. Wenn sie von der Haut oder anderen Oberflächen stammen, haften sie an anderen Mikropartikeln wie Hautschuppen, Schmutzpartikeln oder Textilfasern. Aus den Atemwegen werden sie als Mikrotröpfchen ausgehustet oder ausgeatmet. Ob die suspendierten Bakterien oder Viren überdauern können oder inaktiviert werden, ist abhängig vom Verdampfungsgrad der Aerosoltröpfchen in der Raumluft und damit der relativen Luftfeuchtigkeit [43, 38].

Das von Scofield, Sterling und Arundel 1986 (Abb. 4) veröffentlichte Diagramm illustriert, dass Bakterien, Viren und Pilze bei mittlerer Feuchtigkeit von 40 bis 60 % am wenigsten gesundheitliche Probleme verursachen [2]. Bei Trockenheit unter 40 % und bei Feuchte über rund 60 % nehmen die Gesundheitsprobleme durch bakterielle und virale Erkrankungen und Allergien zu (Abb. 4). Das Diagramm basiert auf klinischen Beobachtungen sowie Studien und hat sich bis heute als zutreffend erwiesen. Die meisten Bakterien und Viren, die Erkrankte in Aerosoltröpfchen abgeben, werden bei mittlerer Raumluftfeuchtigkeit auf

Optimaler Feuchtebereich für minimale gesundheitliche Nebenwirkungen in Gebäuden

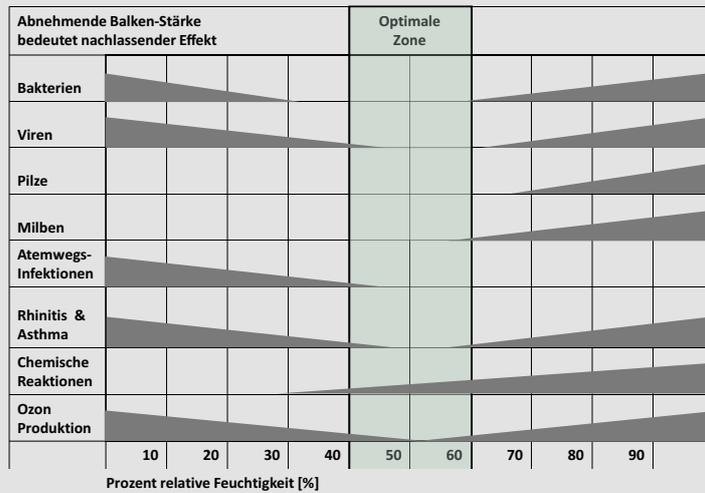


Abbildung 4:

Das sogenannte Scofield-Sterling-Diagramm wurde 1986 veröffentlicht und zeigt den Wissensstand zur optimalen Raumluftfeuchte in Gebäuden von 40 bis 60 % – das hat damals wie heute unverändert Gültigkeit.

dem Übertragungsweg in der Luft oder auf den Oberflächen inaktiviert [43, 38, 59]. Bei hoher Luftfeuchtigkeit können sich Bakterien und Pilze vermehren, was die zunehmenden Gesundheitsprobleme erklärt.

Die Gebäudefachleute sind bisher der Meinung, dass die Trockenheit von Gebäudematerialien und Raumluft eine unschädliche und wirksame Prävention sei gegen Schimmel- und Bakterienwachstum. Dass das Unterschreiten von 40 % relativer Feuchte negative Auswirkungen hat, wird bis heute nicht ernst genommen. Dabei erleben wir in jeder Heizperiode die Auswirkungen als Grippewellen und einen Anstieg der Atemwegsinfektionen, ohne dass der Zusammenhang ernsthaft hinterfragt würde. Mikroben in Aerosoltröpfchen sind in der Luft und auf den Oberflächen bei tiefer Luftfeuchtigkeit vor der Inaktivierung geschützt. Der verantwortliche Mechanismus dafür ist bis heute unklar [43, 38]. Tiefe Luftfeuchtigkeit fördert auch die Aufwirbelung von Mikroben im Staub und Schmutz der Gebäudeoberflächen, weil die Wasseradhäsionskräfte geringer werden. Wesentlich ist zudem, dass Trockenheit die Selektion multiresistenter Bakterien fördert, wie bereits ausgeführt [39, 19, 20, 7, 53, 46], und dass trockene Atemluft verhindert, dass die Immunabwehr in den Atemwegen aktiviert werden kann [34].

Das Mikrobiom und unsere überholten Hygienevorstellungen

Nur ein verschwindend kleiner Teil der Bakterien, Pilze und Viren wurde bis heute entdeckt und beschrieben. Bekannt und nachweisbar sind in erster Linie diejenigen Mikroben, die Krankheiten verursachen. Die für unsere Gesundheit wichtigen, ungleich zahlreicheren harmlosen Bakterien, Viren und Pilze haben wir bisher kaum wahrgenommen (Abb. 5). Neue gentechnische Methoden ermöglichen uns heute überraschende Einblicke in diese bisher unbekanntes Mikrobiom. Wo wir mit traditionellen Methoden Dutzende oder Hunderte von Mikroben nachweisen können, sind effektiv um einige Zehnerpotenzen mehr Mikroben vorhanden [47]. Diese sind entweder unter den gewählten Kulturbedingungen nicht vermehrungsfähig, haben den Stoffwechsel vorübergehend eingestellt oder sind inaktiviert. Wir erkennen aber ihren genetischen Code, können sie in Gruppen einteilen und seit kurzer Zeit ist es auch möglich geworden, zwischen inaktiven und stoffwechselaktiven Mikroben zu unterscheiden [39].

Zwei Zahlen sollen das Missverhältnis zwischen kulturell nachweisbaren und tatsächlich vorhandenen Mikroben illustrieren. Gentechnische Untersuchungen haben gezeigt, dass in 1 m³ Luft, praktisch unabhängig vom Ort der Probenentnahme, rund 500.000 Bakterien und ebenso viele Viren nachweisbar sind [47]. Von unserer Haut geben wir pro Stunde bis zu 14 Mio. Bakterien an die Luft und Kleider ab, zusammen mit Hautschuppen, Schmutzpartikeln und Textilfasern [27]. In beiden Fällen lassen sich kulturell oder lichtmikroskopisch maximal einige Hundert Bakterien nachweisen.

Unser traditioneller Hygienebegriff basiert auf der Vorstellung, dass Menschen und Mikroben je ein Eigenleben führen. Wir haben ein falsches Feindbild aufgebaut von den Mikroben und sehen sie in erster Linie als Gefahr für unsere Gesundheit [21]. Nach mehr als 50 Jahren anfänglich sehr erfolgreichem Kampf gegen mikrobielle Krankheiten wird es noch viele Jahre dauern, bis dieses Feindbild in der Ärzteschaft und in der Gesellschaft abgebaut ist. Die Vorstellung „Hier Mensch – dort Mikrobe, die uns krank macht“ lässt sich nicht aufrechterhalten (Abb. 5). Wir alle, aber auch unsere Gebäude sind Teil eines globalen Ökosystems, in dem die Mikroben eine tragende Rolle spielen für die Stabilität und das Recycling von Biomasse.

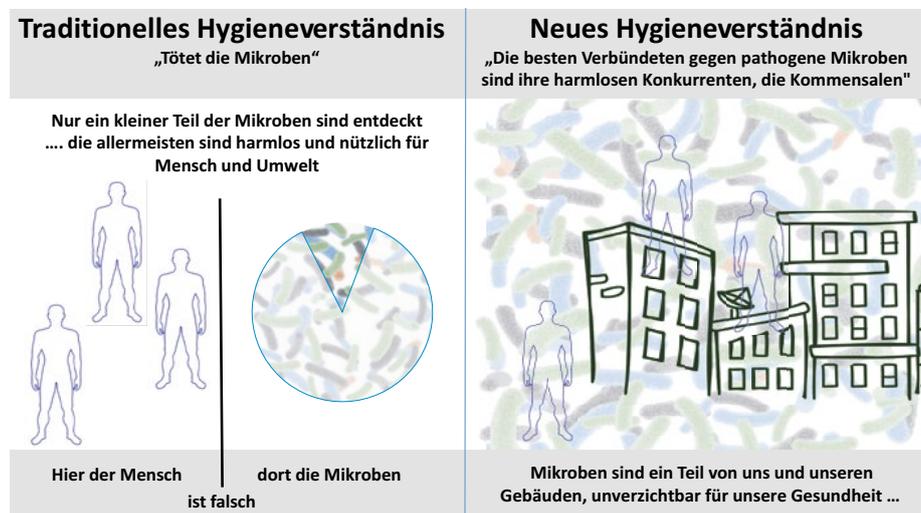


Abbildung 5:

Nur ein kleiner Teil der bis heute entdeckten Mikroben macht krank. Wir müssen erkennen und danach leben, dass Mikroben ein Teil unserer Welt sind, der für unsere Gesundheit unverzichtbar ist, und dass gutartige Mikroben unsere besten Verbündeten sind gegen krankmachende Mikroben.

Hygienemaßnahmen, die aus einer Zeit stammen, in der Mikroben noch primär als Gefahr für unsere Gesundheit betrachtet wurden, müssten dringend revidiert werden. Die Herausforderung besteht darin, uns optimal vor bekannten Krankheitserregern zu schützen, ohne unser körpereigenes Mikrobiom nachhaltig zu schädigen und die Interaktionen mit den für unsere Gesundheit wichtigen, harmlosen Kommensalen einzuschränken. Alle Hygienestudien der letzten 50 Jahre nehmen jedoch als Erfolgskriterium die möglichst vollständige Reduktion der Bakterienzahl. Sie sind nicht fokussiert auf das eigentliche Ziel, die Reduktion von Krankheitsübertragungen und den Erhalt einer gesunden Bakterienvielfalt [57, 4, 5]. Das Ziel steriler, das heißt keimfreier Oberflächen durch Elimination aller Bakterien ist berechtigt in den Eingriffsräumen und Isolationszimmern der Spitäler. Für den Arbeits- und Wohnbereich ist eine solche Strategie vollkommen ungeeignet [39, 58]. Seit Florence Nightingale (1820–1910), der Begründerin der modernen Krankenpflege und Hygiene, wird Hygiene assoziiert mit sauberem Wasser und Oberflächen, frischer Luft und Seife. Häusliche und persönliche Hygiene, basierend auf den Vorstellungen von Florence Nightingale, sind auch heute noch angebracht. Zwischenzeitlich haben wir uns aber neue, damals unbekannte Hygieneprobleme eingehandelt.

Luftfilter und die Mikrobenvielfalt

Die Forschung hat sich auch mit der Frage befasst, wie Luftfilter sowie menschliche Aktivitäten und Emissionen die Mikroben in der Innenraumluft und auf den Gebäudeoberflächen beeinflussen. Die Filtrierung der Aussenluft führt zu einer deutlich geringeren Anzahlkonzentration und einer eingeschränkten Diversität der Bakterien in der Zuluft [30, 31]. Die in der Raumluft nach Filterung vorhandenen Bakterien sind jedoch näher verwandt mit bekannten, krank machenden Bakterien. Es geht von ihnen deshalb ein potenziell erhöhtes Infektionsrisiko aus. Derselbe Effekt wurde beobachtet bei tieferer Raumluftfeuchtigkeit und höheren Raumtemperaturen [30]. Die Messungen wurden durchgeführt in den Räumen eines Universitätsgebäudes und in einem Spital. In den Räumen mit Fensterlüftung war an beiden Orten die Diversität der Bakterien höher und die Nähe zu krank machenden Keimen geringer als bei mechanischer Belüftung mit Filtrierung [30, 31]. Gefilterte Zuluft scheint damit ein grösseres Gesundheitsrisiko darzustellen als die ungefilterte Luft bei Fensterlüftung. Die WHO hat 2009 in einer Publikation für Länder mit niedrigen Einkommen die natürliche Belüftung sogar für Spitäler empfohlen und ihre Effizienz zur Vermeidung von Infektionsübertragungen unterstrichen [59]. Weitere Untersuchungen über die Zusammenhänge zwischen der Luftfilterung, dem Raumklima und dem Mikrogen-Mix in der Luft sind dringend angezeigt.

Die Anzahlkonzentration von Bakterien und Pilzsporen sowie die Massenkonzentration der Partikel sind in der Aussen- und in der Innenluft an vielen Orten weitgehend identisch, solange sich keine Personen in den Räumen aufhalten. Dies hat Hospodsky [27] in jeweils sechs mechanisch belüfteten Klassenzimmern in Berlin, Kopenhagen, Aarhus, Salinas (Kalifornien) und an zwei Standorten in China festgestellt. Die Anwesenheit der Schüler führt durch Aufwirbelung von Staub und Schmutz und durch Emissionen zu einem starken Anstieg der Schwebepartikel in der Raumluft. Im Durchschnitt aller Standorte kam es zu einem Anstieg um das 81-Fache bei den Bakterien, um das 15-Fache für die Pilzsporen und um das 9-Fache für die Partikel. Der grösste Beitrag stammt von der Aufwirbelung vom Boden, ein deutlich geringerer Anteil von den Emissionen der Schüler. Pro Person und Stunde berechneten die Autoren Emissionen von 14 Mio. Bakterien, ebenso vielen Pilzsporen und 22 mg Partikelmasse.

Die Untersuchungen zeigen eindrücklich, dass die Hauptmasse der Mikroben auf den horizontalen Oberflächen abgelagert ist und durch menschliche Aktivitäten leicht aufgewirbelt und in die Luftströmungen eingebracht werden kann. Alle üblicherweise bei Abwesenheit von Personen vorgenommenen Messungen der Innenraumbelastung mit Schwebestoffen sind für Aussagen bezüglich der Benutzerexposition weitestgehend wertlos. Der unten stehende Link führt zu einem Animationsvideo, das visualisiert, wie Mikroben von Oberflächen aufgewirbelt und mit der Konvektion verfrachtet werden [<http://vimeo.com/9005973>].

Mikrobiologisch sinnvoller Einsatz von „LOWTECH“- und „HIGHECH“-Materialien

Die grosse Mehrheit der Mikroben ist auf Oberflächen abgelagert, wie im obigen Abschnitt gezeigt. Deshalb ist der physikochemische, biologische und räumliche Bezug zwischen Oberflächen und Mikroben von entscheidender Bedeutung für das Mikrobiom und letztlich auch für unsere Gesundheit. Für die nur Mikrometer messenden Bakterien sind die physikalischen und mikroskopischen Eigenschaften von Oberflächen wie Hygroskopizität, Poren, Vertiefungen und Höhlenbildungen mit eingelagertem Wasser und mikroskopischen Schmutzresten von Bedeutung (siehe Abb. 5).

Polymere „HIGHTECH“-Materialien werden gezielt entwickelt, um mikrobenfeindliche, extrem glatte und pflegeleichte, chemikalienresistente Oberflächen zu erzielen. Für das Überdauern und die Vermehrung von Mikroben bieten solche Oberflächen gewollt ungünstige Bedingungen, da sie gleichzeitig einen Trockenheits- und Nährstoffmangelstress ausüben. Die Wissenschaft hat in den letzten Jahren nachgewiesen, dass unspezifischer Stress, so auch der Entzug von Wasser und Nährstoffen, ebenso dramatische Nebenwirkungen provoziert wie der Masseneinsatz von Antibiotika oder flächendeckende Desinfektion. Es kommt zur Selektion immer resistenterer Bakterien- und Pilzstämmen [39, 19, 20, 7, 53, 46], die am Ende jeder bekannten Behandlungsmethode trotzen.

Der Einsatz mikrobenfeindlicher Oberflächen macht Sinn für Risikoflächen. So zum Beispiel für sogenannte High-Touch-Oberflächen wie Tastaturen, Armaturen, Türöffner, Küchenutensilien, kritische Arbeitsflächen, Toiletten und Nasszellen sowie von vielen Menschen gemeinsam benutzte Geräte. Für Wände und Decken, Textilien und das Mobiliar im Wohn- und Bürobereich sollten jedoch offenporige Naturmaterialien verwendet werden. Sie gewährleisten das Überdauern eines ausgewogenen und diversifizierten Mikrobioms, das sich ausgehend von diesen Flächen im ganzen Gebäude verbreiten kann. Wir wissen, dass alle verfügbaren Gebäudeflächen in kurzer Zeit von Mikroben aus der Aussenluft, vor allem aber von den jeweils charakteristischen Mikrobiomen der anwesenden Personen besiedelt werden [11, 45, 26]. Auf Oberflächen mit keinem oder nur geringem Stressniveau wird die Mehrheit der „Old Friends“ sich durchsetzen, die krank machenden Keime in Schach halten und so die Gesundheit der Gebäudenutzer unterstützen.

Vor 100 Jahren noch stammten alle verwendeten Materialien in unseren Gebäuden aus der belebten und unbelebten Natur. Auch als verarbeitete Produkte hatten sie in den allermeisten Fällen (Ausnahmen z.B. Eisen, Glas) eine poröse Struktur und Oberfläche. Im Gegensatz zu Polymeren und anderen kompakten Kunstmaterialeen wirken die Naturmaterialien durch ihre Sorptionsfähigkeit regulierend auf das Feuchtklima im Gebäude, geben keine geruchsbelästigenden oder gesundheitsschädigenden volatilen Stoffe ab und bieten Oberflächen, auf denen eine Vielfalt von Bakterien überdauern kann.

Probiotika, die „guten Mikroben“ im Einsatz gegen Multiresistenzen

Ein neues Hygieneverständnis geht davon aus, dass unsere besten Verbündeten gegen krank machende Mikroben ihre harmlosen Konkurrenten sind, die Kommensalen (Abb. 5). In der Medizin und in der Tierhaltung gibt es immer mehr erfolgreiche Beispiele, wie gutartige Bakterien und Viren als „Probiotika“ gegen ihre krank machenden Konkurrenten eingesetzt werden können. In Gebäuden finden Probiotika Verwendung als Ergänzung biologischer Reinigungsmittel und sie werden wohl eine grosse Zukunft haben. In einer Studie, durchgeführt in drei Spitälern, wurden über sechs Monate Probiotika-Reinigungsmittel mit dem üblichen Reinigungsprozedere verglichen. Innert drei bis vier Wochen ergab sich eine mit kulturellen Methoden nachweisbare Verminderung der Zahl von Spitalkeimen um 50 bis 89 % durch Probiotika enthaltende Reinigungsmittel [58]. Der intermittierende Einsatz von Probiotika und Desinfektionsmitteln ergab regelmässig unter Probiotika eine Verminderung der kultivierbaren Zahl von Spitalkeimen.

Empfehlungen zur Förderung eines gesunden Mikroben-Mix in Gebäuden

- › Mittlere Raumlufffeuchte zwischen 40 und 60 % einhalten; tiefere Luftfeuchtigkeit fördert Multiresistenzen, höhere Luftfeuchtigkeit ermöglicht Schimmel- und Bakterienproliferation
- › Schimmelbildung vermeiden durch geringe Strahlungsasymmetrien (im Einklang mit Energieeffizienzzielen) und ein striktes Abluftregime gegen Feuchtespitzen in Küche und Bad. Schimmelprophylaxe durch Trockenheit fördert bakterielle Multiresistenzen!
- › Bedarfsgesteuerte und moderate Luftwechsel (CO₂-Sensoren) helfen, extreme Trockenheit mit der erhöhten Gefahr von Multiresistenzen zu verhindern.
- › Für Wandflächen und Decken offenporige, sorptionsfähige Putze und mineralische Farben verwenden, deren Feuchteaustausch mit der Luft ein ausgewogenes Mikrobewachstum (Diversität und Konkurrenz) zulassen.
- › Für Innenausbau, Mobiliar und Textilien offenporige Naturmaterialien verwenden (Holz, Naturfasern, mineralische und pflanzliche Farben).
- › Mikrobenfeindliche Kunstmaterialien (kompakt, porenlos, pflegeleicht) nur verwenden für Bodenbeläge, Nasszellen und Toiletten sowie High-Touch-Flächen wie Türklinken, Tastaturen und Armaturen.
- › Kunstmaterialien (Polymere, Glas, Stahl, Dispersionsfarben mit Kunststoffen) sind porenfrei und nehmen keine Feuchtigkeit auf. Diese Oberflächen fördern und selektionieren multiresistente Bakterien.
- › Fensterlüftung und dezentrale Fensterlüftungssysteme ohne Luftfilterung ermöglichen den besten Austausch mit dem Mikrobiom der Natur.
- › Haustiere mit Freilauf, vor allem Hunde, verbessern das Mikrobiom im Gebäude, indem sie Schmutz und Mikroben aus der Natur ins Gebäude hineinbringen.
- › Regelmässige Flächenreinigung mit Wasser und Seifen, ohne Chemikalien und Desinfektionsmittel.
- › Probiotika in Reinigungsmitteln haben eine vielversprechende Zukunft.
- › Die konsequente Verwendung von pflegeleichten, mikrobenfeindlichen Kunstmaterialien ist dort sinnvoll, wo mikrobefreie Oberflächen (Sterilität) angestrebt werden (Eingriffsräume, Isolationszimmer im Spital).

Referenzen

- [1] **Adan O, Samson R.** Fundamentals of mold growth in indoor environments and strategies for healthy living. [Wageningen (NL)]: Wageningen Academic Publishers;2011.
- [2] **Arundel AV, Sterling EM, Biggin JH, Sterling TD.** Indirect health effects of relative humidity in indoor environments. *Environ Health Perspect.* 1986 Mar;65:351-61.
- [3] **Bach JF.** The effect of infections on susceptibility to autoimmune and allergic disease. *N Engl J Med.* 2002 Sep 19;347(12):911-20.
- [4] **Blaser MJ, Cardon ZG, Cho MK, Dangl JL, Donohue TJ, Green JL, Knight R, Maxon ME, Northern TR, Pollard KS, Brodie EL.** Toward a predicative understanding of earth's microbiomes to address 21st century challenges. *mBio.* 2016 May 13;7(3). pii:e00714-16.
- [5] **Blaser M.** Antibiotic overuse: stop the killing of beneficial bacteria. *Nature.* 2011 Aug 24;476(7361):393-4.
- [6] **Bloomfield SF, Rook GA, Scott EA, Shanahan F, Stanwell-Smith R, Turner P.** Time to abandon the hygiene hypothesis: new perspectives on allergic disease, the human microbiome, infectious disease prevention and the role of targeted hygiene. *Perspect Public Health.* 2016 Jul;136(4):213-24.
- [7] **Boor KJ.** Bacterial stress responses – what doesn't kill them can make them stronger. *PLoS Biol.* 2006 Jan;4(1):e23.
- [8] **Butt HJ, Kappl M.** Normal capillary forces. *Adv Colloid Interface Sci.* 2009 Feb 28; 146(1-2):48-60.
- [9] **Brodie EL, DeSantis TZ, Parker JP, Zubietta IX, Piceno YM, Andersen GL.** Urban aerosols harbor diverse and dynamic bacterial populations. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 2007 Jan 2;104(1):299-304.
- [10] **Brown GZ, Kline J, Mhuireach G, Northcutt D, Stenson J.** Making microbiology of the built environment relevant to design. *Microbiome.* 2016 Feb 16;4:6.
- [11] **Chase J, Fouquier J, Zare M, Sonderegger DL, Knight R, Kelley ST, Siegel J, Caporaso JG.** Geography and location are the primary drivers of office microbiome composition. *mSystems.* 2016 Apr 19;1(2). pii: e00022-16.
- [12] **Cho I, Blaser MJ.** The human microbiome: at the interface of health and disease. *Nat Rev Genet.* 2012 Mar 13;13(4):260-70.
- [13] **Chopra A, Lineweaver CH.** The case for a Gaian bottleneck: the biology of habitability. *Astrobiology.* 2016 Jan;16(1):7-22.
- [14] **Dannemiller KC, Weschler CJ, Peccia J.** Fungal and bacterial growth in floor dust at elevated relative humidity levels. *Indoor Air.* 2017 Mar;27(2):354-363.
- [15] **Davies J, Davies D.** Origins and evolution of antibiotic resistance. *Microbiol Mol Biol Rev.* 2010 Sep;74(3):417-33.
- [16] **Dedesko SJ.** Indoor Environmental measurements of occupancy from the hospital microbiome project, Civil Engineering [thesis]. Toronto: University of Toronto;2015.
- [17] **Dedesko S, Siegel JA.** Moisture parameters and fungal communities associated with gypsum drywall in buildings. *Microbiome.* 2015 Dec 8;3:71.

- [18] **D'Costa VM, King CE, Kalan L, Morar M, Sung WW, Schwarz C, Froese D, Zazula G, Calmels F, Debruyne R, Golding GB, Poinar HN, Wright GD.** Antibiotic resistance is ancient. *Nature*. 2011 Aug 31;477(7365):457-61.
- [19] **Ebinesh A.** Conspiracy of domestic microenvironment, bacterial stress response and directed mutagenesis towards antimicrobial resistance: Lessons for health care. *J Infectious Disease Med Microbiol*. 2017;1(1):1-3.
- [20] **Ebinesh A.** Bacterial stress response and cross resistance to antibiotics in the light of natural selection. *J Infect Dis Immune Ther*. 2017;1(1):1-2.
- [21] **Ending the war metaphor:** the changing agenda for unraveling the host-microbe relationship: workshop summary. Institute of Medicine (US) Forum on Microbial Threats. Washington (DC): National Academies Press (US); 2006.
- [22] **Fuller RA, Irvine KN, Devine-Wright P, Warren PH, Gaston KJ.** Psychological benefits of greenspaces increase with biodiversity. *Biol Lett*. 2007 Aug 22;3(4):390-4.
- [23] **Ghoul M, Mitri S.** The ecology and evolution of microbial competition. *Trends Microbiol*. 2016 Oct;24(10):833-45.
- [24] **Gilbert JA, Jansson JK, Knight R.** The Earth Microbiome project: successes and aspirations. *BMC Biol*. 2014 Aug 22;12:69.
- [25] **Green JL.** Can bioinformed design promote healthy indoor ecosystems? *Indoor Air*. 2014 Apr;24(2):113-5.
- [26] **Horve PF, Lloyd S, Mhuireach GA, Dietz L, Fretz M, MacCrone G, Van Den Wymelenberg K, Ishaq SL.** Building upon current knowledge and techniques of indoor microbiology to construct the next era of theory into microorganisms, health, and the built environment. *J Expo Sci Environ Epidemiol*. 2019 Jul 15.
- [27] **Hospodsky D, Yamamoto N, Nazaroff WW, Miller D, Gorthala S, Peccia J.** Characterizing airborne fungal and bacterial concentration and emission rates in six occupied children's classrooms. *Indoor Air*. 2015 Dec;25(6):641-52.
- [28] **Iwasaki A, Foxman EF, Molony RD.** Early local immune defenses in the respiratory tract. *Nat Rev Immunol*. 2017 Jan;17(1):7-20.
- [29] **Kaldalu N, Hauryliuk V, Tenson T.** Persisters—as elusive as ever. *Appl Microbiol Biotechnol*. 2016 Aug;100(15):6545-53.
- [30] **Kembel SW, Jones E, Kline J, Northcutt D, Stenson J, Womack AM, Bohannon BJ, Brown GZ, Green JL.** Architectural design influences the diversity and structure of the built environment microbiome. *ISME J*. 2012 Aug;6(8):1469-79.
- [31] **Kembel SW, Meadow JF, O'Connor TK, Mhuireach G, Northcutt D, Kline J, Moriyama M, Brown GZ, Bohannon BJ, Green JL.** Architectural design drives the biogeography of indoor bacterial communities. *PLoS One*. 2014 Jan 29;9(1):e87093.
- [32] **Klepeis NE, Nelson WC, Ott WR, Robinson JP, Tsang AM, Switzer P, Behar JV, Hern SC, Engelmann WH.** The national human activity pattern survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants. *J Expo Anal Environ Epidemiol*. 2001 May-Jun;11(3):231-52.
- [33] **Kramer A, Schwebke I, Kampf G.** How long do nosocomial pathogens persist on inanimate surfaces? A systematic review. *BMC Infect Dis*. 2006 Aug 16;6:130.

- [34] **Kudo E, Song E, Yockey LJ, Rakib T, Wong PW, Homer R, Iwasaki A.** Low ambient humidity impairs barrier function and innate resistance against influenza infection. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 2019 May 28;116(22):10905-10.
- [35] **Lax S1,2, Sangwan N2,3, Smith D4, Larsen P2, Handley KM1, Richardson M1, Guyton K, Krezalek M, Shogan BD, Defazio J, Flemming I, Shkhsheer B, Weber S, Landon E, Garcia-Houchins S, Siegel J, Alverdy J, Knight R, Stephens B, Gilbert JA.** Bacterial colonization and succession in a newly opened hospital. *Sci Transl Med.* 2017 May 24;9(391). pii: eaah6500.
- [36] **Lax S, Gilbert JA.** Hospital-associated microbiota and implications for nosocomial infections. *Trends Mol Med.* 2015 Jul;21(7):427-32.
- [37] **Lazar V, Ditu LM, Pircalabioru GG, Gheorghe I, Curutiu C, Holban AM, Picu A, Petcu L, Chifiriuc MC.** Aspects of gut microbiota and immune system interactions in infectious diseases, immunopathology, and cancer. *Front Immunol.* 2018 Aug 15;9:1830.
- [38] **Lowen AC, Mubareka S, Steel J, Palese P.** Influenza virus transmission is dependent on relative humidity and temperature. *PLoS Pathog.* 2007 Oct 19;3(10):1470-6.
- [39] **Mahnert A, Moissl-Eichinger C, Zojer M, Bogumil D, Mizrahi I, Rattei T, Martinez JL, Berg G.** Man-made microbial resistances in built environments. *Nat Commun.* 2019 Feb 27;10(1):968.
- [40] **McCann CM, Christgen B, Roberts JA, Su JQ, Arnold KE, Gray ND, Zhu YG, Graham DW.** Understanding drivers of antibiotic resistance genes in High Arctic soil ecosystems. *Environ Int.* 2019 Apr;125:497-504.
- [41] **National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine.** Microbiomes of the built environment: a research agenda for indoor microbiology, human health, and buildings. Washington, DC: The National Academies Press;2017.
- [42] **Niehus, R.** Evolution on the microbial battlefield [PhD thesis]. Oxford: University of Oxford;2016.
- [43] **Noti JD, Blachere FM, McMillen CM, Lindsley WG, Kashon ML, Slaughter DR, Beezhold DH.** High humidity leads to loss of infectious influenza virus from simulated coughs. *PLoS One.* 2013;8(2):e57485.
- [44] **Or D, Smets BF, Wraith JM, Dechesne A, Friedman SP.** Physical constraints affecting bacterial habitats and activity in unsaturated porous media – a review. *Advances in Water Resources.* 2007;30(6-7):1505-27.
- [45] **Peccia J, Kwan SE.** Buildings, beneficial microbes, and health. *Trends Microbiol.* 2016 Aug;24(8):595-7.
- [46] **Poole K.** Bacterial stress responses as determinants of antimicrobial resistance. *J Antimicrob Chemother.* 2012 Sep;67(9):2069-89.
- [47] **Prussin AJ 2nd, Garcia EB, Marr LC.** Total virus and bacterial concentrations in indoor and outdoor air. *Environ Sci Technol Lett.* 2015;2(4):84-88.
- [48] **Rook GA.** Regulation of the immune system by biodiversity from the natural environment. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 2013 Nov 12;110(46):18360-7.
- [49] **Sharma A, Gilbert JA.** Microbial exposure and human health. *Curr Opin Microbiol.* 2018 Aug;44:79-87.

- [50] **Schweizer C, Edwards RD, Bayer-Oglesby L, Gauderman WJ, Ilacqua V, Jantunen MJ, Lai HK, Nieuwenhuijsen M, Künzli N.** Indoor time-microenvironment-activity patterns in seven regions of Europe. *J Expo Sci Environ Epidemiol.* 2007 Mar;17(2):170-81.
- [51] **Scudellari M.** Cleaning up the hygiene hypothesis. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 2017 Feb 14;114(7):1433-6.
- [52] **Simon AK, Hollander GA, McMichael A.** Evolution of the immune system in humans from infancy to old age. *Proc Biol Sci.* 2015 Dec 22;282(1821):20143085.
- [53] **Stone W, Kroukamp O, Korber DR, McKelvie J, Wolfaardt GM.** Microbes at surface-air interfaces: the metabolic harnessing of relative humidity, surface hygroscopicity, and oligotrophy for resilience. *Front Microbiol.* 2016 Sep 30;7:1563.
- [54] **The National Academy of Science Engineering Medicine.** Microbiomes of the Build Environment. The National Academies Press, 2017.
- [55] **Turnbaugh PJ, Ley RE, Hamady M, Fraser-Liggett CM, Knight R, Gordon JI.** The human microbiome project. *Nature.* 2007 Oct 18;449(7164):804-10.
- [56] **Vandegrift R, Bateman AC, Siemens KN, Nguyen M, Wilson HE, Green JL, Van Den Wymelenberg KG, Hickey RJ.** Cleanliness in context: reconciling hygiene with a modern microbial perspective. *Microbiome.* 2017 Jul 14;5(1):76.
- [57] **Vandini A, Temmerman R, Frabetti A, Caselli E, Antonioli P, Balboni PG, Platano D, Branchini A, Mazzacane S.** Hard surface biocontrol in hospitals using microbial-based cleaning products. *PLoS One.* 2014 Sep 26;9(9):e108598.
- [58] **Wolkoff P.** Indoor air humidity, air quality, and health – an overview. *Int J Hyg Environ Health.* 2018 Apr;221(3):376-90.
- [59] **WHO Publication/Guidelines.** Natural ventilation for infection control in health-care settings. Geneva: World Health Organization; 2009.

Autor:

Thomas Auer

Transsolar Energietechnik GmbH, Stuttgart, und Professur für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen an der Technischen Universität, München

Autorin:

Laura Franke

Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen, Technische Universität München

Robuste Architektur

Performance Gap

Menschen verbringen im Durchschnitt 80 bis 90 % ihrer Zeit in Gebäuden (vgl. EPA 1989). Es ist die Grundaufgabe von Architektur, Innenräume zu gestalten, die eine hohe Aufenthaltsqualität aufweisen. Gleichzeitig ist der Gebäudesektor in der westlichen Welt verantwortlich für 20 bis 40 % des gesamten Energiebedarfs (vgl. Pérez-Lombard et al. 2008). Zum Erreichen der gesteckten Klimaziele ist es von zentraler Bedeutung, den Energiebedarf des Gebäudesektors drastisch zu reduzieren. Die Carbon Roadmap der Europäischen Union sieht vor, dass im Vergleich zu 1990 die CO₂-Emissionen des Gebäudesektors bis zum Jahr 2050 um 90 % reduziert werden (vgl. European Commission 2018).

Die Bundesregierung hat die Konsultation „Grünbuch Energieeffizienz“ ins Leben gerufen. Mit dem Leitsatz „Efficiency First“ soll klargestellt werden, dass eine deutliche Reduktion der Treibhausgasemissionen nur möglich ist, wenn die vorhandenen Energieeinsparpotenziale im Bau- und Gebäudesektor voll ausgeschöpft werden (BMW_i 2015). Auf diesen Bereich entfallen während Herstellung, Bau und Betrieb etwa 50 % der weltweit verarbeiteten Rohstoffe, 40 % des deutschen Endenergieverbrauchs und ein Drittel der deutschen CO₂-Emissionen (vgl. BMW_i, 2016). Um die nationalen Klimaschutzziele zu erreichen, soll bis zum Jahr 2050 der Primärenergiebedarf in diesem Bereich um 80 % gegenüber dem Jahr 2008 gesenkt werden (vgl. BMW_i 2016). Aber selbst mit dem Bau klimaneutraler Gebäude lässt sich der ökologische Fußabdruck der Vergangenheit und des derzeitigen Gebäudebestandes nicht kompensieren. Die Neubaurate liegt in Deutschland bei rund 1 %, was im Umkehrschluss bedeutet, dass 70 % des Gebäudebestandes von 2050 bereits heute schon existieren. Deshalb gilt es, Einsparpotenziale im Bestand ausfindig zu machen und zu nutzen.

Während der Planungs- und Bauphase fallen in etwa 20 % der gesamten Lebenszykluskosten eines Gebäudes an. Die restlichen 80 % der Kosten sind der Nutzungsphase zugehörig, welche sich in 60 % Betriebskosten und 40 % Energiekosten aufteilen. Somit verursacht der Energieverbrauch nach der Fertigstellung von Gebäuden typischerweise ca. 32 % der gesamten Lebenszykluskosten eines Gebäudes. Der hohe prozentuale Anteil der Energie-

kosten in der Nutzungsphase veranschaulicht deutlich, wie wichtig Monitoring und Qualitätssicherungsmaßnahmen im Gebäudebetrieb sind, um die Lebenszykluskosten in der Nutzungsphase möglichst gering zu halten und einen energieeffizienten Gebäudebetrieb zu gewährleisten.

Doch zeigen wissenschaftliche Studien, dass der gemessene Energieverbrauch in der Nutzungsphase oftmals um ein Mehrfaches größer ist, als der in der Planung berechnete Energiebedarf (vgl. BINE 2015; OBB 2017; Delzende et al. 2017). Eine umfangreiche englische Studie untersuchte knapp 60.000 Bildungseinrichtungen – einschließlich 85 % aller nationalen Schulen (UK) – mit dem Ergebnis, dass 95 % den vorhergesagten Energiebedarf nicht einhalten (vgl. PDSP 2015).

Diese Diskrepanz wird als Performance Gap bezeichnet (Abb. 1). Das Missverhältnis resultiert aus der Differenz zwischen Planung und Realität – wie das Thema Nutzerverhalten zeigt: Der Unterschied zwischen den prognostizierten und den realen Präferenzen der Nutzer hat einen großen Anteil an dem Performance Gap – vor allem im Wohnungsbau (vgl. Delzende et al. 2017).

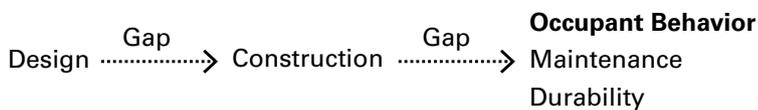


Abbildung 1: Performance Gap zwischen Energiebedarf und -verbrauch von Gebäuden; Abbildung aus Delzende et al. 2017

Die starke Varianz des Performance Gap – ausgelöst durch das Nutzerverhalten – zeigt das Forschungsprojekt „Nutzerverhalten bei Sanierungen berücksichtigen“ (vgl. BINE 2015): Wissenschaftler des E.ON Energy Research Center der RWTH Aachen University untersuchten den Effekt des Nutzerverhaltens bei der Sanierung eines Wohnquartiers in Karlsruhe. Der gemessene Heizenergieverbrauch von zehn Wohneinheiten eines Gebäuderiegels, der auf ein 3-Liter-Haus-Niveau saniert wurde, variiert deutlich (Abb. 2):

Zwar ergibt sich aus den Messergebnissen der zehn Wohneinheiten ein mittlerer Heizenergieverbrauch „E“ von 23,5 kWh/m², doch variieren die Einzelwerte signifikant. Die Autoren beschreiben das Nutzerverhalten des Ausreißers mit 79,3 kWh/m² als ein Profil mit hohen Innenraumtemperaturen und einem moderaten Lüftungsverhalten. Ebenso zeigen die Messungen hohe Energieverbräuche in Wohnungen, deren Nutzer zwar keine hohen Innenraumtemperaturen bevorzugen, jedoch die Fenster zu fast zwei Drittel der Zeit öffnen (vgl. BINE 2015).

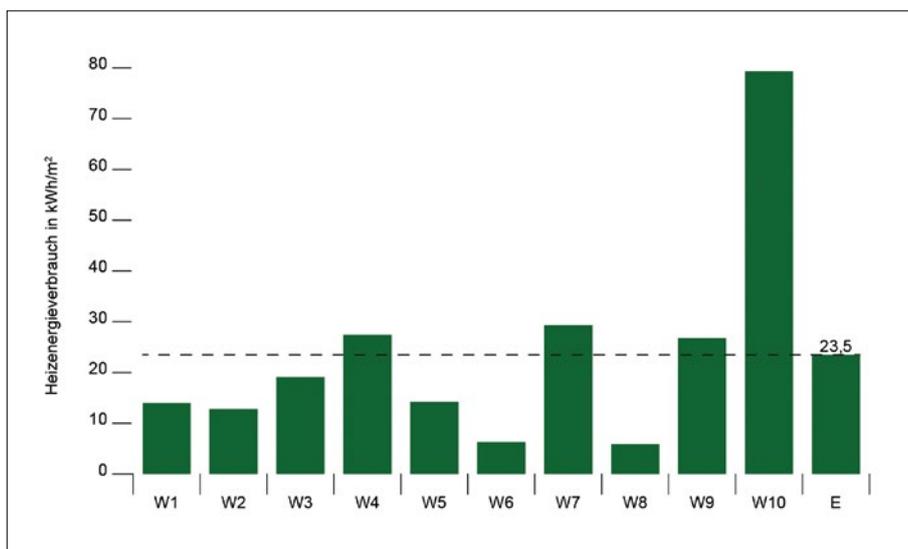
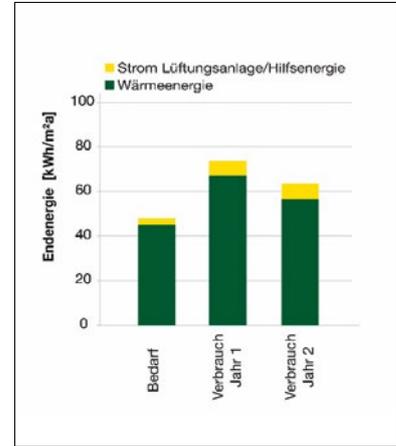
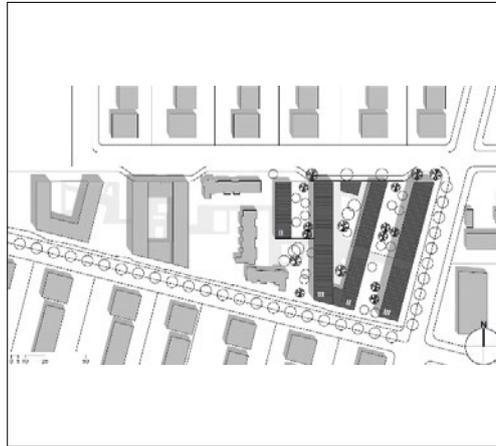


Abbildung 2: Einfluss des Nutzerverhaltens auf den Heizenergieverbrauch am Beispiel von zehn Wohneinheiten eines sanierten Gebäuderiegels in Karlsruhe (vgl. BINE 2015)

Das Forschungsprojekt zeigt anschaulich, dass der Nutzer im Wohnungsbau maßgeblich zwei Parameter beeinflusst: die Lufttemperatur und den Luftwechsel im Raum. Ergeben sich bezüglich dieser Parameter Abweichungen zwischen Planung und Realität, resultiert daraus ein großer Einfluss auf den Performance Gap.

Abbildung 3 und 4:
 Lageplan Ingolstadt-Hollerstauden (links),
 (vgl. OBB 2017);
 Ingolstadt-Hollerstauden – jährlicher
 Energiebedarf und -verbrauch (rechts),
 (vgl. OBB 2017)

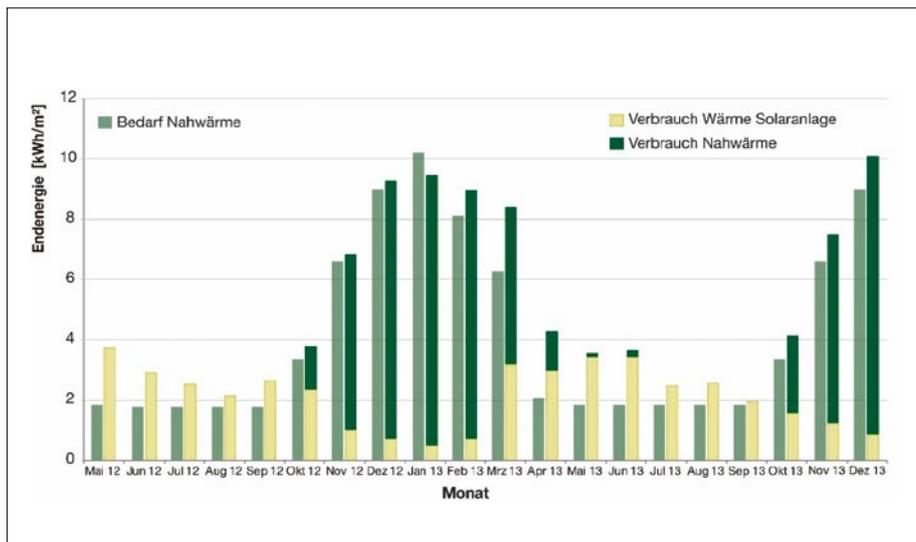


Diesen Einfluss zeigt auch das Forschungsprojekt „e% – Energieeffizienter Wohnungsbau“ der Technischen Universität München als ein Beispiel für den untersuchten Performance Gap im geförderten Geschosswohnungsbau (vgl. OBB 2017).

In Abbildung 4 und 5 sind errechneter Energiebedarf und gemessener Energieverbrauch für einen Wohnungsneubau in Ingolstadt (Baujahr: 2012; Wohneinheiten: 81; Nutzfläche: 7.378 m²) gegenübergestellt. Der jährliche Performance Gap der Wärmeenergie liegt hier bei einem Faktor von ca. 1,5 im ersten Betriebsjahr bzw. 1,3 im zweiten Jahr (Abb. 4).

In der monatlichen Betrachtung (Abb. 5) fällt auf, dass vor allem der gemäß Energieeinsparverordnung statistisch berechnete Bedarf in den unbeheizten Monaten die realen Verbräuche nicht widerspiegelt. Während der Performance Gap in den Wintermonaten relativ gering ist, nimmt er vor allem in der Übergangszeit deutlich zu.

Abbildung 5:
 Ingolstadt-Hollerstauden –
 monatlicher Energiebedarf und -verbrauch
 (vgl. OBB 2017)



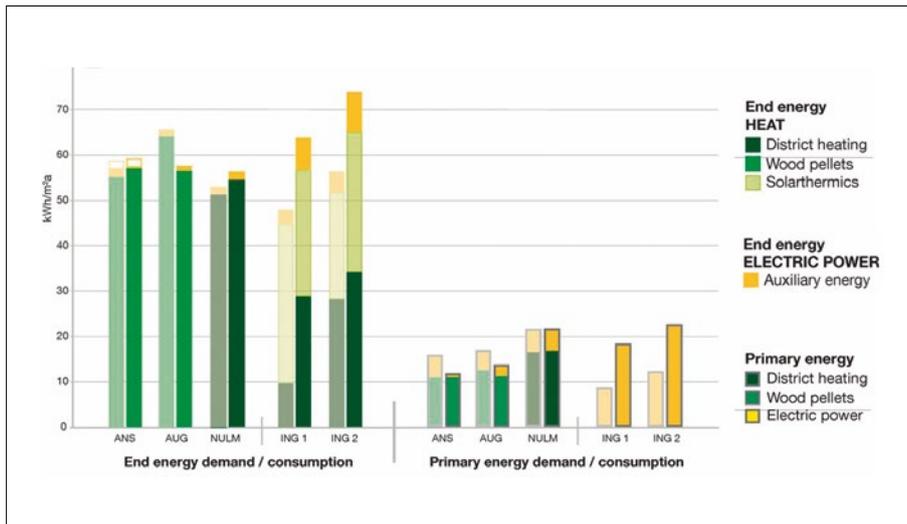


Abbildung 6: Performance Gap – Überblick der untersuchten Gebäude (vgl. OBB 2017)

Insgesamt unterscheiden sich die Energiebedarfe und -verbräuche der untersuchten Gebäude des Forschungsprojektes leicht bis stark (Abb. 6). Auffallend an der Studie ist, dass der Performance Gap bei Gebäudekonzepten mit einfacheren Technikkomponenten deutlich kleiner ausfällt, als bei komplexen Technikkonzepten. Auch hier spielt das Nutzerverhalten eine wesentliche Rolle. Bei den Konzepten mit mechanischen Lüftungssystemen entscheidet das Nutzerverhalten maßgeblich über einen effizienten Wärmeverbrauch: Die vom Nutzer gewählten Innenraumtemperaturen liegen bei den untersuchten Gebäuden – mit Ausnahme der Schlafzimmer – um durchschnittlich 1,5 K über dem Standardwert der Berechnungsverfahren von 20,0 °C. Zudem wird vor allem in den Übergangszeiten auffallend häufiger und länger geheizt.

Grundsätzlich zeigen Studien im Vergleich über alle Gebäudetypen: Der maßgebliche Einfluss auf den Performance Gap entsteht bei Gebäuden mit reduziertem bzw. einfachem technischen System durch den Nutzer (Wohngebäude), hingegen bei Gebäuden mit komplexer Technik durch Systemfehler (Bürogebäude).

An diesem Punkt setzt das laufende Forschungsprojekt „Big-Data-Analysen von Automationsdaten zur energetischen Betriebsoptimierung des Gebäudebestandes“ der Technischen Universität München (Träger: Jülich PTJ / Partner: TU Braunschweig, RWTH Aachen University, Synavision GmbH, WIL0 SE) an: Die Forscher entwickeln ein Modell, welches ein virtuelles Abbild von TGA-Systemen darstellt und die korrekten Anlagenbetriebszustände widerspiegelt. Analog dazu ermöglicht das Modell, Probleme im Gebäudebetrieb zu markieren und Betriebsfehler zu identifizieren.

Auf Basis realer Betriebsdaten lässt sich somit feststellen, ob eine Anlage fehlerfrei oder fehlerhaft betrieben wird. Dadurch wird nachgewiesen, dass über einen modellbasierten Ansatz zur automatischen Betriebsfehlererkennung die Identifikation fehlerhafter Betriebszustände in der TGA möglich ist. Dieser Prozess trägt zur Verbesserung der Gebäudeperformance bei und ermöglicht die Ableitung von Optimierungspotenzialen aufgrund der intelligenten Analysen von Automationsdaten.

Nicht zuletzt zeigen die Forschungsprojekte, dass eine einfache Anlagentechnik (z. B. monovalente Wärmeerzeugung und Abluftanlage) ebenso günstige Endenergieverbräuche erzielen kann wie technisch und wirtschaftlich hochambitionierte und komplexe Systeme (vgl. OBB 2017). Bei Sanierungsprojekten verhält es sich ähnlich: Der Performance Gap fällt umso größer aus, je ausgefallener die anlagentechnische und baukonstruktive Sanierung ausgeführt wird (vgl. BINE 2015).

Die letzte Erkenntnis ist ein entscheidendes Argument gegenüber der stetig steigenden Komplexität im Bauwesen: Die Baukostensenkungskommission der Bundesregierung kam zu dem Ergebnis, dass vor allem die Kostengruppe 400 (technische Gebäudeausrüstung) für die Kostensteigerung am Bau verantwortlich ist. Untersuchungen zeigen, dass die angestrebte Energieeffizienz im Betrieb – wenn überhaupt – erst nach einer Einregulierungsphase erzielt wird (vgl. Jazizadeh et al. 2013). Da ein solches Monitoring für die allermeisten Gebäude nicht durchgeführt wird, liegt der Schluss nahe, dass eine Vielzahl von neuen Gebäuden deutlich mehr Energie verbraucht als erforderlich.

Demnach wird das Ziel, mittels Technologie den Energiebedarf des Gebäudesektors zu minimieren und die Aufenthaltsqualität gleichzeitig zu optimieren, meist verfehlt. Viel zu häufig funktionieren Systeme nicht wie geplant. Und selbst wenn sie das tun, was sie sollten, führt dies nicht zwangsläufig zu einer Zufriedenheit der Nutzer..

Hightech versus Lowtech

Die Abwägung zwischen Hightech und Lowtech bestimmt zunehmend den Diskurs hinsichtlich der Angemessenheit von technischen Systemen mit dem Ziel eines CO₂-neutralen Gebäudebestands. Energieeffizienz war in der vergangenen Dekade vor allem technologisch getrieben. Derzeit gibt es jedoch ein Umdenken hinsichtlich ganzheitlicher Zusammenhänge. Neben der Frage nach einem effektiven Einsatz von Technologie werden die „richtigen“ Bilanzgrenzen diskutiert: quartiersbezogener bzw. städtischer Maßstab anstelle der ausschließlichen Bilanzierung des Gebäudes. Außerdem sind die Aufenthalts- und architektonisch-haptische Qualität zunehmend Teil der Betrachtung. Passive Ansätze für Energieeffizienz bzw. die Nutzung regenerativer Energiequellen sind dabei integraler Bestandteil der Architektur.

Die Frage ist, ob die Komplexität in Bau und Betrieb der Gebäude, den gewünschten Erfolg erzielt. Hinzu kommt der Nutzer, der durch sein Verhalten häufig die getroffenen technischen Maßnahmen konterkariert. Architekten und Ingenieure sprechen in solchen Fällen oft von einem „Nutzerfehlverhalten“, wobei zu hinterfragen ist, ob es sich um eine Fehlnutzung oder ein falsches Konzept handelt.

Einen Gegenpol bilden eine Reihe neuer Gebäude, die nach dem Prinzip Lowtech entwickelt wurden. Die Frage nach Hightech versus Lowtech – letztlich ein Thema der 1990er-Jahre – ist dadurch neu entbrannt. Passive Strategien, wie wir sie aus der vernakulären Architektur kennen, zeigen, dass die Aufenthaltsqualität bei minimiertem Einsatz von Klimatechnik optimiert werden kann. Auf normativer Basis der adaptiven Komfortstandards (DIN EN 15251) kann man zeigen, dass die Aufenthaltsqualität in historischen Gebäuden meist relativ komfortabel war, wenngleich sie in der Regel nicht den Komfortansprüchen des 21. Jahrhunderts genügt. Andererseits haben eine gewisse Ignoranz gegenüber einer klimagerechten Architektur und der Glaube an Technik bis in die 1990er-Jahre des letzten Jahrhunderts zu einer „Aufrüstung“ an Technik geführt. Dies hatte zum Ergebnis, dass viele Gebäude mit Klimatechnik ausgestattet wurden, ohne dass die Aufenthaltsqualität in Gebäuden ganzheitlich betrachtet wurde. Mit der Konsequenz, dass viele Gebäude weder die gewünschten Energiekennzahlen erzielen, noch in der Lage sind, eine Aufenthaltsqualität herzustellen, die zu einer großen Nutzerzufriedenheit führt.

Aus der Notwendigkeit der Verbesserung gingen letztlich zwei – teils konträre – Ansätze hervor:

1. Optimierung der Klimatechnik und der Mess-, Steuer- und Regelungstechnik (MSR), gegebenenfalls mit einem „smarten“ Nutzer-Interface (smart building, IoT technology etc.), und
2. Optimierung der Architektur hin zu weniger Klimatechnik (passive Maßnahmen).

Passive Strategien und Materialien wurden in den letzten 20 Jahren stetig weiterentwickelt. In diesem Zusammenhang steht das eigengenutzte Bürogebäude „2226“ der Baumschlager Eberle Architekten, das nach eigenen Angaben komplett ohne Heizungs-, Lüftungs- und Klimatechnik (HLK) auskommt und gleichzeitig in der Lage ist, komfortable Innenraumverhältnisse (22–26 °C) zu gewährleisten (Abb. 7).



Abbildung 7:
2226, Lustenau, Österreich,
© be architekten (Eberle et al. 2016)

Das unterschiedlich genutzte Haus (Büro, Kantine, Wohnen, Sport etc.) verzichtet auf Heizungs-, Lüftungs- und Klimatechnik. Nur die innen liegenden Nasszellen werden über dezentrale Anlagen automatisch be- und entlüftet. Über die Mess-, Steuer- und Regelungstechnik wird die natürliche Lüftung durch motorisch öffnende Lüftungsflügel nach Raumtemperatur und CO₂-Konzentration geregelt. Dabei öffnen sich gleichzeitig zwei diagonal gegenüberliegende Lüftungskappen eines Raumes (Querlüftung). Bei sommerlicher Hitze öffnen sich alle Lüftungsflügel pro Raum bei Nacht. Individuelle Regelungen nach Nutzung, sowie das Eingreifen des Nutzers sind möglich. Die Beleuchtung sichert im Bedarfsfall die Raumwärme (vgl. Eberle et al. 2016).

Bereits bei 2226 zeigt sich, dass es schwerfällt, Lowtech zu definieren, und Lowtech keinesfalls auf die Minimierung von Technik reduziert werden kann. Grundsätzlich kann Lowtech bedeuten:

- › einfache Konstruktion mit einfachen Details
- › einfache Grundrisse und Gebäudeorganisation
- › einfache, flexible Umnutzung (Nutzungsneutralität)
- › wenig oder keine HLK (Heizen, Lüften, Kühlen), aber intelligente MSR (Mess-, Steuer- und Regelungstechnik)
- › einfache HLK und keine bzw. wenig MSR
- › usw.

Dem Lowtech Ansatz steht die hermetisch abgeschlossene und hochgedämmte Hülle – kombiniert mit einer optimierten Klimatechnik, die aus regenerativen Energiequellen gespeist wird, gegenüber: Komplexe Regelungstechnik – teilweise mit selbstlernenden Algorithmen – kontrollieren die Aufenthaltsparameter Raumklima, Luftqualität und Licht.

Beide Ansätze können ein sehr energieeffizientes Gebäude zum Ergebnis haben und es wird nicht gelingen, ein „Richtig“ oder „Falsch“ zu bestimmen. Auch die Definition von Lowtech ist schwierig: Ein historisches Bauernhaus war sicherlich Lowtech und extrem energieeffizient. Es ist aber weder auf unsere dicht bebauten Städte übertragbar, noch würde der winterliche Komfort heute akzeptiert werden. Eine „Ertüchtigung“ mit modernen Hightech-Materialien würde das Ergebnis deutlich verbessern; ist es dann aber noch ein Lowtech-Gebäude?

Es gibt heute passiv betriebene Gebäude, die MSR-Technik und Hightech-Materialien nutzen. Genauso gibt es einfache Gebäudegrundrisse und -hüllen, kombiniert mit HLK-Technik, wobei die Trennung von Hülle und Techniksystem beachtet wurde. Die unterschiedlichen Konzepte führen zu einer subjektiven Wahrnehmung der Begriffe Lowtech oder auch „Einfach bauen“, die bislang keine wissenschaftlich fundierte Definition haben. Mit dem Ziel einer objektiveren Betrachtung der Begriffe denken wir (Autoren) an dieser Stelle folgende Hypothese an:

Ausgeklügelte technische Systeme erzielen in der breiten Anwendung weder die prognostizierte Energieeinsparung, noch führen sie zu einer guten Nutzerzufriedenheit. Ein robuster Gebäudebetrieb bei guter Aufenthaltsqualität, kombiniert mit einem minimalen Energiebedarf, lässt sich vor allem über passive Systeme herstellen. Ausschließlich eine klimagerechte Gestaltung der gebauten Umwelt – in all ihren Skalierungsgraden (Raum, Gebäude, Quartier, Stadt) – ist entscheidend für Nutzerkomfort und Energieeffizienz. Allzu oft kommen technische Systeme zum Einsatz, um eine fehlerhafte Gestaltung zu korrigieren.

Robustheit

Was die Hypothese im Kern beschreibt, lässt sich mit dem Begriff der Robustheit ausdrücken: Eine robuste Optimierung ist in vielen Industriezweigen Stand der Technik, hat jedoch im Bauwesen noch keinen Einzug gefunden (vgl. Nguyen et al. 2014). Gleichzeitig bestehen gerade im Gebäudesektor unsichere Randbedingungen, beispielsweise aus dem Nutzerverhalten, nicht optimal betriebenen Systemen oder auch dem Klimawandel, der zwangsläufig – vor allem in Städten – zu einer Veränderung der klimatischen Randbedingungen führen wird.

Ein robustes Verhalten, bzw. eine robuste Optimierung, lässt sich wissenschaftlich beschreiben (vgl. Rhein 2014; Maderspacher 2017). Die folgende Grafik (Abb. 8) zeigt den Unterschied zwischen einer globalen und einer robusten Optimierung – reduziert auf zwei Parameter.

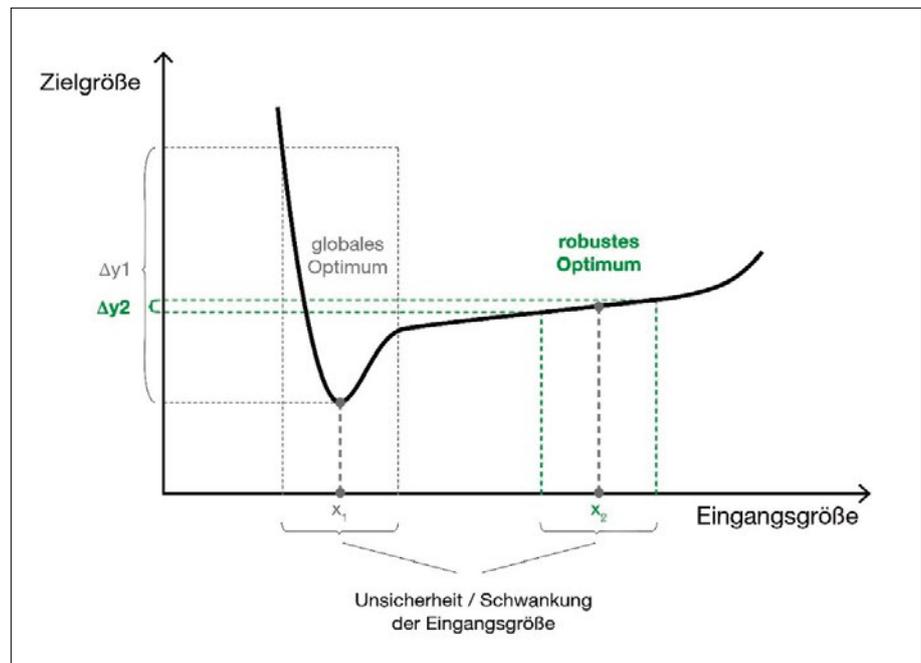


Abbildung 8:

Unterschied zwischen einem globalen und einem robusten Optimum (eigene Darstellung nach: Rhein 2014)

Bisherige Planungsprozesse haben zum Ziel, für die jeweilige Aufgabe das sogenannte globale Minimum zu finden. Die Schwankung der Eingangsgröße um das globale Optimum (unsichere Randbedingungen) kann jedoch das Ergebnis erheblich beeinflussen (Abb. 8: Δy_1). Demgegenüber beeinflussen bei einer robusten Optimierung unsichere Randbedingungen das Ergebnis nur geringfügig (Abb. 8: Δy_2). Im Gegensatz zum Begriff Lowtech ist die Robustheit damit klar definiert.

Forschungsprojekte der Technischen Universität München zeigen, dass die Robustheit von Gebäuden ein zentraler Parameter ist (vgl. Maderspacher 2017; Endres 2018; Einfach Bauen 1, 2018). Betrachtet man beispielsweise den Anteil der Fensterfläche in einer Wand, so nimmt der Energiebedarf durch die verbesserte Nutzung von Tageslicht bis zu einem gewissen Punkt ab. Bei einer weiteren Erhöhung des Fensterflächenanteils steigt der Energiebedarf dann überproportional an (z. B. durch einen erhöhten Kühlbedarf, ohne dass der Kunstlichtbedarf weiter abnimmt) – vor allem dann, wenn der Nutzer Einfluss auf den Sonnenschutz nimmt.

Technologie reduziert die Robustheit, wenn eine fehlerbehaftete MSR-Technik und/oder der Nutzereinfluss das Ergebnis massiv beeinträchtigt. Das Forschungsprojekt „e% – Energieeffizienter Wohnungsbau“ zeigt, dass die Nutzer in den untersuchten Gebäuden mit maschineller Lüftung und Wärmerückgewinnung die Fenster trotzdem öffnen, sodass der gemessene Energiebedarf den prognostizierten um ca. 100 % übersteigt. Dahingegen wird bei den natürlich gelüfteten Häusern der prognostizierte Energiebedarf eingehalten oder sogar leicht unterschritten. Eine maschinelle Lüftung ist demnach im Geschosswohnungsbau keine robuste Lösung. (vgl. OBB 2017)

Die meisten Optimierungen in der Praxis gehen von bekannten Eingangsgrößen aus. Eine robuste Optimierung geht weiter, indem sie die Schwankungen (Unsicherheiten) der Eingangsgrößen berücksichtigt. Daher scheint es sinnvoll, Gebäude gemäß ihrer Robustheit zu bewerten. So könnten in Zukunft Technikkonzepte vermieden werden, die zwar unter spezifischen Randbedingungen besser als andere Konzepte sein können, die aber hinsichtlich der gesamten Schwankungsbreite ihrer Randbedingungen schlechter sind.

Die Robustheit von Gebäuden lässt sich definieren. Ein robust optimiertes Gebäude lässt erwarten, dass der Performance Gap drastisch reduziert wird. Ein robustes Verhalten lässt außerdem erwarten, dass auch die Nutzerzufriedenheit ansteigt.

Aktuelle Forschungsprojekte im Kontext einer robusten Optimierung

Das Forschungsprojekt „Parameterstudie Low-Tech Bürogebäude“ (Träger: BBSR, Zukunft Bau/Partner: Deutsche Poroton GmbH) der Technischen Universität München betrachtet passive Gebäudemaßnahmen an der Schnittstelle zu aktiver Haustechnik zum Heizen, Kühlen und Lüften und validiert die Konzepte unter ganzheitlichen Aspekten. Diese Aspekte sind unter anderem natürliche Lüftungsstrategien, Einfluss von Raumgeometrien und Belegungsdichten, thermische Speichermassen im Raum oder der Einsatz grauer Energie in der Konstruktion. Neben diesen genannten Parametern ist auch das Nutzerverhalten in die Betrachtungen miteinbezogen.

Die Ergebnisse der simulierten Büroräume zeigen, dass der Verzicht auf sämtliche mechanischen Komponenten in der Haustechnik und der Fassadentechnik den Innenraumkomfort gegenüber den anerkannten Regeln der Technik einschränkt bzw. die anerkannten Regeln der Technik nicht eingehalten werden können (Abb. 9). Der Verzicht auf sämtliche technische Einrichtungen führt dazu, dass im Winter die Luftqualität und der thermische

Komfort nicht unabhängig voneinander sichergestellt werden können. Aber: Durch den Verzicht auf technische Systeme zur Raumkonditionierung und Steuerungstechnik in der Hüllkonstruktion für Sonnenschutz und natürliche Lüftungsstrategien wächst der Einfluss der Fassadengestaltung und des Nutzers auf das herrschende Raumklima (vgl. Endres 2018).

In der Studie wurde ein nach Norm typischer Büroraum (Wetterdaten des Deutschen Wetterdienstes: TRY 2011, Potsdam extrem) per thermischer Simulation abgebildet und hinsichtlich des Endenergieverbrauchs für Heizen, gegebenenfalls Kühlen und den sommerlichen Wärmeschutz untersucht. Dabei variiert wurden: Raumgeometrie, Orientierung, Fensterflächenanteil, Verglasungsqualität sowie die thermische Masse der Decke und der Wände. Zusätzlich wurden ein außen liegender Sonnenschutz, eine maschinelle Lüftung (hygienischer Luftwechsel mit einer Zulufttemperatur von 18 °C) und eine Bauteilaktivierung untersucht. Die Ergebnisse der fast 5.000 Varianten wurden als Punktwolken dargestellt, wobei die Abszissenachse den elektrischen Endenergiebedarf und die Ordinate die sommerlichen Wärmeschutz abbildet.

Die Studie zeigt, dass ein rein passiver Betrieb den sommerlichen Wärmeschutz nicht herstellen kann. Addiert man eine mechanische Komponente (außen liegender Sonnenschutz, maschinelle Lüftung oder Bauteilaktivierung), so erfüllen zwischen 27 % (Lüftung) und 67 % (Bauteilaktivierung) der Varianten die Anforderungen des sommerlichen Wärmeschutzes, wobei der Energiebedarf steigt.

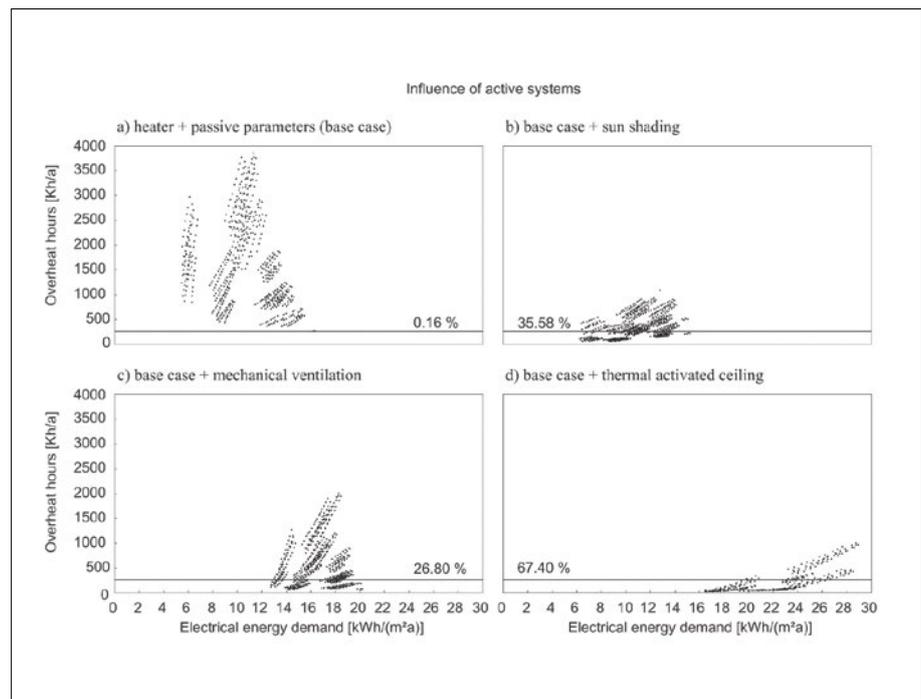


Abbildung 9:

Übersicht Punktwolken der unterschiedlichen Randbedingungen (vgl. Endres 2018)

In der „Parameterstudie Low-Tech Bürogebäude“ wird deutlich, dass eine passive Optimierung der Fassade die Robustheit des Gebäudes vergrößert – ein rein passiver Betrieb die geltenden Anforderungen jedoch nicht erfüllt und nicht zwangsläufig zu einer robusten Optimierung führt. Daher geht die Studie davon aus, dass Lowtech im Bereich von Bürogebäuden nicht ohne jegliche technischen Systeme zu definieren sein wird. Die Ergebnisse zu den eingesetzten Systemen zeigen, dass bereits der Einsatz einfacher Technologien ein hohes Optimierungspotenzial aufweist. (Endres, 2018)



Abbildung 10:

„Einfach Bauen“ – 1:1-Mock-ups einschichtiger Außenwandkonstruktionen in hochwärmedämmendem Mauerwerk, Massivholz und Leichtbeton in Bad Aibling
© TUM, www.einfach-bauen.net

Im Kontext einer robusten Optimierung arbeiten mehrere Lehrstühle der Architekturfakultät der Technischen Universität München an dem Forschungsprojekt „Einfach Bauen“.

Die beteiligten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler möchten einen Gegenimpuls zur immer weiter steigenden Komplexität moderner Bauten setzen. Ihre Strategien für einfaches und gleichzeitig energieeffizientes und ressourcenschonendes Bauen umfassen unter anderem die Reduktion der Gebäudetechnik, eine monolithische Bauweise und eine Reduzierung der Schichten. Dabei stehen optimierte Konstruktionen aus Massivholz, Leichtbeton ohne Stahl und hochwärmedämmendem Mauerwerk im Fokus (Abb. 10).

Im ersten Teil – Einfach Bauen 1: Forschung zu den Prinzipien des einfachen Bauens (2016–2018) – untersuchte das Team die Wechselwirkungen von Raum, Konstruktion und Gebäudetechnik (Träger: BBSR, Zukunft Bau/Partner: Stiftung Bayerisches Baugewerbe, B&O Gruppe, Bad Aibling, Gump & Maier GmbH, MEIER Betonwerke GmbH). Knapp 3.000 Varianten von Raummodellen wurden thermisch-dynamisch simuliert, wobei neben der Bauweise auch die Himmelsrichtung, die Raumtiefe und -höhe, der Fensterflächenanteil, die Glasart sowie die Schichtdicke der Außenwand parametrisiert untersucht wurden (vgl. Einfach Bauen 1, 2018). Auf der Gebäudeebene wurde eine Lebenszyklusanalyse durchgeführt und zusammen mit den Lebenszykluskosten vergleichend dargestellt. Die theoretische Grundlagenforschung brachte eine Strategie für „Einfach Bauen“ hervor, bestehend aus den wesentlichen Elementen:

- › einschichtige Wand- und Deckenkonstruktionen,
- › klimatisch träge Bauteile durch Speichermasse,
- › angemessene Fensterflächen – kein Sonnenschutz – Nutzerlüftung,
- › wenig Aufwand für den Betrieb durch geringe Komplexität des Gebäudes,
- › handwerkliche Fügung der Bauteile,
- › Verzicht auf Hilfsstoffe und materialfremde Sonderbauteile und
- › konsequente Trennung von Gebäude und Techniksystemen.

Im anknüpfenden Projekt „Einfach Bauen 2“ (Träger: BBSR, Zukunft Bau/Partner: Stiftung Bayerisches Baugewerbe, B&O Gruppe) geht es um die praktische Anwendung der gewonnenen Erkenntnisse in drei Pilot-Wohnhäusern, die derzeit durch die B&O Gruppe auf ihrem eigenen Gelände in Bad Aibling errichtet werden. Im Rahmen des Forschungsprojekts sollen technische Installationen minimiert und bauliche Details sowie Anschlüsse systematisch vereinfacht werden (vgl. Einfach Bauen 2, 2019). Die drei Häuser werden monolithisch in den Materialien Holz, Mauerwerk und Beton gebaut. Ziel der Forschung ist es, die Strategien „Einfach Bauen“ konsequent umzusetzen (Abb. 11).

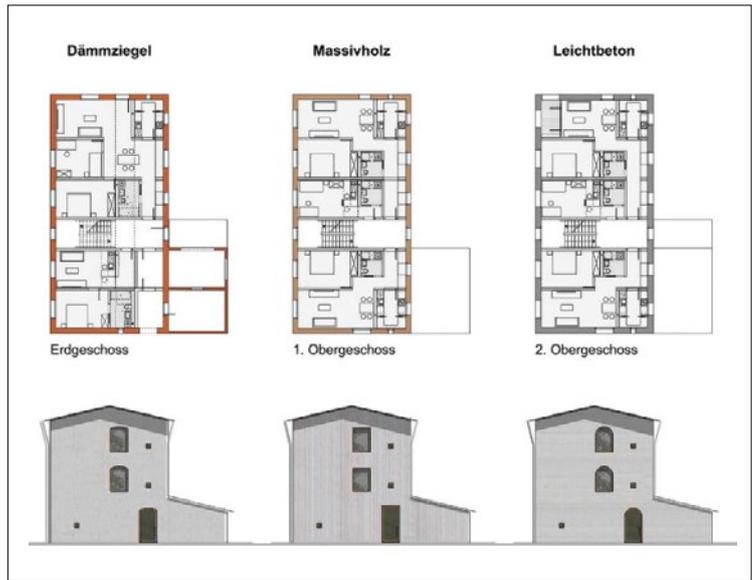


Abbildung 11:

Gebäude Leichtbeton, Rohbauarbeiten im EG (links), © TUM, Laura Franke; Grundrisse und Straßenansicht der drei Forschungshäuser (rechts), © Florian Nagler Architekten

Auch ausgehend von den Erkenntnissen des Forschungsverbundes an der Technischen Universität München baut das Studentenwerk München ab 2020 auf dem Campus Garching drei Wohngebäude. Die drei Forschungshäuser bieten knapp 200 Wohnplätze für Studierende. Gebaut werden sie in gleicher Geometrie und Größe und ebenfalls in den Konstruktionsmaterialien Leichtbeton, Massivholz und Mauerwerk (Abb. 12).



Abbildung 12:

Forschungshäuser auf dem TUM-Campus in Garching, Modellfoto, © Florian Nagler Architekten

Ziel sind robuste Gebäude, die stark an den Bedürfnissen der Bewohnerinnen und Bewohner ausgerichtet sind. Als Prototypen für das Prinzip des „Einfachen Bauens“ werden sie außerdem für weitere Untersuchungen (Nutzerinteraktion) und Langzeitmessungen (Komfort und Verbrauch) genutzt. Unterstützt wird das Projekt von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU).

Fazit

Bezug nehmend auf die gestellte Hypothese zu robusten Gebäuden mit passiven Systemen lässt sich abschließend ergänzen: Passive und gleichzeitig nutzergeregelte Systeme führen potenziell nicht nur zu einem reduzierten Energiebedarf und geringeren Installationskosten; sie erhöhen gleichzeitig die Robustheit von Gebäuden. Damit steigern sie die Nutzerzufriedenheit und reduzieren den Performance Gap. Aufgrund der großen Anzahl an Mängeln, die wir im Bauwesen haben, sind robuste Lösungen zwingend notwendig. Außerdem sollte der Mensch wieder stärker ins Zentrum der Betrachtung gerückt werden. Vielleicht sollten wir den Wünschen und der „Sensorik des Menschen“ mehr vertrauen als nicht mehr nachvollziehbaren Regelalgorithmen.

Referenzen

BINE (2015). Nutzerverhalten bei Sanierungen berücksichtigen. BINE Informationsdienst. Projektinfo 02/2015. Energieforschung konkret. E.ON Energy Research Center der RWTH Aachen University.

BMWi (2015). Energieeffizienzstrategie Gebäude – Wege zu einem nahezu klimaneutralen Gebäudebestand. Broschüre des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi). Berlin.

BMWi (2016). Grünbuch Energieeffizienz. Diskussionspapier des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi). Berlin.

Delzende, E. et al. (2017). The impact of occupants' behaviours on building energy analysis: A research review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol 80, 1061–1071.

Eberle, D. et al. (2016). Be 2226 – Die Temperatur der Architektur – Portrait eines energieoptimierten Hauses. Birkhäuser. Basel.

Einfach Bauen 1 (2018). Einfach Bauen: Ganzheitliche Strategien für ein energieeffizientes, einfaches Bauen – Untersuchung der Wechselwirkungen von Raum, Technik, Material und Konstruktion. Endbericht. Technische Universität München, Zukunft Bau (BBSR). SWD-10.08.18.7-16.29.

Endres, E. (2018). Parameterstudie Low-Tech Bürogebäude. Endbericht. Technische Universität München. Zukunft Bau (BBSR). SWD-10.08.18.7-16.65.

EPA (1989). Report to Congress on Indoor Air Quality. Volume II: Assessment and Control of Indoor Air Pollution. United States Environmental Protection Agency. EPA/400/1-89/001C.

European Commission (2018). 2050 low-carbon economy. Website besucht am 17.6.2019. URL: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050_en.

Fisch, M. N. et al. (2007). EVA – Evaluierung von Energiekonzepten für Bürogebäude. Abschlussbericht der TU Braunschweig. Institut für Gebäude- und Solartechnik.

Jazizadeh, F. et al. (2013). Personalized Thermal Comfort Driven Control in HVAC Operated Office Buildings. *Computing in Civil Engineering – Proceedings of the 2013 ASCE International Workshop on Computing in Civil Engineering*, 218–225.

Maderspacher, J. (2017). Robuste Optimierung in der Gebäudesimulation. Entwicklung einer Methode zur robusten Optimierung für die energetische Sanierung von Gebäuden unter unsicheren Randbedingungen. Dissertation. Technische Universität München.

Nguyen, A. T. et al. (2014). A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. *Applied Energy*, vol. 113, 1043–1058.

OBB (2017). e% – Energieeffizienter Wohnungsbau. Abschlussbericht der wissenschaftlichen Begleitung des Modellbauvorhabens. Technische Universität München. Hochschule Augsburg. Hochschule Coburg. Oberste Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern, für Bau und Verkehr.

Pérez-Lombard, L. et al. (2008). A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, vol. 40, 394–398.

Rhein, B. (2014). Robuste Optimierung mit Quantilmaßen auf globalen Metamodellen. Dissertation. Universität Köln.

Rupp, F. et al. (2015). A review of human thermal comfort in the built environment. *Energy and Buildings* 105, 178–205.

Autor:

Lars Junghans

Professur am Taubman College der University of Michigan, Ann Arbor

Feasibility of the “22/26” building under varying construction, occupancy and climatic conditions

Existing high-performance building concepts for a cold climate have been demonstrated to be technically efficient in reducing operating cost and greenhouse gas emissions. Concept “22/26” is a realized high performance building which has been proven to be economically and environmentally feasible in the cold climate of Lustenau/Austria, even without using mechanical systems for heating, cooling and ventilation. However, its feasibility in conditions differing to those in Lustenau has not been investigated. This study compares the thermal comfort in the “22/26” concept with conditions differing from the realized building in Lustenau. Thermal comfort conditions are tested for different climate zones, occupancy types and climate conditions.

Results are demonstrating that the “22/26” concept technology is feasible even in conditions differing from these of the realized project.

Introduction

In recent years, the discussion of high-performance building design, especially in cold climates, has focused on so-called “Net Zero Energy Buildings” (NZEB). NZEB are high-energy performance buildings that require a very low amount of energy for building operation and their remaining energy requirements are covered to a very large extent by renewable energy sources like photovoltaic systems (Rodriguez-Ubinas et al. 2014).

Several NZEB concepts have been developed for cold climates to address this goal, including the passive house concept (Feist et al. 1993), the null/plus energy house concept (Sobek 2011), and the LowEx building (Hepbasli 2012; Meggers et al. 2012). All of these concepts have the common goal of reducing greenhouse gas emissions and the cost of building operation (Marzal et al 2011).

The passive house is a high performance building originally developed by W. Feist in the late 1990s (Feist et al. 1993; Feist et al. 1999). A common feature of passive houses is the extremely high quality of the building envelope which reduces the heat transfer. High performance heat protecting glazing, a huge amount of insulation and extremely low air infiltration are typical features of the passive house envelope. The passive house is typically equipped with a controlled mechanical ventilation system with heat recovery. The defined goal of the passive house is the reduction to a level not higher than 15 kWh/m²y for the use energy demand for heating and to a level not higher than 120 kWh/m²y for the total primary energy demand for buildings located in the cold climate of Central Europe. The initial cost of a passive house is, depending on the location, 8–12 % higher than that of a building designed according to national building codes in Central Europe (Audenaert et al. 2008). Passive houses have been successfully built and operated in a large number of countries.

The net zero energy house takes a different approach. Its design focuses on the use of mechanical systems with renewable energy sources. The “Null Energy House” concept requires a huge amount of building technology to compensate for the energy demand for building operation. Some net zero energy house can accommodate a lower quality of building envelope than a passive house. One variety, the Plus Energy House, is designed to deliver even more energy to the public grid than its own operation (Sartori et al. 2012).

The LowEx House derives its name from the goal of reducing the overall exergy of the building (Hepbasli 2012). It tries to recover every type of waste heat occurring and use it for room heating. For example, waste heat in the sewage water or from cooking is extracted by small-scale heat pumps for room heating. A demonstration project of the LowEx building concept was realized in Zurich in the year 2012.

“22/26” shares goals of these three concepts, but it takes the next step by introducing a building without any active systems for heating, cooling and ventilation. The heart of the innovative building concept is a novel building automation system. The building control is based on a hybrid control logic (El Mankibi and Michel 2009; Heisselberg et al 1999).

The building concept described here, “22/26”, realized in 2013 in Lustenau/Austria, goes beyond the conventional zero net emission building discussion. It is able to reduce the initial and operating cost of a near-zero energy building because it uses a new form of building automation to control motorized natural ventilation openings.

Two strategies have been applied to achieve the high performance of this building:

1. The building envelope is improved to a level such that internal heat gains can cover the heating energy demand in the heating season, and
2. Conventional HVAC systems are eliminated because of the introduction of a new form of building automation system to control natural ventilation openings.

The temperature, humidity and CO₂ concentration are monitored in each room of the building. Lustenau is located in the ASHRAE climate zone 4. The climate zone has cold winters with a minimum temperature of -12° C and a maximum temperature of 35° C in summer. Summers are not humid.

These features enable it to reduce initial and operating costs beyond that of other high performance building concepts.

Long-term measurement and occupant surveys have been conducted. The results demonstrated that the “22/26” concept provides comfortable room conditions and good indoor air quality over the majority of the year (Junghans and Widerin 2017).



Figure 1:
Realized “22/26” building in
Lustenau/Austria (2014)

Figure 2 demonstrates the acceptability of room temperatures as defined in the adaptive comfort model (de Dear and Brager 2008) during the large majority of operating hours in the year. The data is shown for a critical north-west oriented office in the building. Measurement results and results of the occupant survey demonstrate that the building technology consistently provides comfortable room conditions in the winter season. Temperatures never drop below the minimum recommended room temperature of 20° C during the heating season.

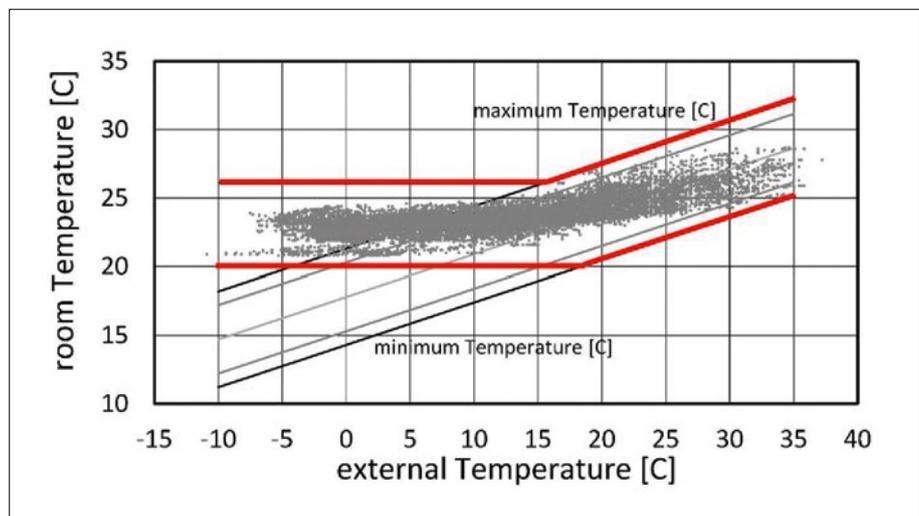


Figure 2:
Measured room temperature relative
to external temperature in a
north-west oriented office

Although there are hours with room temperatures above the comfort field in summer, their number is very small. This shows that the building needs to be adjusted to accommodate extreme warm weather conditions. The indoor air quality has been shown to be adequate in all time periods.

Clearly, the data indicates that the “22/26” concept is successful for the realized building in Lustenau.

A general recommendation for its feasibility under different conditions cannot be given.

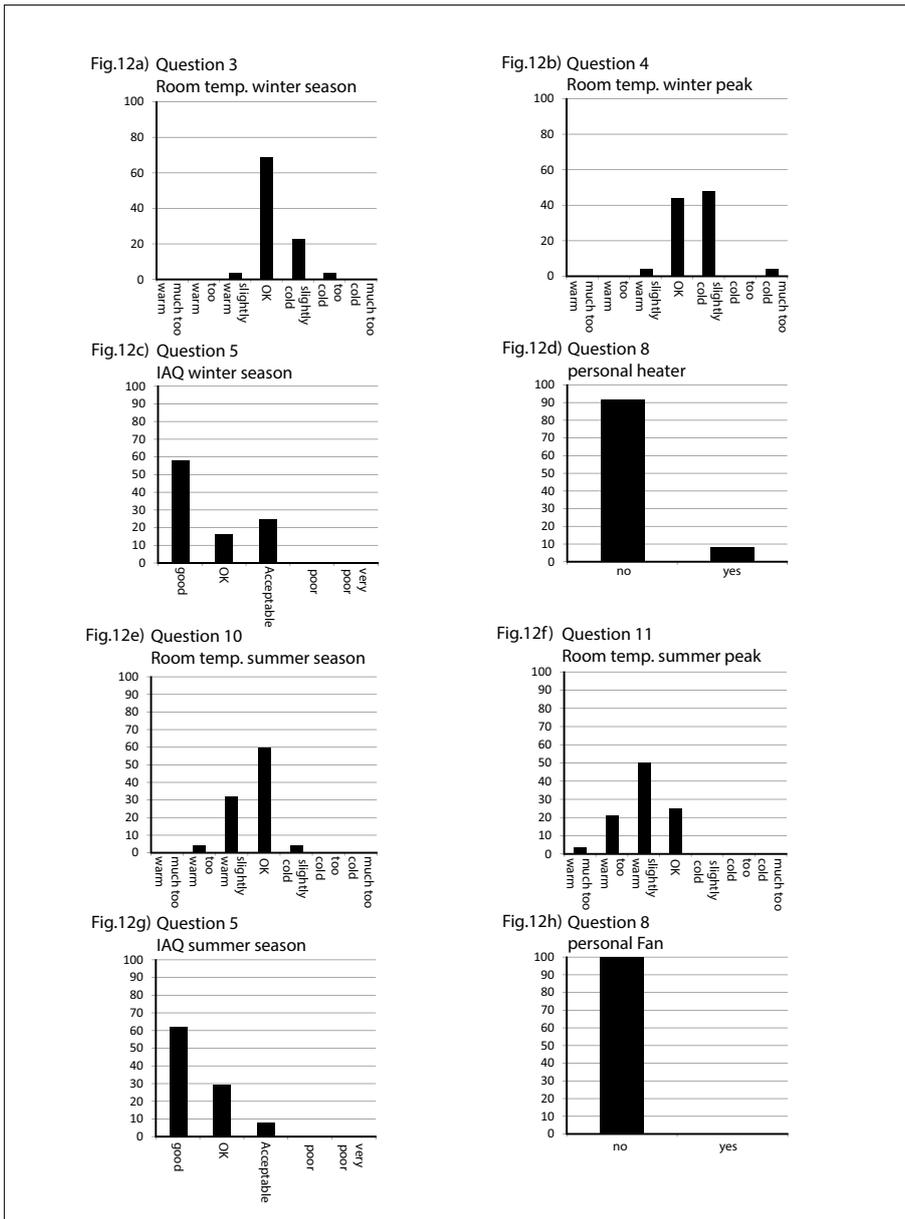


Figure 3: Results of the occupant survey in winter and in summer t-Parameter studies

To establish this general feasibility, several questions must be addressed:

- Is the building technology limited to applications in climates similar to Lustenau/Austria? How does the concept work in other climate zones?
- Can the building technology provide acceptable room conditions in residential buildings which have lower specific internal heat gains?
- Can it work in buildings featuring an envelope with less heat capacity in it but a similar heat transfer coefficient?

This paper focuses on answers to these questions. Results of the long-term measurement are compared with simulation results that explore the effects of different parameters reflecting the test conditions of the three questions. This paper explains the methodology of the technical concept of “22/26” in Section 2. Section 3 presents the results of the benchmark comparison. Section 4 presents the conclusions and implications for the feasibility of the concept.

Methods

“22/26” Concept

The challenge in the “22/26” concept is to ensure comfortable room conditions and indoor air quality without using conventional heating or cooling devices. The room temperature of a building is determined by heat gains, heat loss and internal thermal heat storage effects. The goal is to control the heat transfer so room temperatures are in the thermal comfort field for most of the operating time. In other words, room temperatures should be relatively low in summer and relatively high in winter. Figure 3 illustrates the simplified control scheme of the “22/26” concept.

In general, office buildings have relatively high internal heat gains from occupants, electrical appliances, artificial lighting and computer server stations. High internal heat gains result in generally higher room temperatures over the year. These higher room temperatures are helpful in reducing the heating energy demand in the heating season but can increase the cooling energy demand in summer time. The right balance between heat gain and heat loss must be found in all seasons to meet the goal of a near zero net energy building.

Control in winter

The “22/26” building is well insulated and has a high-performance brick construction with a thickness of 72 cm. The U-value of the envelope is 0.1–0.12 W/m²K, which meets conventional high-performance building standards in a cold climate. The huge time delay of the heat flow caused by the 72 cm external wall construction helps to maintain comfort during extreme cold periods. A triple glazing system is used in combination with a high-performance window frame. The U-value of the window is 0.6 W/m²K.

Control in summer

Overheating problems in summer must be avoided through a suitable building envelope design. The main device to increase the heat transfer is the extensive use of natural ventilation. As a passive cooling strategy, night ventilation is used to reduce the temperature of the internal thermal mass through cold incoming air at night (Artmann et al 2007). Automated opening of the window provides natural ventilation. A simple model predictive control logic is integrated into the building automation system to avoid uncomfortable temperatures in the transition seasons.

The relatively small window to wall ratio with its large reveal and lintel provides good shading in the summer. The vertical windows provide good illuminance distribution in the building.

Building simulation

Extensive simulation work is realised with the well-established thermal dynamic simulation tool Trnsys 17 (Duffy et al. 2009). The software is used to optimize the building performance and building automation logic of the “22/26” building. Trnsys 17 facilitates the testing of novel building automation algorithms. It was used for the previous “22/26” building design stage and for simulation of this study. Thermal simulations are used to optimize the building envelope and building automation set-points. Fluid dynamic simulation tools are used to evaluate the CO₂ concentration in the room, while daylight simulation software is used to evaluate the internal illuminance distribution.

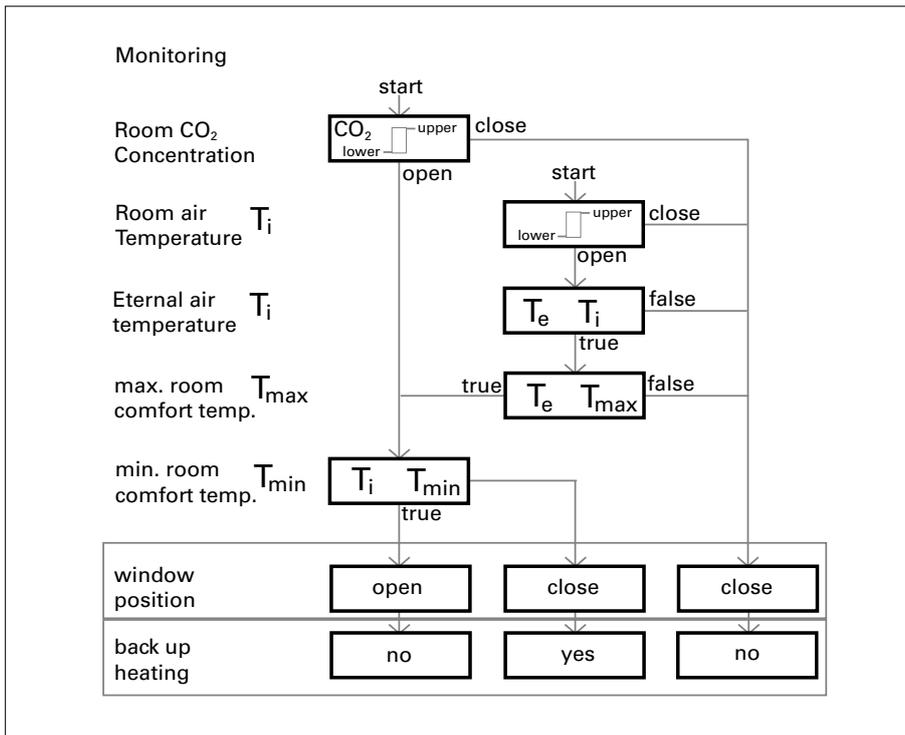


Figure 4: Simplified illustration of the building automation system for the controlled natural ventilation opener

The duration of building simulation is 3 minutes, which is very short. The short duration is necessary to provide accurate data for the CO₂ concentration in the room.

Parameter studies have been realised to answer the questions about the feasibility of the “22/26” concept

1. in other climate zones,
2. in residential buildings and
3. with other construction types.

The same algorithm for building automation (explained in section 2.1) is used for all alternatives in this study.

The room temperatures are predicted for Chicago, Seattle and San Francisco. Chicago is significantly colder than Lustenau in Austria. Seattle and San Francisco have a milder winter than Lustenau. All alternative climates have significantly more sunshine hours in the winter than Lustenau.

The room temperatures in the office space in the “22/26” building are compared to those of a residential space with the same ventilation concept.

To determine the influence of the construction type on the concept, two alternative construction types are analyzed for the building envelope. One alternative has a light timber construction without any internal heat capacity. The heat transfer coefficient (U-value) is identical to that of the construction with 72 cm high performance brick.

The other alternative construction in this study has a 20 cm concrete wall with a 30 cm insulation as an external layer. Like the light timber construction, it has an U-value of 0.12 W/m²K.

Results

Table 1 shows the minimum room temperature, maximum room temperature and hours outside the comfort limit for all parameters in this study. The hours above the comfort limit are analyzed according to the adaptive comfort model for naturally ventilated buildings (de Dear and Brager 2008). As noted above, it allows higher room temperatures when external temperatures are higher.

	"22/26" realised	construction		occupancy residential	climate		
		concrete t5er			Chicago	Seattle	SF
minimum temperature	17.9	18.3	2,9	18,3	16,1	17.9	18.4
maximum temperature	31.0	31.0	31.0	30.9	35.6	35.0	36.7
temp. below comfort (min./year)	295.4	75.0	29404.0	3049.6	251.9	136.2	100.4
temp. above comfort (min./year)	444.6	505.4	5217.0	124.6	6560.8	616.5	978.8

Table 1:
Results for sroom temperatures

Comparison of measured data to simulated data

Figure 2 shows measured external and room temperatures for the "22/26" building in 2015. The measured data does not show temperatures below the comfort limit, because the back-up heating is activated. Figure 4 shows room temperatures predicted by the dynamic simulation tool. A comparison between Fig. 2 and 4 demonstrates that the temperatures predicted by the dynamic thermal simulation are very close to those actually measured in real measurements of the building. Overheating problems are shown to occur in both figures when the external temperature is extremely high. There is a small number of temperatures below the comfort limit in the simulation results which occur when the back-up heating is not activated. The simulation results can be used as an indicator of the validity of the dynamic simulation tool.

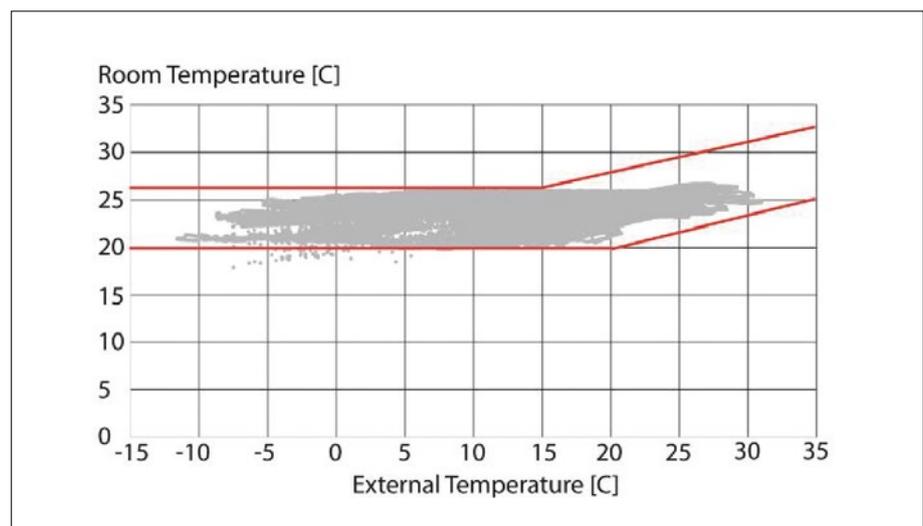


Figure 5:
Simulated room temperature in relation to external temperature in a north-west oriented office room. Simulation results for Lustenau/Austria

Climate

Table 1 shows that the building in Lustenau/Austria has 295 minutes with room temperatures below the comfort limit. In Chicago, the number of minutes is 252 minutes. The smaller number of minutes in Chicago when compared to Lustenau can be explained by the larger number of sunshine hours in Chicago in winter, so greater solar heat gains are predicted. The number of minutes in Seattle (136 min.) and San Francisco (100 min.) is significantly lower than in Lustenau because of the milder winter climates in those locations. In Seattle and San Francisco, time periods where the room temperature is below the comfort temperature are due to night ventilation.

All three alternative climates (Chicago, Seattle and San Francisco) have a larger predicted time period with overheating hours than Lustenau.

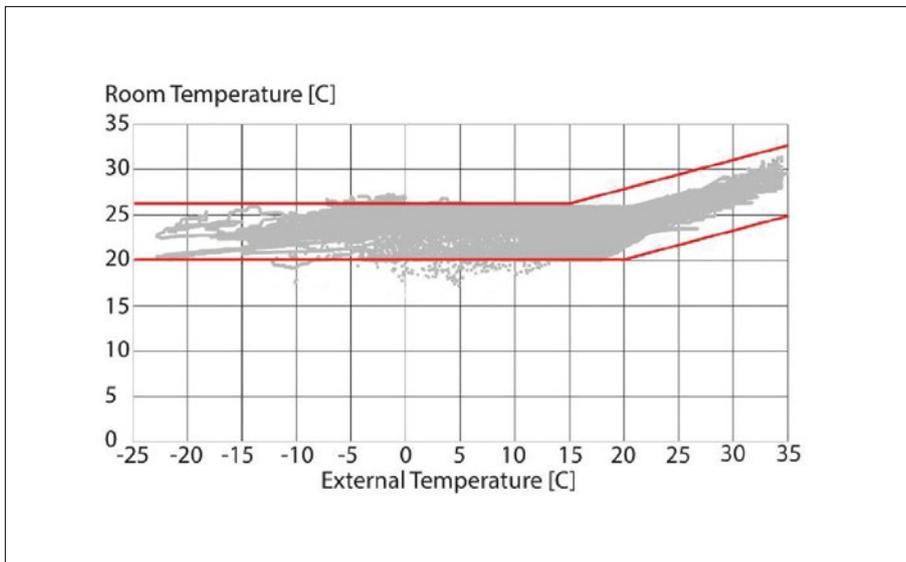


Figure 6: Simulated room temperature in relation to external temperature in a north-west oriented office. Simulation result for Chicago/ USA

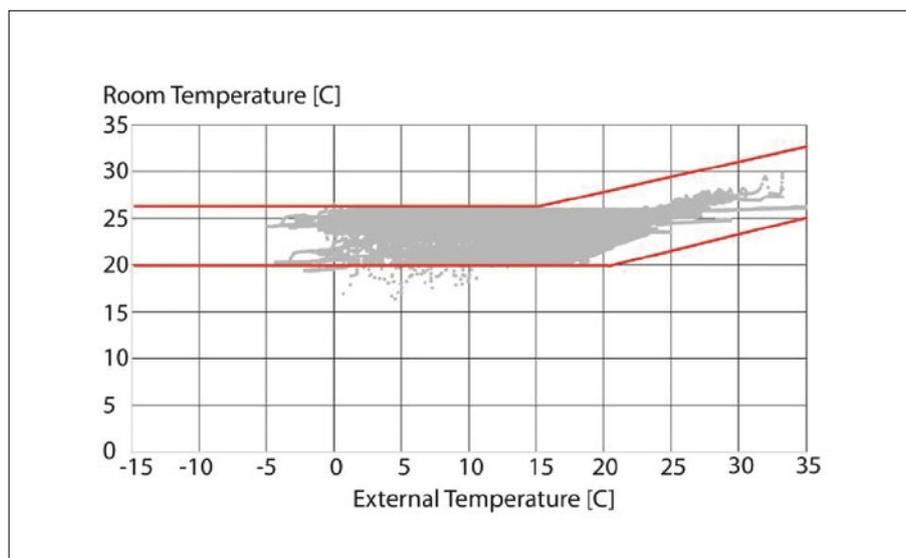
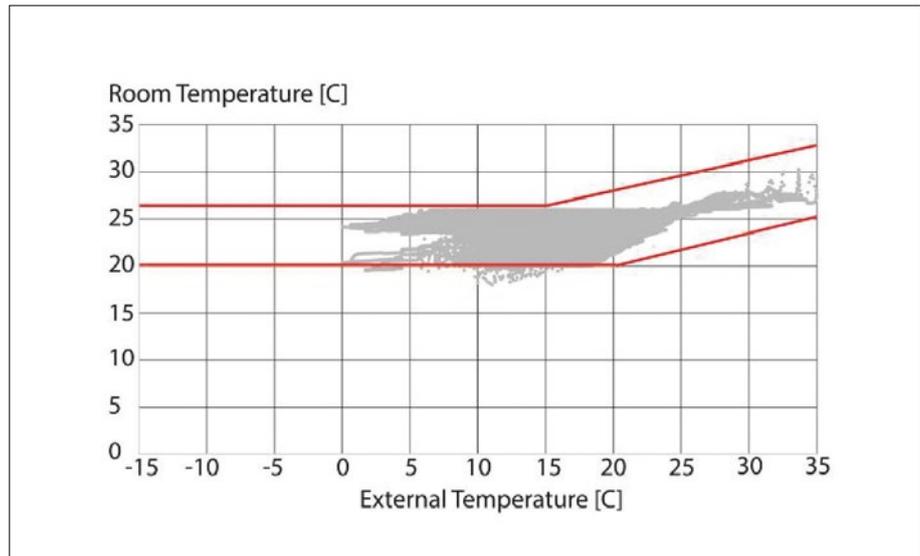


Figure 7: Simulated room temperature in relation to external temperature in a north-west oriented office. Simulation result for Seattle/USA

Figure 8:
 Simulated room temperature in relation to external temperature in a north-west oriented office. Simulation result for Seattle/USA

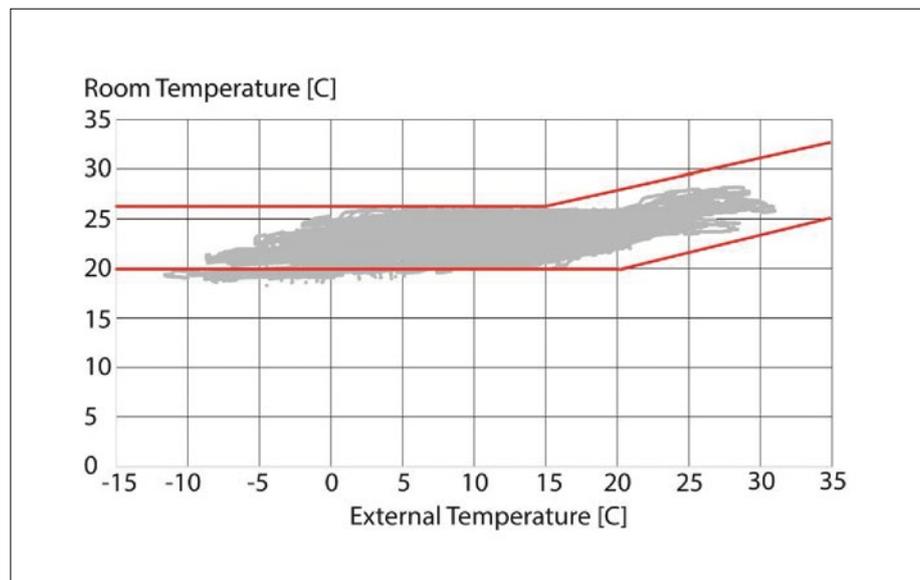


Residential building

Figure 9 shows the simulation results for the building used as a residential space. It has significantly more hours below the comfort limit of 20° C in this use than when the building is used as an office space. The smaller internal heat gain results in more hours below the comfort limit. Figure X also shows that use as a residential building will lead to less overheating in summer than occurs in the office space.

The predicted minimum room temperature of the residential space is 3° C, slightly higher than in the office space. This is caused primarily by the relatively denser occupancy of the residential building at night when internal heat gains are more of a factor.

Figure 9:
 Simulated room temperature in relation to external temperature in a north-west oriented residential space. Simulation result for Lustenau/Austria



Construction

Table 1 illustrates our most significant finding, namely that the light (timber) construction without any internal thermal mass has significantly more hours with room temperatures below the thermal comfort level of 20° C than the building with high performance brick. The hours of overheating are also significantly higher.

The minimum predicted room temperature of 2.9° C is significantly smaller than that of the building with internal thermal mass. Also, the time with room temperatures below comfort temperatures is significant greater for the light construction. These findings show that the light construction has a broad range of temperatures because solar heat is not stored.

Room temperatures are significantly higher higher in summer. Night ventilation is not effective because of the lack of thermal mass.

Table 1 illustrates that the thermal properties of the concrete construction with 20 cm concrete and 30 cm insulation versus 72 cm high performance brick results in a shorter time period with temperatures below the comfort limit. It shows, that construction with “conventional” insulation and a similar U-value provides fewer hours below the comfort limit of 20° C than the high-performance brick construction. The reason is the higher heat capacity of 20 cm concrete when compared to that of the high-performance brick.

As might be expected on the basis of the findings above, the number of minutes above the comfort limit is slightly higher when the concrete construction is used.

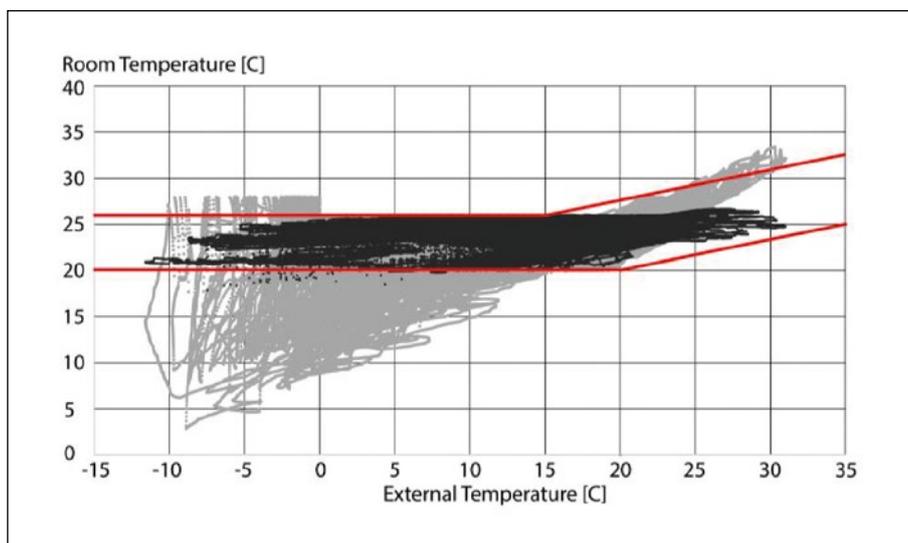


Figure 10: Simulated room temperature in relation to external temperature in a north-west oriented office. It compares the temperatures of a heavy (black) and light construction (grey). Simulation result for Lustenau/Austria

Conclusion

The present study explores the feasibility of the innovative “22/26” high-performance building concept in Lustenau/Austria in conditions that differ from the realized building. The thermal behavior of the realized building was simulated and compared to buildings using the same building automation technology varying in:

1. having a conventional building envelope,
2. serving as a residential building, and
3. being placed in a different climate zone.

Comparison of the “22/26” data to a building without any internal thermal mass demonstrates, that the building automation concept of “22/26” is not feasible under the simulated conditions. The results show that the concept depends on sufficient internal thermal mass to control the internal temperature.

The results demonstrate that the building exhibits similar thermal behavior when a conventional building envelope with 30 cm insulation and 20 cm concrete is used. This shows that the energy concept does not depend on the use of high-performance brick as the external layer.

The number of hours below the comfort limit increases dramatically when the building is used as a residential building. The building requires an additional heat source to be operated as a residential building in Lustenau/Austria. However, the temperature gap between the minimum predicted room temperature and comfort limit is so small that the heating power can be significantly lower than in comparable high performance building technologies.

The “22/26” building provides comfortable temperatures in winter in the mild climates of Seattle and San Francisco without using a heating system. However, it cannot be operated without a heating system in the cold climate of Chicago. The “22/26” building would also need a cooling system for each climate in this study.

References

- Artmann, N., Manz, H., Heiselberg, P. (2007)** Climatic potential for passive cooling of buildings by night-time ventilation in Europe, *Applied Energy* 84 p. 187–201
- Audenaert, A., De Cleyn, S.H., Vankerckhove, B. (2008)** Economic analysis of passive houses and low-energy houses compared with standard houses, *Energy Policy* 36 p. 47–55
- de Dear, R., Brager, G. (2008)** The adaptive model of thermal comfort and energy conservation in the built environment. *International Journal of Biometeorology*, 45(2), 100–108.
- El Mankibi and Michel, P. (2009)** Hybrid ventilation control design and management, *ASHRAE Transactions* 2009
- Feist, W. (1993)** Passivhauser in Mitteleuropa, Dissertation Gesamthochschule Kassel, (Passive low energy houses in mid Europe) PhD Thesis University of Kassel, 1993 (Germany)
- Feist, W. (1999)** Protokollband Nr. 16 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser, "Wärmebrückenfreies Konstruieren". Passivhaus Institut, Darmstadt.
- Heiselberg, P., P.O. Tjelflaat, P.O. (1999)** Design procedure for hybrid ventilation, *Proceedings of HybVent Forum 1999*, Sydney, Australia
- Hepbasli, A. (2012)** Low exergy (LowEx) heating and cooling systems for sustainable buildings and societies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 p. 73–104
- Junghans, L., Widerin, P. (2017)** Thermal comfort and indoor air quality of the "Concept 22/26", a new high performance building standard, *Energy and Buildings* 149 p. 114–122
- Marzal, A.J., Heiselberg, P., Bourrelle, J.S., Musall, E., Voss, K., Sartori, I., Napolitano, A. (2011)** Zero Energy Building – A review of definitions and calculation methodologies, *Energy and Buildings* 43 p. 971–979
- Duffy M.J., Hiller M., Bradley D.E, Keilholz W., Thornton J. (2009)** TRNSYS – FEATURES AND FUNCTIONALITY FOR BUILDING SIMULATION 2009 CONFERENCE, Eleventh International IBPSA Conference, Glasgow, Scotland
- Meggers, F., Ritter, V., Goffin, P., Baetschmann, M., Leibundgut, H. (2012)** Low exergy building systems implementation, *Energy* 41 p. 48–55
- Rodriguez-Ubinas, E., Rodriguez, S., Voss, K., Todorovic, M.S (2014)** Energy efficiency evaluation of zero energy houses, *Energy and Buildings* 83 p. 23–35
- Sartori, I., Napolitano, A., Voss, K.** Net zero energy buildings: A consistent definition framework, *Energy and Buildings* 48 (2012) 220–232
- Sobek, W. (2011)** Architecture isn't here to stay – Toward a reversibility of construction. In A. Ruby, & I. Ruby (Eds.), *Re-inventing construction*. Ruby Press: Berlin.

Autor:

Lars Junghans

Professur am Taubman College der University of Michigan, Ann Arbor

Discussion of the “22/26” technology – Insights and recommendations of the new building automation strategy

Introduction

The “22/26” building is a multipurpose building that was realized in 2013 in Lustenau/Austria. It is the first modern building in the cold Central European climate that provides comfortable room conditions all year round without using conventional heating, cooling and mechanical ventilation devices.

The “22/26” building energy concept described goes beyond the conventional zero net emission building by introducing a building that reduces the initial and operating costs of the building through a new form of building automation for control motorized natural ventilation openings.

Two strategies have been applied to achieve the high-performance standard of this building. Firstly, the building envelope is improved to a level that ensures that internal heat gains can cover heat losses through the building envelope in the heating season and, secondly, conventional HVAC systems are eliminated through the introduction of a new form of building automation system for control of natural ventilation openings in an occupant demand manner [1].

The combination of a good building envelope with the new building automation system provides significant opportunities to reduce the initial and operation costs of a building by using “lean” building technology.

The paper presented provides an insight into “22/26” building technology. It also provides recommendations for architects and engineers who are interested in a similar building project.

Targets for occupant comfort are described in Section 2 of this paper. Section 3 provides the requirements for passive design. Finally, Section 4 discusses the building control systems.

Occupant comfort

The air temperature should not be seen as the only measure for occupant comfort. Significant energy demand savings can be achieved when surface temperatures and air velocity are monitored in addition to the air temperature and relative humidity [2].

Surface radiation

The surface temperature is an essential part of the energy concept of “22/26” technology. Beside the passive cooling effects of night ventilation in summer, higher surface temperatures in winter help to keep the room comfortable even when the ventilation opening is open. Overheating problems can occur in winter time when solar heat gains are dominant. The integration of internal thermal mass, especially in the ceiling, is important to control thermal flows.

Future building automation systems should predict and control the influence of surface temperatures.

Adaptive comfort field

Research studies have demonstrated that occupants accept higher room temperatures (higher than 26° C) when external temperatures are relatively high (>32°C) [3][4]. Future control systems should take advantage of this knowledge by integrating a dynamic temperature threshold band. This would decrease the energy demand in the summer season.

Cold air drift

Cold air drift is caused by a cold surface temperature such as on badly insulated windows. It can also be caused by open windows when the external temperature is extremely cold. The temperature of the internal air adjacent to the cold surface or open window drops and will cause increased discomfort because of high air velocities. These cold air drift effects should be avoided.

Internal studies have shown that the occupant should be located at a distance of 0.8 m to the operable window to avoid cold air drift effects.

Passive design requirements

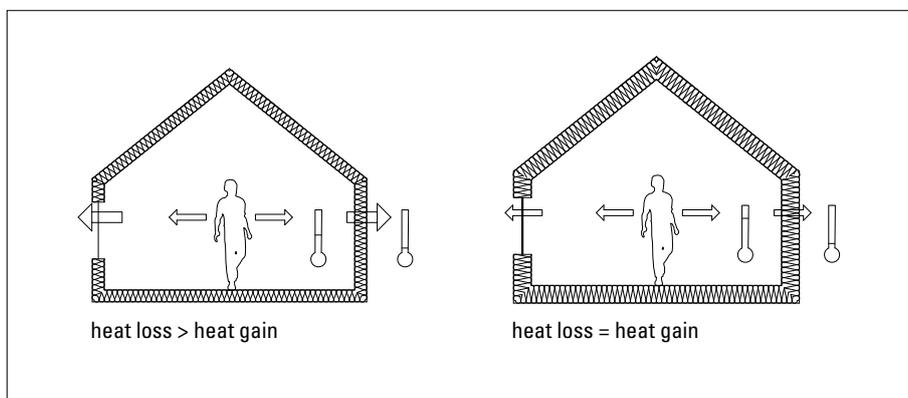


Figure 1:
Illustration of the heat flow balance

Requirements for the building envelope

The goal of the “22/26” technology during the heating season is to maintain the heat inside the building by creating a building envelope with sufficient thermal resistance and air tightness. The remaining heat loss is compensated for through internal heat gains. It is important for the realization of “22/26” technology to find the right balance between the heat loss and heat gain [1].

In the cold climate, the building envelope needs to meet requirements of a high-performance building. The U-value of the opaque wall needs to be 0.12 W/m²K or lower to retain the heat inside the building. The glazing should be a triple glazing system with an U-value of 0.7 W/m²K or lower. The air tightness should have an air change rate of 0.12 1/h or better to reduce the heat ventilation loss.

The external building envelope does not need to have thermal mass. The building concept can be operated with a light envelope construction, provided the building has sufficient internal thermal storage (internal brick, clay or concrete walls and ceilings).

Internal heat capacity

The “22/26” building concept requires sufficient internal thermal mass. Thermal mass is an essential part of the thermal control system. Night ventilation in summer cannot be operated without internal thermal mass. Additionally, overheating problems in winter are compensated for through the internal thermal mass. The thermal mass works as a heat storage system when solar heat gains are stored for the night.

Best locations for thermal storage are the ceiling, internal walls and the floor (in this order).

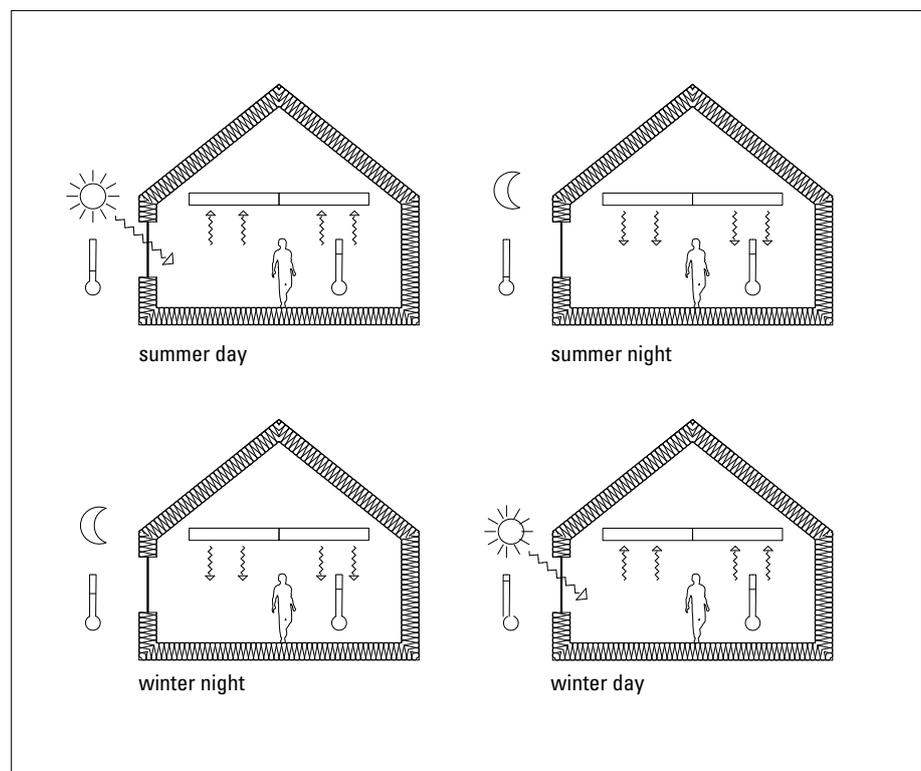


Figure 2:

Illustration of the use of internal thermal mass in summer and winter

Optimum positioning of ventilation openings

Optimum dimensioning and placement of the ventilation opening is essential to reduce the time interval of cold air supply. Knowledge of the CO₂ distribution and concentration in the non-ventilated and naturally ventilated space is essential to achieve optimum ventilation efficiencies. There is a risk of increased air change rates without consideration of this knowledge.

It is recommended to provide cross ventilation or provide vertical ventilation openings with sufficient pressure differences.

Room volume and ceiling height

The demand-controlled fresh air supply depends heavily on the CO₂ concentration in the room. A densely occupied room with a relatively small volume will accumulate CO₂ and other pollutants at a faster rate than a room with a relatively large volume. Therefore, a room with relatively high ceiling heights (>2.80 m) will create longer time periods without a fresh air supply.

A room that is occupied by one person and has an area of 10 m² and a room height of 2.6 m can be operated with demand-controlled ventilation (Section 4.1).

Building control systems

Demand-controlled ventilation

The demand-controlled fresh air supply is the most innovative part of the "22/26" concept. In the winter season, only the minimum amount of air will be let into the room to keep the indoor air quality at an acceptable level. A room that has one occupant needs less of a fresh air supply than a room with two occupants [5]. Occupants of modern buildings open the window when the internal air quality is no longer acceptable. However, it is known that the window is very often not closed after the fresh air let in has improved the indoor air quality to an appropriate level.

Demand-controlled ventilation imitates the occupant by using a CO₂ sensor. The CO₂ sensor indicates the indoor air quality [6][7][8]. The window opens when the air quality exceeds a threshold. The window closes when the air quality is seen to be acceptable. For the heating season, it is important to reduce the time for ventilation (open windows) to a minimum to reduce the amount of cold air coming into the building. Demand-controlled ventilation reduces the amount of air flow per person significantly when the threshold values for control are balanced. Operation of the demand-controlled ventilation in the "22/26" building was optimized for the specific situation in Lustenau. The measurements during building operation have shown that the preliminary theoretical analysis was successful. Internal calculations have shown that demand-controlled natural ventilation reduces the energy demand for heating (heat ventilation loss) by an amount similar to a heat recovery with a heat recovery system rate of 65 %.

Figure 3 demonstrates the effectiveness of a localized and demand-controlled room conditioning system. Conventional centralized ventilation systems are providing fresh air continuously for the entire thermal zone (residential unit, floor,...). Individual room control is difficult, meaning that non-occupied zones are conditioned in situations where there is no demand. Localized systems have the advantage that each room can be conditioned according to local demand. Significant energy demand savings can be achieved through the reduced ventilated air.

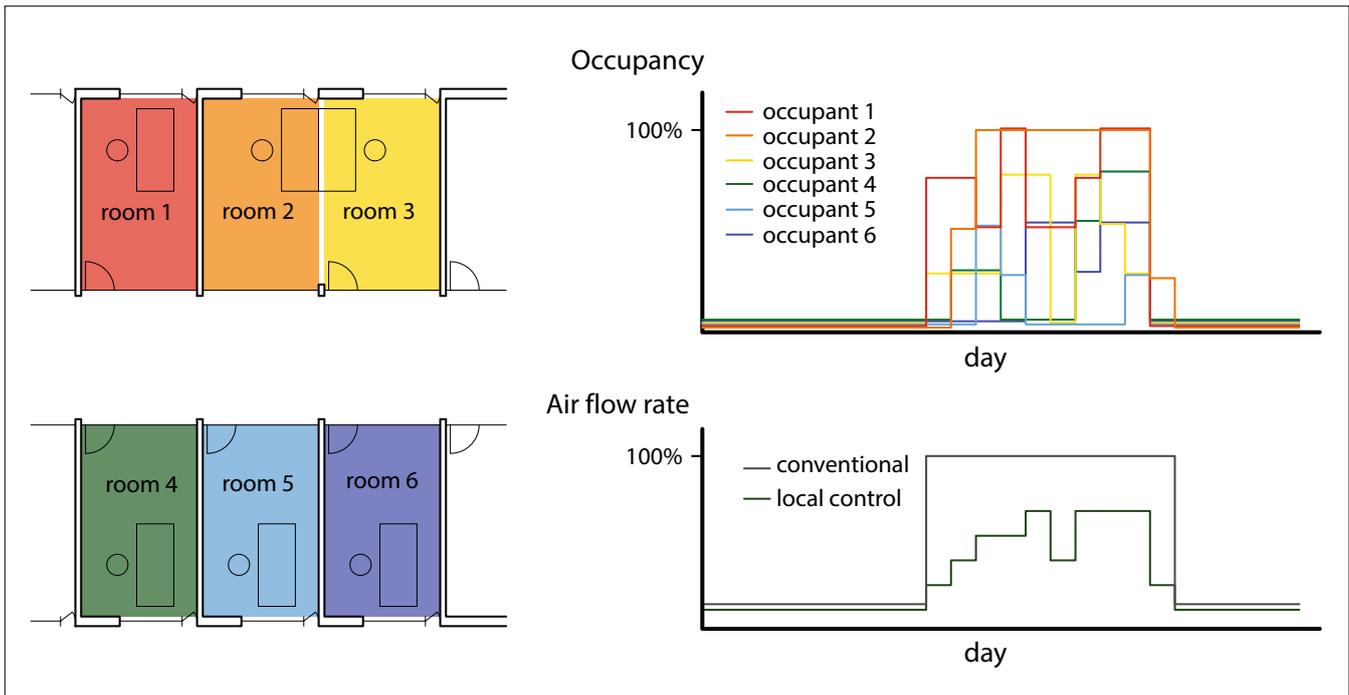


Figure 3:
Comparison between conventional centralized ventilation and localized room individual ventilation

Figure 4 illustrates the logic of the demand-controlled building automation system in the winter months. The room does not have any fresh air supply as long the CO₂ level is measured below a given threshold value (1500ppm). In this condition, room temperatures and the CO₂ concentration are rising as long the building is occupied. The room is ventilated as soon as the CO₂ concentration exceeds the threshold value. The room temperature and the CO₂ concentration will drop because of ventilation. Ventilation will stop as soon as the CO₂ concentration is at an acceptable level or the room temperature drops below a given set point.

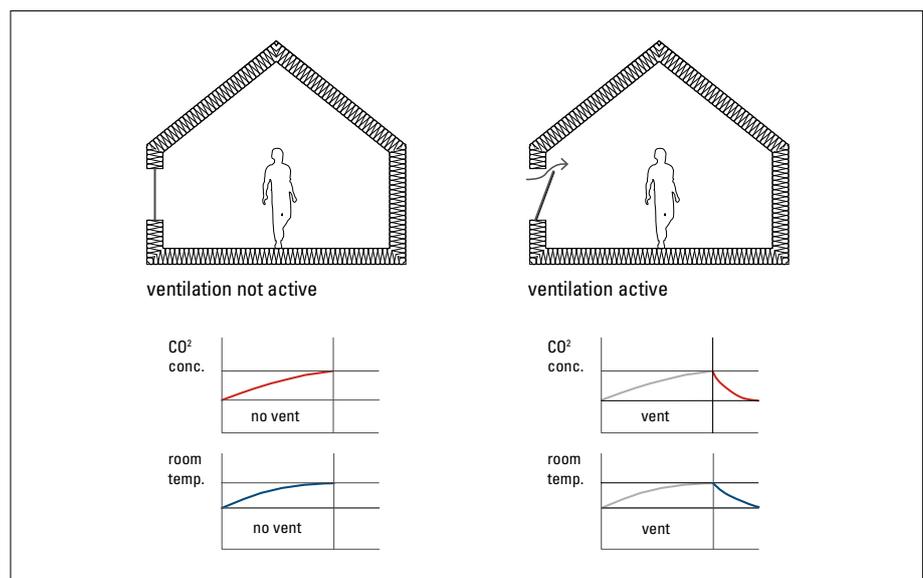


Figure 4:
Illustration of fresh air supply control. The CO₂ concentration is used as an indicator for the indoor air quality.

Demand-controlled ventilation can be implemented in decentralized ventilation systems like fan coil units or small-scale window frame integrated heat recovery systems. However, integration into a centralized mechanical ventilation system is difficult because of control limitations (blower pressure control).

Sensors needed for the operation of “22/26” technology

“22/26” technology needs a wide range of sensors to provide a locally demand-controlled ventilation strategy.

These sensors are needed in every room:

- › Air temperature
- › Relative humidity
- › CO₂ concentration

These sensors are needed to measure the external weather condition:

- › Air temperature
- › Relative humidity
- › Wind velocity
- › Solar radiation (pyranometer)

CO₂ sensors

CO₂ sensors are an essential part of “22/26” technology because they determine the indoor air quality of the room. However, CO₂ sensors are relatively expensive and have a relatively short lifespan. Annual maintenance is necessary to calibrate these sensors. Furthermore, currently available CO₂ sensors are relatively inaccurate. Even given the success of currently available CO₂ sensor technology, it is recommended that CO₂ sensors be replaced with a reliable technology that can detect the number of occupants in a room [9][10].

Night ventilation

Night ventilation is essential for “22/26” technology to provide comfortable room temperatures in the summer season and prevent overheating. A ceiling fan or any other local ventilation device can improve the efficiency of night ventilation when the temperature drop at night time is not sufficient or at time periods where the air flow rate does not meet the requirements for night ventilation.

Predictive control

A predictive control system can predict the future room condition. Predictive control systems are necessary where renewable energy sources like solar radiation are to be used more efficiently [11][12][13]. In addition, the use of thermal storage systems can be exploited more efficiently. Incorrect control of ventilation openings for night ventilation can be prevented. Online weather forecast systems can help to provide predictive control systems.

Occupancy schedules should not be involved in predictive control systems.

The “22/26” building in Lustenau does not have a predictive control environment.

Weather Prediction ○
 Predicted Temperature Range —
 Measured Room Temperature —
 Simulated Room Temperature —
 External Temperature —

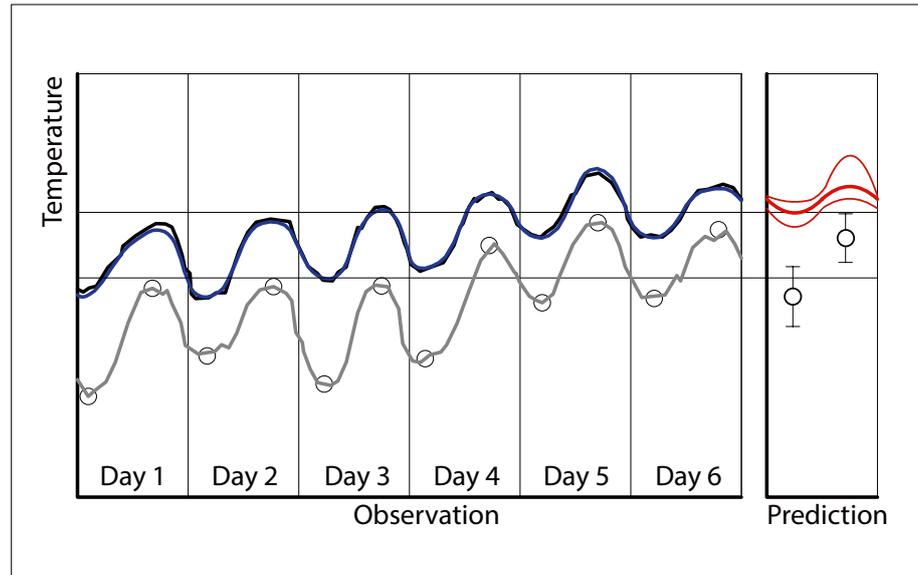


Figure 5:
 Model predictive control concept
 based on microcontroller integrated
 simulation module

Reliability

The first priority of every energetic conception is the satisfaction of the occupants, even during time periods with extreme weather. Human comfort should be of a high level for most of the operating time. The “22/26” technology is able to reduce the building specific heating season. However, the building needs additional heating (and cooling) at extreme weather conditions.

Liability issues caused by discomfort of the occupants need to be avoided in any type of building. A “parachute” in the form of a back-up heating (and cooling) system is needed to avoid legal issues.

Back-up systems

Back-up heating and cooling systems are very important for reliable operation of a building with “22/26” technology. Back-up systems provide local heat when room temperatures drop below the comfort range. In the same way, back-up systems provide higher air velocities when room temperatures rise above the comfort range [14][15].

Individual local heating and cooling devices have the advantage of using a small amount of energy on demand. Unoccupied areas do not use energy.

Studies have shown that demand-controlled localized heating systems can reduce the energy demand when compared to centralized systems, even when the localized system has a lower efficiency [15][16][17]. This is especially true when the occupancy schedule is very irregular. Small desk fans are inexpensive and increase the air velocity locally.

Localized demand-controlled systems:

- Local infrared heater (20–60 W, officially not on the market)
- Heated and cooled office chair (developed by UC Berkeley)
- Locally heated surfaces
- Desk fan (small scale)

References

- [1] **L. Junghans, P. Widerin**, Thermal comfort and indoor air quality of the “Concept 22/26”, a new high performance building standard, *Energy and Buildings* 149 (2017) 114–122
- [2] **T. Hoyt, E. Arens, H. Zhang**, Extending air temperature setpoints: Simulated energy savings and design considerations for new and retrofit buildings, *Building and Environment* 88 (2015) 89–96
- [3] **R. de Dear, G. Brager**, The adaptive model of thermal comfort and energy conservation in the built environment. *International Journal of Biometeorology*, 45(2), 100–108.
- [4] **ANSI/ASHRAE Standard 55 (2010)**, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, ASHRAE, Atlanta 2010
- [5] **S. Emmerich**, Simulated Performance of Natural and Hybrid Ventilation Systems in an Office Building, *HVAC&R Research* 12.4 (Oct 2006): 975–1004.
- [6] **P. Heiselberg, P. O. Tjeflaat**, Design procedure for hybrid ventilation, *Proceedings of HybVent Forum 1999*, Sydney, Australia
- [7] **El Mankibi and P. Michel (2009)**, Hybrid ventilation control design and management *ASHRAE Transactions* 2009
- [8] **M. Gruber, A. Truschel, J.O.Dalenback**, CO₂ sensors for occupancy estimations: Potential in building automation applications, *Energy and Buildings* 84 (2014) 548–556
- [9] **A. Mylonas, O. B. Kazanci, R. K. Andersen, B. W. Olesen**, Capabilities and limitations of wireless CO₂, temperature and relative humidity sensors, *Building and Environment* 154(2019) 362–374
- [10] <https://www.safetyandhealthmagazine.com/articles/the-pros-and-cons-of-electrochemical-sensors-2>
- [11] **Aste N, Manfren M, Marenzi G.**, Building Automation and Control Systems and performance optimization : A framework for analysis. *Renew Sustain Energy Rev* 2016:1–18.
- [12] **Lazos D, Sproul AB, Kay M.**, Optimisation of energy management in commercial buildings with weather forecasting inputs: A review. *Renew Sustain Energy Rev* 2014; 39:587–603.
- [13] **M. Killian, M. Kozek**, Ten questions concerning model predictive control for energy efficient buildings, *Building and Environment* 105 (2016) 403–412
- [14] **H. Zhang, E. Arens, Y. Zhai**, A review of the corrective power of personal comfort systems in non-neutral ambient environments, *Building and Environment* 91 (2015) 15–41
- [15] **L. J. Lo, A. Novoselac**, Localized air-conditioning with occupancy control in an open office, *Energy and Buildings* 42 (2010) 1120–1128
- [16] **Gail Brager, Hui Zhang & Edward Arens (2015)**, Evolving opportunities for providing thermal comfort, *Building Research & Information*, 43:3, 274–287, DOI: 10.1080/09613218.2015.993536
- [17] **H. Zhang, E. Arens, C. Huizenga, T. Han**, Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments, part II: Local comfort of individual body parts, *Building and Environment* 45 (2010) 389–398

Autorin:

Elisabeth Endres

Ingenieurbüro Hausladen GmbH, Kirchheim bei München, und Professur für Gebäudetechnologie und Leitung des Instituts für Gebäude- und Solartechnik

Hightech versus Lowtech oder einfach nur robust?

Wie wenig ist genug?

Unter dieser Prämisse wurden 2018 die Flächen für die Geschäftsstelle der IBA Thüringen in einem Konversionsgebäude, das Egon Eiermann entworfen und umgesetzt hat, konzipiert, um nach 20 Jahren Leerstand das Denkmal mit einfachsten Mitteln zu reaktivieren. Es ist die entscheidende Frage in der aktuellen Debatte um klimagerechtes, energieeffizientes und nachhaltiges Bauen: Wie wenig ist genug? Damit verbunden ist der Diskurs Hightech versus Lowtech hin zu Robustheit und Dauerhaftigkeit.

Betrachten wir zunächst traditionelle Bauweisen, zeigt sich, dass mit einem großen Verständnis für den Ort und wenigen Mitteln Hüllen als Wetterschutz entstanden, die bereits über die reine Schutzfunktion ein Maß an Komfort boten. Diese Bauformen sind geprägt vom Umgang mit den klimatischen Standortfaktoren sowie lokalen Baumaterialien. Häuser mit dicken Mauern und kleinen Fenstern, deren schräge Laibungen einem optimierten Lichteintrag dienen, wie etwa im schweizerischen Engadin, zeugen ebenso von diesem Wissen wie die Windturmarchitektur in heißen trockenen Ländern oder die weit auskragenden aufgeständerten Hütten am Äquator, deren Dächer Schatten und Konvektion bieten. Es sind einfache Konzepte, die sich selbst erklären. Im Vergleich zu den hochtechnisierten Häusern unserer Zeit bedürfen sie keinerlei Erläuterung, sind beherrschbar und meist so robust, dass sie über Jahrhunderte die originäre Funktion, Lebensraum zu bieten, erfüllten.

Industrialisierung und Fortschritt haben seit Ende des 19. Jahrhunderts die Architektur von Gebäuden verändert und oben genannte Konzepte mit regionalem Bezug verdrängt. Mit voranschreitender Entwicklung der technischen Systeme und baukonstruktiven Möglichkeiten sowie einem damit einhergehenden Komfortanspruch verloren der lokale Aspekt der Verfügbarkeit von Materialien sowie die Notwendigkeit, klimagerecht zu bauen an Bedeutung. Durch die Errungenschaften der Bauindustrie der letzten 150 Jahre hat –

neben der Möglichkeit, hohe Häuser zu bauen – auch im Bereich der technischen Gebäudeausrüstung eine enorme Entwicklung stattgefunden. Mittels der Möglichkeiten zur Klimatisierung sind der Gestaltung und Fassadenausbildung bis heute keine Grenzen gesetzt. Lüftungs- und Konditionierungssysteme übernehmen bei entsprechendem Verhalten der Gebäude durch hohe Verglasungsanteile und leichte Bauweisen die Klimatisierung der Innenräume. Sie suggerieren damit ein hohes Maß an Flexibilität und Komfort. Der Einsatz von Energie spielte dabei bis zum Ende des 20. Jahrhunderts eine untergeordnete Rolle.

Die Endlichkeit fossiler Brennstoffe, der sukzessive Ausstieg aus der Kernenergie sowie ein gestiegenes Umweltbewusstsein führten zunächst nach der Ölkrise seit den 1970er-Jahren zu gesetzlichen Anforderungen an den wärmetechnischen Standard im Bauwesen. In den Jahren nach 1995 erfuhr dieser Aspekt durch die Implementierung zunächst der verschärften Wärmeschutzverordnung und im Folgenden der ENEC eine immer entscheidendere Relevanz im Planungs- und Bauprozess. Technische Systeme wurden immer häufiger zur Einsparung vor allem von Lüftungswärmeverlusten eingesetzt. Ebenso haben sich Strategien wie Absenkungen der Raumtemperaturen in der Nacht und Einzelraumregelungen im Winter oder die einbruchssichere und witterungsgeschützte Nachtpülung im Sommer in der Gesetzgebung festgeschrieben. Komponentenreiche Konzepte mit Atrien und Doppelfassaden, die mittels Gebäudeleittechnik optimierte, passive Strategien umsetzen konnten, galten lange Zeit als Antwort auf die Fragestellung der geforderten Energieeffizienz im Bauwesen. Eine erneute Novellierung wird zeitnah mit Einführung des Gebäudeenergiegesetz (GEG) erfolgen. Der Entwurf dieses neuen Gesetzes zeigt ohne einen inhaltlichen Einstieg die Paradoxität der aktuellen Situation. Während der Wärmebedarf in den letzten 40 Jahren um ein Fünf- bis Zehnfaches gesunken ist je Gebäudestandard, hat sich die Anzahl der Seiten, dieses Regelwerkes, seit Einführung 1977 von 20 auf ca. 300 Seiten erhöht. Im übertragenen Sinn stellt sich auch hier die Frage: Wie wenig ist genug?

Parallel zum vermehrten Einsatz technischer Systeme, welche der aktiven Konditionierung und den passiven Strategien dienen, hat eine starke Entwicklung in der Baustoffindustrie, allen voran in der Glasindustrie, stattgefunden, sodass sich vor allem das passive winterliche Verhalten der Gebäude in den vergangenen fünf bis zehn Jahren auch ohne Doppelfassaden und Pufferbereiche mit aufwendigster Steuerungstechnik deutlich verbessert hat. Dennoch zeigt sich trotz daraus resultierenden sinkenden Lastgängen in den Gebäuden keine Erleichterung im Einsatz technischer Systeme. Dies zeigen die Baukosten aktuell ausgeführter Projekte im Nichtwohnungsbau ebenso wie im Wohnungsbau. Der Bericht der Baukostensenkungskommission zeigt dies deutlich anhand der Preisentwicklung der Kostengruppen 300 und 400 nach HOAI im Wohnungsbau auf (vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit; Endbericht November 2015). Obwohl die Lastgänge in Gebäuden durch oben genannte Maßnahmen und Entwicklungen sinken, steigen Kosten und Komplexität in den technischen Systemen an – Systeme, deren originäre Funktion der Ausgleich von Lastgängen im Gebäude ist, zeigen eine höhere Steigerungsrate an – bei gleichzeitig sinkenden Lasten durch bessere Dämmung und optimierte wärmetechnische Materialien.

Bestätigt wird diese monetäre Auswertung bei einem Blick in Abhangdecken, Schächte und Technikzentralen heutiger Bauvorhaben. Dieser zeigt, dass technische Systeme eine beherrschende Komponente im Bauwesen sind. Begründet liegt diese parallele Aufrüstung von passiven und aktiven Komponenten nicht zuletzt in einem stetig wachsenden Glauben an das intelligente Haus, welches neben oben genanntem energieeffizienten Betrieb eine große Freiheit in der Nutzung und Flexibilität suggeriert. Dieser erwünschte Erfolg bleibt jedoch meist aus, wie aktuelle Auswertungen von Monitoringergebnissen oder Nutzerbefragungen zeigen.

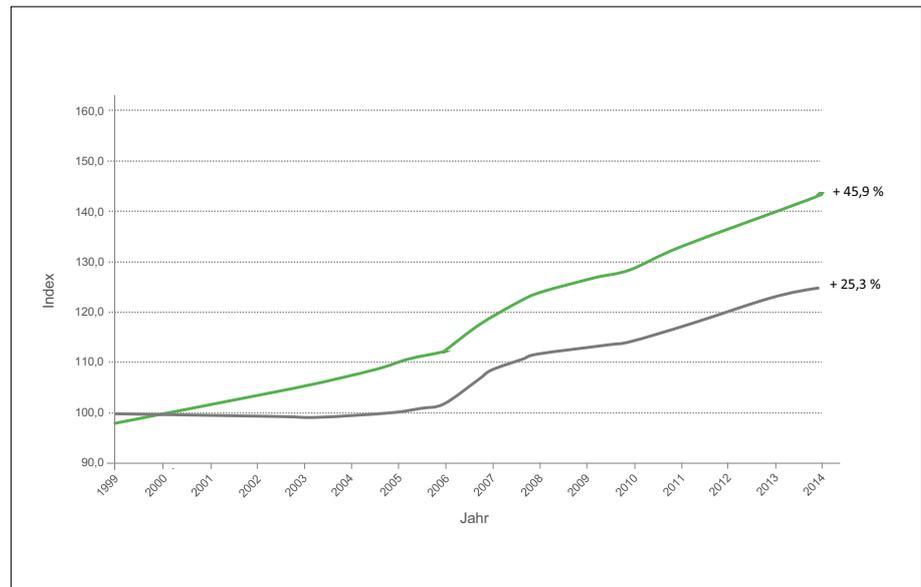
KG 300: Bauwerk –
Baukonstruktion —

KG 400: Bauwerk –
Technische Anlagen —

Abbildung 1:

Darstellung der Entwicklung
der Kosten in KG 300 und 400

(Darstellung in Anlehnung an den Bericht
der Baukostensenkungskommission)
Quelle „Bericht der Baukostensenkungs-
kommission“; Bundesministerium für
Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktor-
sicherheit; Endbericht November 2015



Monitorings zeigen in der Praxis, dass weder die prognostizierte Effizienz noch der Erfolg hinsichtlich Komfortempfinden beim Nutzer erreicht wird. Im Gegenteil, mit steigender Komplexität und Anzahl an Komponenten steigen Wartungskosten und Fehleranfälligkeit. Dies gilt für den Wohnungsbau ebenso wie für den Nichtwohnungsbau. Eine Studie zum energieeffizienten Wohnungsbau der Obersten Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern, Bau und Verkehr in Kooperation mit der Technischen Universität München bestätigt dies. In einer Langzeitbegleitung inklusive eines Monitorings wurden Wohnungsbauprojekte mit unterschiedlichen Versorgungs- und Konditionierungssystemen in Planung, Inbetriebnahme und Betrieb dokumentiert und ausgewertet. Die Ergebnisse verdeutlichen eine hohe Divergenz von errechneten Bedarfen im Planungsprozess zu tatsächlichen Verbräuchen in Abhängigkeit zum Einsatz technischer Systeme und deren Komplexität. Jene Gebäude, die mit steigender Komplexität der Kubatur und Anlagen in der Planung niedrige Bedarfe rechnerisch aufwiesen, weichen im Betrieb vom theoretischen Wert deutlich ab. Im Gegensatz dazu zeigen sich Projekte mit insgesamt geringerer Komplexität und technischem Aufwand als effizienter bzw. deckungsgleich mit den prognostizierten Werten der Bedarfsermittlung.

Wie wenig ist also genug? Und welches Maß an Technik – seien es aktive haustechnische Systeme oder die Komplexität der Hüllkonstruktionen – ist unter dem Begriff Lowtech zusammenzufassen? In diesen Fragestellungen im Kontext und in der Abgrenzung von Hightech zu Lowtech bis hin zu Notech, sind die Aspekte und Definitionen zu Suffizienz – der Dauerhaftigkeit und Robustheit gegenüber unsicheren Randbedingungen wie Außenklimaveränderungen, Nutzer und Nutzungsszenarien im Lebenszyklus eines Gebäudes bis hinein in die urbane Struktur – unumgänglich.

Im Maschinenwesen ist die Auslegung nach einem robusten Betriebsoptimum eine verbreitete Herangehensweise, um einen prognostizierten Betriebszustand dauerhaft umzusetzen. Dabei ist nicht die Auslegung auf ein sehr spezifisches Optimum, welches durch genau einen Betriebszustand definiert ist, das Ziel, vielmehr wird eine konstante Performance, die auch bei geringen Abweichungen einen nah am Optimum liegenden Betrieb erreicht, angestrebt. Im Bauwesen zeigt sich die gegenteilige Strategie, welche einen Optimierungspunkt anstrebt, dessen Verfehlung einen hohen Einfluss auf die Effizienz und

den Betrieb des Gebäudes aufweist. Dies führt zu einem hohen Impact einzelner Randbedingungen, vor allem der unsicheren Randbedingung „Nutzer“ und sich ändernde Verhältnisse des Außenklimas.

An diesem Punkt setzen nun der Prozess und die Herangehensweise des Bundes zur Erstellung des Erweiterungsbaus des Bundesministeriums für Umwelt in Berlin an. Im Vorfeld eines Wettbewerbes für das ca. 50.000 m² umfassende Gebäude wurden in einem interdisziplinären Vorbereitungsprozess Parameter und daraus resultierende „Goldene Regeln“ festgelegt, deren Beachtung in der Konzeption ein Bauwerk in einfacher Bauweise und einen robusten Betrieb im Sinne einer Lowtech-Strategie schaffen soll. Leitgedanke und Ziel des Projektes sind wie folgt beschrieben (Abb. 2):

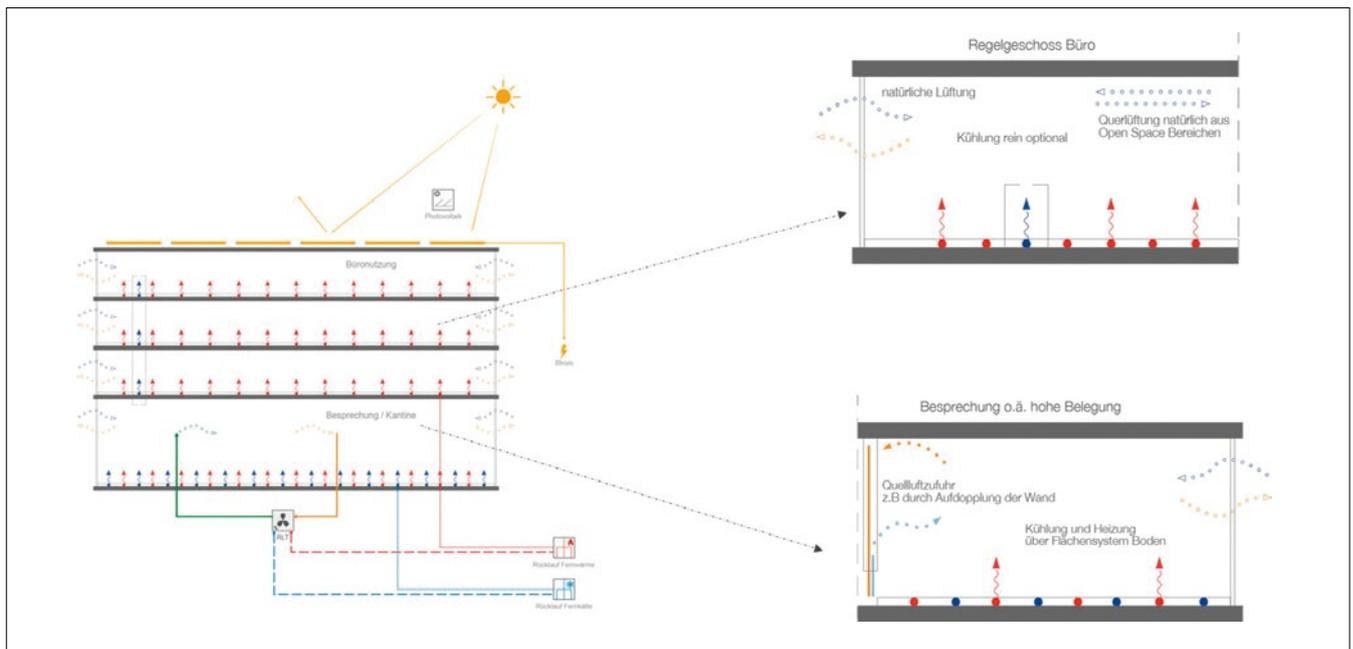


Abbildung 2:
Systemschnitt zur ES Bau
„Erweiterungsbau BMU Berlin“

„Die im Gebäude zu schaffenden Komfortbedingungen sollen auf baulich konstruktivem Wege erreicht werden. Erst wenn dieses nicht möglich ist, sind technische Lösungen oder Anlagen einzusetzen. Komfortanforderungen werden vor dem Hintergrund des einfachen Bauens hinterfragt, um den Aspekt der Suffizienz in die Konzeption verstärkt einfließen zu lassen. Ziel der Lowtech Strategie für den BMU Erweiterungsbau ist es, bauliche und funktionale Aspekte in den Mittelpunkt der Konzeption des zukünftigen Gebäudes zu stellen und damit technische Lösungen, die zu einer hohen Komplexität im Betrieb führen, zu vermeiden.“

Aus diesem Leitgedanken heraus wurden für die einem Architektenwettbewerb vorangestellte Entscheidungsunterlage Bau Randbedingungen festgelegt, innerhalb derer ein komponentenarmes und minimal über Steuerungstechnik betriebenes Gebäude gestaltet werden soll. Die Verteilung der Nutzungen ähnlicher Anforderungen zur Umsetzung des Prinzips kurzer Wege im Fall notwendiger Technik ist ebenso Ausgangspunkt zur Minimierung der technischen Systeme wie eine Fassade, welche die Lastgänge im Gebäude ganzjährig minimiert. Hierfür ist ein effektiver Einsatz der Materialien im innerstädtischen Kontext ebenso entscheidend wie der Fensterflächenanteil, welcher je nach Orientierung und vertikaler Position differenziert zu wählen ist. Ziel ist der Verzicht auf gesteuerte, variable

Sonnenschutzsysteme sowie motorisch betriebene Öffnungsflügel. Ergänzt wird dieses passive System durch eine unregelmäßige Flächenheizung und -kühlung, die nicht in konstruktiv und statisch notwendige Strukturen eingelegt ist. Damit kann das Haus mit nur einem System ganzjährig gesteuert werden, unabhängig von den Nutzern und der sich entwickelnden Außentemperaturen. Hierbei hat sich zum Beispiel gezeigt, dass passive Kühlungen, die mittels motorischer Klappen gesteuert werden, häufig weder die Luftmengen noch die gewünschten Temperaturunterschiede in der Nacht erreichen, sodass eine kontinuierliche Erwärmung des Gebäudes entsteht. Dies soll durch die Wahl nur eines Systems, welches ganzjährig temperiert, die Grundlast deckt, aber nicht auf Spitzen ausgelegt ist, gelöst werden. Die Belüftung erfolgt grundsätzlich natürlich, lediglich Plenarsaal und Konferenzbereiche mit sehr hohen Belegungsdichten werden mechanisch be- und entlüftet. Die Vermeidung von Untergeschossen zur Minimierung grauer Energien in Kombination mit der Nutzung von Dächern zum Aufenthalt im verdichteten städtischen Kontext erfordert den effizienten Umgang mit Technikzentralen. Um diese Anforderung entsprechend dem urbanen Gefüge zu lösen, erfolgt die Versorgung über die am Standort anliegenden Netze. Dabei ist eine Nutzung der jeweiligen Rückläufe aus Fernwärme und -kälte vorgesehen, um die Abwärmepotenziale maximal zu nutzen. Eine konsequente Übersetzung der genannten Aspekte in die Gestaltung des Gebäudes als Stadtbaustein steht aktuell aus und soll über den Wettbewerb hervorgebracht werden. Eine konsequente Weiterführung des Prozesses und die damit verbundene Umsetzung dieses Pilotprojekts bietet ein enormes Potenzial, um für den Bundesbau auf die aktuelle und in die Zukunft orientierte Frage „Wie wenig ist genug?“ Antworten finden zu können.

Bereits umgesetzt ist das Beispiel der IBA-Geschäftsstelle in Apolda. Während im urbanen Kontext der Städte die Flächeneffizienz im Vordergrund der Betrachtungen steht, ist die Herausforderung in strukturschwachen Gebieten, vorhandene Gebäude mit geringem Aufwand herzustellen und zu betreiben. Die Stadt Apolda stellt ein solches Fallbeispiel dar und wurde im Zuge der IBA Thüringen als Projektort ausgewählt. Ein ehemaliges Fabrikgebäude, welches in den 1930er-Jahren des letzten Jahrhunderts durch Egon Eiermann ergänzt wurde, wurde 2017 im Zuge der Bauausstellung beispielgebend umgestaltet. Im Sinne der Aufgabenstellung „Wie wenig ist genug?“ wurde ein Haus-im-Haus-Konzept entwickelt, welches durch die Schaffung lokal unterschiedlicher Klimata ein effizientes Nutzungskonzept in Investition und Betrieb darstellt. Im Fokus der ganzheitlichen Herangehensweise und der Umsetzung steht nicht die Optimierung des Gesamtvolumens durch Fassadensanierung, sondern durch die Schaffung eines Makroklimas im Großraum und von Mikroklimata durch eingestellte Gewächshäuser und Boxen (Abb. 3). Das eingestellte Volumen bietet eine komfortable Umgebung und kann je nach Bedarf über Infrarotstrahler individuell geheizt werden. Diese schalten sich aus, wenn die Temperatur im Mikroklima durch interne Gewinne der Nutzer und Computer im Nutzungsfall erreicht ist. Der Großraum wird mittels Strahlplatten an der Decke leicht temperiert, sodass auch dieser als Aufenthaltsbereich mit Temperaturen von 10–15 °C dienen kann. Im Betrieb hat sich gezeigt, dass diese Strategie für die Anwendung im Bestand die richtige Antwort auf die Frage nach dem Maß an Technik in Interaktion mit dem passiven Gebäudeverhalten und der vorhandenen Baukultur darstellt.

Nicht zuletzt das Projekt in Apolda hat gezeigt, dass Lowtech und Robustheit eng verwoben sind mit der architektonischen und materiellen Qualität gebauter Strukturen. Neben Maß und Integration technischer Systeme und deren Aufrüstung in Gebäuden sowie den Anforderungen an den Komfort entscheiden die Themen der Materialität und der Stoffkreisläufe über die Haltbarkeit gebauter Umwelt. In der Diskussion um das Bauen von morgen ist es unvermeidlich, die Themen der Effizienz und Robustheit bereits in Bezug auf die Erstellung sowie den Betrieb mit Rückbau zu berücksichtigen.



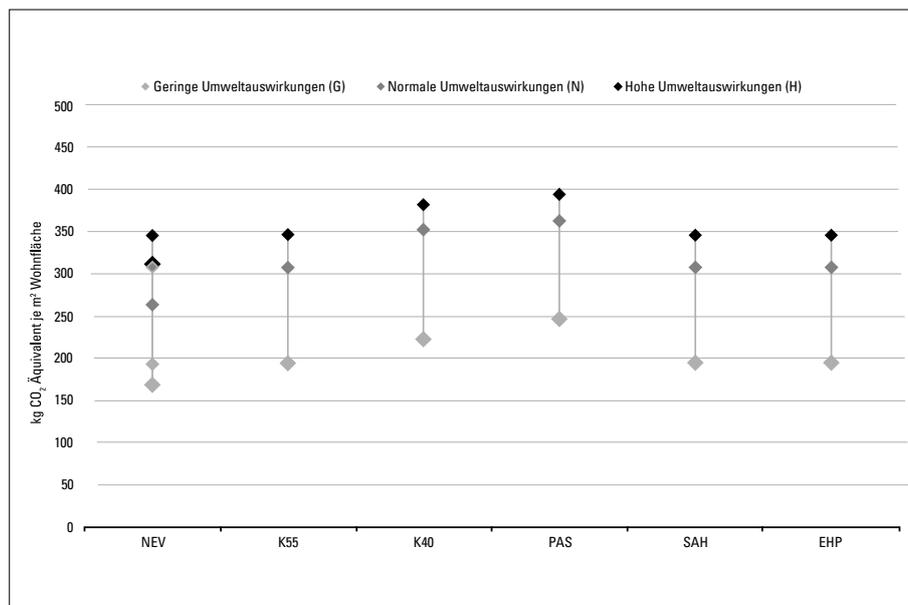
Abbildung 3:
Innenraum der IBA-Geschäftsstelle
in Apolda mit Raum-in-Raum-Konzepten
Foto Thomas Müller/© IBA Thüringen

Ausblick: Wie wenig ist genug? – Das Bauen von morgen

Die genannten Beispiele zeigen, dass ein radikales Umdenken erforderlich ist, um die Herausforderungen und Notwendigkeiten umweltverträglichen Bauens zu lösen. Dies gilt für den Neubau und für den Bestand. Die Umstellung der vorhandenen Bezugsgrößen und Maßstäbe stellt ein großes Potenzial dar. Die spezifischen Zahlen zeigen, dass die Energieeffizienz pro Quadratmeter – kWh/m²a – in den letzten Jahrzehnten seit Einführung der Gesetze zur Energieeinsparung zugenommen hat. Parallel dazu ist jedoch der Flächenverbrauch pro Kopf in Deutschland erheblich gestiegen, sodass in der absoluten Betrachtung keine Effizienzsteigerung erfolgt ist. Die Einführung einer Bezugsgröße pro Kopf und die damit vorhandene direkte Verbindung von Gebäude und Nutzer sind in den kommenden Jahren unumgänglich, um eine tatsächliche Kenngröße und Wertigkeit zu erhalten. Ebenso wie die Bezugsgröße ist in diesem Zusammenhang die Bemessung von Energie infrage zu stellen. In diesem Aspekt muss der Bezug zur Klimaneutralität zum Beispiel durch die Stellschraube der CO₂-Äquivalenz aufgegriffen werden.

Die Evaluierung pro Kopf und eine damit geschaffene direkte Verbindung zur Dichte und zu den Nutzern erfordert ein Umdenken, welches Konsequenzen haben wird, in der Projektentwicklung neuer Quartiere bis hinein in die Gebäudestruktur. Die Resilienz und damit die Umbaubarkeit von urbanen Strukturen und Gebäuden zur Schaffung von Flexibilität ist entscheidend für die Langlebigkeit und damit einhergehender Baukultur. Signifikante Gebäude sollten so konzipiert sein, dass sie wandelbar in der Nutzung, robust und haltbar sind. Um aktuellen Fragestellungen einer Gesellschaft Raum zu geben, müssen im Gegensatz dazu qualitätsvolle Aufenthaltsflächen im öffentlichen Raum und Freiräume in den Quartieren zur Interimsnutzung geschaffen werden, die im Anschluss wieder vollständig zurückgebaut werden können. Strukturen, die den Anforderungen der vergangenen 100 Jahre gerecht werden, wie etwa mehrgeschossige Tiefgaragen und der Fokus in der Stadtplanung auf den Individualverkehr, werden an Relevanz verlieren und sollten Raum geben für die Konzeption neuer Strukturen. Dies lässt sich am Beispiel von profanen Gebäudeteilen wie Tiefgaragen einfach erläutern. Einerseits sinkt die Zahl der privaten Fahrzeuge in dichten Räumen und eine Verlagerung der Mobilität in Sharing-Modelle und den öffentlichen Nahverkehr steigt. Andererseits stellt das Bauwesen die erforderliche graue Energie, die zur Errichtung unterirdischer Geschosse notwendig ist, nicht infrage. Die Diskussion um Nachhaltigkeit und ressourcenschonendes Bauen – so der Anschein und die Praxis – beginnt mit dem Übergang in die oberirdischen Geschosse. Dabei ist der Kampf um die letzte Kilowattstunde bereits in den Untergeschossen verloren worden.

Abbildung 4:
Umwelteinflüsse unterschiedlicher
Energiestandards in Wohngebäuden



Innovative Konzepte, welche diese praktizierten Vorgehensweisen zugunsten einer Vereinfachung und Reduzierung der Komponenten führen, scheitern in der Planung und Umsetzung häufig an den bestehenden Normen und Richtlinien oder an der nach aktuellen Maßgaben nicht wirtschaftlichen Darstellbarkeit, wie etwa in Bezug auf regenerative Stromnetze und Verteilungen. Einhergehend damit sinkt die Bereitschaft der Beteiligten, Verantwortung zu übernehmen und neue Wege einzuschlagen. Dies betrifft neben Themen in der regenerativen Energieerzeugung, der Mobilität und der Bauleitplanung vor allem Auslegungen von Systemen zur Temperierung von Gebäuden sowie Anforderungen an Luftqualitäten. Beispiele hierzu sind mannigfaltig und betreffen die Baukonstruktion ebenso wie die technische Gebäudeausrüstung und die Bauphysik. Ein Beispiel stellt die Anforderung der Einzelraumregelung dar. Mit zunehmender Qualität des wärmetechnischen Standards der Gebäude sinken die Lastgänge in den Räumen – auch bei unterschiedlicher Nutzung – auf ein Minimum und damit auch die Notwendigkeit von Einzelraumregelungen zur Steigerung der Effizienz. Einhergehend mit dieser bautechnischen Optimierung sind die Möglichkeiten zur Nachweisführung mittels dynamischer Planungswerkzeuge weit entwickelt, bilden jedoch keine Basis für die Auslegung der Systeme in der Fachplanung der technischen Gebäudeausrüstung. Diese erfolgt weiterhin statisch, die Systeme und Installationen werden daraufhin auf Betriebsfälle ausgelegt, die in diesen Dimensionen nahezu niemals eintreffen.

Die Vereinfachung der technischen Ausrüstung der Gebäude, eine Umstellung auf eine effektive Verteilung in Erstellung, Betrieb und Rückbau von regenerativ erzeugtem Strom in Arealnetzen, Änderungen hinsichtlich der Bezugsgrößen von Flächen auf die Bevölkerung als Pro-Kopf-Einheit sowie die Betrachtung gesamter Stoffkreisläufe bedürfen grundlegender Änderungen in Vorschriften, Normen und Gesetzen. Es wird nicht ausreichend sein, vereinzelt Verschärfungen vorzunehmen. Vielmehr ist es die Aufgabe der nächsten Jahre, ein radikales Umdenken in der Gesellschaft zu erreichen, gewohnte Prinzipien vollständig zu überdenken und die bestehende Normen- und Gesetzeslage zu vereinfachen. Nicht zuletzt liegt in der Beantwortung der Frage „Wie wenig ist genug?“ in Bezug auf die Normung und Gesetzgebung der Schlüssel zur ganzheitlichen Betrachtung und zum damit verbundenen Erfolg, die Strukturen entsprechend den Anforderungen der zukünftigen Gesellschaft anzupassen und zu gestalten.

Referenzen

Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat – BMI (2015). Bericht der Baukostenenkommision des Bündnisses für bezahlbares Wohnen und Bauen.

Endres, E. (2018). Parameterstudie Low-Tech Bürogebäude. Endbericht. Technische Universität München. Zukunft Bau (BBSR). SWD-10.08.18.7-16.65.

Ingenieurbüro Hausladen, Kirchheim (2017). Gutachten über erschließbare Umweltpotenziale von Effizienzhaus Plus Gebäuden. BBSR/ZukunftBau.

OBB (2017). e% – Energieeffizienter Wohnungsbau. Abschlussbericht der wissenschaftlichen Begleitung des Modellbauvorhabens. Technische Universität München. Hochschule Augsburg. Hochschule Coburg. Oberste Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern, für Bau und Verkehr.

Autorin:

Andrea Klinge

ZRS Architekten Ingenieure Berlin
Leitung Forschung



Weniger Technik – mehr Gesundheit. Die Natur macht's! Lowtech im Gebäudebereich

Einführung

Trotz wachsender rechtlicher Vorgaben und ambitionierter Klimaschutzziele belastet der Bausektor in Deutschland aufgrund der enormen Ressourcen- und Energieverbräuche nach wie vor massiv unsere Umwelt. Der voranschreitende Klimawandel, der auch in Deutschland immer deutlicher seine Auswirkungen zeigt, und die zunehmende Ressourcenknappheit sind Aufforderungen zur Veränderung. Die Verfehlungen der angestrebten Nachhaltigkeitsziele fordern eine kritische Reflexion und ganzheitliche Bewertung der bislang verfolgten Strategien.

Die Industrialisierung des Bauwesens und die wachsenden technischen Möglichkeiten haben in den vergangenen Jahrzehnten dazu geführt, dass die klimatischen Gegebenheiten in der modernen Architektur immer weniger berücksichtigt wurden. Vor allem der Einsatz von Lüftungstechnik, der bei energieeffizienten Gebäuden heutzutage Standard ist, wird unter Fachleuten, Eigentümern, aber auch Gebäudenutzern zunehmend kritisch gesehen. Höhere Energieverbräuche als prognostiziert, eingeschränkter Nutzerkomfort, aber auch gesundheitliche Beeinträchtigungen sind Themen, die immer öfter den Diskurs bestimmen. Die Meinungen von Befürwortern und Gegnern gehen stark auseinander und weitere Forschung zu diesem Thema ist dringend notwendig. Einschlägige Regelwerke wie DIN-Normen begünstigen den technikbasierten Ansatz. Eine zunehmende Anzahl von Untersuchungen, aber auch realisierte Projekte zeigen hingegen Wege auf, wie durch klimaangepasste Architekturkonzepte und die Verwendung von hygroskopischen Naturbaustoffen Lüftungstechnik signifikant reduziert werden kann. Solche Ansätze werden in Zukunft einen wichtigen Beitrag zum Ressourcenschutz, aber auch zu einer höheren Energieeffizienz und Wohngesundheit leisten.

Der folgende Artikel thematisiert diese Fragestellung und illustriert Denk- und Lösungsansätze des Berliner Büros ZRS Architekten Ingenieure auf Basis von Ergebnissen aus dem EU-Forschungsvorhaben „[H]house“ sowie geplanten und realisierten Projekten aus der Praxis.

Heutige Herausforderungen im Bausektor

Der Gebäudesektor in Deutschland trägt signifikant zum nationalen Ressourcenverbrauch bei. 50 % der fossilen Energieressourcen werden landesweit für den Betrieb von Gebäuden aufgewendet. Trotz immer strenger werdender Regularien (EnEV etc.), Energieeffizienzprogrammen (KfW etc.) sowie ambitionierter Gebäudezertifizierungssysteme (BNB, DGNB) ist der Gebäudesektor nach wie vor für 35 % des Primärenergiebedarfs und 30 % der CO₂-äquivalenten Emissionen (2015) verantwortlich [1].

Erklärte Nachhaltigkeitsziele, den Gebäudebestand bis 2050 klimaneutral zu gestalten, werden mit den aktuellen Strategien nicht zu erreichen sein [2].

Vor dem Hintergrund einer wachsenden Weltbevölkerung, die bis 2050 um weitere 2 Mrd. auf 9,8 Mrd. ansteigen wird [3], [4], und immer knapper werdenden fossilen Ressourcen stellen sich Experten zunehmend die Frage, wie eine nachhaltige und verantwortungsvolle Architektur von morgen aussehen kann und muss. Der Mensch hat durch sein Handeln und die Entwicklung einer Baukultur vermehrt Einfluss auf die Umwelt genommen. Die Nutzung fossiler Ressourcen hat der Gesellschaft neue Handlungsräume ermöglicht. Bis Mitte des 19. Jahrhunderts wurde weitestgehend klimaangepasst, unter Verwendung lokal verfügbarer Materialien gebaut. Öl, Stahl, Kohle und Beton haben uns glauben gemacht, die natürlichen Begebenheiten bei der Gestaltung von Gebäuden nicht mehr beachten zu müssen. Immer neue Techniken zum Betrieb und zur Klimatisierung von Gebäuden waren die Zukunft, auch in den hinter uns liegenden Jahren der Suche nach energieeffizienten Gebäuden. Eine kritische Evaluierung dieses technikbasierten Ansatzes und eine ganzheitliche Bewertung der verfolgten Vorgehensweisen, vor allem in Bezug auf reale Energieverbräuche, waren über Jahrzehnte wenig Thema. In den letzten Jahren haben Experten diese Fragestellung vermehrt aufgegriffen und zum Teil alarmierende Ergebnisse veröffentlicht. Gebäude, deren Energieverbrauch um ein Vielfaches höher ausfällt als prognostiziert, sind leider keine Seltenheit [5], [6]. Die Veränderung des Klimas, die auch in Deutschland immer stärker sichtbar wird, sowie die zunehmende Verknappung von Ressourcen sind Aufforderungen zum Wandel (Abb. 1).

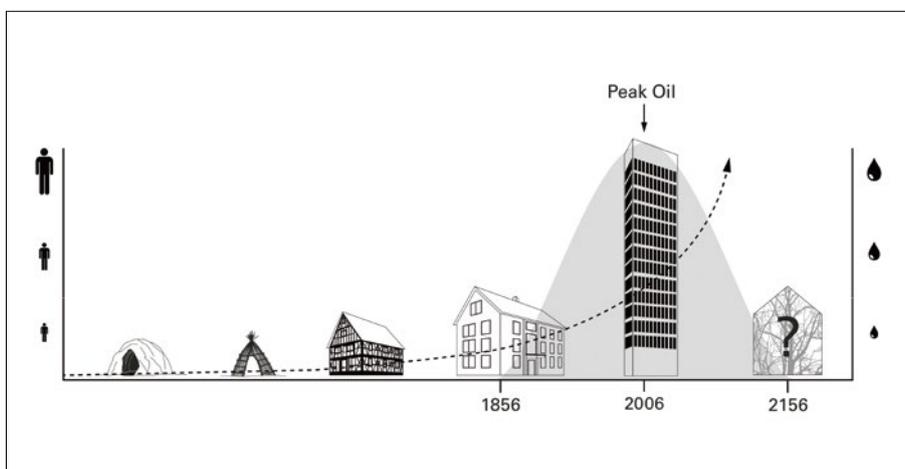


Abbildung 1:
Was kommt nach dem fossilen Konsumzeitalter?

Das Voranschreiten der Reform des Bauwesens hat somit zentrale Bedeutung zum Erreichen der Nachhaltigkeitsziele, die unsere Gesellschaft zukunftsfähig macht und heutigen, aber vor allem nachfolgenden Generationen eine lebenswerte Zukunft ermöglicht. Klimaangepasste Architekturkonzepte, die auf die Verwendung von lokal verfügbaren, hygroskopischen und recycelfähigen Naturbaustoffen setzen, werden einen wesentlichen Beitrag zum Ressourcenschutz erbringen und durch den Bausektor bedingte Treibhausgasemissionen signifikant senken.

Insbesondere die Materialwahl wird in Zukunft wieder eine größere Rolle spielen. Waren der architektonische Entwurf und die Gebäudekonzeption in den vergangenen Jahrzehnten stark vom Design, also überwiegend von der äußeren Wirkung und Ästhetik bestimmt, werden künftig Parameter wie graue Energie, CO₂-Emissionen, Recyclierbarkeit und lokale Verfügbarkeit eine höhere Bedeutung erlangen.

Ein anderes, wesentliches Thema, welches die Materialperformance wieder stärker in den Fokus rücken lässt, ist die Gesundheit und die damit verbundene Produktivität von Gebäudenutzern. Unlängst veröffentlichte Studien berichten vermehrt über verschiedenste Symptome von Unwohlsein bis hin zu Krankheiten, die bei Nutzern auftreten, die sich in mechanisch belüfteten Räumen aufhalten [7], [8] (siehe auch Beitrag von Dr. Walter Hugentobler in diesem Tagungsband). Auch hier kommt dem Einsatz von Naturbaustoffen eine besondere Bedeutung zu.

In Fachkreisen besteht zunehmend Einigkeit darüber, dass die Gesundheit, das Wohlbefinden, aber auch die Produktivität von Gebäudenutzern maßgeblich von der Raumluftqualität unserer gebauten Umwelt beeinflusst werden. Energieeffiziente Gebäude, hoch luftdicht gebaut oder saniert, sind oftmals problematisch in Bezug auf erhöhte Raumluftfeuchten oder auch Konzentration von Luftschadstoffen im Innenraum. Reduzierte Luftwechselraten, wie sie im modernen Wohnungsbau heute üblich sind, verschärfen das Problem und verursachen in vielen Fällen Feuchtigkeitsschäden, die im schlimmsten Fall zu Kondensatausfall und damit zu Schimmelbildung führen können. Potenzielle Ausgasungen aus Baumaterialien, Möbeln, anderen Gegenständen oder Reinigungsmitteln können aufgrund der hohen Luftdichtigkeit u. a. Atemwegsbeschwerden, Bronchitis oder auch Herz-Kreislauf-Probleme hervorrufen [9].

Um auf die oben beschriebenen Auswirkungen dieser Bauweise zu reagieren, werden Wohngebäude heute im Regelfall mit mechanischen Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung ausgestattet. Damit verbundene Nachteile in Bezug auf einen erhöhten Platzbedarf, zusätzliche Investitions- und Wartungskosten, zu geringe Anforderungen an die Hygiene sowie Einschränkungen hinsichtlich Nutzkomfort und -kontrolle bleiben oftmals unbeachtet oder werden mit dem Argument der geforderten Energieeffizienz vermeintlich entkräftet. Wenn keine bedarfsgesteuerten Geräte zum Einsatz kommen, führt dies zudem zu einer Zwangsbelüftung und vielfach zu einer Überbelüftung und damit Austrocknung der Räume und Raumluftfeuchten, die oftmals unter 30 % fallen. Allergien, Atemwegsbeschwerden und Krankheiten als unmittelbare Folgeerscheinungen sind vor allem im Winter keine Seltenheit [10]. Ein Zusammenhang zur Raumluftfeuchte wird bislang in den wenigsten Fällen hergestellt. Studien von Scofield und Sterling haben bereits 1985 die Wechselwirkung von Mikrobiomen und relativer Raumluftfeuchte nachgewiesen (Abb. 2). Auch bei einer zu geringen und nicht nur bei zu hoher Luftfeuchtigkeit (< 40 % und > 60 %) nimmt diese Aktivität zu und beeinträchtigt das Wohlbefinden, die Produktivität und schlimmstenfalls die Gesundheit der Nutzer. Raumluftfeuchten im Bereich von 40 bis 60 % sorgen hingegen für ein gesundes und behagliches Raumklima. So wird beispielsweise die Aktivität von Grippeviren innerhalb einer Stunde um 80 % reduziert, wenn die Luftfeuchtigkeit über 40 % liegt [11].

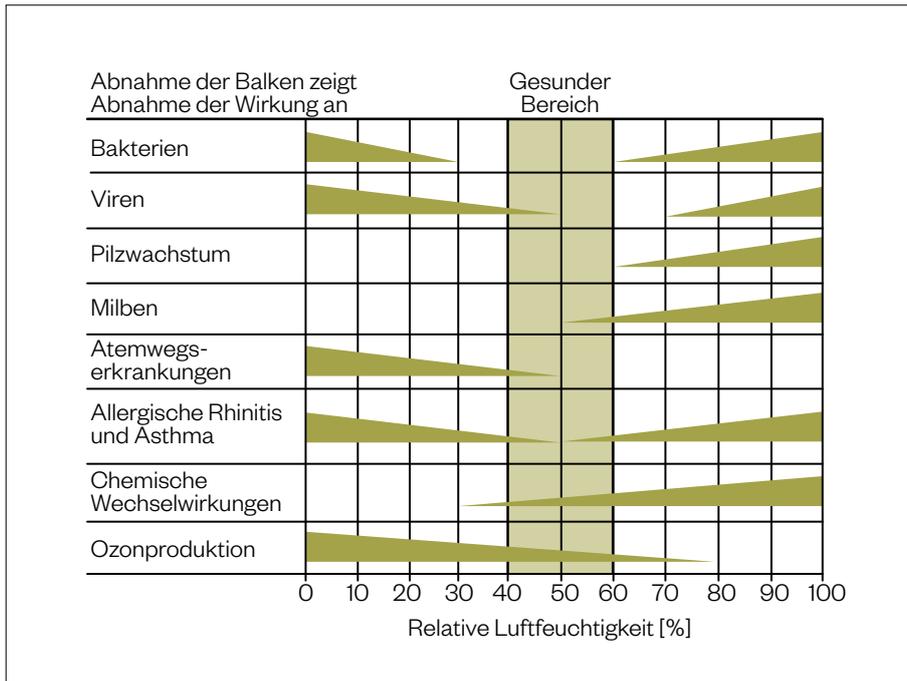


Abbildung 2: Scotfield-Sterling-Diagramm – relevante Wechselwirkung von Mikroorganismen bei unterschiedlicher Raumluftfeuchte [12]

Wissenschaftliche Ergebnisse – EU-Forschungsvorhaben „[H]house“

Grundlagen für ein gesundes Raumklima

Die wesentlichen Kriterien für die Belüftung von Gebäuden sind durch die DIN 1946-6 festgelegt und wie folgt definiert:

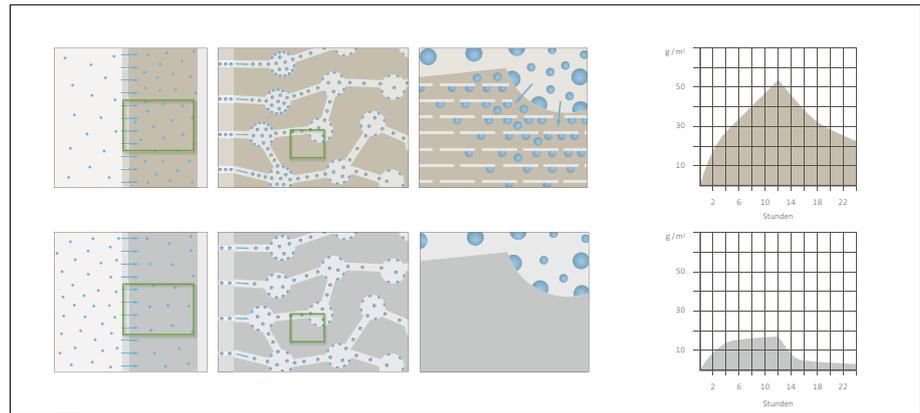
- Reduktion der Raumluftfeuchte im Winter zur Vermeidung von Kondensat und Schimmel
- Reduktion von Schadstoffen in der Raumluft
- Reduktion des CO₂-Gehaltes in der Raumluft

Traditionell verwendete Naturbaustoffe wie Holz und Lehm, aber auch Naturfasern wie beispielsweise Holzweichfasern, Hanf, Flachs oder Stroh können insbesondere Feuchte aus der Raumluft aufnehmen und an diese wieder abgeben. Abbildung 3 zeigt das Prinzip der Feuchtespeicherung am Beispiel von Lehmstoffen. Aufgrund des materialspezifischen Kapillarsystems sowie der Porosität und großen Oberfläche der Dreischichtenminerale bieten Baustoffe auf Basis von Lehm eine überdurchschnittlich große Oberfläche, an die sich Wasserdampf anlagern kann.

In Kombination mit einer diffusionsoffenen Gebäudehülle, einem angemessenen Glasanteil und natürlicher Belüftung wirken sich diese Baustoffe positiv auf das Raumklima aus und sind in der Lage, dieses zu steuern. Lehm ist zudem für seine Fähigkeit bekannt, Schadstoffe aus der Raumluft zu sorbieren. Dieses Wissen, vor allem in Bezug auf das Feuchteverhalten von Naturbaustoffen, wird heute auf Basis bauphysikalischer Kenntnisse, Untersuchungen von Minke [13], Ziegert und Röhlen [14], aber auch empirischen Untersuchungen [15] in Gebäuden, in denen Naturbaustoffe eingesetzt wurden, in der Praxis angewendet.

- Wasserdampfmoleküle in der Raumluft 
- Anstrich auf Lehmputz 
- Poren, Porenkanal und Feststoff Lehmputz 
- Anstrich auf Nichtlehmputz 
- Poren, Porenkanal und Feststoff Nichtlehmputz 

Abbildung 3:
Grafische Darstellung der Luftfeuchtesorption bei Lehmputzen (oben) und Nichtlehmputzen (unten) sowie Vergleich Feuchtesorption von Lehm und Beton innerhalb von 24 Std.



Feuchtesorption von Bauprodukten und Bauteilen

Im Folgenden wird noch mal konkret auf die Ergebnisse aus dem EU-finanzierten Forschungsvorhaben „[H]house – healthier life with eco-innovative components for housing construction“ (www.h-house-project.eu) eingegangen, da diese eine breite wissenschaftliche Basis für das Bauen mit einem reduzierten Technikansatz bzw. ohne mechanische Lüftung schaffen. Die Untersuchungen basieren auf der Annahme, dass es ressourcenschonendere und gesündere Lösungsansätze gibt, die nicht nur die Anforderungen an die oben aufgeführten Anforderungen für eine Belüftung erfüllen, sondern auch zu einer ganzheitlich verbesserten Wohngesundheit beitragen. Es wurde nachgewiesen, dass sich durch den Einsatz von emissionsarmen, klimasteuernden Naturbaustoffen in Verbindung mit einer dampfdiffusionsoffenen Gebäudehülle, einem angemessenen Glasanteil und natürlicher Belüftung eine stabile Raumluftfeuchte und damit ein gesundes Raumklima in Wohngebäuden einstellt. Durch umfangreiche Labormessungen nach bzw. in Anlehnung an die DIN 18947 [16] wurde das überdurchschnittliche Sorptionsvermögen von Naturbaustoffen im Vergleich zu konventionellen Produkten auf Material-, aber auch auf Bauteilebene nachgewiesen. Insgesamt wurden ca. 100 Materialien in unterschiedlichen Kombinationen getestet. Als Benchmark wurden handelsübliche, gipsbasierte Bauprodukte in die Testreihen mit aufgenommen.

Abbildung 4:
Wasserdampfsorption von Innenwänden aus Natur- und konventionellen Baustoffen; Messungen in Anlehnung an die DIN 18947

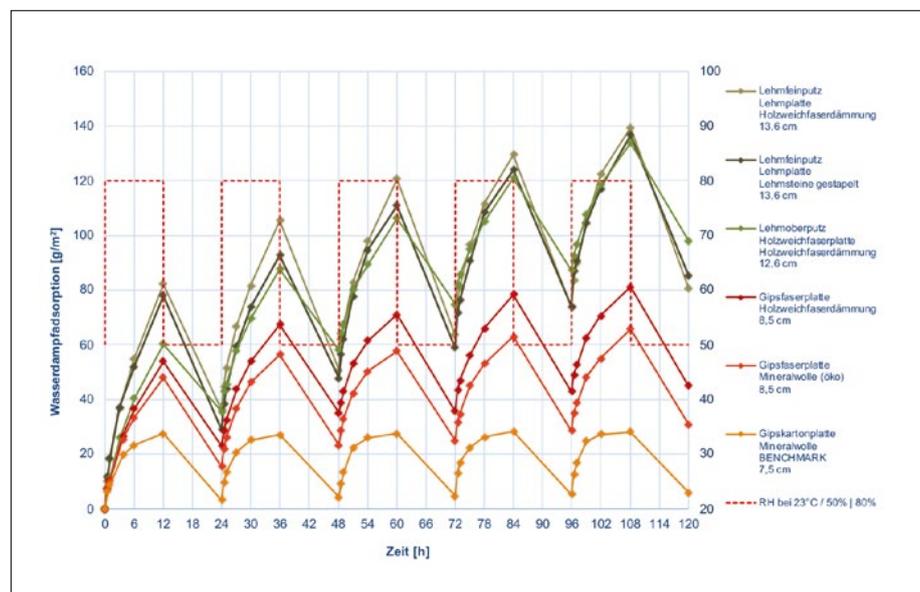


Abbildung 4 zeigt Sorptionsprüfungen von unterschiedlichen Innenwandkonstruktionen aus Naturbaustoffen und konventionellen Materialien (Benchmark), die über einen Zeitraum von fünf Tagen getestet wurden. Die Ergebnisse spiegeln die Tendenzen der Messungen der Einzelmaterialeiten wider und zeigen deutlich, dass die Wandaufbauten auf Basis von Holz- und Lehmabaustoffen eine 4,5–5-mal höhere Sorptionskapazität aufweisen als Aufbauten aus konventionellen Materialien. Dies zeichnet sich zum einen durch die Gesamtmenge an sorbiertem Wasserdampf aus, zum anderen durch die höhere Sorptionsgeschwindigkeit (1–3 Stunden). Auch die Dämmebene des Wandaufbaus wird aktiviert und trägt im Falle von Holzweichfasern zur höheren Speicherfähigkeit (ca. 16 g/m² im 5. Zyklus) der Konstruktion bei. Kommt hingegen eine wenig sorptive Mineralwollämmung zum Einsatz, so nimmt diese Schicht der Wand kaum noch Feuchtigkeit auf.

Der Vergleich zweier Messungen auf Baustoff- und Bauteilebene (Abb. 5) zeigt das überdurchschnittlich gute Sorptionsvermögen von Lehmabaustoffen sehr eindrücklich. Ein zweischichtiges Lehmputzsystem mit einer Materialstärke von nur 15 mm adsorbiert ca. 2,5-mal so viel Feuchtigkeit wie ein gesamtes Innenwandssystem auf Basis von Gipskarton und Mineralwollämmung mit einer Wandstärke von 75 mm.

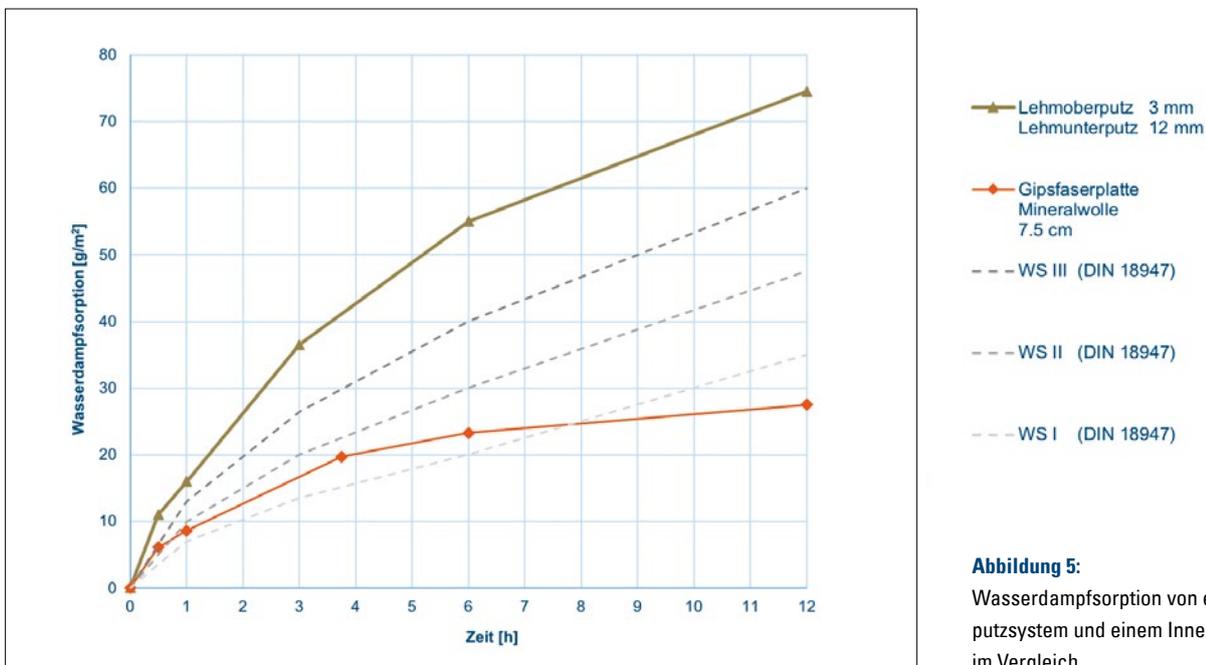


Abbildung 5:
Wasserdampfsorption von einem Lehmputzsystem und einem Innenwandssystem im Vergleich

Monitoring in Gebäuden

Die Labormessungen wurden durch eine experimentelle Studie ergänzt. Um den Steuerungseffekt von hygroskopischen Materialien auf das Raumklima nachzuweisen, wurden zwei Wohnungen in Berlin in Bezug auf relative Luftfeuchtigkeit und Temperatur hin untersucht. Die erste Wohnung ist mit Naturbaustoffen wie Lehm und Holzweichfaser ausgestattet und wird, abgesehen von einer präsenzgesteuerten Abluft im Bad, natürlich belüftet. Die zweite Wohnung wird aufgrund der wenig hygroskopischen Materialien wie beispielsweise Gipsputze, Gipskarton und Mineralwolle mechanisch belüftet. Das Raum- sowie das Außenklima wurden sowohl im Winter als auch im Sommer über einen Zeitraum von jeweils 6–8 Wochen mithilfe von Miniatursensoren und einem Datenerfassungssystem (iButton®) aufgezeichnet [15]. Im Ergebnis konnte gezeigt werden, dass durch den Einsatz von Naturbaustoffen im Vergleich zu konventionellen Materialien die gemessenen Raumluftfeuchten überwiegend stabil in einem komfortablen und gesunden Bereich von

45–60 % lagen, was auf die Feuchtespeicherkapazität der Lehm- und Holzbaustoffe zurückzuführen ist [17] und in [13], [15], [18] nachgewiesen wurde. In der Wohnung, die mit konventionellen Baustoffen ausgestattet wurde, waren die Raumlufffeuchten im Winter mit 30 % sehr niedrig. Dieses ist auf die mechanische Belüftung zurückzuführen, die vor allem im Winter durch die sehr trockene, angesaugte Außenluft die Räume runtertrocknet. Zudem trägt die fehlende Speicherfähigkeit der Baustoffe dazu bei, dass die durch Kochen und Duschen generierte Feuchtigkeit nicht aufgenommen werden kann [15].

Auch punktuell kritische Lastfälle, wie beispielsweise der extreme Anstieg der Raumlufffeuchte auf > 90 % wurden betrachtet, da diese ein maßgeblicher Grund für den Einsatz von Lüftungstechnik sind. Abbildung 6 zeigt die Entwicklung der relativen Luftfeuchtigkeit im Badezimmer vor, während und nach einem Duschvorgang über einen Zeitraum von 24 Stunden. Die Raumlufffeuchte pendelt sich innerhalb weniger Minuten nach dem Lastfall auf die Ausgangsfeuchte ein und bleibt stabil, wenn der Gebäudenutzer nach dem Duschen das Fenster zur Stoßlüftung öffnet. Der Großteil der Feuchtigkeit wird über den Lüftungsvorgang abgeführt, die hygroskopischen Naturbaustoffe wirken zudem als Puffer, der dazu beiträgt, Schadensfälle zu vermeiden.

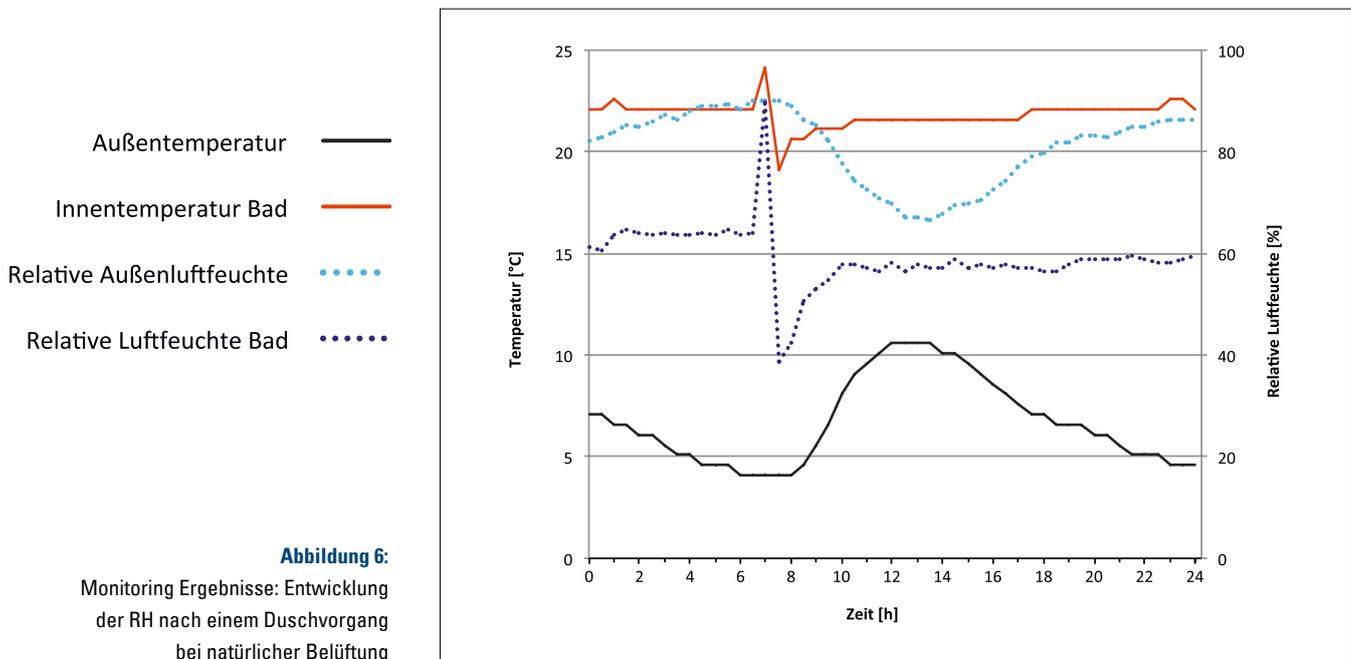


Abbildung 6:
Monitoring Ergebnisse: Entwicklung der RH nach einem Duschvorgang bei natürlicher Belüftung

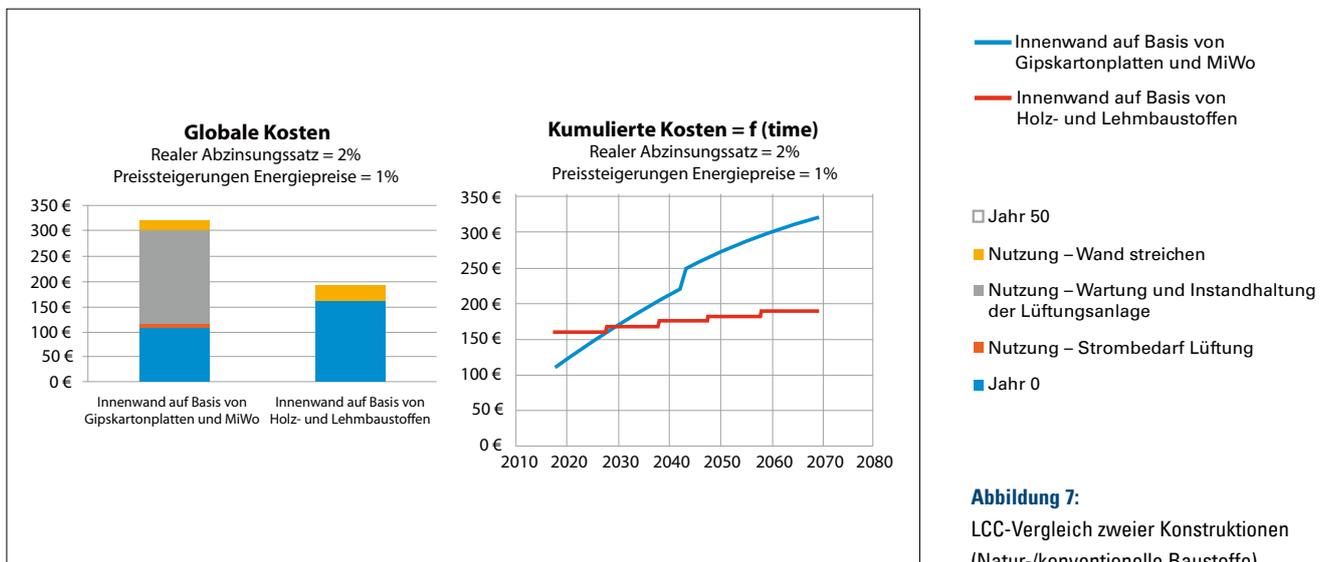
Emissionen aus Bauprodukten

Zu einem gesunden Raumklima gehört eine schadstoffarme Raumluff. Diese stellt sich ein, wenn die Emissionen aus Bauprodukten und anderen Quellen begrenzt werden. Im Rahmen des Vorhabens wurden daher umfangreiche Emissionsprüfungen an ca. 100 Bauprodukten auf Material- sowie Bauteilebene durchgeführt. Es konnte nachgewiesen werden, dass nahezu alle Materialien und Materialkombinationen die Bewertung nach AgBB [19] bestehen, was bedeutet, dass sie für die Verwendung im Innenraum tauglich sind. Detaillierte Ergebnisse der Untersuchungen sind in [17] zu finden.

Lebenszykluskosten (LCC)

Kosten sind nach wie vor ein maßgebliches Entscheidungskriterium für die zum Einsatz kommende Lösung. Da der Vergleich von Investitionskosten zu kurz greift und keinen ganzheitlichen Ansatz liefert, wurden im Rahmen des Vorhabens projektbegleitende Berechnungen der Lebenszykluskosten nach DIN EN 60300-3 über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren erstellt [20]. Dafür wurden zwei Entwürfe für einen mehrgeschossigen Wohnungsbau in Berlin verglichen. Szenario 1 sah die Ausstattung der Innenräume mit feuchteaktiven Naturbaustoffen (Lehmputze, Holzweichfaserplatten und -dämmung) vor, die einen sehr reduzierten Lüftungsansatz im Bereich der Bäder in Form einer präsensgesteuerten Abluft ermöglicht. Szenario 2 ging von der Ausstattung der Räumlichkeiten mit konventionellen Baustoffen (Gipskartonplatte, Mineralwolldämmung) aus, die aufgrund der geringen Feuchteaktivität mit dezentralen Lüftungsgeräten ausgestattet wurden. Das Lüftungskonzept wurde in beiden Fällen von einem TGA-Planer erstellt, der die Entwicklung einer technikeffizienten Lösung explizit zum Ziel hatte. Die im Rahmen einer Lebenszyklusbetrachtung relevanten Szenarien (Preissteigerungen von Energiepreisen, Diskontranten und Sensitivitätsanalysen) wurden mit unterschiedlichen Ansätzen berechnet.

Die Ergebnisse (Abb. 7) liefern wichtige Erkenntnisse und zeigen deutlich, dass sich die höheren Investitionskosten für die Naturbaustoffwände nach ca. zwölf Jahren amortisieren. Nach 50 Jahren liegen die Gesamtkosten für das Gebäude auf Basis von Naturbaustoffen sogar um 40 % unter den Kosten für die konventionelle Bauweise, da die höheren Wartungskosten und der Strombedarf der Lüftungsanlage stärker zu Buche schlagen als die anfänglichen Mehrkosten für das Material und den erhöhten Arbeitsaufwand beim Einbau. Würde man potenzielle Folgekosten bedingt durch ein eingeschränktes Wohlbefinden, Krankheit oder eine geringere Produktivität der Nutzer in Betracht ziehen, würde die Bilanz zugunsten der passiven Lösung auf Basis von hygroskopischen Materialien noch besser ausfallen. Die Untersuchung unterstreicht, wie wichtig es ist, Kosten nach einem ganzheitlichen Ansatz zu vergleichen und nicht nur die Investitionskosten in Betracht zu ziehen.



Potenziale für die Baupraxis – realisierte Projekte

Technische Grundlagen für ein Bausystem ohne Lüftungsanlage auf Basis von Naturbaustoffen

Vorbild für das von ZRS entwickelte Bausystem ohne Lüftungsanlage ist das historische Fachwerkhaus, welches sich, im Vergleich zu Gebäuden aus Stein, aufgrund der verwendeten, hygroskopischen Baustoffe Holz und Lehm durch eine gute Raumlufftfeuchte auszeichnete. Im Winter sind die Räume relativ trocken und somit gefühlt warm und im Sommer angenehm kühl.

Grundlage des modernen, energieeffizienten Holz-Lehm-Hauses ist ein angemessener Glasanteil, der zwischen Energiegewinnen im Sommer, aber auch -verlusten im Winter vermittelt. Wesentliches Kriterium ist zudem die angemessene Versorgung mit Tageslicht. Der diffusionsoffene, opake Anteil der Gebäudehülle trägt zur Klimasteuerung und somit zum Komfort im Haus bei.

Wie bei allen energetisch optimierten Gebäuden haben die opaken Außenbauteile des Holz-Lehm-Hauses sehr geringe U-Werte, die in der Regel zwischen 0,15 und 0,10 W/(m²K) liegen. Dies kann beispielsweise über ein Tragwerk aus KVH 6 x 30 mit beidseitiger Bekleidung mit Holzfaserplatten als Raumabschluss erreicht werden. Die Holzfaserplatte bildet die winddichte Ebene und ermöglicht den Verzicht auf verklebte Folien. Diese Aufbauten werden innenseitig in der Regel mit einem Lehmheizputz und außenseitig mit einer hinterlüfteten Fassade bekleidet. Als Dämmstoff werden üblicherweise Holzfasern oder Zellulose oder einjährige Naturfasern in die Wände eingeblasen. Durch die kapillaren Naturbaustoffe und das diffusionsoffene Bausystem entsteht eine robuste, schadstoffarme, dauerhafte Bauweise. Als Fenster kommen oftmals dreifachverglaste Holzfenster zum Einsatz, deren Blendrahmen zur Vermeidung von Kondensat auf den Scheiben an kalten Wintertagen überdämmt wird. Abbildung 8 zeigt die Grundprinzipien eines solchen Systems.

- 01 Baugrund
- 02 Bodenplatte, Schaumglasdämmung, Stahlbeton
- 03 Wände Holzbau, Zellulose
- 04 Dach Holzbau, Zellulose
- 05 Bodenaufbau EG, Fußbodenheizung
- 06 Innenwand Holzbau, Lehm
- 07 Decke Brettstapel
- 08 Lehmbelegung, Steuerung Raumklima
- 09 Passive Solarenergienutzung über Fenster
- 10 Wärmeversorgung über Fußbodenheizung
- 11 Solarenergienutzung Solarkollektor
- 12 Schichtenspeicher, Zusatzheizung
- 13 Zusatzheizung, Passivhauskamin

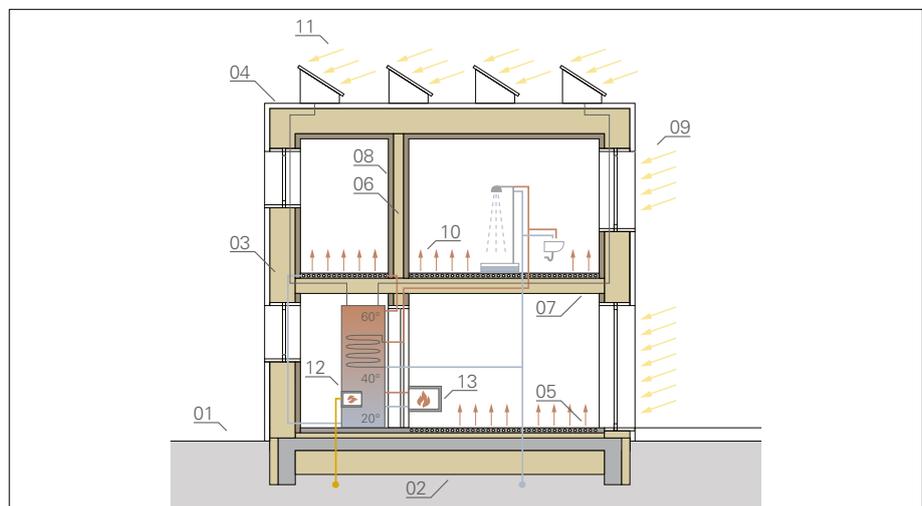
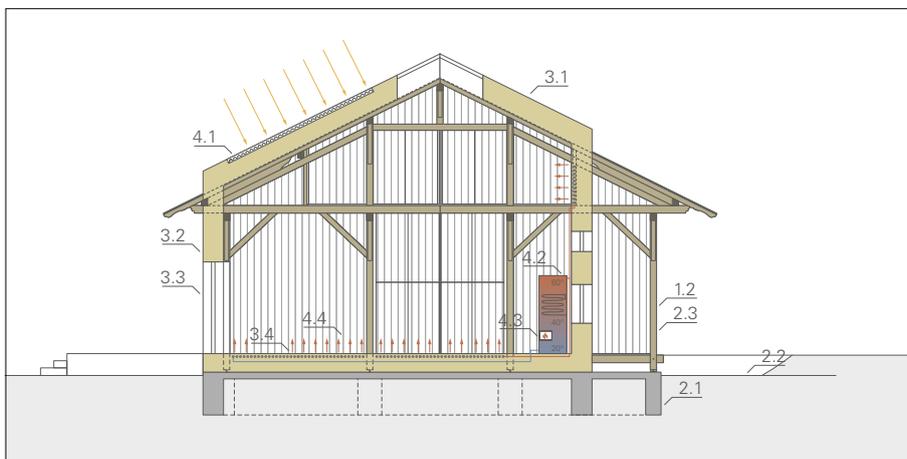


Abbildung 8:
Klimaaktives Bausystem
ohne Lüftungsanlage

Historische Torfremise

Das Gebäude ist ein Prototyp für die Themen Lowtech-Konstruktionen, Zirkularität und Ressourceneffizienz. Die historische Torfremise stand bis 2005 an ihrem alten Standort in Kolbermoor, wo sie einer Transformation des Gewerbegebietes weichen musste und von den Bauherren abgebaut wurde. Am neuen Standort in Schechen erhielt sie eine neue

Gründung, um die Integration eines Niedrigenergiehauses in Holz-Lehm-Bauweise zu ermöglichen. Das Gebäude ist als Konzept realisiert worden. Die neue, hochdämmende und diffusionsoffene Holzständerkonstruktion aus den hygroskopischen Baustoffen Holz und Lehm ermöglicht den Verzicht auf eine Lüftungsanlage. Um diesen Lowtech-Ansatz realisieren zu können, wurde der Glasanteil, der je nach Himmelsrichtung zwischen 40 und 60 % liegt, bewusst angemessen gehalten. Der sommerliche Wärmeschutz wird über einen außen liegenden Sonnenschutz sowie den Eintrag von thermischer Masse im Bereich der Innenwände gewährleistet, die in Lehmsteinmauerwerk errichtet und mit Lehm verputzt wurden (Abb. 11). Neben dem Wärmespeichereffekt bewirken die Lehmstoffe eine Verdunstungskühlung, die sich positiv auf die sommerlichen Temperaturen auswirkt. Die Feuchtesorption trägt zudem zu einer stabilen Raumluftfeuchte und zu einem gesunden Raumklima bei. Eine Fußbodenheizung (EG) und ein Wandheizungssystem (1. OG), welche theoretisch im Sommer auch zum Kühlen herangezogen werden könnten, sorgen im Winter für eine angenehme Strahlungswärme (Abb. 9).



1. Bestand vor der Demontage

- 1.1 Fundamente
- 1.2 Historischer Holzbau

2. Wiedererrichtung am neuen Standort

- 2.1 Neue Gründung und Bodenplatte (Stahlbeton)
- 2.2 Neues Gelände
- 2.3 Wiedererrichtung historischer Holzbau

3. Integration Niedrigenergiehaus

- Hochdämmende diffusionsoffene Gebäudehülle aus regenerativen Rohstoffen (Holz, Cellulose, Lehm)
- 3.1 Aufdopplung Dach U-Wert: 0,15 W/m²K
- 3.2 Außenwand U-Wert: 0,13 W/m²K
- 3.3 Holzfenster Dreifachverglasung U-Wert: 1,0 W/m²K
- 3.4 Bodenaufbau gedämmt, U-Wert: 0,1 W/m²K

4. Regenerative Wärmeversorgung

- 4.1 Warmwasserkollektor
- 4.2 Schichtenspeicher
- 4.3 Stückholzheizung
- 4.4 Flächenheizung zur Wärmeverteilung

Abbildung 9:
Haustechnikschema

Über die Gewinnung von solarer Energie über einen Warmwasserkollektor und die Verwendung von Brennholz aus Abfällen aus dem eigenen Handwerksbetrieb und dem eigenen Wald wird das Werkstatt- und Wohnhaus klimaneutral beheizt. Die Aktivierung der Dachfläche mit Photovoltaik würde den Betrieb als Plusenergiegebäude ermöglichen.

Weißer Lehmputz und geseifte Tannenböden prägen den Innenraum (Abb. 10). Das historische Tragwerk, meist handgehackte Balken, wurde gewaschen und nach dem Einbau geölt. Durch den großen Dachüberstand und den Versatz zur historischen Lattenfassade wurde der Einsatz von Lehmputz auch auf der Außenseite der Wände möglich. Der eingesetzte Neubau steht somit ganz selbstbewusst als eigenständiger Baukörper und doch in einer untrennbaren Verbindung mit dem historischen Gebäude.



Abbildung 10:
Holztragwerk, Holz- und
Lehmoberflächen, Wohnung EG



Abbildung 11:
Innenwand aus Holzständer mit
Lehmsteinen und Heizungssystem

Wettbewerbsentwurf Schöneberger Linse, Berlin

Der Entwurf eines siebengeschossigen Wohngebäudes in reiner Holz-Lehm-Bauweise steht für Angemessenheit und Reduktion von Konsum (Abb. 12). Die geplanten Wohnflächen mit weniger als 30 m² pro Kopf sind bewusst reduziert gehalten, um den Ressourcenkonsum im Bereich Gebäude, aber auch die Investitionskosten zu reduzieren. Gemeinschaftsflächen schaffen hier einen Ausgleich und erhöhen nachhaltig die Nutzungsintensität von Flächen. Über sichtbare, klimaaktive Holzoberflächen und Elemente kann der Technikeinsatz stark reduziert werden.

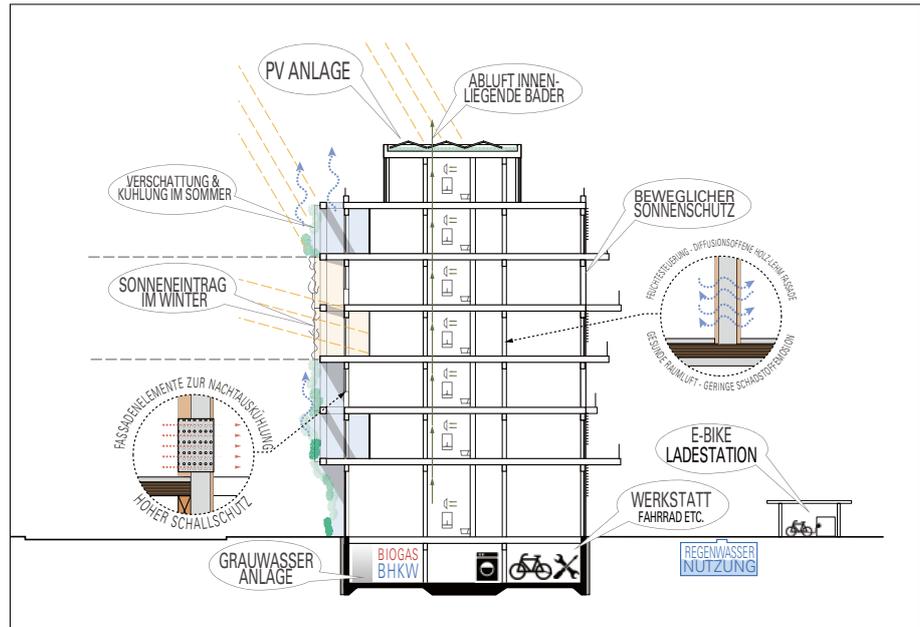
In Zusammenarbeit mit dem Büro Roedig.Schop Architekten wurden multifunktionale Grundrisstypologien entwickelt, die eine flexible Um- oder Nachnutzung zwischen Wohnen und Arbeiten ermöglichen sollen. Aus diesem Grund wurde als Tragwerk ein Holz-Skelettbau entwickelt, der eine freie Grundrissgestaltung ermöglicht (Abb. 13). Dafür wurden die Schächte im Bereich der Kerne angeordnet. Wohnnutzungen können so ohne große Eingriffe in die Struktur des Gebäudes in Büro- oder Gewerbeeinheiten umgebaut werden. Aufgrund der hygroskopischen Oberflächen war nur eine bedarfsgesteuerte Abluft im Bereich der innen liegenden Bäder notwendig, ein Aspekt, der für die flexible Nutzungsänderung maßgeblich ist. Sollte bei einer höheren Belegungsdichte die Fensterlüftung nicht ausreichend sein, kann über die Abluft die Raumluftfeuchte einfach nachgesteuert werden. Mit diesem System, das sich als effizient und funktional erwiesen hat, wurden bereits in früheren ZRS-Projekten im gehobenen Wohnungsbau wertvolle Erfahrungen gesammelt.



Abbildung 12:
Straßenansicht Schöneberger Linse

Um den sommerlichen Wärmeschutz zu verbessern, der zunehmend auch in Deutschland eine Herausforderung darstellt, und damit die Diskussion um die CO₂-neutrale Energieversorgung für Gebäude bestimmt, wurde in Zusammenarbeit mit Marco Schmidt von der TU Berlin auf passive Strategien gesetzt. Um dem Gebäude eine Pufferschicht zu geben, wurde eine Dach- und Fassadenbegrünung vorgeschlagen, die nicht nur das Mikroklima am Gebäude verbessert, sondern über die stattfindende Verdunstungskühlung auch zur Senkung der Außentemperatur und somit zur Kühlung der Stadt beiträgt. Zudem wird die Biodiversität im Stadtkontext durch Nisthilfen für Insekten, Vögel und Fledertiere gefördert.

Abbildung 13:
Nachhaltigkeitsschema



Neubau Betriebsgebäude Flexim GmbH, Berlin

Das Betriebsgebäude überführt Erfahrungen im Wohnungsbau und die Ergebnisse des „[H]house“-Vorhabens in den Gewerbebau und realisiert das Konzept auf knapp 13.000 m² Bruttogrundfläche. Die Gebäudehülle bilden diffusionsoffene Wandaufbauten, die auf der Innenseite mit einer Gipsfaserplatte bekleidet sind. Gipsfaser sorbiert mit ca. 45 g/m² Luftfeuchtigkeit drei Viertel dessen, was ein Lehmputz der besten Sorptionsklasse aufnimmt und das Dreifache von Gipskarton darstellt. Das Material eignet sich im Gewerbebau, um einen Kompromiss zwischen Preis und Leistung zu bilden. Auch die Innenwände sind aus Gipsfaserwänden mit Naturfaserdämmung geplant und steuern so das Raumklima mit. Eine weitere große klimaaktive Fläche bildet die unbehandelte Holzlage der HBV-Decken.

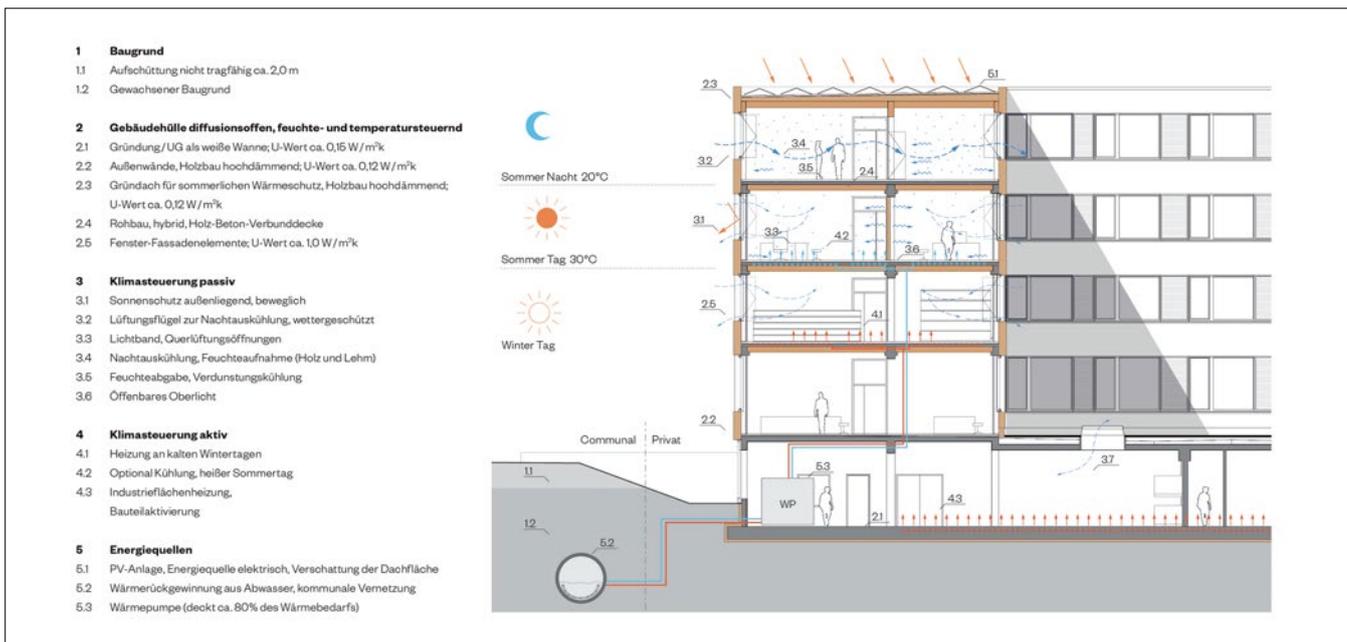


Abbildung 14:
Nachhaltigkeitsschema
Firmengebäude Flexim, Berlin

Zusammenfassung

Die Untersuchungen des „[H]house“-Vorhabens befassen sich mit Innenwänden aus Naturbaustoffen. Hier wurden für Naturbaustoffe besondere Potenziale zur Steuerung der Raumlufffeuchte in der Raumluff nachgewiesen. Diese Kenntnisse lassen sich auch auf die gesamte Gebäudehülle und auf Tragwerke aus Holz, Lehm und Naturfasern übertragen.

Bei den außenluftberührenden Bauteilen Dach und Wand hat sich im Holzbau die diffusionsoffene Bauweise und somit der Verzicht auf Dampfsperren und Dampfbremsen durchgesetzt [21].

Bezogen auf den Lüftungsbedarf und die Luftqualität von energetisch optimierten, hoch-dichten Gebäuden aus Holz, Lehm und Naturfaserdämmstoffen lässt sich hinsichtlich der drei oben genannten Hauptkriterien bei zweimaliger Stoßlüftung über die Fenster (einmal am Morgen, einmal am Abend) folgende Aussage treffen:

Die im „[H]house“-Projekt untersuchten Naturbaustoffe steuern bei üblichen Wohnnutzungen die Innenraumluff im Winter auf den Bereich zwischen gesunden 40 und 60 % relativer Raumlufffeuchte. So sind Schimmelrisiko und das Gesundheitsrisiko durch Viren bei zu geringen Raumlufffeuchten ausgeschlossen. Holz-Lehm-Häuser sind gerade, weil sie auf Lüftungsanlagen verzichten können, gesund und komfortabel.

Der Schadstoffgehalt in der Raumluff hängt wesentlich von den Baustoffen ab. Durch die Verwendung der richtigen Baustoffe kann der Schadstoffeintrag ins Gebäude sehr gering gehalten werden und liegt im gesunden Bereich. Insbesondere Lehmbaustoffe können zudem der Raumluff Schadstoffe entziehen und diese im Rahmen der freien Lüftung wieder abgeben.

Folglich ist das wesentliche Kriterium für die Lüftung die Abführung des CO₂, das der Mensch über seine Atmung an den Raum abgibt. Der CO₂-Gehalt ist abhängig von dem pro Person zur Verfügung stehenden Luftvolumen, also der Anzahl der Menschen und der Raumgröße. Dies kann beispielsweise in einem kleinen Schlafraum, in dem zwei Erwachsene bei geschlossener Tür schlafen, kritisch werden. Wird aber über eine offene Tür ein Verbund zu anderen Räumen hergestellt, steht ausreichend Volumen zur Verfügung und die Werte bleiben im angestrebten Bereich von < 1.000 ppm.

Die Anwendung mechanischer Lüftungsanlagen ist aktuell stark in der Diskussion. Die DIN 1946-6:2009-05 [22] soll den Lüftungsbedarf regeln. Diese Norm wurde vom Ausschuss Heiz- und Raumlufftechnik erarbeitet und schließt manuelle Fensterlüftung zum Feuchteschutz – also zur Schimmelvermeidung – aus. Diese Norm wird inhaltlich sehr kontrovers diskutiert und gilt nicht als „allgemein anerkannte Regel der Technik“. Es besteht in jedem Fall ein hohes Haftungsrisiko, da die Norm bislang juristisch unterschiedlich interpretiert wird. Auch wenn man eine Lüftungsanlage einbaut, können einem zu hohe Investitionskosten und ein Gesundheitsrisiko über zu trockene Raumluff ausgelegt werden.

Über Messungen in verschiedenen Wohnungen konnte bei zweimaliger Fensterlüftung am Tage, einmal am Morgen, einmal am Abend, auch das CO₂ abgeführt und somit im vertretbaren Bereich gehalten werden. Ganz wesentlich ist vor allem die stabile Raumlufffeuchte im Winter, die im gesunden und komfortablen Bereich zwischen 45 und 60 % lag.

Referenzen

- [1] **Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2016)**. https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Schlaglichter-der-Wirtschaftspolitik/2016/01/onlinemagazin-schlaglichter-01-16.html?cms_textId=298690&cms_artId=298682, zuletzt besucht am 11.10.2019 um 19:13 Uhr.
- [2] **dena-GEBÄUDEREPORT (2016)**. Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand. Berlin. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena).
- [3] **Deutsche Stiftung Weltbevölkerung (2017)**. <https://www.dsw.org/neue-un-bevoelkerungsprojektionen-2017-entwicklung-weltbevoelkerung-bis-2100/>, zuletzt besucht am 11.10.2019 um 19:18 Uhr.
- [4] **Statista (2019)**. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1716/umfrage/entwicklung-der-weltbevoelkerung/>, zuletzt besucht am 11.10.2019 um 19:30 Uhr.
- [5] **Bauwelt (2015)**. <https://www.bauwelt.de/themen/interview/Die-Komfortmacher-interview-Matthias-Sauerbruch-Thomas-Auer-Sauerbruch-Hutton-Transsolar-2418649.html>, zuletzt besucht am 11.10.2019 um 19:41 Uhr.
- [6] **Cali, D. et al. (2016)**. Energieeinsparpotenzial sanierter Wohngebäude unter Berücksichtigung realer Nutzungsbedingungen. Bonn. Fraunhofer IRB Verlag, ISBN (E-Book): 978-3-8167-9634-3.
- [7] **Thalmayer Interview Hugentobler (2016)**. Die Nase ist unsere Klimaanlage. HK-Gebäudetechnik. Ausgabe 6/2016, S. 66–67.
- [8] **Hugentobler, W. J. (2016)**. In die Wüste geschickt. Gebäude und Technik, Ausgabe 9/2016, S. 48–54.
- [9] **Umweltbundesamt (2019)**. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaftskonsum/produkte/bauprodukte/europaeische-pruefverfahren-fuer-emissionen-aus>, zuletzt besucht am 11.10.2019 um 19:49 Uhr.
- [10] **Hugentobler, W. J./Langholz, R. (2017)**. Höhere Raumluftfeuchte? Unbedingt! kma Krankenhaustechnik, Ausgabe 11/2017, S. 16–19.
- [11] **Noti, J. D. et al.** High Humidity Leads to Loss of Infectious Influenza Virus from Simulated Coughs, PLoS One. 2013;8(2):e57485.
- [12] **Sterling, E. M. et al. (1985)**. Criteria for Human Exposure to Humidity in Occupied Buildings. ASHRAE Transactions, Vol. 91, Part 1.
- [13] **Minke, G. (2012)**. Handbuch Lehm- und Ziegelbau. 8. Auflage. Staufien bei Freiburg: ökobuch Verlag.
- [14] **Röhlen, U./Ziegert, C. (2010)**. Lehm- und Ziegelbau-Praxis: Planung und Ausführung.
- [15] **Klinge, A. (2013)**. Natural materials with high hygroscopic properties in naturally ventilated buildings. Master thesis, London Metropolitan University.
- [16] **DIN 18947 (2013)**. Lehmputzmörtel – Begriffe, Anforderungen, Prüfverfahren.

- [17] **Klinge, A. (2016).** Reduktion von Lüftungstechnik durch den Einsatz klimasteuernder Naturbaustoffe – Ergebnisse aus dem EU-Forschungsvorhaben H-House und der Baupraxis. DVL 2016: Tagungsbeiträge der 7. Internationalen Fachtagung für Lehm-bau, Weimar, Deutschland, 12.–14. November.
- [18] **Eckerman, W./Ziegert C. (2006).** Auswirkung von Lehmbaustoffen auf die Raumluft-feuchte.
- [19] **Ausschuss für die gesundheitliche Bewertung von Bauprodukten (AgBB) (2015).** Vorgehensweise bei der gesundheitlichen Bewertung der Emissionen von flüchtigen organischen Verbindungen (VVOC, VOC und SVOC) aus Bauprodukten; http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/355/dokumente/agbb-bewertungsschema_2015_2.pdf (zuletzt besucht am 13.9.2016).
- [20] **DIN EN 60300-3-3:2004.** Anwendungsleitfaden Lebenszykluskosten.
- [21] **DIN 68800-2:2012-02.** Holzschutz – Teil 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau.
- [22] **DIN 1946-6 (2004).** Lüftung von Wohnungen – Allgemeine Anforderungen, Anforderungen zur Bemessung, Ausführung und Kennzeichnung, Übergabe/Übernahme (Ab-nahme) und Instandhaltung.

Autor:

Viktor Grinewitschus

**Techem Stiftungsprofessur für Energiefragen der Immobilienwirtschaft an
der EBZ Business School – University of Applied Sciences, Bochum**

Interaktion statt Automation: Mehr Energieeffizienz durch nutzerzentrierte Betriebsführung von Gebäuden

Der gebäuderelevante Energieverbrauch in Deutschland beträgt 34,4 % des gesamten Endenergieverbrauchs. Er hat zwischen 2008 und 2017 um 6,9 % abgenommen, der Zielwert (Abnahme des Endenergieverbrauchs in Gebäuden bis 2020 um 20 %) erscheint trotz erheblicher Verschärfungen der gesetzlichen Anforderungen an die Energieeffizienz von Gebäuden (EnEV) im Zeitraum 2008–2017 kaum erreichbar.¹ Eine besondere Rolle spielen dabei die Nichtwohngebäude. Obwohl ihr Anteil in Deutschland nur 13 % des Gebäudebestandes ausmacht, sind diese für 37 % des gebäudespezifischen Energieverbrauchs verantwortlich.² Nichtwohngebäude haben in Deutschland einen deutlich höheren flächenbezogenen Energieverbrauch als Wohngebäude, Ursachen werden in der technischen Ausstattung vermutet.³ Wenn die technische Ausstattung der Gebäude für einen hohen Energieverbrauch verantwortlich ist, was liegt näher, als diese deutlich zu reduzieren? Lässt sich so tatsächlich der Energieverbrauch deutlich senken bei gleichzeitiger Steigerung der Zufriedenheit mit dem Raumklima? Im Folgenden sollen die verschiedenen Aspekte dieses Ansatzes diskutiert werden.

Die Rolle der Gebäudetechnik in Nichtwohngebäuden

Nichtwohngebäude müssen heute unterschiedlichste Anforderungen erfüllen. Das Gebäude soll eine repräsentative Gestaltung haben, die Menschen, die dort ihren Arbeitsplatz haben, sollen sich darin wohlfühlen und ihre Arbeit mit einer hohen Performance erbringen. Gleichzeitig sollen die „Life Cycle Costs“ des Gebäudes minimiert werden. Diese enthalten (nicht nur) die Energieverbräuche und Wartungskosten der Technik. Dabei ergeben sich Zielkonflikte zwischen der gestalterischen Freiheit des Gebäudes, der Energieeffizienz und dem individualisierbaren Raumklima. Die Technische Gebäudeausstattung (TGA) ist dabei in den meisten Fällen Mittel zum Zweck, ermöglicht sie doch in vielen Fällen Kompromisse

1 vgl. <https://www.umweltbundesamt.de/indikator-energieverbrauch-fuer-gebaeude#textpart-3> [Zugriff am 19.1.2020].

2 vgl. https://www.energieagentur.nrw/gebaeude/energieeffiziente-nichtwohngebaeude/nichtwohngebaeude_in_deutschland__daten_und_fakten [Zugriff am 19.1.2020].

3 vgl. https://www.energieagentur.nrw/gebaeude/energieeffiziente-nichtwohngebaeude/nichtwohngebaeude_in_deutschland__daten_und_fakten [Zugriff am 19.1.2020].

(Abb. 1). Beispiele sind Gebäude mit einem hohen Glasanteil in der Fassade. Arbeitsplätze sollen trotzdem blendfrei sein und sich im Sommer nicht unzulässig aufheizen. Mitarbeiter sollen eine optimale Luftqualität am Arbeitsplatz haben, gleichzeitig sind Lüftungsverluste wegen der hohen Anforderungen an die Energieeffizienz zu minimieren. Ein Verzicht auf TGA minimiert die Möglichkeiten zum Kompromiss zwischen den verschiedenen Polen.

Mit zunehmenden Kompromissen steigen sowohl die Komplexität der Anlagentechnik als auch die Anforderungen an die Betriebsführung des Gebäudes an. Dies lässt sich am Beispiel eines Segelflugezugs verdeutlichen. Es fliegt CO₂-neutral, indem es die Antriebsenergie aus den Luftbewegungen der Atmosphäre nutzt. Verbunden ist dies mit erheblichen Einschränkungen für die Passagiere (Platz ist begrenzt, Erreichen des Reisezieles ist extrem wetterabhängig). Des Weiteren gibt es hohe Anforderungen an die Sachkenntnis und an das Geschick des Piloten. Neben Kenntnissen der Meteorologie und der Aerodynamik ist die richtige Einschätzung des zur Verfügung stehenden „Energievorrates“ aus der Flughöhe unabdingbar. Ein Motorflugzeug hingegen ist in der Lage, viele der genannten Einschränkungen durch die Bereitstellung von Antriebsenergie zu kompensieren.

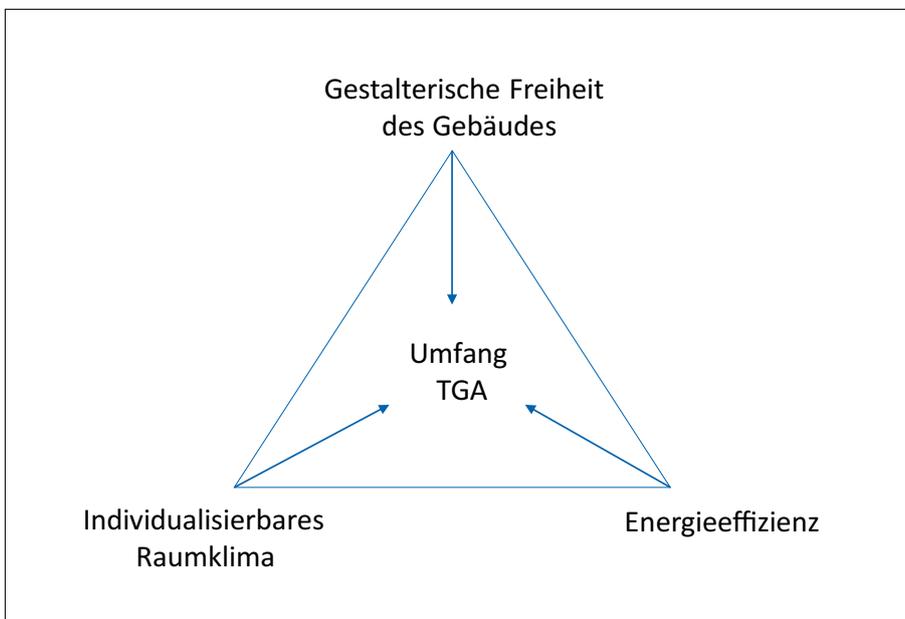


Abbildung 1:
Zielkonflikte beim Gebäudeentwurf

Vergleichbar mit einem Segelflugezug ist bei Gebäuden das Passivhaus. Es ist so konzipiert, dass es mit dem Angebot an Energie aus der Umwelt und den internen Wärmegewinnen auskommt. Per Definition wird auf eine aktive Heizungsanlage verzichtet. Zur Vermeidung von Lüftungsverlusten ist eine Lüftungsanlage obligatorisch, der Nutzer muss mitmachen (u. a. muss er verstehen, dass das Öffnen der Fenster zu hohen Wärmeverlusten führt, die sich erst mit großer zeitlicher Verzögerung kompensieren lassen). Ohne einen funktionierenden Sonnenschutz kann sich das Passivhaus im Sommer übermäßig aufheizen. Vorrichtungen, um die Raumtemperatur individuell raumweise einzustellen, sind aufgrund des Fehlens der Heizungsanlage nicht vorhanden. „Die Nutzung von Passivhäusern ist im Grunde wesentlich einfacher als die Nutzung konventioneller Gebäude – nur eben etwas anders.“⁴

4 Pfluger, Rainer/Feist, Wolfgang et al.: Nutzerhandbuch für den Geschoßwohnungsbau in Passivhaus-Standard.

Passivhäuser werden oft dafür kritisiert, dass der niedrige berechnete Energieverbrauch in der Praxis in vielen Fällen nicht erreicht wird. Als Grund dafür wird oftmals das Nutzerverhalten genannt, welches vom Idealverhalten erheblich abweicht. Nutzer verstehen offensichtlich die Zusammenhänge nicht, inwiefern ihr Verhalten den Energieverbrauch nachhaltig beeinflusst, oder sind nicht bereit, sich den Anforderungen des Gebäudebetriebes anzupassen. Oftmals fehlen Feedbackmechanismen, mittels denen der Nutzer lernt, die Wirkung seines Verhaltens richtig zu interpretieren und sich energieeffizient zu verhalten.

Interaktion der Nutzer mit smarter Gebäudetechnik

Wie Nutzer mit smarten Gebäuden interagieren, wird seit 2001 in sogenannten Living Labs erprobt. Der Autor ist Mitgründer und von 2001 bis 2013 Leiter des ersten Living Labs in Europa, des Fraunhofer-inHaus-Zentrums gewesen. Ein Living Lab ist ein gut ausgestattetes Labor, welches bewohnbar ist und in dem sich das Verhalten verschiedener Probanden gut beobachten lässt. Im zweiten Bauabschnitt des Fraunhofer-inHaus-Zentrums, des inHaus 2 (Abb. 2, Eröffnung 2008), lag der Fokus in der Untersuchung von Anwendungsprozessen in Nichtwohngebäuden. Dort wurde vor allem untersucht, inwieweit smarte Gebäudesysteme die Anwendungsprozesse im Office, Hotel, Pflegeeinrichtung unterstützen und wie Nutzer mit smarten Umgebungen interagieren.



Abbildung 2:

inHaus 2 des Fraunhofer-inHaus-Zentrums
© R. Dinkelbach, Fraunhofer Gesellschaft

Eine Weiterentwicklung des Living-Lab-Ansatzes sind sogenannte Reallabore. Hierbei wird die Alltagsumgebung der Nutzer zum Labor. Die Wohnung oder das Büro wird mit zusätzlichen Sensoren und weiteren smarten Komponenten ausgestattet und das Verhalten der Menschen in ihrer Alltagsumgebung beobachtet. Daraus lassen sich Rückschlüsse über die Akzeptanz und Bedienerfreundlichkeit von Produkt-/Dienstleistungsinnovationen ziehen. Beispiele für Reallabor-Projekte, bei denen der Autor beteiligt war, sind „I-stay@home“ (2012–2015) und das Projekt „EE-Office“ (2017–2019). Reallabore sind insbesondere geeignet, um neue Entwicklungen im sozialen Kontext zu erproben.

Wie viel Lowtech im Gebäude erwartet uns zukünftig?

Die Gesetzgebung über die Energieeffizienz wird im hohen Maße von den Entwicklungen auf der EU-Ebene beeinflusst. Insbesondere ist hier die Energy Performance of Building Directive⁵ zu nennen, in der die Anforderungen an die nationale Gesetzgebung der EU-Mitgliedstaaten zur Energieeffizienzsteigerung in Gebäuden definiert wird. In ihr wird kein Low-Tech-Ansatz propagiert, eher im Gegenteil. Die Informationstechnik im Gebäude wird zukünftig als wesentliche Größe betrachtet, mit der sich die Energieeffizienz steigern lässt. Beispiele hierfür sind die folgenden Zielvorgaben:

- › Förderung der Nutzung von IKT und intelligenten Technologien, die geeignet sind, den energieeffizienten Betrieb von Gebäuden sicherzustellen,
- › Nutzung der Gebäudeautomatisierung und -steuerung als Alternative zu physischen Inspektionen,
- › Einführung eines Intelligenzindikators, mit dem die technologische Fähigkeit eines Gebäudes bewertet wird, mit den Bewohnern und dem Netz zu kommunizieren und seinen Betrieb eigenständig effizient zu gestalten,
- › Berücksichtigung des Einsatzes beispielsweise von Smart Metern, Ladesäulen für Elektromobilität sowie Energiespeichern.

Ein allgemeiner Trend zum Lowtech-Gebäude ist dort nicht erkennbar. Stark fokussiert wird über einen Intelligenzindikator die Schnittstelle zwischen Gebäude und Gebäudenutzer.

⁵ Vgl. <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/energy-performance-of-buildings/energy-performance-buildings-directive> [Zugriff am 19.1.2020].

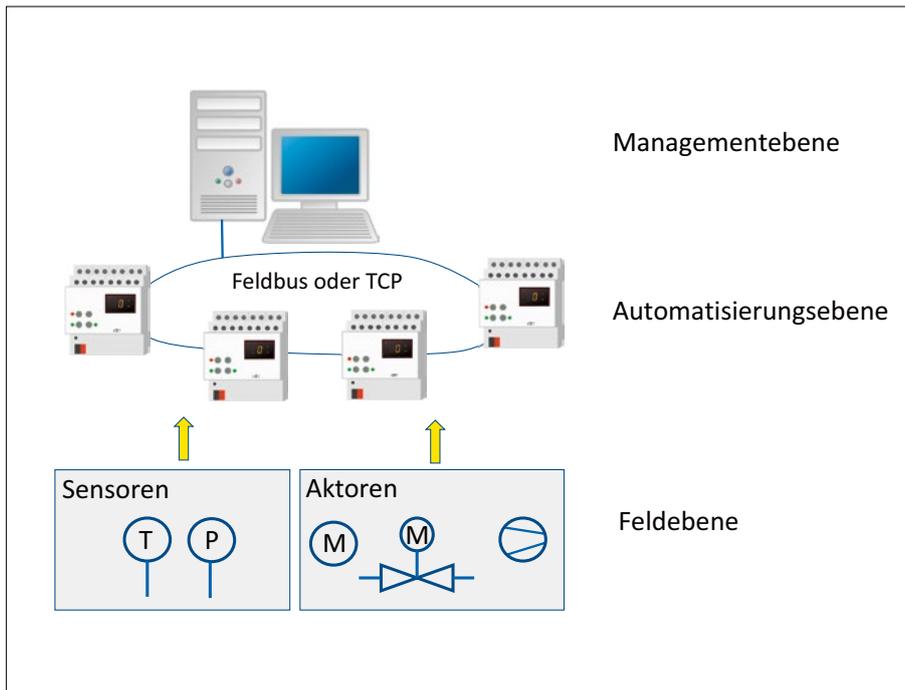


Abbildung 3:
Standardarchitektur von
Gebäudeautomationssystemen

Architektur der klassischen Gebäudeautomation: Teil der Lösung oder Ursache des Problems?

Klassische Gebäudeautomationssysteme besitzen eine streng hierarchische Architektur. In der Regel wird unterschieden zwischen der Feldebene, der Automationsebene und der Managementebene. In der Feldebene finden sich Sensoren, Aktoren wie Stellantriebe, Pumpen etc., die mit der Automationsebene über analoge Schnittstellen oder Feldbusse kommunizieren. Viele Regelungen laufen autark zwischen der Automationsebene und der Feldebene ab, mit der Managementebene tauschen die Automatisierungsstationen Sollwerte und Statusinformationen aus (Abb. 3). Wie in allen hierarchischen Systemen nimmt die Informationsdichte in den höheren Ebenen ab. Bei Gebäudeautomationssystemen sind Datenpunkte die Kalkulationsgrundlage für die Berechnung der Kosten. Je mehr Datenpunkte das System verarbeitet, desto höher sind die Hard- und vor allem die Softwarekosten (Inbetriebnahme). Dadurch hat sich das Prinzip der „Datensparsamkeit“ etabliert. Datenpunkte, die nicht zwingend für die Funktion benötigt werden, werden nicht verarbeitet und an die Managementebene durchgereicht.

Nichtwohngebäude sind in der Regel individuelle Einzelobjekte, deren Gebäudeautomation jeweils an das Gebäude angepasst wird. Die Funktionen sind dabei zu einem großen Teil „software-defined“, das heißt sie entstehen in immer stärkerem Umfang durch Entwicklung und Konfiguration von Software. Auch hier sind die logischen Verbindungen zwischen Sensoren, Automatisierungsstationen und Aktoren in Software abgebildet. Der hohe Anteil an Software bei der Festlegung der Gebäudefunktionalität lässt vermuten, dass sich diese zum Zweck der Betriebsoptimierung recht schnell anpassen lässt. Dies ist in der Praxis leider nur sehr selten der Fall. Die üblicherweise bei der Softwareentwicklung genutzten Designprozesse kommen bei der Inbetriebnahme und Konfiguration von Gebäudeautomationssystemen nicht oder nur sehr rudimentär zum Einsatz. So wird beispielsweise bei Produktentwicklungen, die einen wesentlich geringeren Funktionsumfang als Nichtwohngebäude aufweisen, ein erheblicher Aufwand bei der Softwareentwicklung in der Konzeption von Mechanismen für einen späteren Test und eine Fehlerdiagnose geleistet. Für die Diagnose der Energieeffizienz im Gebäude beispielsweise müssen die Energieflüsse ausgewertet und so aufbereitet werden, dass das FM-Personal aus den Informationen Handlungsempfehlungen ableiten kann. Solche Überlegungen sind in der Praxis nur

schwach ausgeprägt. Zu einem überwiegenden Teil fehlen Zwischenzähler, mit denen sich eine entsprechende Diagnose durchführen lässt. Für öffentliche Gebäude hat der Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnik staatlicher und kommunaler Verwaltungen (AMEV)⁶ einen Leitfaden entwickelt, in welchem Umfang aus Gründen der Qualitätssicherung unter anderem Zwischenzähler verbaut und ausgewertet werden sollen. Leider werden diese Empfehlungen in der Praxis (noch) nicht in der Breite umgesetzt.

Ein weiterer Trend besteht in der Verfügbarkeit und in dem Einsatz immer intelligenterer Komponenten und Subsysteme. So liefert beispielsweise die Heizungsumwälzpumpe Wilo Stratos Maxo bis zu 66 Datenpunkte. Intern gemessen werden unter anderem der Energieverbrauch, die Leistungsaufnahme, die Betriebsstunden und auftretende Differenzdrücke, alles Parameter, die für eine Diagnose auf der Managementebene gut geeignet sind. Teilweise könnten solche intelligenten Komponenten nicht vorhandene Zwischenzähler ersetzen oder diese ergänzen. Aus den vorher genannten Gründen werden Informationen aus smarten Komponenten in wenigen Gebäuden an die Managementebene weitergeleitet, der Informationsaustausch ist meist auf sehr wenige Datenpunkte (Ein, Aus, Sollförderhöhe, liegt eine Störung vor?) beschränkt.

Wünschenswert bei Gebäudeautomationssystemen ist, dass die Funktionalität bei Änderungen der Gebäudenutzung schnell angepasst wird. In der Praxis sind solche Änderungen mit erheblichen Kosten verbunden. Der Einrichter der TGA besitzt in gewisser Weise eine Monopolstellung, umfangreichere Anpassungen müssen nicht zuletzt aus Gewährleistungsgründen an den Errichter vergeben werden. Der fehlende Wettbewerb und für Dritte schwer durchschaubare Programmierungen führen am Ende zu erstaunlich unflexiblen Gebäudeautomatisierungs-Implementierungen und beim Betreiber zu einer Haltung in Richtung „never change a running system“.

Das Spannungsfeld zwischen Design und Raumautomation kann in der Praxis ebenfalls zu suboptimalen Lösungen führen. Wenn Architekten bemüht sind, dass die TGA-Bedienkomponenten optisch möglichst wenig in Erscheinung treten, ist das Ergebnis im Allgemeinen eine schlecht zu bedienende und aus energetischer Sicht nicht angemessene Lösung. Die folgenden Beispiele zeigen ein in der Fußleiste unter dem Schreibtisch platziertes Thermostatventil (Abb. 4) und einen in einem Garderobenschrank eingebauten Raumtemperaturregler (Abb. 5).



Abbildung 4 und 5:

Thermostatventil in der Fußleiste (links);
Raumtemperaturregler im
Garderobenschrank (Mitte und rechts)

6 <https://amev-online.de/> [Zugriff am 22.1.2020].

Sicht des Nutzers auf Hightech-Gebäude

Gebäudeautomationssysteme tragen zur energieeffizienten Betriebsführung bei, indem sie unter anderem eine Überversorgung des Gebäudes verhindern. Hierzu wird nur der sich aus der aktuellen Gebäudenutzung ergebende Energiebedarf für Heizung, Kühlung und Beleuchtung zur Verfügung gestellt. Dazu muss die TGA diesen Bedarf kennen und die Betriebsführung daraufhin anpassen. Es ist also eine enge Interaktion mit den Nutzern gefordert, um die aktuellen Bedarfe zu erkennen und auf diese angemessen zu reagieren. Notwendig ist dabei weniger eine Automatisierung als vielmehr eine Assistenz der Nutzer. Wird versucht, Abläufe zu automatisieren, versteht der Nutzer die Funktion der Systeme in vielen Fällen nur unzureichend, der Nutzen von wichtigen Funktionen, mit denen die Energieeffizienz erhöht werden kann, bleibt in vielen Fällen unklar. Mit dem Technisierungsgrad des Gebäudes wächst die Erwartung und auch der Anspruch des Nutzers, das Raumklima individualisieren zu können. Gleichzeitig sind Nutzer umso kritischer gegenüber Abweichungen, je automatisierter das Gebäude ist. Bei Beobachtungen hinsichtlich der Bedienung der Sollwerte für die Raumtemperatur zeigte sich, dass, wenn Nutzer etwas verstellen, das Resultat in vielen Fällen zu maximalen oder minimalen Sollwerten führt. Offensichtlich gehen Nutzer davon aus, dass die Änderungen dadurch schneller wirksam werden, was in den wenigsten Fällen richtig ist. Auch wurde beobachtet, dass mit automatischen Funktionen unzufriedene Nutzer (hier Abschalten der Heizung bei geöffnetem Fenster) Fensterkontakte mit mitgebrachten Magneten manipulieren, um die Automatik außer Betrieb zu nehmen. Dies geht natürlich zulasten der Energieeffizienz.

Sicht des Betreibers auf die Gebäudetechnik

In vielen Fällen hat das FM-Personal in Nichtwohngebäuden keine direkten Vorgaben, welchen Energieverbrauch bei welcher Raumklimaqualität das Gebäude erreichen muss. Die TGA stellt hierzu auch keine direkten, objektiven Informationen zur Verfügung. Mindestens müssten Energieverbräuche hierzu witterungsbereinigt und mit den realen Betriebszeiten der Gebäude gewichtet, gegebenenfalls mit den Planzahlen verglichen werden. In der Praxis erfolgt der Gebäudebetrieb daher nicht auf Basis einer Effizienzstrategie, sondern einer Komfortstrategie. Oberste Prämisse ist dabei die Vermeidung von Beschwerden der Nutzer. Das Wärmeangebot und damit die Raumtemperaturniveaus orientieren sich meist an den Meinungsführern unter den Nutzern, was dazu führt, dass ein Überangebot an Raumwärme im Gebäude zur Verfügung gestellt wird. Die Personen, deren Büros auf diese Weise zu warm werden, helfen sich durch Weglüften dieses Leistungsüberschusses. Bleiben Beschwerden aus, wird der Sinn oder Unsinn von Betriebsführungsstrategien wie fehlende Nacht- oder Wochenendabsenkung der Raumtemperaturen nicht mehr hinterfragt. Es findet keine organisierte Kommunikation mit dem Nutzer statt. Trotz einer umfangreichen TGA-Ausstattung bleiben in der Praxis große, vorhandene Einsparpotenziale ungenutzt.

Neue Ansätze zur Nutzerassistenz

Ein möglicher Ansatz, dem Nutzer beim energieeffizienten Verhalten zu assistieren, liegt in der Beeinflussung des Lüftungsverhaltens. Menschen wollen das Raumklima individuell beeinflussen und oft ist dabei die Fensterlüftung das Manko für Energieeffizienzbestrebungen: Sinkt die Raumtemperatur durch das Öffnen des Fensters, wird die üblicherweise in Büros eingesetzte Regelungstechnik (Raumtemperaturregler, Thermostatventile) versuchen, den Temperaturabfall, welcher durch das Öffnen des Fensters entsteht, zu kompensieren. Gelingt dies, bleibt ein offen stehendes Fenster über einen langen Zeitraum unbeachtet, hohe Energieverluste sind die Folge. Wenig zu lüften ist allerdings insbesondere in Gebäuden ohne Lüftungsanlage keine Lösung. Denn schlechte Luftqualität senkt das Wohlbefinden und verringert die persönliche Leistungsfähigkeit.



Abbildung 6:
Lüftungssystem Piaf
© Christina Zimmer

Der von der EBZ Business School entwickelte Raumklima-Assistent „Piaf“ – was übrigens auf Französisch „Spatz“ bedeutet – ist ein digitales Messsystem in Vogelform (Abb. 6). Dieses hilft, ein besseres Gefühl für das Raumklima zu bekommen. Der Vogel sitzt auf dem Monitor des Mitarbeiters deutlich wahrnehmbar im Sichtfeld, misst kontinuierlich die Raumluftqualität und meldet sich über Lichtsignale auf der Brust, sobald Handlungsbedarf besteht. Ist die Raumluftqualität zu schlecht, leuchtet die Brust des Vogels rot (Abb. 7). Sobald ausreichend gelüftet wurde, zwitschert er und zeigt eine blau gefärbte Brust.

Die Idee, dem Raumklima-Assistenten die Gestalt eines Vogels zu geben, hatte die Düsseldorf Designerin Dr. Christina Zimmer. Im Ruhrgebiet waren Kanarienvögel früher Symbol für die Luftqualität. Sie signalisierten Bergleuten gefährliche Konzentrationen von Kohlenmonoxid – dann mussten sie unverzüglich den Stollen verlassen. Dr. Zimmer entwarf das Design, durch das das Raumklimamessgerät als persönlicher Assistent wahrgenommen wird. Dieser Ansatz wurde in zwei Bürogebäuden, dem Land- und Amtsgericht in Bonn und dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) in Berlin (Abb. 8), erfolgreich erprobt.



Abbildung 7:
Assistenzsystem Piaf mit Anzeige
schlechter Luftqualität
© Christina Zimmer

Fazit

Wie viel Technik braucht ein Gebäude? Sind Lowtech Gebäude die Lösung auf die bestehenden und zukünftigen Herausforderungen bezüglich der Energieeffizienz in Gebäuden? Sicherlich nicht. Die TGA ermöglicht Freiheiten in der Gebäudegestaltung bei gleichzeitiger Möglichkeit der Individualisierung des Raumklimas und einer guten Energieeffizienz. Aber nur wenn sie gut gemacht ist. Hier besteht der wirkliche Handlungsbedarf. Es braucht einen neuen Umgang mit der Gebäudetechnik, neue Systemarchitekturen. Die etablierten Systeme und Vorgehensweisen erweisen sich mittlerweile als zu unflexibel und sind dringend überarbeitungsbedürftig. Im Vorherigen wurden einige der wichtigsten Handlungsfelder skizziert. Die Schlussfolgerung, dass die Technik nicht gebraucht wird, Lowtech die Lösung ist, greift viel zu kurz. Will man ein individuelles Raumklima bei gleichzeitig hoher Energieeffizienz, gibt es zur Gebäude- und Raumautomation keine Alternative. Es braucht die intensive Vernetzung der Systeme im und außerhalb des Gebäudes sowie eine nutzerzentrierte, das heißt an den individuellen Bedürfnissen des Nutzers orientierte Betriebsführung. Die Energy Performance of Building Directive formuliert hier die zukünftige Richtung. Ohne TGA und einen intensiven Dialog mit den Gebäudenutzern ist das Wechsel- und Zusammenspiel zwischen Anlagentechnik, Gebäudemanagement und Nutzern nicht im Sinne einer hohen Energieeffizienz zu organisieren. Dabei spielen Feedbacksysteme wie das hier vorgestellte Assistenzsystem „Piaf“ eine wichtige Rolle. Darüber hinaus nehmen zukünftig die Anforderungen an die Gebäudetechnik zu, will man erneuerbare Energien wesentlich stärker für die Energieversorgung von Gebäuden heranziehen.



Abbildung 8:
Piaf im Besprechungsraum der
Bundesumweltministerin Svenja Schulze
© BMU

Anhang

Autorinnen/Autoren

Tilman Santarius

Professur für Sozial-ökologische Transformation am Institut für Berufliche Bildung und Arbeitslehre der Technischen Universität Berlin

Tilman Santarius ist Professor für Sozial-ökologische Transformation an der TU Berlin und am Einstein Center Digital Futures. Er forscht zu den Themen Klimapolitik, Handelspolitik, nachhaltiges Wirtschaften, globale Gerechtigkeit und digitale Transformation.

Neben diversen Zeitschriftenartikeln ist Tilman Santarius Co-Autor mehrerer Bücher, darunter „Fair Future. Begrenzte Ressourcen und globale Gerechtigkeit“ (C.H.Beck 2005), „Der Rebound-Effekt“ (Metropolis 2015) und „Smarte grüne Welt. Digitalisierung zwischen Überwachung, Konsum und Nachhaltigkeit“ (Ökom 2018).



Tilman Santarius hat Soziologie, Ethnologie und Volkswirtschaft studiert und in Sozial- und Gesellschaftswissenschaften promoviert. Von 2001 bis 2009 war er Projektleiter am Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie, von 2009 bis 2011 leitete er die Internationale Klima- und Energiepolitik bei der Heinrich-Böll-Stiftung. Zwischen 2012 und 2015 schrieb er seine Doktorarbeit zum Thema „Der Rebound-Effekt“ an der Universität Kassel und der University of California, Berkeley. Seit 2016 leitet er seine Nachwuchs-Forschungsgruppe zum Thema „Digitalisierung und sozial-ökologische Transformation“ an der Technischen Universität Berlin und dem Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW).

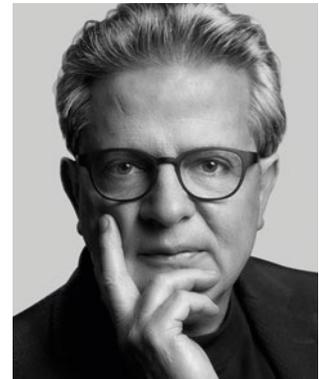
Walter J. Hugentobler

Dr. med., Hausarzt

Medizinstudium an der Universität Zürich

- 1978 – 1985** Promovierung und Weiterbildung zum Facharzt für Allgemeine Innere Medizin
- 1985 – 2012** Leitung einer allgemeinmedizinischen Arztpraxis
- 1995 – 2018** Lehrarzt Allgemeine Medizin des Instituts für Hausarztmedizin, Universität Zürich.
- Seit 2013** Akademischer und Medizinischer Berater von Condair AG

30 Jahre praktische Erfahrung mit den Interaktionen zwischen unserer Gesundheit, dem Innenraumklima und unseren Gebäuden. Zahlreiche Publikationen in medizinischen und technischen Journalen, Präsentationen und Lehrveranstaltungen. Partner verschiedener Forschungsgruppen.



Thomas Auer

Transsolar Energietechnik GmbH, Stuttgart, und Professur für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen an der Technischen Universität, München

Nach dem Studium der Verfahrenstechnik in Stuttgart war Thomas Auer für die Firma Transsolar tätig. Mit Büros in Stuttgart, München, Paris und New York entwickelt und simuliert das Büro Transsolar innovative Energie- und Klimakonzepte für Gebäude und Stadtviertel mit dem Ziel der Energieeffizienz bei hoher Aufenthaltsqualität. Thomas Auer lehrte an der Universität Yale in New Haven, CT (USA), der École Spéciale d'Architecture (ESA) in Paris (Frankreich), der Universität Sassari auf Sardinien (Italien) und der Ryerson University in Toronto (Kanada).

Zum Januar 2014 wurde Prof. Thomas Auer, Geschäftsführer der Firma Transsolar, auf den Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen der TUM berufen. Im Fokus von Forschung und Lehre stehen klimagerechtes und energieeffizientes Bauen. Ein Schwerpunkt der Forschung ist die robuste Optimierung des Gebäudesektors auf der Skalierung des Gebäudes als auch der Stadt.



Laura Franke

Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen an der Technischen Universität München

Laura Franke studierte Umweltingenieurwesen an der Technischen Universität München (TUM) und Environmental Engineering and Management an der Technischen Universität Dänemarks in Kopenhagen (DTU). 2014 schloss Laura Franke ihr Studium mit einem Master of Science in Environmental Engineering ab. In ihrer Masterarbeit, die sie bei der Firma Transsolar Climate Engineering GmbH schrieb, entwickelte sie eine Methode für die Bewertung des Komforts (PMV) in tropischen Klimazonen nach PMV unter Berücksichtigung erhöhter Luftgeschwindigkeiten im Raum (PMV with elevated air speed), die auf der PLEA 2014 vorgestellt und im Gebäudesimulationsprogramm TRNSYS 18 integriert wurde.



Von 2014 bis 2016 forschte Laura Franke am Zentrum für nachhaltiges Bauen der TUM zu Mengengerüst und Energiebedarf bei Nichtwohngebäuden. Seit 2016 arbeitet Laura Franke am Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen der TUM (Prof. Thomas Auer), wobei sie neben der Forschung die wissenschaftliche biennale PowerSKIN-Konferenz auf der Weltleitmesse BAU München organisiert. Ihr Forschungsgebiet „Einfach Bauen“, zu deren gleichnamiger Forschergruppe der TUM-Fakultät für Architektur sie gehört (einfach-bauen.net), wird gefördert durch die Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesministeriums des Innern, für Bau und Heimat (BMI) und der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU).

Lars Junghans

Professur am Taubman College der University of Michigan, Ann Arbor

Lars Junghans lehrt seit 2010 als Associate Professor an der University of Michigan im Fachbereich Architektur die Fächer Grundlagen der Bauphysik, Energiegerechtes Bauen und Solartechnik im Bauwesen. Im Jahr 2005 hat er an der ETH Zürich bei Prof. Klaus Daniels und Prof. Dietmar Eberle seine Dissertation mit dem Schwerpunkt des energiegerechten Bauens in warmen Klimagebieten abgeschlossen. Nach einem Forschungsaufenthalt als Postdoctoral Visiting Scholar an der University of California in Berkeley hat er als Ingenieur mit namhaften Architekten an internationalen Projekten gearbeitet.

Lars Junghans' Forschungsgebiet befasst sich mit dem Entwickeln von zukunftsorientierten Regelungssystemen für Gebäude. Zudem arbeitet er an Gebäudeoptimierungssystemen.

Im Jahre 2011 entwickelte er für den Architekten Prof. Dietmar Eberle das Energiekonzept für das Multifunktionsgebäude „22/26“ in Lustenau/Österreich. Das Gebäude „22/26“ wird ohne mechanische Heiz-, Kühl- oder Lüftungstechnik das ganze Jahr über betrieben und ist somit das erste seiner Art in einem kalten Klimagebiet.



Elisabeth Endres

Ingenieurbüro Hausladen GmbH, Kirchheim bei München, und Professur am Institut für Gebäude- und Solartechnik an der Technischen Universität Braunschweig

Elisabeth Endres arbeitet in Praxis und Forschung an der Schnittstelle von Architektur und technischen Systemen und deren Integration in Gebäudestrukturen. Dabei stehen die Fragen welches Raumklima in Gebäuden durch passive Strategien entsteht, welche Technik ergänzend sinnfälliger ist und wie diese in die Gebäude integriert wird, im Mittelpunkt der Betrachtungen. Zunächst studierte Elisabeth Endres an der Technischen Universität Kaiserslautern und München Architektur mit dem Abschluss Diplom. Ab 2007 war sie am Lehrstuhl für Bauklimatik und Haustechnik unter der Leitung von Professor Gerhard Hausladen wissenschaftliche Mitarbeiterin und hat neben einzelnen Forschungsprojekten maßgeblich den Lehrbetrieb im Studiengang Architektur geleitet, den Studiengang „Energieeffizientes nachhaltiges Bauen“ aufgebaut sowie im Studiengang „ClimaDesign“ die integralen Module geleitet.

Seit 2013 ist sie Projektleiterin im Ingenieurbüro Hausladen und als Doktorandin an der TU München Mitglied der International Graduate School of Science and Engineering. 2018 wurde sie in die Geschäftsleitung des Ingenieurbüros Hausladen berufen. Sie leitet damit die Geschicke des Büros, welches seit über 30 Jahren für integrale Konzepte im Spannungsfeld von passiven und aktiven Parametern in der Gebäudeplanung steht, entscheidend mit. Sie hat Lehraufträge an der Akademie der Bildenden Künste München und den Hochschulen Wismar und Salzburg.



Andrea Klinge

ZRS Architekten Ingenieure, Berlin

Andrea Klinge, Dipl.-Ing. Architektur, M.Sc. Architecture, Energy & Sustainability, studierte an der TU Berlin und der London Metropolitan University und spezialisierte sich auf das nachhaltige Bauen. Andrea Klinge arbeitete in verschiedenen Architekturbüros in London, Rom und Berlin. Seit 2013 ist sie für ZRS Architekten Ingenieure tätig, wo sie die Forschungsabteilung etablierte und die EU-Forschungsprojekte „[H]house“ und „RE4“ leitet. Ihr Forschungsschwerpunkt liegt auf dem Einsatz natürlicher Baustoffe (Lehm, Holz, Naturfasern) zur Verbesserung der Raumluftqualität in Gebäuden sowie dem ressourcenschonenden, zirkulären Bauen.

Durch ihren Hintergrund als Tischlerin arbeitet Andrea Klinge immer wieder praktisch, um Forschungsergebnisse in die direkte Anwendung zu bringen. Sie hat dazu mehrere Projekte mit Lehm, Bambus oder Holz international umgesetzt. Darüber hinaus ist sie als Dozentin tätig und unterrichtete unter anderem an der North Eastern University Boston (Berlin), der ETH in Zürich sowie der Architektenkammer Berlin.

Seit 2018 sitzt Andrea Klinge im Aufsichtsrat der TRNSFRM eG, einer Genossenschaft, die sich dem sozialen und zirkulären Bauen verschrieben hat und momentan mehrere Bauvorhaben auf dem Rollberg-Areal in Berlin-Neukölln umsetzt. Zudem gehört sie dem Prüfungsausschuss für die Erstellung von Muster-Umweltproduktdeklarationen für Lehm-Baustoffe an.



Viktor Grinewitschus

Techem Stiftungsprofessur für Energiefragen der Immobilienwirtschaft an der EBZ Business School – University of Applied Sciences, Bochum

Viktor Grinewitschus studierte Elektrotechnik mit dem Schwerpunkt Nachrichtentechnik an der Universität Duisburg und promovierte dort mit dem Thema „Modellgestützter Entwurf verteilter Systeme“. Von 1990 bis 2012 entwickelte er am Fraunhofer-Institut für mikroelektronische Schaltungen und Systeme (IMS) in Duisburg Technologien und Produkte für die intelligente Haustechnik und Softwarelösungen für die Systemintegration. Er gründete gemeinsam mit Klaus Scherer 1998 das Fraunhofer-inHaus-Zentrum in Duisburg, das erste Living Lab in Europa, welches von beiden bis 2012 gemeinsam geleitet wurde (<http://www.inhaus.fraunhofer.de>). Viktor Grinewitschus verantwortete dort den Bereich „Technik und Innovation“.

Zum Zeitpunkt seines Ausscheidens kooperierten dort ca. 90 Firmen und sieben Fraunhofer-Institute bei der Entwicklung von Lösungen zur Prozessoptimierung in Gebäuden in den Anwendungsfeldern Wohnen, Facility-Management, Office, Hotel und Health Care. Seit 2011 ist er Professor für Technische Gebäudeausrüstung an der Hochschule Ruhr West und seit 2012 zusätzlich Professor für Energiefragen der Immobilienwirtschaft an der EBZ Business School in Bochum. Seine Forschungs- und Lehrtätigkeiten beziehen sich auf den Einsatz der Gebäude- und Hausautomatisierung zur Steigerung der Energieeffizienz in Gebäuden und zur Assistenz der Nutzer, zum Beispiel beim Wohnen im Alter.



Abbildungsverzeichnis

Lowtech im Gebäudebereich

Abbildung 1:	Plakat Symposium	9
Abbildung 2:	Schlussdiskussion	11

Gesundheitliche Aspekte von Gebäudetechnik und Architektur

Abbildung 1:	350.000 Jahre menschliches Immuntraining	26
Abbildung 2:	Der Wandel von lokaltypischen Baustilen mit Naturmaterialien aus der Region zu einem urbanen Baustil	29
Abbildung 3:	Industrielle Baumaterialien sind pflegeleicht, trocken und sauber.	29
Abbildung 4:	Das sogenannte Scofield-Sterling-Diagramm wurde 1986 veröffentlicht	31
Abbildung 5:	Nur ein kleiner Teil der bis heute entdeckten Mikroben macht krank	32

Robuste Architektur

Abbildung 1:	Performance Gap zwischen Energiebedarf und -verbrauch von Gebäuden	41
Abbildung 2:	Einfluss des Nutzerverhaltens auf den Heizenergieverbrauch am Beispiel von zehn Wohneinheiten eines sanierten Gebäuderiegels in Karlsruhe	41
Abbildung 3/4:	Lageplan Ingolstadt-Hollerstauden (links); rechts: Lageplan Ingolstadt-Hollerstauden – jährlicher Energiebedarf und -verbrauch (rechts)	42
Abbildung 5:	Ingolstadt-Hollerstauden – monatlicher Energiebedarf und -verbrauch	42
Abbildung 6:	Performance Gap – Überblick der untersuchten Gebäude	43
Abbildung 7:	2226, Lustenau, Österreich	45
Abbildung 8:	Unterschied zwischen einem globalen und einem robusten Optimum	46
Abbildung 9:	Übersicht Punktwolken der unterschiedlichen Randbedingungen	48

Abbildung 10:	„Einfach Bauen“ – 1:1-Mock-ups einschichtiger Außenwandkonstruktionen in hochwärmedämmendem Mauerwerk, Massivholz und Leichtbeton in Bad Aibling	49
Abbildung 11:	Gebäude Leichtbeton, Rohbauarbeiten im EG (links); Grundrisse und Straßenansicht der drei Forschungshäuser (rechts) . . .	50
Abbildung 12:	Forschungshäuser auf dem TUM-Campus in Garching, Modellfoto . . .	50

Feasibility of the “22/26” building under varying construction, occupancy and climatic conditions

Figure 1:	Realized “22/26” building in Lustenau/Austria	56
Figure 2:	Measured room temperature in relation to external temperature in a north-west oriented office	56
Figure 3:	Results of the occupant survey in the winter and in the summer t-Parameter studies	57
Figure 4:	Simplified illustration of the building automation system for the controlled natural ventilation opener	59
Figure 5:	Simulated room temperature in relation to external temperature in a north-west oriented office. Simulation results for Lustenau/Austria.	60
Figure 6:	Simulated room temperature in relation to external temperature in a north-west oriented office. Simulation result for Chicago/USA.	61
Figure 7:	Simulated room temperature in relation to external temperature in a north-west oriented office. Simulation result for Seattle/USA.	61
Figure 8:	Simulated room temperature in relation to external temperature in a north-west oriented office. Simulation result for San Francisco/USA.. . . .	62
Figure 9:	Simulated room temperature in relation to external temperature in a north-west oriented residential space. Simulation result for Lustenau/Austria.	62
Figure 10:	Simulated room temperature in relation to external temperature in a north-west oriented office. It compares the temperatures of a heavy (black) and light construction (grey). Simulation result for Lustenau/Austria.	63

Discussion of the “22/26” technology

Figure 1:	Illustration of the heat flow balance.	67
Figure 2:	Illustration of the use of internal thermal mass in summer and winter.	68
Figure 3:	Comparison between conventional centralized ventilation and localized room individual ventilation.	70
Figure 4:	Illustration of fresh air supply control. The CO ₂ concentration is used as an indicator for the indoor air quality.	70
Figure 5:	Model predictive control- concept based on microcontroller integrated simulation module.	72

Hightech versus Lowtech oder einfach nur robust?

Abbildung 1:	Darstellung der Entwicklung der Kosten in KG 300 und 400 (Darstellung in Anlehnung an den Bericht der Baukostensenkungskommission)	76
Abbildung 2:	Systemschnitt zur ES Bau „Erweiterungsbau BMU Berlin“	77
Abbildung 3:	Innenraum der IBA-Geschäftsstelle in Apolda mit Raum-in-raum-Konzepten	79
Abbildung 4:	Umwelteinflüsse unterschiedlicher Energiestandards in Wohngebäuden	80

Weniger Technik – mehr Gesundheit. Die Natur macht's! Lowtech im Gebäudebereich

Abbildung 1:	Was kommt nach dem fossilen Konsumzeitalter?	83
Abbildung 2:	Scofield-Sterling-Diagramm – relevante Wechselwirkung von Mikroorganismen bei unterschiedlicher Raumlufffeuchte.	85
Abbildung 3:	Grafische Darstellung der Luftfeuchtesorption bei Lehmputzen (oben) und Nichtlehmputzen (unten) sowie Vergleich Feuchtesorption von Lehm und Beton von 24 Std.	86
Abbildung 4:	Wasserdampfsorption von Innenwänden aus Natur- und konventionellen Baustoffen; Messungen in Anlehnung an die DIN 18947	86
Abbildung 5:	Wasserdampfsorption von einem Lehmputzsystem und einem Innenwandssystem im Vergleich.	87
Abbildung 6:	Monitoring Ergebnisse: Entwicklung der RH nach einem Duschvorgang bei natürlicher Belüftung	88

Abbildung 7:	LCC-Vergleich zweier Konstruktionen (Natur-/konventionelle Baustoffe)	89
Abbildung 8:	Klimaaktives Bausystem ohne Lüftungsanlage.	90
Abbildung 9:	Haustechnikschema	91
Abbildung 10:	Holztragwerk, Holz- und Lehmoberflächen, Wohnung EG	92
Abbildung 11:	Innenwand aus Holzständer mit Lehmsteinen und Heizungssystem.	92
Abbildung 12:	Straßenansicht Schöneberger Linse	93
Abbildung 13:	Nachhaltigkeitsschema	94
Abbildung 14:	Nachhaltigkeitsschema Firmengebäude Flexim, Berlin	94

Interaktion statt Automation: Mehr Energieeffizienz durch nutzerzentrierte Betriebsführung von Gebäuden

Abbildung 1:	Zielkonflikte beim Gebäudeentwurf	99
Abbildung 2:	inHaus 2 des Fraunhofer-inHaus-Zentrums.	100
Abbildung 3:	Standardarchitektur von Gebäudeautomationssystemen.	101
Abbildung 4/5:	Thermostatventil in der Fußleiste (links); Raumtemperatur- regler im Garderobenschrank (Mitte und rechts)	102
Abbildung 6:	Lüftungsassistenzsystem Piaf	104
Abbildung 7:	Assistenzsystem Piaf mit Anzeige schlechter Luftqualität	104
Abbildung 8:	Piaf im Besprechungsraum der Bundesumweltministerin Svenja Schulze	104

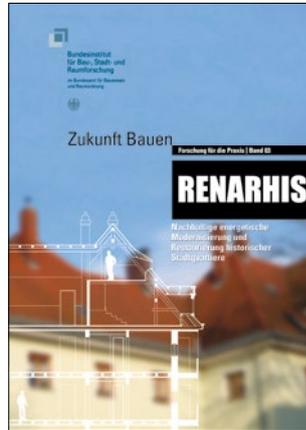
Literaturhinweise des Herausgebers



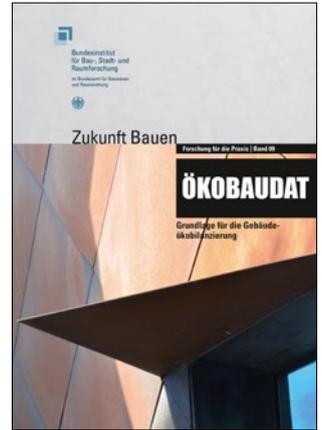
ready – Neue Standards und Maßnahmensets für die stufenweise, altengerechte Wohnungsanpassung im Neubau



best practice – Soziale Faktoren nachhaltiger Architektur. 17 Wohnungsbauprojekte im Betrieb



RENARHIS – Nachhaltige energetische Modernisierung und Restaurierung historischer Stadtquartiere



Ökologische Baustoffwahl – Aspekte zur komplexen Planungsaufgabe „Schadstoffarmes Bauen“



ready kompakt – Planungsgrundlagen zur Vorbereitung von altengerechten Wohnungen



Materialströme im Hochbau – Potenziale für eine Kreislaufwirtschaft



WECOBIS – Webbasiertes ökologisches Baustoffinformationssystem



Nachhaltiges Bauen des Bundes – Grundlagen – Methoden – Werkzeuge

Literaturhinweise des Herausgebers



ÖKOBAUDAT – Basis for the building life cycle assessment



Bauteilkatalog – Niedrigschwellige Instandsetzung brachliegender Industrieareale für die Kreativwirtschaft



Bauliche Hygiene im Klinikbau – Planungsempfehlungen für die bauliche Infektionsprävention



Effizienzhaus Plus – Möglichkeiten und Alternativen zur Umsetzung des Effizienzhaus Plus Standards



Nachhaltig geplante Außenanlagen – Empfehlungen zu Planung, Bau und Bewirtschaftung von Bundesliegenschaften



Vorbildwirkung Bundesbau – Klimaschutzziele und Vorbildfunktion des Bundes im Gebäudebereich



BIM-Leitfaden für den Mittelstand – Wie viel BIM (Building Information Modeling) verträgt aktuell ein mittelgroßes Bauprojekt?

Die Broschüren sind kostenfrei erhältlich.

Die Bestellhinweise sowie die Downloads finden Sie unter:
www.zukunftbau.de/publikationen/

Notizen

IMPRESSUM

Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR), Bonn
Deichmanns Aue 31–37
53179 Bonn

Wissenschaftliche Begleitung und Redaktion

Referat II 7 – Energieoptimiertes Bauen
Jörg Lammers

Autoren

Thomas Auer
Elisabeth Endres
Laura Franke
Viktor Grinewitschus
Walter J. Hugentobler
Lars Junghans
Andrea Klinge
Tilman Santarius

Eike Roswag-Klinge
Jörg Lammers

Stand

1. Auflage, Januar 2020

Gestaltung | Barrierefreies PDF | Korrektorat

A Vitamin Kreativagentur GmbH, Berlin |
Dr. phil. Birgit Gottschalk, Nümbrecht
probicon GmbH, Berlin

Druck

Silber Druck oHG, Niestetal

Bestellung

ref-2-7@bbr.bund.de
Stichwort: lowtech

Bildnachweise

Titelbild: ZRS Architekten Ingenieure
Sofern nicht angegeben: Bilder und Grafiken
wurden von den Autoren zur Verfügung gestellt.

Nachdruck und Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten.
Nachdruck nur mit genauer Quellenangabe gestattet.

Die von den Autoren vertretene Auffassung ist nicht unbedingt
mit der des Herausgebers identisch.

ISBN 978-3-87994-300-5
ISSN 2199-3521

Bonn 2020



Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung

im Bundesamt für Bauwesen
und Raumordnung



Die energie- und klimapolitischen Anforderungen an unsere Gebäude wurden und werden zunehmend strenger. Parallel dazu wachsen die Komfortansprüche der Gebäudenutzer. Daraus folgt häufig ein erhöhter Technisierungsgrad, was zu einem höheren Fehlerrisiko durch die Technik einerseits und das Nutzerverhalten andererseits führt.

Das in Kooperation mit der TU Berlin durchgeführte Symposium zum Thema „Low-tech im Gebäudebereich“ hat die heute gebräuchlichen, technikzentrierten Effizienzstrategien kritisch diskutiert. Die vorliegende Broschüre gibt eine ausführliche Zusammenfassung der unterschiedlichen Beiträge wieder.

Mit dem Innovationsprogramm Zukunft Bau stärkt das Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI) in Zusammenarbeit mit dem Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) die Zukunfts- und Innovationsfähigkeit der Bauwirtschaft. Ziel ist es, die Wettbewerbsfähigkeit des deutschen Bauwesens im europäischen Binnenmarkt zu verbessern und insbesondere den Wissenszuwachs und die Erkenntnisse im Bereich technischer, baukultureller und organisatorischer Innovationen zu unterstützen.



www.zukunftbau.de

ISBN 978-3-87994-300-5
ISSN 2199-3521