



*Hans Simmler
Dr., Leiter Labor
Gebäudehülle
Empa Bautechnologien
CH-8600 Dübendorf*

Innovative Wärmedämmungen

Innovative Wärmedämmungen

Einleitung

Energiesparmassnahmen bei Gebäuden werden erst seit den 70-er Jahren des letzten Jahrhunderts systematisch angewendet, hauptsächlich als Folge der ersten Ölkrise 1973, die einen starken Motivationsschub bei Hauseigentümern/innen und Behörden auslöste. Seither ist die Energiekennzahl von neuen Gebäuden markant gesunken, wie Figur 1 am Beispiel des Kantons Baselland zeigt. Die wesentlichen Reduktionsbeiträge sind i) Wärmedämmung von Aussenwänden und Dach, ii) Einsatz von Wärmeschutzverglasung, iii) Erhöhung der Luftdichtheit von Gebäuden, wozu ebenfalls fortschrittliche Fenster beitragen. Deutlich erkennbar in Abbildung 1 ist der Einfluss von sinkenden Ziel- und Grenzwerten in Normen und Bauvorschriften, die sich allerdings nur auf die jeweils neueste Generation von Neubauten auswirken. Deren Energiebedarf für Heizung und Warmwasser hat sich innert etwa zwei Jahrzehnten halbiert. Insgesamt wird aber immer noch knapp die Hälfte der gesamten Endenergie in der Schweiz im Gebäudesektor verbraucht, überwiegend für Heizung und Kühlung.

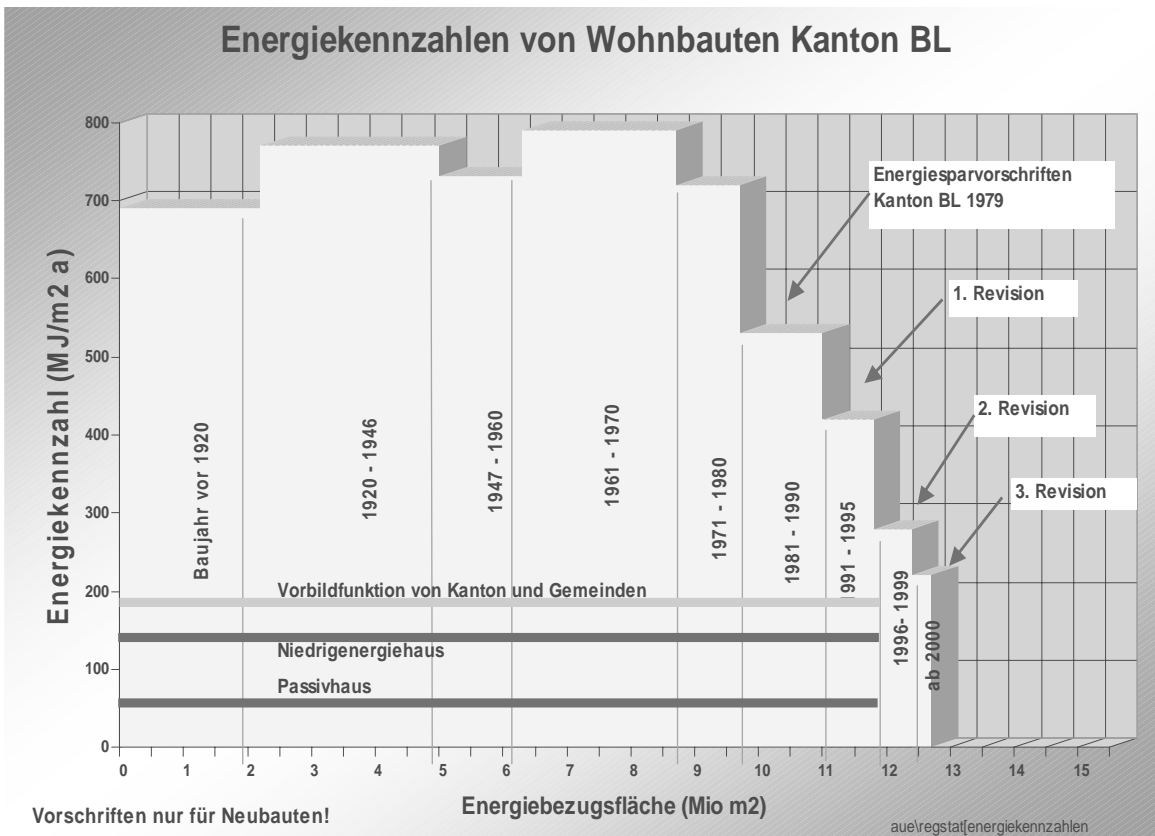


Abbildung 1: Energiekennzahlen des Gebäudebestandes am Beispiel der Wohnbauten im Kanton Baselland (Quelle: Eicher & Pauli AG).

Der grösste Anteil am sinkenden Energiebedarf von Wohngebäuden ist auf bessere Wärmedämmung zurückzuführen. Trotzdem wird über den Sinn einer „leichten“ Wärmedämmschicht im Vergleich zu einer dicken Massivwand teilweise immer noch diskutiert. Am einfachen Beispiel einer 60 cm dicken Massivwand und einer 15-cm-Backsteinwand mit Aussenwärmedämmung lässt sich erkennen, dass auch eine für heutige Massstäbe durchschnittliche Wärmedämmung nur etwa den halben Transmissionsverlust im Vergleich zur Massivwand ergibt, trotz tiefer Wärmeleitfähigkeit des Mauerwerks (Tabelle 1). Die bessere Wärmespeicherfähigkeit der Massivwand in Bezug auf Solargewinne durch Absorption auf der Aussenoberfläche wirkt sich energetisch nicht wesentlich aus, da der Grossteil der Wärmegewinne direkt an die Umgebung abgegeben wird.

Konstruktion	U-Wert (Norm) $W m^{-2}K^{-1}$	Transmissionswärmeverlust MJ/m^2
Massivwand - Dicke 60 cm - $\lambda = 0.3 W m^{-1}K^{-1}$	0.46	-139.1
Backstein-Kompaktfassade - Wärmedämmung 12 cm - $\lambda_{WD} = 0.035 W m^{-1}K^{-1}$	0.25	-77.7

Tabelle 1: Transmissionswärmeverluste einer Massivwand und einer Backsteinwand mit Kompaktfassade. Dynamische Simulation mit HELIOS [1] für Zürich SMA, Oktober-April, Südorientierung, Innentemperatur 22°C, solarer Absorptionsgrad 30%.

Für eine deutliche Verringerung der Wärmeverluste von Gebäuden sind folglich fortschrittliche wärmedämmtechnische Massnahmen unumgänglich. Da der überwiegende Teil des Gebäudebestandes in Bezug auf Wärmeschutz nicht dem heutigen Stand der Technik entspricht, liegt hier ein grosses Potenzial zur Einsparung von fossiler Energie und CO₂-Produktion. Durch eine gesamthafte Gebäudeerneuerung im Minergiestandard könnte heute der Heizenergieverbrauch in Gebäuden etwa halbiert werden [2]. Längerfristig ist im Hinblick auf die Vision einer 2000-W-Gesellschaft mit minimaler Umweltbelastung anzustreben, den Heizenergiebedarf im Wohn- und Bürobereich gegen Null zu senken.

Trotz energie- und umweltpolitisch grosser Bedeutung der Wärmedämmung wird öfters die Frage gestellt: Braucht es weitere Innovationen und Entwicklungen in diesem Bereich? Reichen vorhandene Materialien und Systeme nicht für beliebige Anwendungen und Anforderungen an die Wärmeisolation der Gebäudehülle aus? Für ein Nein gibt es verschiedene Gründe: Die starke Absenkung der U-Werte wurde im Wesentlichen durch immer grössere Dämmschichtdicken erreicht, die heute schon Werte bis 40 oder 50 cm erreichen. Damit entstehen für Architekten und Bewohner ungünstige Bunkerbauten mit grossem Ressourcen- und Raumverbrauch für die Dämmung. Wird z.B. ein Kubus mit 8 Meter Seitenlänge mit 40 cm Dämmung rundherum angenommen, belegt die Dämmung etwa 27 % des gesamten umbauten Volumens. Bei beschränkten Raumverhältnissen und besonders bei Sanierungen fehlt oft der erforderliche Platz dafür. Ein weiterer „Mangel“ gebräuchlicher Dämmungen ist die Aussperrung der anfallenden Solarenergie, die im Wohnbaubereich zur Senkung des Heizwärmebedarfs beitragen würde. Und schliesslich ist eine Steigerung der Effizienz und der Umweltverträglichkeit bei allen Wärmedämmstoffen und -systemen gefragt.

In den folgenden Abschnitten werden realisierte oder mögliche Weiterentwicklungen diskutiert, welche gegenüber bisherigen Standardlösungen Vorteile aufweisen.

„Konventionelle“ Wärmedämmstoffe

Auch im Bereich der „konventionellen“ Wärmedämmstoffe hat sich in den letzten Jahren einiges getan, sowohl in wärmetechnischer als auch umwelttechnischer Hinsicht. Im Folgenden werden - ohne Anspruch auf Vollständigkeit und objektive Gewichtung - einige Entwicklungen kurz angesprochen.

Eine aus wärmetechnischer Sicht markante Verbesserung wurde bei expandiertem Polystyrol (EPS) erreicht. Durch die Zugabe von Infrarot absorbierenden oder reflektierenden Partikeln wie z.B. Graphit (Abbildung 2) wird der Wärmetransport durch Strahlungsaustausch auch bei kleineren Raumgewichten von rund 15 kg m^{-3} weitgehend ausgeschaltet. Die Wärmeleitfähigkeit sinkt dadurch von knapp 40 auf gegen $30 \text{ mW m}^{-1}\text{K}^{-1}$. Diese modifizierten EPS-Platten haben bereits einen beachtlichen Marktanteil erreicht. In einem ähnlichen Bereich befinden sich heute auch die wärmetechnisch besten Mineralwolleprodukte.

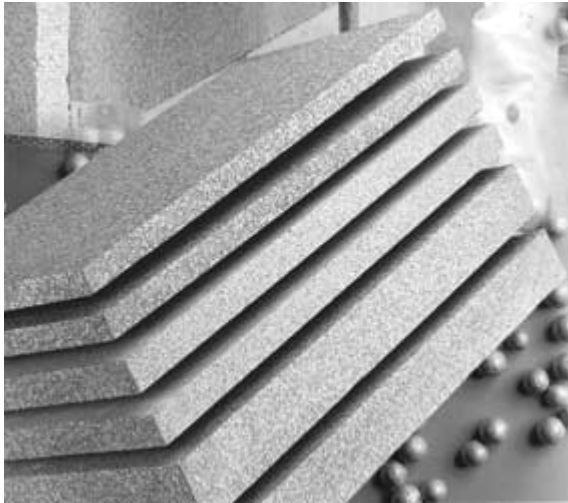


Abbildung 2: Silbergrauer EPS durch Zugabe von Infrarot reflektierendem Graphit.

Auch bei den Hartschaumkunststoffen geht die Entwicklung weiter. Die meisten Produkte aus extrudiertem Polystyrol (XPS) enthalten heute Luft als Zellgas. Die (dickenabhängigen) Wärmeleitfähigkeiten dieser Platten liegen im Bereich von 32 bis $36 \text{ mW m}^{-1}\text{K}^{-1}$. Hartschäume aus Polyurethan (PU) werden heute mit Pentan oder CO_2 geschäumt und erreichen λ -Werte von $24 \text{ mW m}^{-1}\text{K}^{-1}$ (diffusionsdichte Deckschichten) bzw. $26 - 28 \text{ mW m}^{-1}\text{K}^{-1}$ (diffusionsoffen). Spitzenreiter in Sachen Isolationsleistung ist Phenolharz-Hartschaum mit λ -Werten von $21 - 24 \text{ mW m}^{-1}\text{K}^{-1}$, abhängig von der Schichtdicke.

Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen (Beispiele Abbildung 3) weisen wohl keine Spitzenwerte bei der Isolation auf, sind jedoch am wenigsten Umwelt belastend und werden vermehrt bei Bauten mit hoher Priorität von Ökologie und gesundem Innenklima eingesetzt.



Abbildung 3: Holzfaser-Dämmplatten (links) und Celluloseflocken als Einblasdämmung (rechts)

Celluloseflocken aus Altpapier haben sich einen Marktanteil hauptsächlich im Holzbau gesichert und in den letzten Jahren Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeiten unter $40 \text{ mW m}^{-1} \text{K}^{-1}$ erreicht. Holzfaserdämmplatten weisen gute Wärme- und Feuchtespeichereigenschaften auf und werden insbesondere bei Dachisolierungen vermehrt eingesetzt. Neue Produkte am Markt basieren auf der Kombination von Holz(spänen) und Lehm. Eine interessante Technologie ist die Verarbeitung von Gras zu Fasern, Protein und Biogas [3]. Die Graszellulose (Figur 4) lässt sich als Einblasdämmstoff oder zu Platten verarbeiten. Bisher wurde das Material erst in einzelnen Pilotprojekten getestet. Weitere natürliche Dämmmaterialien aus Hanf, Flachs, Kork, Schafwolle usw. sind zwar seit langem bekannt, werden in der Schweiz aber nur wenig eingesetzt.



Abbildung 4: Einblasdämmstoff aus Graszellulose.

Hochisolationssysteme

Bei konventionellen porösen Wärmedämmstoffen ist die Wärmeleitfähigkeit physikalisch durch die Wärmeleitfähigkeit der unbewegten Porenluft bei Normaldruck limitiert, d.h. auf ca. $25 \text{ mW m}^{-1}\text{K}^{-1}$. Aus diesem Grund konnten die steigenden Anforderungen an U-Werte mit den gebräuchlichen Faser- und Schaumdämmstoffen im Wesentlichen nur durch eine entsprechende Zunahme der Dämmstärken erfüllt werden. Ein Quantensprung bezüglich Wärmeleitfähigkeit wird durch Druckabsenkung in einem sehr feinporigen Kernmaterial erreicht.

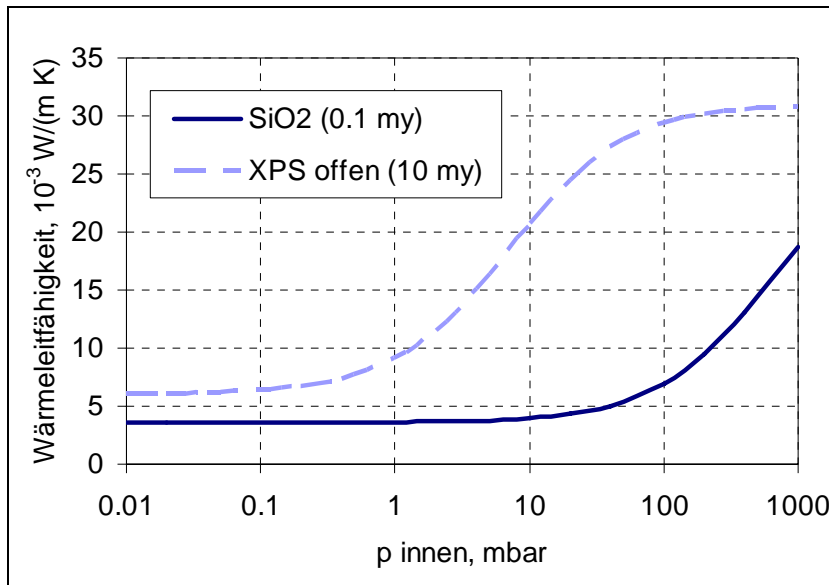


Abbildung 5: Wärmeleitfähigkeit von pyrogener Kieselsäure (SiO_2) und offenzelligem XPS in Abhängigkeit des Poren-Luftdrucks.

Als bestes Kernmaterial für Langzeitanwendungen hat sich pyrogene Kieselsäure – Siliziumdioxid (SiO_2) in Form kleinster vernetzter Kügelchen – herausgestellt, die als Nebenprodukt der Silizium-Waferproduktion (Halbleiterindustrie) erzeugt wird. Durch den sehr kleinen Porengrößenbereich von unter 100 Nanometer wird die Wärmeleitung im Zellgas schon bei vergleichsweise hohen Innendrücken von bis zu 10 mbar praktisch vollständig unterdrückt (Figur 5). Gepresst zu einem Raumgewicht von ca. 200 kg m^{-3} liegt die Wärmeleitfähigkeit des trockenen Kernmaterials (mit Infrarot-Trübungsmittel und einigen Prozent Strukturfasern) bei einem Luftdruck von 1 mbar bei rund $4 \text{ mW m}^{-1}\text{K}^{-1}$. Dies entspricht etwa einem Achtel der heute üblichen Dämmmaterialien.

Entscheidend für die Langzeitanwendung im Baubereich ist die Qualität der Hülle eines Vakuum-Isolationspaneels (VIP). Massive Aluminiumfolie wäre sehr dicht, verbietet sich aber wegen übermässiger Wärmebrückeneffekte im Randbereich. Heute bieten mehrere Hersteller bautaughliche VIP an, deren Hülle aus einem mehrfach metallisierten, thermisch verschweissten Kunststofflaminat besteht. In der Schweiz sind bereits einige $10'000 \text{ m}^2$ VIP dieser Technologie installiert, wobei häufig die Isolation von begehbaren Flachdachbereichen ohne störende Stufe zwischen Innen- und Aussenbereich gefragt ist (Figur 6). Grossformatige Paneele mit massiver Hülle aus Edelstahl werden von einem Hersteller besonders für den Kühlsystembau angeboten [4].

Die neue VIP-Technologie wurde in den letzten Jahren im Rahmen des IEA-Projekts Annex 39 (High performance thermal insulation) im Hinblick auf Alterung, Lebensdauer sowie wärme- und anwendungstechnische Fragen untersucht. Zwei Schlussberichte geben einen guten Überblick über die Eigenschaften und Anwendungen von VIP [5]. Qualität und Sicherheit sind heute deutlich verbessert. Alterungseffekte – Eindringen von N_2 und O_2 und Feuchteaufnahme des Kerns – sind jedoch nicht vernachlässigbar und ergeben zusammen mit einem Wärmebrückenzuschlag für den Randverbund Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit von 8 bis $9 \text{ mW m}^{-1}\text{K}^{-1}$ bei grossflächiger Verlegung. Heikel ist nach wie vor die Verarbeitung von VIP. Der Prozess von der Produktion bis zur geschützten Installation ist nicht fehlertolerant und sollte Fachleuten vorbehalten bleiben. Sicherer als der Offeneinbau auf dem Bauplatz ist Produktion von Bauteilen mit „VIP inside“. Zurzeit wird in verschiedenen Projekten an solchen VIP-Systemen gearbeitet.



Abbildung 6: Komponenten eines VIP (links), VIP-Isolation für einen stufenlosen Übergang von Innenraum und Balkon (rechts).

Wärmetechnisch stellen VIP erhöhte Anforderungen an die Konstruktion von typisch eher kleinformatischen Bauteilen, da konstruktive Wärmebrücken durch die dünne thermische Sperrschicht viel stärker ins Gewicht fallen als bei üblichen Dämmmaterialien. Selbstverständlich geht die Entwicklung von VIP weiter. Andere Kernmaterialien werden an Stelle der kostspieligen pyrogenen Kieselsäure getestet, verlangen allerdings nach wesentlich dichteren Barrierekonstruktionen, die den Innendruck langfristig nicht über 10^{-2} mbar ansteigen lassen.

SiO_2 -Aerogel, bisher in granularer Form verfügbar als transluzente Dämmung zwischen Glasscheiben, wird seit kurzem auch zur Herstellung von mattenartigen Hochisulationsmaterialien verwendet [6]. Das Aerogel wird dabei in einer Fasermatrix (Kunststoff- oder Glasfaservlies) zu einem Verbundmaterial verarbeitet, das bei normalem Luftdruck eine Wärmeleitfähigkeit um $12 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ aufweist. Bauanwendungen sind bisher – schon aus Kostengründen – noch nicht bekannt.

Systeme mit Solarenergienutzung

Ein Nachteil opaker Wärmedämmungen ist die „Vernichtung“ der aussen absorbierten Solarwärme. Auch eine gut isolierte Wand mit $U = 0.2 \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-1}$ ergibt im schweizerischen Mittelland über die Heizperiode einen Wärmeverlust von rund 20 kWh m^{-2} . Andererseits beträgt der Solareintrag auf die Fassade zwischen Ost- und Westorientierung rund $300 \text{ bis } 450 \text{ kWh m}^{-2}$. Falls davon nur ein kleiner Teil genutzt wird, trägt die Fassade zur Deckung des Wärmebedarfs bei. Das Prinzip der transparenten Wärmedämmung (TWD) ist schon lange bekannt [7] und wurde auch in der Schweiz bei verschiedenen Bauprojekten realisiert (Figur 7). Trotz nachgewiesener Funktion und gutem thermischem Komfort von TWD-Bauten hat die TWD-Anwendung in den letzten Jahren allerdings stagniert. Gründe dafür sind vor allem hohe Systemkosten und mögliche Überhitzungsprobleme, die bei einem Gesamtwirkungsgrad von bis zu 30 Prozent auftreten können.

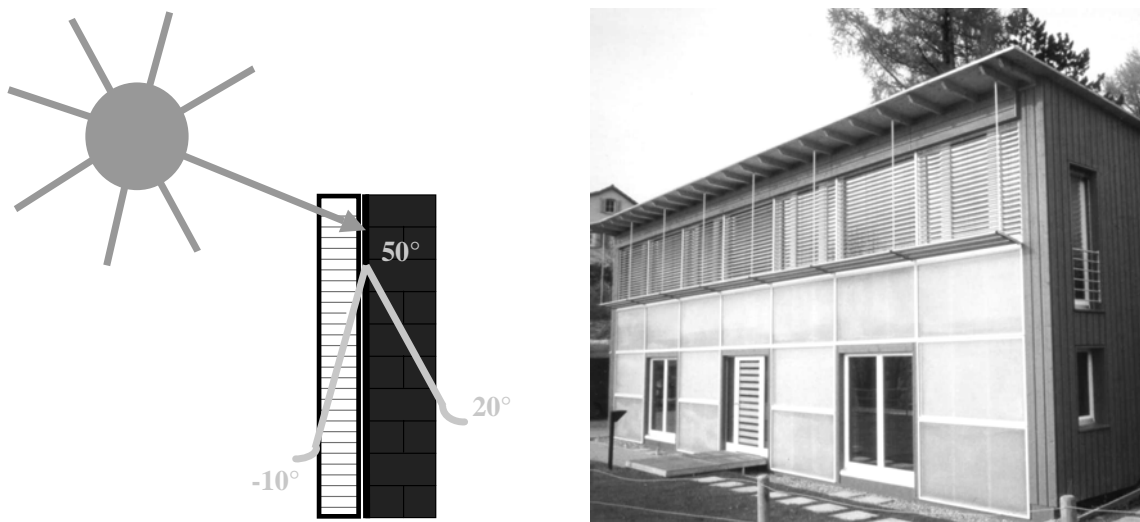


Abbildung 7: Prinzip der transparenten Wärmedämmung (links), Gebäude mit TWD-Fassade (rechts).

Eine Variante des TWD-Prinzips, die heute noch kaum realisiert wurde, könnte vor allem für die Sanierung interessant sein: Die Verwendung von – heute sehr kostengünstig produziertem – Isolierglas als grossflächige Vorhangfassade. In Figur 8 sind schematisch zwei Sanierungsvarianten eines Zweischalenmauerwerks dargestellt. Die konventionelle Minergiesanierung erreicht den U-Wert $0.2 \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-1}$. Die platz sparende und dauerhafte Sanierung mit vorgehängten Isolierglaselementen ergibt in Ost-/Westrichtung einen halb so grossen U-Effektivwert und in Südrichtung einen negativen Wert, d.h. einen Wärmegewinn. Als U-Effektivwert bezeichnet wird

$$U_{\text{effektiv}} = \frac{Q_{\text{transmission}}}{\Delta T_{\text{mittel}} \cdot \Delta t}$$

mit $Q_{\text{transmission}}$ berechneter Wärmeverlust pro m^2 für die Heizperiode
 ΔT_{mittel} mittlere Temperaturdifferenz während der Heizperiode (16.9 K)
 Δt Dauer der Heizperiode (5088 h von 1. Oktober bis 30. April)

Eine ähnliche Sanierung ohne Rückbau wäre auch für eine Kompaktfassade denkbar. In diesem Fall müssen allerdings die Verankerung der Glasfassade und die Temperaturbeständig-

keit des bestehenden Wandaufbaus geprüft werden. Für die Abklärung solcher Fragen wie auch des Sommerverhaltens sollten diese Konzepte genauer untersucht werden.

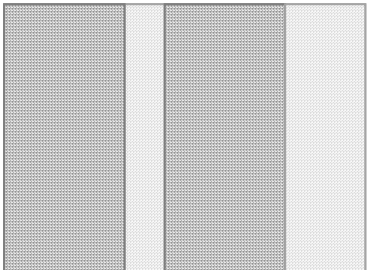
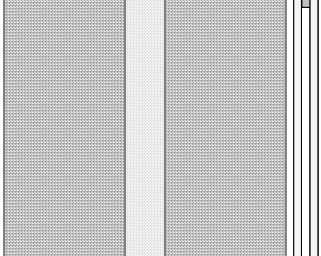
	<p>Konventionelle Sanierung (Minergiestandard)</p> <p>10 cm Mineralwolle, $\lambda = 0.034 \text{ W/(m K)}$ verputzt</p> <p>U_{Wand} W/(m²K) 0.20</p> <p>$T_{\text{si,min}}$ °C 20.3</p> <p>$T_{\text{si,max}}$ °C 20.8</p>		
	<p>Sanierung mit Isolierglasfassade</p> <p>2-IV mit $U_G = 1.5 \text{ W/(m}^2\text{K)}$, $\tau_e \alpha_e = 0.4$</p> <p>U_{Wand} W/(m²K)</p> <p>U_{effektiv} W/(m²K)</p> <p>$T_{\text{si,min}}$ °C</p> <p>$T_{\text{si,max}}$ °C</p>	Süd	Ost
		0.39	0.39
		- 0.16	0.09
		20.0	19.9
		23.3	22.5

Tabelle 2: Sanierungsvarianten für ein Zweischalenmauerwerk mit $U = 0.52 \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-1}$. Minergiesanierung opak (oben), Vorhangfassade aus Isolierglas (unten). Dynamische Simulation mit HELIOS [1] für Zürich SMA, Oktober-April, Innentemperatur 21°C.

Schaltbare Wärmedämmung

Der praktisch konstante Wärmewiderstand der gedämmten Gebäudehülle ist grundsätzlich nicht optimal. Beispielsweise liesse sich die Überhitzungsproblematik in Bürogebäuden entschärfen, wenn Nachtauskühlung sowohl über Luftaustausch als auch über eine thermisch leitende Fassade möglich wäre. Solargewinne könnten im Bedarfsfall in das Gebäude geleitet statt abgeblockt werden.

Ein schaltbares Dämmelement ist bis heute nicht käuflich, wurde jedoch im Rahmen eines Projekts durch ein Vakuumpaneel aus Edelstahl mit Glasfaserfüllung als Prototyp realisiert [8]. Die Wärmeleitfähigkeit wird durch Freisetzen bzw. Binden einer kleinen Menge Wasserstoff mittels Heizen/Abkühlen eines Metallhydrid-Getters um etwa einen Faktor 50 variiert. Eine mögliche Anwendung in einem Solargewinnsystem ist in Figur 9 dargestellt. Denkbar wäre auch ein direkter Einbau z.B. als Brüstungselement in einer Glas-Metall-Fassade.

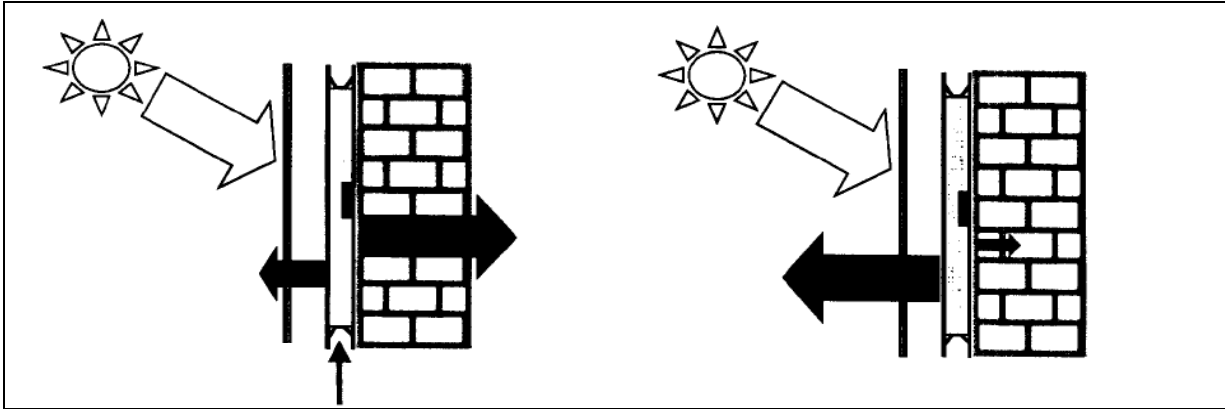


Abbildung 8: Schaltbares Dämmelement in einem solaren Wandheizsystem. Links in leitendem, rechts in sperrendem Zustand.

Fazit

Die Auswahl von bestehenden und möglichen Dämmsystemen zeigt, dass in verschiedenen Bereichen eine aktive Entwicklungstätigkeit existiert. Es wird nicht den einzigen Wärmedämmstoff der Zukunft geben für jede Anwendung und für jede/n Gebäudeeigner/in. Auf der einen Seite wird sich wahrscheinlich die Bewegung in Richtung Hochleistungsdämmstoffe und -systeme verstärken, nicht zuletzt unter dem Eindruck steigender Anforderungen und konstruktiver Einschränkungen, die bei sehr grossen Dämmstärken unvermeidlich sind. Aber auch Dämmmaterialien aus erneuerbaren Rohstoffen weisen Potenziale auf, die noch nicht ausgeschöpft sind. Gerade wenn nicht ausschliesslich die minimale Wärmeleitfähigkeit, sondern gesundes Innenklima und Nachhaltigkeit im Vordergrund stehen. Daneben gibt es Ansätze zu steuerbaren Systemen, die in verschiedenen Anwendungen sinnvoller einsetzbar sind als Dämmsysteme mit fixiertem Wärmewiderstand. Auch hier sind konkrete Komponenten zu erwarten. Weiterentwicklungen im opaken und transparenten Bereich der Gebäudehülle werden einen massgeblichen Einfluss darauf haben, wie effizient und wie wirtschaftlich der Heizwärmebedarf des Gebäudebestandes gesenkt werden kann.

Referenzen

- [1] Frank Th., Programmbeschreibung HELIOS 1, EMPA Abteilung Bauphysik (1982). Aktuelle Version: HeliosXP (beta).
- [2] BFE Kampagne bau-schlau (A. Eckmanns), www.bau-schlau.ch.
- [3] 2B AG, Neugutstr. 66, CH-8600 Dübendorf, www.2bio.ch.
- [4] lambdasave GmbH, Am Duckeldamm, D-26725 Emden, www.lambdasave.de.
- [5] IEA/ECBCS Annex 39 High Performance Thermal Insulation, Schlussberichte Subtask A (Paneele) und Subtask B (Anwendungstechnik) in Englisch (2005). Deutsche Kurzfassungen erhältlich. Infos und Download: www.vip-bau.ch.
- [6] Aspen Aerogels, 30 Forbes Road, Northborough, MA 01532, USA, www.aerogel.com.
- [7] Kerschberger A., Platzer W., Weidlich B., Transparente Wärmedämmung, Bauverlag Wiesbaden+Berlin, ISBN 3-7625-3444-6 (1997).
- [8] Hetfleisch J., Caps R., Fricke J., Switchable Thermal Insulation: Results of Computer Simulations for Optimization in Building Applications, High Temp. – High Press. 32 (2000), pp 669–675.