

GI

Gebäudetechnik in Wissenschaft & Praxis



Foto: Medical Park Hannover GmbH

- ▶ Inhomogene Luftverteilung über den Unterboden eines Hörsaals
- ▶ Nutzung von Photovoltaik im Campusquartier Potenziale und Herausforderungen bei Baudenkmalen auf dem Hauptcampus der TU Dresden
- ▶ Die thermisch aktivierte Wärmedämmung – ein ganzheitlicher Ansatz zum Gelingen der Wärmewende
- ▶ Entwicklung eines vernetzten Systems zur Erfassung, Visualisierung und Auswertung von Messdaten sowie zur Ansteuerung von Aktoren – Teil 1
- ▶ Brennstoffzellen-Heizung richtig abrechnen
- ▶ Fachinterview: Digitale Transformation – eine Sache der Unternehmenskultur

Die thermisch aktivierte Wärmedämmung – ein ganzheitlicher Ansatz zum Gelingen der Wärmewende

Es kristallisiert sich immer mehr heraus, dass die Wärmewende zum Hemmschuh bei der Umsetzung der Energiewende-Ziele 2050 werden kann. Dabei besteht durchaus eine ganze Reihe von Gründen, warum eine erfolgreiche Wärmewende unerlässlich ist. Mit einer thermisch aktivierten Wärmedämmung (TAWD) werden bereits heute die Voraussetzungen für einen klimaneutralen Gebäudebestand geschaffen. In einem ersten Beitrag zu diesem Thema, der in der vorhergehenden Ausgabe der GI erschienen ist [1], wurde näher auf diese nachhaltige und mit vielen wichtigen Synergieeffekten verbundene Beheizungsform eingegangen. Im vorliegenden Beitrag wird erläutert, wie mit einer TAWD die Jahrhundertaufgabe Wärmewende mit staatlicher Lenkung umsetzbar und durch die erzielte Energieeinsparung finanzierbar wird.

**The Thermally Activated Thermal Insulation –
a Holistic Approach to the Success of the German
Heat Transition (Wärmewende)**

It is becoming more and more apparent that the German heat transition (Wärmewende) can become a drag on the implementation of the Energiewende 2050 goals. There are quite a number of reasons why a successful German heat transition (Wärmewende) is essential. Thermally activated thermal insulation (TAWD) already now creates the conditions for a climate-neutral building stock. In a first article on this topic, which appeared in the previous issue of this journal [1], more detail was given to this sustainable form of heating, which has many important synergy effects. This part of the article explains how with a TAWD can implement the task of the century of the German heat transition (Wärmewende) with state steering and how it can be financed by the achieved energy savings.

VON
FRANK TRIESCH

1. Warum eine erfolgreiche Wärmewende unerlässlich ist

Die Wärmewende braucht – wie die gesamte Energiewende auch – „Zeit, Geld und Akzeptanz“ [2]. Die Akzeptanz soll durch die Wiederholung einiger an sich bekannter Fakten erhöht werden, die untermauern, dass Handlungsbedarf auf mehreren Ebenen besteht.

Im Jahr 2012 wurden allein von Deutschland ausgehend $E_{BRD,a} = 927 \cdot 10^6 \text{ t}_{\text{CO}_2\text{e}}/\text{a}$ in der Atmosphäre verklappt [3], davon aus Ölprodukten $E_{BRD,Oil,a} = 332 \cdot 10^6 \text{ t}_{\text{CO}_2\text{e}}/\text{a}$ und aus Erdgas $E_{BRD,Gas,a} = 159 \cdot 10^6 \text{ t}_{\text{CO}_2\text{e}}/\text{a}$ [4]. Damit trägt Deutschland nicht unbedeutend zum Klimawandel bei. Das Energiewende-Programm der Bundesregierung (2010) soll vordringlich der Reduzierung dieser klimarelevanten Emissionen dienen.

Dabei sind die Energieressourcen auch physisch begrenzt, es bestehen Risiken durch die Abhängigkeit von internationalen Energiekartellen, durch geopolitisches Handeln einiger Energieexportländer und durch Wechselkursschwankungen.

Im Jahr 2014 betrug der Importanteil Deutschlands an Energieträgern $Q_{PE, BRD, Import} = 69\%$ [5]. Vom Rohöl wurden $Q_{PE, Oil, BRD, Import} = 97\%$ importiert, vom Erdgas $Q_{PE, Gas, BRD, Import} = 75\%$, von der Steinkohle $Q_{PE, SK, BRD, Import} = 86\%$ [6]. Der Ölpreis stieg – von 1972 bis zum Jahr 2012 – in 40 Jahren von $k_{Oil} = 2 \text{ US-}\$/\text{bbl}$ auf $109 \text{ US-}\$/\text{bbl}$. Die Energieträgerimporte erreichten 2012 einen Gegenwert von $K_{PE, BRD, Import, a} = 93,5 \cdot 10^9 \text{ Euro}/\text{a}$, davon für Erdöl-produkte $K_{PE, Oil, BRD, Import, a} = 68 \cdot 10^9 \text{ Euro}/\text{a}$ und für Erdgas $K_{Gas, BRD, Import, a} = 23 \cdot 10^9 \text{ Euro}/\text{a}$. Dies entspricht 3,5 % des Bruttoinlandsprodukts pro Kopf der Bevölkerung $BIP_{K,a} = 1.169 \text{ Euro}/(\text{Kopf} \cdot \text{a})$, im Jahr 2002 waren es noch 1,6 % und $BIP_{K,a} = 404 \text{ Euro}/(\text{Kopf} \cdot \text{a})$ entsprechend [4].

Der Wert der jährlichen Energieträgerimporte kann sich zukünftig noch mehr als verdoppeln, nach unterschiedlichen Schätzungen auf $K_{PE, BRD, Import, a} = 203 \cdot 10^9 \text{ Euro}/\text{a}$ im Jahr 2050 [7], bzw. bis auf $252 \cdot 10^9 \text{ Euro}/\text{a}$ bereits im Jahr 2040 [4]. Wenn nicht entschieden gegengesteuert wird.

2. Unter welchen Bedingungen wird eine Wärmewende erfolgreich sein

Eine Wärmewende wird nur erfolgreich sein, wenn der wirtschaftliche Nutzen die Kosten weit überwiegt, die Amortisationsdauer der erforderlichen Investitionen wesentlich kürzer ist als die

Nutzungsdauer und es einen Dreiklang von Ökonomie, Ökologie und Sozialem gibt. Dies kann nur mit einem ganzheitlichen Ansatz gelingen.

3. Beispiel Ein- und Zweifamilienhäuser

Im Jahr 2006 gab es in Deutschland 14,7 Millionen Ein- und Zweifamilienhäuser. Dies sind 83 % aller Wohngebäude mit einer anteiligen Wohnfläche von 60 %. Damit ist diese Zielgruppe durchaus bedeutend.

Bis zum Jahr 2050 verbleiben weniger als 32 Jahre. Im Interesse der Mittel- und Ressourcenschonung sowie des Klimaschutzes muss nunmehr jede wärmetechnische Sanierung bereits das für 2050 geforderte, wärmetechnische Niveau von mindestens -80 % des Primärenergiebedarfes gegenüber 2008 (weiter „ $\Delta Q_{PE} \geq -80\%$ “) [8] erreichen, und jeder Neubau klimaneutral sein – gefordert durch staatliche Maßgaben, gefördert mit staatlichen Mitteln, sowie im Interesse jedes langfristig denkenden Bauherrn und Eigentümers selbst.

Dabei bietet der derzeit am Markt verfügbare Stand der Technik noch keine wirtschaftliche und gleichzeitig nachhaltige Lösung zur großflächigen, wärmetechnischen Sanierung des Gebäudebestands auf das für 2050 geforderte Niveau von $\Delta Q_{PE} \geq -80\%$.

Wollte man etwa alle Haushalte auf Holz-Pellet-Feuerung umstellen, muss berücksichtigt werden, dass mit dem gesamten, im Jahr 2010 geschlagenen Holz nur etwa 4 % des Primärenergiebedarfes von Deutschland gedeckt werden können. Schon diese Menge birgt in sich das Risiko, die Integrität der Wälder durch eine nicht nachhaltige Holzentnahme zu gefährden [9].

Ein höherer Holzverbrauch würde zudem die Preise ansteigen lassen, zu lange vergessenen geglaubten Feinstaub-, Schad- und Klimagas-Emissionen und nicht zuletzt zu einem Anstieg des Treibhausgaseffektes führen. Eine Ausweitung der Umstellung auf Holzbrand wäre somit nicht nachhaltig.

Vielmehr soll nach aktueller Auffassung die national nachhaltig verfügbare Biomasse prioritär im Industriesektor eingesetzt werden [10]. Deshalb wird selbst bei einer bereits bestehenden Holzfeuerung eine Minderung des Verbrauches um $\Delta Q_{PE} \geq -80\%$ erforderlich sein.

Auch der **Effekt der bisherigen staatlichen Sanierungsförderung** ist unzureichend, um das angestrebte Ziel zu erreichen. Die von der **KfW** geförderten Wärmeschutzmaßnahmen von 2006 – 2012 führten in 2012 zusammengekommen zu einer jährlichen Einsparung von ca. $\Delta E_{BRD} = -4,5 \cdot 10^6 \text{ t}_{\text{CO}_2\text{e}}$ [11]. Dies entsprach im selben Jahr 0,8 % der Emissionen aus Energieträgerimporten. Fortgeschrieben sind das im Jahr 2050 Einsparungen von lediglich etwa $\Delta E_{BRD} \approx -134 \cdot 10^6 \text{ t}_{\text{CO}_2\text{e}}$.

Benötigt wird ein qualitativer wie quantitativer Sprung bei der Umsetzung der Wärmewende.

4. Woran mangelt es derzeit für eine erfolgreiche Umsetzung der Wärmewende

Eine zielführende energetische Sanierung ist erfahrungsgemäß weder durch den Immobilien-Eigentümer organisierbar, noch herkömmlich über das Handwerk umsetzbar. Einzelmaßnahmen werden immer Stückwerk bleiben und führen lediglich zu Dauerbaustellen. Benötigt werden Komplettsanierungskonzepte und Firmen, die diese aus einer Hand umsetzen.

Investitionshemmnis ist derzeit unter anderem die unbekannte Energiepreisentwicklung in „ferner“ Zukunft.

Auch mangelt es an einfachen, verständlichen Lösungen. Musterhausheizsysteme mit PV-Anlage, Solarabsorber, Eisspeicher, Wärmepumpe, Solar Kollektoranlage, Pufferspeicher und Fußbodenheizung [12] zeigen zwar die technischen Möglichkeiten auf, sind aber zu komplex.

Offen ist auch das Speicherproblem – mit Erdboden-, Wasser-, Eis-, PCM-, Adsorptions-, chemischen Reaktionsspeichern, Elektrobatterien und anderem konnte dieses noch nicht gelöst werden.

Weiter fehlt es an nachhaltigen, bezahlbaren Konzepten mit Bestandsgarantie. So liegt die Strompreisentwicklung für Wärmepumpen in der Zukunft völlig im Ungewissen – im Bundesdurchschnitt stiegen die Strompreise von 2000 – 2017 um $\Delta k_{EE, BRD} = 102 \%$ [6], die Baukosten im selben Zeitraum um $\Delta k_{\text{Bau}, BRD} = 34 \%$ [13].

Und nicht zuletzt fehlt es an Lösungen für die großflächige Sanierung im bewohnten Bestand. Mustersanierungen im Modellvorhaben Effizienzhaus Plus wie etwa in Hamburg, Darmstadt und in Neu-Ulm [14]-[17] fanden

jeweils im unbewohnten Rohbauzustand statt, waren mit gravierenden baulichen Veränderungen verbunden und sind nicht in der Breite umsetzbar.

5. Die Aufgabe

Die Wärmewende kann nur gelingen, wenn sie

- zu sehr niedrigen, dauerhaft tragbaren Heizkosten führt,
- eine Bestandsgarantie bis 2050 und darüber hinaus bietet,
- sehr einfach und allgemein verständlich ist,
- von den Betroffenen akzeptiert wird,
- nachhaltig ist,
- zur Hebung von Synergieeffekten beiträgt – so gleichzeitig das Speicherproblem, die Schimmelproblematik, Probleme wie die Lärm- und Brandgefährdung löst,
- ohne Eingriff in die Umwelt, zusätzlichen Platzbedarf und neue Emissionen erfolgt,
- im bewohnten Bestand,
- standardisiert in großem Maßstab realisiert werden kann,
- ohne Kostenrisiko ist und
- mit einer Amortisation in überschaubarem Zeitraum erfolgt.

6. Sehr niedrige Heizkosten – Bestandsgarantie über 2050 hinaus

Von sehr niedrigen Heizkosten kann bei $k_{A, HZ} = 1,- \text{ Euro}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ gesprochen werden.

Ein im Bestand umsetzbarer KfW-55-Standard mit einem Heizwärmeverbrauch von $q_{HZ, A, a} = 35 \text{ kWh}_{\text{th}}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ und einer Wärmepumpe mit einer $JAZ_{WP} = 3,6 \text{ kWh}_{\text{th}}/\text{kWh}_{\text{EE}}$ hat für ein Einfamilienhaus mit $A_{WF} = 172,5 \text{ m}^2$ bei einem Strompreis von derzeit ca. $k_{EE} = 0,25 \text{ Euro}/\text{kWh}_{\text{EE}}$ Heizkosten von $k_{HZ, A, a} = 2,43 \text{ Euro}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, bzw. von $K_{HZ, a} = 419 \text{ Euro}/\text{a}$:

$$k_{HZ, A, a} = 35 \text{ kWh}_{\text{th}}/(\text{m}^2 \cdot \text{a}) \cdot 0,25 \text{ Euro}/\text{kWh}_{\text{EE}} / 3,6 \text{ kWh}_{\text{th}}/\text{kWh}_{\text{EE}} = 2,43 \text{ Euro}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$$

$$K_{HZ, a} = 2,43 \text{ Euro}/(\text{m}^2 \cdot \text{a}) \cdot 172,5 \text{ m}^2 = 419,- \text{ Euro}/\text{a}$$

Um spezifische Heizkosten von $k_{HZ, A, a} = 1,- \text{ Euro}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ zu erzielen, darf der Heizenergiepreis bei $k_{HZ} \approx 2,9 \text{ ct}/\text{kWh}_{\text{th}}$ liegen:

$$k_{\text{Heiz}} = 1,- \text{ Euro}/(\text{m}^2 \cdot \text{a}) / 35 \text{ kWh}_{\text{th}}/(\text{m}^2 \cdot \text{a}) = 0,029 \text{ Euro}/\text{kWh}_{\text{th}}$$

Hier wird bereits deutlich, dass dies nicht ohne „kostenfreie“ erneuerbare Energien bzw. eine besonders effiziente Wärme(preis)-pumpe mit einer $JAZ_{WP} \geq 8,75 \text{ kWh}_{th} / \text{kWh}_{EE}$ erreichbar ist:

$$JAZ_{WP} = 0,25 \text{ Euro/kWh}_{EE} / 0,029 \text{ Euro / kWh}_{th} = 8,75 \text{ kWh}_{th} / \text{kWh}_{EE}$$

Langfristige Energiepreissteigerungen vorwiegend wird eine $JAZ_{WP} \approx 10 \text{ kWh}_{th} / \text{kWh}_{EE}$ anzustreben sein.

Dies ergibt einen Jahresheizenergie(arbeits)-preis in Höhe von $K_{HZ,a} = 151,- \text{ Euro/a}$:

$$\begin{aligned} q_{EE,A,a} &= 35 \text{ kWh}_{th} / (\text{m}^2 \cdot \text{a}) / 10 \text{ kWh}_{th} / \text{kWh}_{EE} = 3,5 \text{ kWh}_{EE} / (\text{m}^2 \cdot \text{a}) \\ k_{HZ,A,a} &= 3,5 \text{ kWh}_{EE} / (\text{m}^2 \cdot \text{a}) \cdot 0,25 \text{ Euro/kWh}_{EE} = 0,875 \text{ Euro} / (\text{m}^2 \cdot \text{a}) \\ K_{HZ,a} &= 0,875 \text{ Euro} / (\text{m}^2 \cdot \text{a}) \cdot 172,5 \text{ m}^2 = 151,- \text{ Euro/a} \end{aligned}$$

An einem Passivhaus mit einem Jahresheizwärmeverbrauch von $q_{HZ,A,a} = 15 \text{ kWh}_{th} / (\text{m}^2 \cdot \text{a})$, ausgestattet mit einer Elektrodirektheizung, entstehen unter denselben Bedingungen Heizkosten von $k_{HZ,A,a} = 3,75 \text{ Euro} / (\text{m}^2 \cdot \text{a})$, insgesamt von $K_{HZ,a} = 647 \text{ Euro/a}$:

$$\begin{aligned} q_{EE,A,a} &= 15 \text{ kWh}_{th} / (\text{m}^2 \cdot \text{a}) = 15 \text{ kWh}_{EE} / (\text{m}^2 \cdot \text{a}) \\ k_{HZ,A,a} &= 15 \text{ kWh}_{EE} / (\text{m}^2 \cdot \text{a}) \cdot 0,25 \text{ Euro/kWh}_{EE} = 3,75 \text{ Euro} / (\text{m}^2 \cdot \text{a}) \\ K_{HZ,a} &= 3,75 \text{ Euro} / (\text{m}^2 \cdot \text{a}) \cdot 172,5 \text{ m}^2 = 647 \text{ Euro/a} \end{aligned}$$

Dies sind um den Faktor 4,3 höhere Heizenergiekosten, als für eine erfolgreiche Wärmewende erforderlich. Das heißt, die Heizkosten eines Passivhauses müssen auf weniger als ein Viertel gesenkt werden.

An einem Passivhaus, ausgerüstet mit einer aufwändigeren, marktgängigen Wärmepumpenheizung mit einer $JAZ_{WP} = 3,6 \text{ kWh}_{th} / \text{kWh}_{EE}$ reduzieren sich die Jahresheizkosten zu jetzigen Preisen auf $k_{HZ,A,a} = 1,04 \text{ Euro} / (\text{m}^2 \cdot \text{a})$ bzw. $K_{HZ,a} = 179 \text{ Euro/a}$:

$$\begin{aligned} q_{EE,A,a} &= 15 \text{ kWh}_{th} / (\text{m}^2 \cdot \text{a}) / 3,6 \text{ kWh}_{th} / \text{kWh}_{EE} = 4,17 \text{ kWh}_{EE} / (\text{m}^2 \cdot \text{a}) \\ k_{HZ,A,a} &= 4,17 \text{ kWh}_{EE} / (\text{m}^2 \cdot \text{a}) \cdot 0,25 \text{ Euro/kWh}_{EE} = 1,04 \text{ Euro} / (\text{m}^2 \cdot \text{a}) \\ K_{HZ,a} &= 1,04 \text{ Euro} / (\text{m}^2 \cdot \text{a}) \cdot 172,5 \text{ m}^2 = 179 \text{ Euro/a} \end{aligned}$$

Dies sind immer noch knapp 19 % mehr als angestrebt. Allerdings ist der Passivhausstandard im Bestand nicht großflächig umsetzbar.

Bei Plusenergiehäusern stellen sich Betriebskosten (einschließlich Haushaltsstrom) von $k_{EE,A,a} \approx 2 \div 3 \text{ Euro} / (\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ein [18]. Dieses Konzept basiert überwiegend auf dem KfW-55-Dämmstandard, einer großen PV-Anlage und einer elektrischen Wärmepumpe. Der selbst erzeugte Sonnenstrom entsteht saisonversetzt zum Heizwärmebedarf, muss im Stromnetz „zwischen gespeichert“ und über das EEG vergütet werden, belastet damit das Netz und die übrigen Stromverbraucher, er wird in der Heizsaison gegen noch immer von Kohle dominierten Strommix getauscht und ist auch aufgrund sinkender und später ganz entfallender Einspeisevergütungen nicht nachhaltig. Die Umsetzbarkeit des Effizienzhaus-Plus-Standards in der Sanierung konnte bisher praktisch nicht nachgewiesen werden [18].

Es stellt sich also die Frage, wie eine Lösung aussehen muss, die diese Bedingung erfüllt.

7. Eine Lösung – die thermisch aktivierte Wärmedämmung

– einfach, allgemein verständlich, akzeptabel, nachhaltig, mit Synergieeffekten verbunden, ohne Eingriff in die Umwelt, Lärmentwicklung, zusätzlichen Platzbedarf und neue Emissionen – Eine Lösung besteht in der aktiven Rückgewinnung des Transmissionswärmeverlusts des Gebäudes mit einer thermisch aktivierten Wärmedämmung (TAWD).

Bereits eingeführt sind Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung [19]. Hier wird der in der Fortluft enthaltene Energiestrom der Zuluft weitestgehend wieder zugeführt. Dabei werden Wärmerückgewinnungsgrade von $\Phi_{WRG} \geq 90 \%$ erzielt.

Warum soll es nicht gelingen, den Transmissionswärmeverlust eines Gebäudes ebenso nahezu vollständig zurückzugewinnen und dem Gebäude wieder zuzuführen. Da im Gegensatz zu einer Lüftungsanlage der Transmissionswärmeverlust nicht an einen Stoffstrom gebunden ist, wird zu seiner Rückgewinnung eine Wärmepumpe benötigt.

Um mit dieser hohe Jahresheizarbeitszahlen zu erzielen, bedarf es eines niedrigen Temperaturhubes zwischen Wärmequelle und Wärmesenke, möglichst hoher Wärmequellen- und niedriger Wärmesenkentemperaturen, kombiniert mit

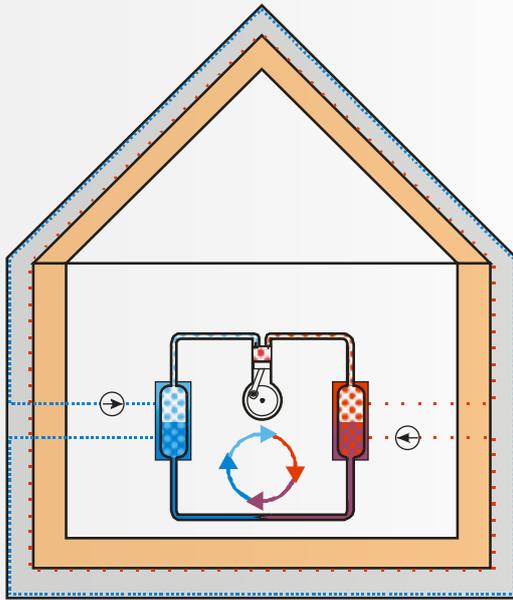


Bild 1: Schematische Darstellung eines Heizsystems, basierend auf Wärmerückgewinnung. v. a. n. i.: Wärmeabsorber – Wärmedämmung – Umfangsheizung – tragende Außenwand / Dach / Bodenplatte / Kellerdecke – Niederhub-Wärmepumpe [1].

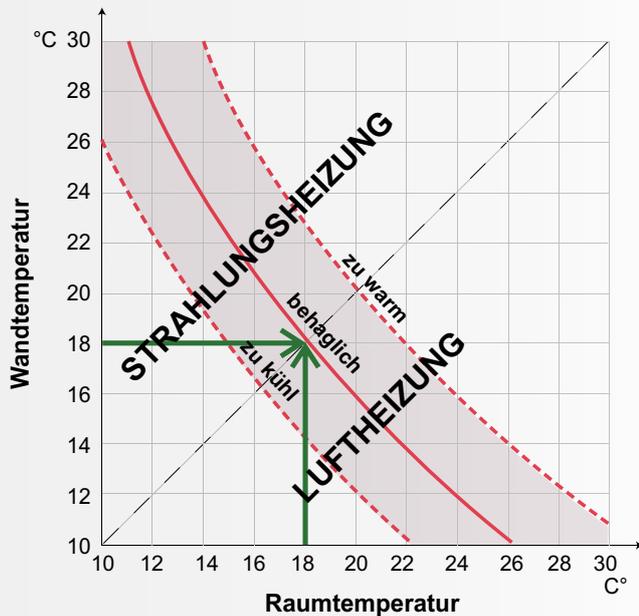


Bild 2: Behaglichkeitsprofil aus Wand- und Raumlufttemperatur (nach Bedford und Liese) [20].

maximalen Wärmeübertragungsflächen und minimalen Temperaturdifferenzen, und einer auf den niedrigen Hub optimierten Wärmepumpe.

Diese Bedingungen werden erfüllt, wenn als Wärmequelle das gedämmte Gebäude außen möglichst vollflächig mit einem Absorber umgeben ist, und als Wärmesenke das tragende Gerüst des Gebäudes, also die ungedämmte Außenwand,

die Dachkonstruktion und die Kellerdecke bzw. Bodenplatte – möglichst vollumfänglich von einer Heizfläche umschlossen ist (siehe **Bild 1**).

Dann entstehen Quelltemperaturen, entsprechend der Außenluft, und Senkentemperaturen, vergleichbar der Raumluft, und in der Folge ein minimaler Temperaturhub.

Die Umfangsheizung ist eine Form der Strahlungsheizung. Mit ihr wird Behaglichkeit bei vergleichsweise niedrigen Oberflächen- und Raumtemperaturen erzielt. So führt bereits eine Kombination aus Wand- und Raumtemperaturen von jeweils $t_w = t_i = 18^\circ\text{C}$ zu hinreichender Behaglichkeit (siehe **Bild 2**).

Dies ist durchaus plausibel, da bei einer mittleren monatlichen Außentemperatur von $\bar{t}_e = 18^\circ\text{C}$ selbst in ungedämmten Bestandsgebäuden die Heizgrenztemperatur von $t_{ed} = 15^\circ\text{C}$ (DIN 4108-6) weit überschritten ist. Jede innere Last führt zu einem Anstieg der Raumtemperatur und bleibt bis etwa $t_i = 22^\circ\text{C}$ behaglich.

Wegen der hohen Masse des Systems Haus wirkt die Umfangsheizung selbstregelnd – auch ohne „smart home“. Sollten kurzzeitig individuell höhere Behaglichkeitsanforderungen bestehen, kann die Umfangsheizung als allgemeine Grundtemperierung mit schnell ansprechenden, zeitlich begrenzt wirkenden, hoch effizienten, personenbezogenen, auf dem Strahlungsprinzip beruhenden Zuheizern ergänzt werden. Ein Rebound-Effekt ist so vermeidbar.

Der außenseitige Wärmeabsorber und die Umfangsheizfläche werden indirekt verbunden über eine optimierte, sowohl in der Verdampfungs- als auch in der Kondensationstemperatur geregelte Niederhub-Wärmepumpe.

In Analogie zum menschlichen Körper wird das Innere des Gebäudes gleichwarm gehalten („homiotherm“), das Äußere wird der Außentemperatur angepasst, ist somit wechselwarm („poikilotherm“). Dies ist ein einfaches und für jedermann verständliches, über Jahrmillionen bewährtes, bionisches Wirkprinzip.

Für die Umsetzung genügt der KfW-55-Wärmedämmstandard, erzielt durch die luftdichte Dämmung von Dach, Fassade und Kellerdecke, durch passivhaustaugliche, luftdicht eingebaute Türen, Fenster und eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung.

Ein weiterer Vorteil der Umfangsheizung besteht im Betrieb der Wärmepumpe mit Vorlauftemperaturen von nur $t_{vl} = 20^\circ\text{C}$, oder

gegebenenfalls geringfügig davon abweichend, was auch bei tiefsten Außentemperaturen vergleichsweise hohe Arbeitszahlen ermöglicht, die nicht durch energieintensive Abtauprozesse wie bei einer Luftwärmepumpe beeinträchtigt werden.

Mit markt gängigen Wärmepumpen sind im Mittel Jahresheizarbeitszahlen von $JAZ_{WP} \gg 6 \text{ kWh}_{th}/\text{kWh}_{EE}$ zu erzielen (siehe **Tabelle 1**), mit speziellen Niederhub-Wärmepumpen von $JAZ_{NHWP} \geq 10 \text{ kWh}_{th}/\text{kWh}_{EE}$ zu erwarten (siehe **Tabelle 2**). Eine $JAZ_{WP} \approx 10 \text{ kWh}_{th}/\text{kWh}_{EE}$ führt zu den angestrebten niedrigen Heizkosten in Höhe von $k_{HZ, A, a} = 1,- \text{ Euro}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$.

Mit einer TAWD wird die angestrebte Dekarbonisierung bereits mit dem heute gültigen Primärenergiefaktor erreicht (EnEV 2014: $f_{PE} = 1,8$). Sie ermöglicht eine PE-Einsparung von bis zu $\Delta Q_{PE, TAWD} > -95\%$. Im Vergleich zu einer Luft-Wasser-Wärmepumpe reduziert die TAWD im Heizfall ($t_a = -15 \text{ °C}$) den PE-Verbrauch nochmals um $\Delta Q_{PE, TAWD} = -57\%$ (siehe **Tabelle 3**).

8. Synergieeffekte

Die Wärmedämmung, die Wärmequelle, die Heizung und die Warmwasserbereitung sind in einer gemeinsamen Lösung integriert – der thermisch aktivierten Wärmedämmung. Es wird weder eine Erdsonde, noch ein großflächiger Erdabsorber und auch kein Eisspeicher oder Saisonwärmespeicher benötigt. Es entsteht auch kein Luftschall wie an Luft-Wärmepumpen.

Im Gebäude wächst kein Schimmel, weil die Umfassungsflächen stets höher temperiert sind, als die Taupunkttemperatur der feuchten Raumluft. Hinzu kommt die positive Wirkung einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung.

Die Realisierung erfolgt von außen – im bewohnten Bestand. Die vorhandene Heizung kann demontiert werden, was zusätzlich zu Raumgewinnen führt.

Die Räume kühlen unbeheizt bei Außentemperaturen von $t_a = -15 \text{ °C}$ in 26 Stunden nur um ca. $\Delta t_i = -1 \text{ K}$ ab. Das Haus selbst dient damit als (Mehr)tageswärmespeicher. Die Wärmepumpe kann netzdienlich betrieben werden. Es genügt, wenn sie in der Übergangszeit nur dann arbeitet, wenn ausreichend erneuerbarer Strom zur Verfügung steht.

Es bestehen diverse Möglichkeiten der Wärmeverschiebung. So wird solare Einstrahlung direkt nutzbar, indem die Wärmedämmung überbrückt

Tabelle 1: Leistungszahlen einer markt gängigen Sole/Wasser-Wärmepumpe bei einer Vorlauftemperatur von 20 °C [1].

WP	Typ	S/W						
t_{vd}	[°C]	-15	-10	-5	0	5	10	15
t_{ko}	[°C]	20	20	20	20	20	20	20
dT	[K]	35	30	25	20	15	10	5
ϵ	[-]	4,1	4,7	5,3	6,0	6,7	7,5	8,3
ϵ_c	[-]	8,4	9,8	11,7	14,7	19,5	29,3	58,6
$\zeta = \epsilon/\epsilon_c$	[-]	0,493	0,482	0,454	0,409	0,343	0,254	0,141

Tabelle 2: Leistungszahlen einer Niederhub-Wärmepumpe mit Hubkolbenverdichter [21] für die Monatsmitteltemperaturen von Potsdam [1].

Potsdam		Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	Mär	Apr	Heizs.
θ_e	[°C]	9,5	4,1	0,9	1	1,9	4,7	9,2	4,487
t_{vd}	[°C]	7,5	2,1	-1,1	-1	-0,1	2,7	7,2	2,487
t_{ko}	[°C]	20	20	20	20	20	20	20	20
dT	[K]	12,5	17,9	21,1	21	20,1	17,3	12,8	17,51
ϵ	[-]	12,6	9,9	8,8	8,8	9,1	10,1	12,4	10,2

wird, der Wärmeabsorber und die Umfangsheizung hydraulisch kurzgeschlossen werden. Eine sommerliche Kühlung kann passiv oder aktiv, ohne oder mit Wärmepumpe erfolgen. Die Fassade kann gezielt getrocknet werden, um Algen am Putz die Lebensgrundlage zu entziehen [22].

Selbst die Bekämpfung eines eventuellen Brandes wäre in situ über die Absorber- und Heizflächen mit dem Wärmeträgermedium und gegebenenfalls mit einer zusätzlichen Löschwasserzufuhr möglich.

Und nicht zuletzt – eine thermisch aktivierte Wärmedämmung löst das Spannungsfeld der vergangenen Jahrzehnte zwischen Energiebewusstsein und Lebensqualität. Die Architektur tritt wieder in den Vordergrund [23].

Im ersten Teil wurde detaillierter eingegangen auf die Wirkungsweise der TAWD, die diversen Möglichkeiten der Wärmespeicherung und Wärmeverschiebung, die Warmwasserbereitung im System und die erzielbaren Leistungszahlen der unterschiedlichen Wärmepumpensysteme [1].

9. Realisierung im bewohnten Bestand

– standardisiert, im großen Maßstab, ohne Kostenrisiko –

Für die energetische Komplettisanierung ist ein individueller Sanierungsfahrplan aufzustellen.

strenger Winterbetrieb		40 mm	350 mm	20 mm	
		Außenputz	Hochlochziegel	Innenputz	
t_{ie} °C	-15 °C	-13,12 °C	-11,33 °C	13,90 °C	20,0 °C
α_{ie} W/m ² K	25				7,69
λ W/mK		1,05	0,68	0,87	
R m ² K/W	0,04	0,038	0,515	0,023	0,13
L mm		410 mm	370 mm	20 mm	
R_{ges} m ² K/W	0,746				
u_{ges} W/m ² K	1,341	η	PE-Faktor	PE	
q_i W/m ²	46,9	90%	1,1	57,36	

Bild 3: Aufbau einer zu sanierenden Außenwand, U-Wert und Transmissionswärmeverlust [1].

strenger Winterbetrieb		5 mm	150 mm	2,6 mm	410 mm	
		Putz	Dämmung	Kleber	verp. Ziegel	
t_{ie} °C	-15 °C	-14,7 °C	-14,7 °C	15,57 °C	15,58 °C	35 °C
α_{ie} W/m ² K	25					7,69
λ W/mK		1	0,031	1	0,712	
R m ² K/W	0,04	0,005	4,839	0,003	0,5758	0,13
L mm		567,6 mm	562,6 mm	412,6 mm	410,0 mm	
R_{ges} m ² K/W	5,592	650%		dT_{WP}	K	50
u_{ges} W/m ² K	0,179	-87%		q_U	W/m ²	3,13
q_i W/m ²	6,26	-87%		ϵ_{WP}	-	2,00
η_{WP} %	100%			P_{WP}	W/m ²	3,13
PE _{EE} -Faktor	1,8					
PE _{HZ} W/m ²	5,63	-90%				

Bild 4: Aufbau einer Außenwand mit WDVS-System, U-Wert und Transmissionswärmeverlust, Beheizung mit marktgängiger Luft/Wasser-Wärmepumpe und vorhandener Radiatorheizung [1].

Jedes einzelne Gebäude ist zu betrachten und eine zugeschnittene Sanierungsempfehlung auszusprechen.

Für alle Gebäude ist eine **Sanierungsreihenfolge** festzulegen, bei der die Wirtschaftlichkeit, die mögliche Primärenergieeinsparung, die Dringlichkeit, gesetzliche Vorgaben und die Mittelfristplanung der Eigentümer einzubeziehen sind.

Die energetische Komplettanierung erfolgt **standardisiert, nahezu komplett von außen** – mit der thermisch aktivierten Wärmedämmung des Daches, der Außenwände, der Kellerdecke oder Bodenplatte, dem Einbau neuer Fenster und Türen im Passivhausstandard in der Dämmebene.

Von innen werden die vorhandenen Fenster und Außentüren und die Heizung demontiert und ein neues Lüftungssystem mit Wärmerückgewinnung montiert. Trockenbau- und Malerarbeiten schließen die Maßnahme **im bewohnten Zustand innerhalb von maximal vier bis sechs Wochen** ab.

Dazu bedarf es **spezialisierter und zertifizierter Firmen**, die die **Sanierung aus einer Hand** im großen Stil mit Kolonnen ausführen, die von Haus zu Haus ziehen und nach und nach ganze Straßenzüge sanieren.

Eine **neutrale Qualitätsabnahme**, unter anderem mit Blower-Door-Test, und ein

Tabelle 3: Parametervergleich bei Sanierung mit WDVS / TAWD und elektrischer WP ($t_e = -15^\circ\text{C}$).

Dämmzustand	unsaniert	WDVS	TAWD = WDVS	TAWD = WDVS	TAWD = WDVS
Wärmequelle	Abgas	Umgebungsluft	Umfangsabsorber	Umfangsabsorber	Umfangsabsorber
Primärenergie	Erdgas	Elektroenergie	Elektroenergie	Elektroenergie	Elektroenergie
Heiztechnik	NT-Gaskessel	L-W-WP	S-W-WP	S-S-NH-KV-WP	S-S-NH-TV-WP
Wärmeübergabe	Heizkörper	ehem. Heizkörper	Umfangs-Heizung	Umfangs-Heizung	Umfangs-Heizung
Temperaturen	79 / 63 °C	35 / 32 °C	20 / 18 °C	20 / 18 °C	20 / 18 °C
Parameter	Bild 3	Bild 4	Bild 5	-	-
u_i / u_a [W/(m ² K)]	1,341	0,179	0,0/0,050	0,0/0,044	0,0/0,040
q_i / q_e [W/m ²]	46,9	6,26	0,0/1,64	0,0/1,45	0,0/1,34
COP [kW/kW]	0,9	2,0	4,1	4,7	5,1
f_{PE} [kW/kW]	1,1 DIN V 18599-1:2007-02	1,8 EnEV 2014:01.01.2016	1,8 EnEV 2014:01.01.2016	1,8 EnEV 2014:01.01.2016	1,8 EnEV 2014:01.01.2016
PE [W/m ²]	57,36	5,63	2,96	2,6	2,4
[%]	100%	10%	5,2%	4,5%	4,2%
[%]	1019%	100%	53%	46%	43%
[%]	1938%	190%	100%	88%	81%
[%]	2206%	217%	114%	100%	92%
[%]	2390%	235%	123%	108%	100%

strenger Winterbetrieb	5 mm	2 mm	3,4 mm	2 mm	150,0 mm	2 mm	3,4 mm	2 mm	410 mm			
$t_{i,e}$ °C	-15 °C	-14,9 °C	-14,93 °C	-14,92 °C	-14,92 °C	-14,91 °C	17,99 °C	18,0 °C	18,0 °C	18,0 °C	18,0 °C	18,0 °C
$\alpha_{i,e}$ W/m ² K	25											7,69
λ W/mK		1	1	0,210	1	0,031	1	0,210	1	0,712		
R m ² K/W	0,04	0,005	0,002	0,016	0,002	4,839	0,002	0,016	0,002	0,576		0,13
L mm	579,8 mm	579,8 mm	574,8 mm	572,8 mm	569,4 mm	567,4 mm	417,4 mm	415,4 mm	412,0 mm	410,0 mm	0,0 mm	
R_{ges} m ² K/W	außen			äquivalent		Mitte			äquivalent		innen	gesamt ohne
						0,047			∞		0,708	5,630
u_{ges} W/m ² K		21,28		0,050		0,206			0,000		1,413	0,178
		außen		Absorber					Heizfläche		innen	gesamt ohne
q W/m ²		1,64		-5,16		6,80			6,80		0,00	5,86
	ϵ_c	8,8		ζ	0,469		ϵ	4,14		P	1,64	W/m ²

Bild 5: Parameter an einer Außenwand mit thermisch doppelt aktiviertem WDV-System [1].

lebenslanges Monitoring sind die Basis für eine Garantie des zukünftig niedrigen Energieverbrauchs über mindestens 30 Jahre.

So wird es möglich, die energetische Sanierung für den Eigentümer kostenneutral über die erzielte Energieeinsparung zu finanzieren.

10. Amortisation in überschaubarem Zeitraum

Als Beispiel wird ein Einfamilienhaus mit einer Wohnfläche von $A_{WF} = 172,5 \text{ m}^2$ betrachtet.

Bei **Mustersanierungen** wurden durchschnittliche Kosten ermittelt und mögliche Energieeinsparungen in Höhe von $\Delta q_a = -77\%$ nachgewiesen [24]. Für das Beispielhaus ergeben sich damit durchschnittliche Kosten in Höhe von $K_{Inv, -77\%} = 115.000 \text{ Euro}$ (siehe **Tabelle 4**).

Die spezifischen Kosten der Sanierung betragen $K_{A, WF, -77\%} \approx 600 \text{ Euro/m}^2_{WF}$, bzw. $K_{A, HZ, -77\%} = 550 \text{ Euro/m}^2$ beheizter Wohnfläche ($189,25 \text{ m}^2$).

Hatte ein Musterhaus vor der energetischen Sanierung für Heizung, Warmwasserbereitung und Lüftung (inklusive elektrischer Hilfsenergie) einen durchschnittlichen Energieverbrauch von $q_{A, a, unsan} = 319 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, so sinkt er im Ergebnis der Sanierung auf $q_{A, a, -77\%} = 74 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ [24].

Dies entsprach vorher einem Energieverbrauch von $Q_{a, unsan} = 55.000 \text{ kWh/a}$, also durchschnittlichen Energiekosten in Höhe von $k_{a, unsan} \approx 5.500 \text{ Euro/a}$. Nach einer energetischen Sanierung geht der jährliche Energieverbrauch auf $Q_{a, -77\%} = 12.800 \text{ kWh/a}$ zurück. Damit entsteht eine Heizkosteneinsparung in Höhe von

etwa $\Delta k_{a, -77\%} = 4.200 \text{ Euro/a}$. Diese Sanierungsmaßnahme amortisiert sich (statisch) nach mehr als $a_{stat, -77\%} = 27 \text{ a}$.

Bei einer energetischen Sanierung mit einer thermisch aktivierten Wärmedämmung entstehen auf derselben Basis durchschnittliche Kosten in Höhe von $K_{Inv, TAWD} = 131.000 \text{ Euro}$ (siehe **Tabelle 5**).

Eine Standardsanierung mit Einbringung einer Fußbodenheizung in elf Räumen mit zusammen $A_{HZ} \approx 189,25 \text{ m}^2$ erfordert den unbewohnten Leerstand. Die TAWD erfolgt von außen, belegt zwölf periphere Teilflächen und ist mit $A_{U, HZ} = 478 \text{ m}^2$ zweieinhalbmal so groß.

Im Ergebnis der Sanierung mit einer thermisch aktivierten Wärmedämmung entstehen spezifische Investitionskosten in Höhe von $K_{A, WF, TAWD} = 696 \text{ Euro/m}^2$ Wohnfläche, bzw. von $K_{A, HZ, TAWD} = 635 \text{ Euro/m}^2$ beheizter Wohnfläche. Der Energieverbrauch für Heizung, Warmwasserbereitung und Lüftung (inkl. elektrischer Hilfsenergie) sinkt von $q_{EE, A, a, unsan} = 319 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ um $\Delta q_{EE} = -97\%$ auf $q_{EE, A, a, TAWD} \approx 7,2 \text{ kWh}_{EE}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ – für Heizenergie $q_{HZ, A, a, TAWD} \approx 3,5 \text{ kWh}_{EE}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ und für die Warmwasserbereitung $q_{WWB, A, a, TAWD} \approx 3,7 \text{ kWh}_{EE}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$.

Es wird so nicht nur die Anforderung von $\Delta Q_{PE} \geq -80\%$ im Gebäudebestand erfüllt. Vielmehr wird bereits mit dem heutigen Strommix das Ziel der Dekarbonisierung erreicht. Dies wird ermöglicht durch eine Kombination aus innovativer Umfangsheizung, optimierter Wärmedämmung, vollflächigem Wärmeabsorber und hocheffizienter Wärmepumpe.

Nach einer energetischen Sanierung mit TAWD geht der jährliche Energieverbrauch für

Tabelle 4: Durchschnittliche Kosten einer energetischen Sanierung „-77%“ [24].

Einfamilienhaus mit $A_{WF} = 172,5 \text{ m}^2$ Wohnfläche		
Heiztechnik:		22.500 € 20%
Wärmedämmung Dach:	$162 \text{ m}^2 \cdot 150 \text{ €/m}^2 =$	24.300 € 21%
Fenster/Türen:	$56,6 \text{ m}^2 \cdot 502 \text{ €/m}^2 =$	28.400 € 25%
Wärmedämmung Außenwand:	$186 \text{ m}^2 \cdot 136 \text{ €/m}^2 =$	25.300 € 22%
Wärmedämmung Kellerdecke:	$130 \text{ m}^2 \cdot 37 \text{ €/m}^2 =$	4.800 € 4%
Lüftungsanlage:		10.000 € 9%
Summe energetische Sanierung (-77%):		115.300 €

Tabelle 5: Durchschnittliche Kosten einer energetischen Sanierung mit TAWD.

Einfamilienhaus mit $A_{WF} = 172,5 \text{ m}^2$ Wohnfläche		
Heiztechnik:	Umfangsheizung:	
	Dach:	$162 \text{ m}^2 \cdot 30 \text{ €/m}^2 =$ 4.860 € 34%
	Fassade:	$186 \text{ m}^2 \cdot 30 \text{ €/m}^2 =$ 5.580 € 39%
	Kellerdecke:	$130 \text{ m}^2 \cdot 30 \text{ €/m}^2 =$ 3.900 € 27%
	Umfangsheizung gesamt:	$478 \text{ m}^2 \cdot 30 \text{ €/m}^2 =$ 14.340 € 37%
	Wärmeabsorber gesamt:	$478 \text{ m}^2 \cdot 30 \text{ €/m}^2 =$ 14.340 € 37%
	Niederhub-Wärmepumpe mit Hydraulikmodul:	10.000 € 26%
	Summe Erneuerung Heiztechnik:	38.680 € 29%
Wärmedämmung Dach:	$162 \text{ m}^2 \cdot 150 \text{ €/m}^2 =$	24.300 € 18%
Fenster/Türen:	$56,6 \text{ m}^2 \cdot 502 \text{ €/m}^2 =$	28.400 € 22%
Wärmedämmung Außenwand:	$186 \text{ m}^2 \cdot 136 \text{ €/m}^2 =$	25.300 € 19%
Wärmedämmung Kellerdecke:	$130 \text{ m}^2 \cdot 37 \text{ €/m}^2 =$	4.800 € 4%
Lüftungsanlage:		10.000 € 8%
Summe energetische Sanierung mit TAWD:		131.480 €

die Raumheizung auf $Q_{HZ, a, TAWD} = 604 \text{ kWh}_{EE}/a$ und für die Warmwasserbereitung auf $Q_{WWB, a, TAWD} = 643 \text{ kWh}_{EE}/a$ zurück:

$$Q_{WWB, a, TAWD} = 12,5 \text{ kWh}_{th}/(\text{m}^2 \cdot a) / 3,35 \text{ kW}_{th} / \text{kW}_{EE} \cdot 172,5 \text{ m}^2 = 643 \text{ kWh}_{EE}/a$$

Damit entstehen jährliche Wärmekosten von insgesamt $k_{A, TAWD} = 312 \text{ Euro}/a$:

$$\begin{aligned} Q_{\Sigma, a, TAWD} &= 7,23 \text{ kWh}_{EE}/(\text{m}^2 \cdot a) \cdot 172,5 \text{ m}^2 = \\ &= 1.247 \text{ kWh}_{EE}/a \\ k_{a, TAWD} &= 1.247 \text{ kWh}_{EE}/a \cdot 0,25 \text{ Euro} / \text{kWh}_{EE} = \\ &= 312 \text{ Euro}/a \end{aligned}$$

Die jährliche Heizkosteneinsparung beträgt $\Delta k_{a, TAWD} \approx 5.200 \text{ Euro}/a$. Die Sanierung mit TAWD amortisiert sich (statisch) nach $a_{stat, TAWD} \approx 25 \text{ a}$.

Bei einer gegebenenfalls durch eine entsprechende CO_2 -Abgabe herbeigeführten, jährlichen Energiepreissteigerung von $\Delta k_{PE} = 3\%/a$ werden sich die Heizkosten im unsanierten Zustand innerhalb von 35 Jahren auf $k_{a, unsan} = 15.500 \text{ Euro}/a$ fast verdreifachen (siehe **Bild 6**).

Es ist fraglich, ob Energiekosten in einer solchen Höhe für den Eigentümer überhaupt noch tragbar sein werden oder ob die Immobilie schon aus diesem Grund aufzugeben ist.

Die dynamische Amortisation einer Standard-sanierung ist nach $a_{dyn, -77\%} > 20 \text{ a}$ erreicht. Die Energiekosten steigen jedoch von anfänglich $k_{a, -77\%} = 1.280 \text{ Euro}/a$ nach 35 Jahren bereits wieder auf $k_{a, -77\%} = 3.600 \text{ Euro}/a$. Eine solche Sanierung ist also wenig nachhaltig. Dabei ist fraglich, ob eine spätere, erneute Sanierung technisch überhaupt noch einmal möglich und effizient ist.

Die Sanierung mit einer thermisch aktivierten Wärmedämmung amortisiert sich dynamisch nach $a_{dyn, TAWD} \approx 19$ a. Sie lässt die jährlichen Energiekosten mit $k_{a, TAWD} = 880$ Euro/a auch nach 35 Jahren noch in einem erträglichen Rahmen erscheinen. Diese Sanierung ist somit in kürzerer Zeit amortisiert und auch langfristig nachhaltig.

Betrachtet man die über die weitere Lebensdauer der Immobilie insgesamt zu zahlenden Energiekosten (siehe Bild 7), so sind vom Eigentümer im unsanierten Zustand über 35 Jahre $K_{\Sigma, unsan} \approx 348.000$ Euro zu zahlen (braune Linie) – überwiegend für Energieträgerimporte.

Eine Standard-Sanierung führt über 35 Jahre zusammengenommen zu Kosten in Höhe von $K_{\Sigma, -77\%} \approx 196.000$ Euro (Summe der roten Linien). Davon fließen noch immer $K_{PE, \Sigma, -77\%} \approx 81.000$ Euro für flüssige oder gasförmige Energieträger nahezu vollständig ab.

Die Sanierung mit einer thermisch aktivierten Wärmedämmung bedingt immerhin noch Gesamtkosten in Höhe von $K_{\Sigma, TAWD} \approx 151.000$ Euro (Summe der grünen Linien). Bei einer Deckung der Antriebsenergie für die Wärmepumpenheizung durch vorrangig ins Netz einzuspeisende oder direkt am Gebäude produzierte, erneuerbare Energien verbleiben diese Kosten aber nahezu vollständig im Land. Und diese Sanierung wird zunehmend klimaneutraler.

11. Finanzierungsmodell – Energieeinsparfinanzierung

Es ist davon auszugehen, dass auch die Sanierung mit einer thermisch aktivierten Wärmedämmung staatlich subventioniert wird. Eine Förderung fällt hier auch leichter, weil aus den zukünftig im Land verbleibenden Investitionen und Energiekosten sowie aus einer eventuellen CO₂-Abgabe zusätzliche Steuereinnahmen generiert werden.

Bei einer Förderung durch Zinsbefreiung zahlen die in der sanierten Immobilie wohnenden Eigentümer an den Kreditgeber (KfW) als Tilgungsrate die Differenz der bisherigen zu den neuen Energiekosten in Höhe von $\Delta k_{a, TAWD} = 5.200$ Euro/a, jährlich pauschal erhöht um $\Delta k_{PE} = 3\%$ /a. Dann ist nach $\tau > 19$ Jahren der langfristige, zinsfreie Kredit getilgt.

Die Eigentümer wohnen bereits die gesamte Zeit über in einer vollständig auf den modernsten Stand sanierten Immobilie, ohne die Unannehmlichkeiten und den Zeit-

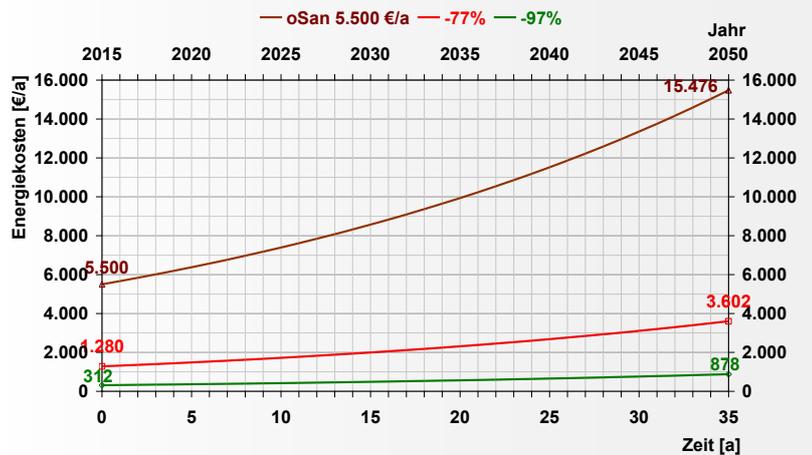


Bild 6: Entwicklung der jährlichen Energiekosten über 35 Jahre, unsaniert bzw. bei unterschiedlichen Sanierungsformen, bei einem Energiepreisanstieg von 3%/a.

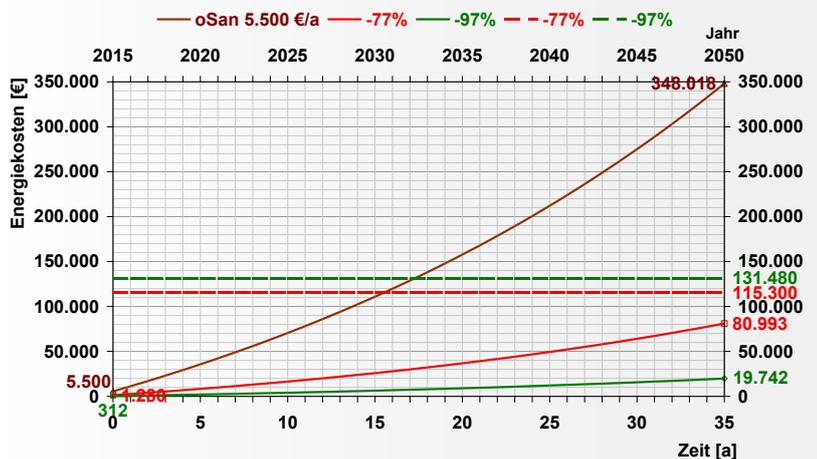


Bild 7: Summe der Energiekosten über 35 Jahre, unsaniert, bei herkömmlicher Sanierung (-77%) und Sanierung mit TAWD (-97%), bei einer jährlichen Preissteigerung von 3%/a.

aufwand, den eine Sanierung in Eigenregie mit sich gebracht hätte. Sie genießen den hohen Komfort neuer Fenster und Türen, einer luftdichten Hülle, einer Strahlungsheizung bei stets frischer Raumluft.

Die nach der Tilgung frei werdenden Mittel können anderweitig sinnvoll eingesetzt werden. Die Energiekosten bleiben – bis zum Jahr 30 nach der Sanierung garantiert – auch nach 2050 niedrig. Der Wert der Immobilie steigt. Sie bleibt den Nachkommen der Eigentümer erhalten.

Der Staat erreicht die Ziele der Wärmewende – eines klimaneutralen Wohnungsbestandes – bis zum Jahr 2050. Die CO₂-Emissionen gehen planmäßig zurück. Die Folgen der Klimaänderung können begrenzt werden. Die Energieträgerimportabhängigkeit sinkt.

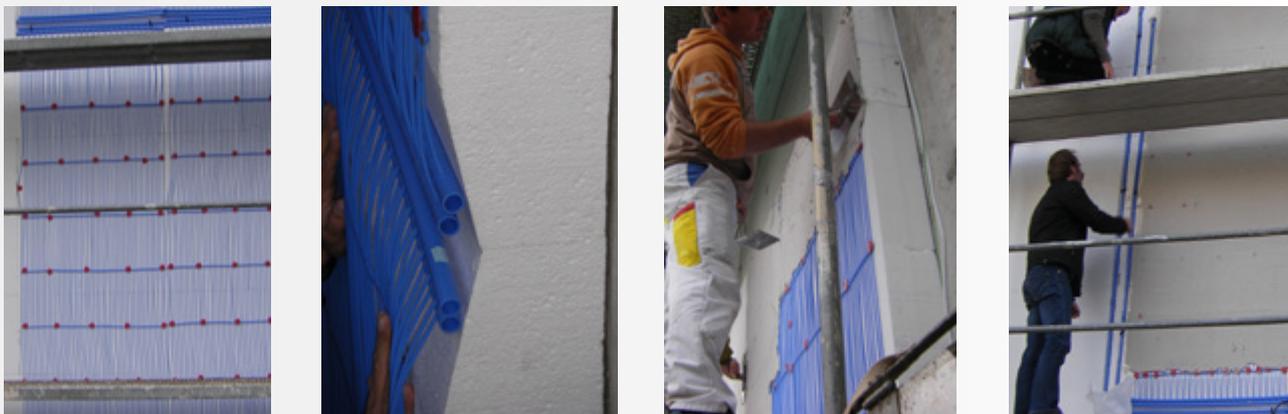


Bild 8: Herstellen eines Kapillarrohrmatten-Absorbers im Außenputz der Wärmedämmung [22] v.l.n.r.: Fixierung der Kapillarrohrmatten auf der Polystyrol-dämmschicht, Integration der Stammrohre, Spachteln des Absorbers, Anbindung der Versorgungsleitungen. (Quelle: A. Born / Sova)



Bild 9: Umsetzung einer Kapillarrohrmatten-Umfangsheizung bei der energetischen Ertüchtigung eines Einfamilienhauses. v.l.n.r.: im Dach, an der Außenwand, an der Kellerdecke – jeweils vor Anbringung der Wärmedämmung [1]. (Quelle: A. Lucke / Thermo Integral)

Eine solche Wärmewende wird für lange Zeit zu einem Konjunkturmotor. Es werden neue, qualifizierte Arbeitsplätze geschaffen. Europäische Baufirmen können sich an der Umsetzung beteiligen, das Außenhandelsdefizit sinkt. Das Modell wird zu einem ideellen wie materiellen Exportschlager für eine erfolgreiche Wärmewende „Made in Germany“.

12. Erste Schritte der Umsetzung

An der Fassade eines Versuchsgebäudes wurde ein Kapillarrohrmatten-Absorber in den Außenputz eines Wärmedämm-Verbundsystems eingebettet [22] (siehe **Bild 8**).

Bei der energetischen Ertüchtigung eines Einfamilienhauses wurde auf der gesamten

ehemaligen Umfangsfläche des Gebäudes eine Kapillarrohrmatten-Umfangsheizung aufgebracht – in den Gefachen des Dachstuhl, auf dem ehemaligen Außenputz der Fassade und an der Kellerdecke (siehe **Bild 9**).

Inzwischen kommen auch erste optimierte Niederhub-Wärmepumpen mit vergleichsweise hohen Arbeitszahlen auf den Markt [25].

Damit wurden alle Bestandteile einer thermisch aktivierten Wärmedämmung – der periphere Wärmeabsorber, eine angepasste Wärmedämmung, die Umfangsheizung und die Niederhub-Wärmepumpen für sich genommen bereits umgesetzt.

Nun bedarf es einiger Referenzobjekte, an denen die Gesamtlösung einer thermisch aktivierten Wärmedämmung synergierich

umgesetzt, mit einem Monitoring überprüft und mit Standardlösungen verglichen werden kann.

13. Jahrhundertaufgabe Wärmewende

Dass es sich bei der Wärmewende um eine Jahrhundertaufgabe handelt, wird bereits bei der Betrachtung der erforderlichen Gesamtinvestitionen deutlich. Werden unter den oben getroffenen Annahmen ca. 90 % aller Einfamilienhäuser (EFH) saniert [26], bindet dies Investitionen in Höhe von 1,74 Billionen Euro:

$$K_{san, EFH} = 14,7 \text{ Mio. EFH} \cdot 131.480 \text{ Euro/EFH} \cdot 90 \% \approx 1,74 \cdot 10^{12} \text{ Euro}$$

Zum Vergleich: Die Nettoenergeträgerimporte von 2013 – 2040 werden auf insgesamt $K_{PE, \Sigma, Import} = 4,45 \cdot 10^{12}$ Euro geschätzt [4]. Eine erfolgreiche Wärmewende als nachhaltige Alternative dazu ist schon aus diesem Grund eindeutig vorzuziehen.

Dafür ist die Sanierungsrate auf $f_{san} = 3 \% / a$ anzuheben. Gleichmäßig über 30 Jahre verteilt ist für die energetische Sanierung von

$$n_{san, EFH, a} = 14,7 \cdot 10^6 \text{ EFH} \cdot 3 \% / a = 441.000 \text{ EFH/a}$$

ein Kreditvolumen von $K_{a, TAWD, EFH} = 58 \cdot 10^9$ Euro/a aufzubringen.

Demgegenüber entstehen Energiekosteneinsparungen von im Jahr 2051:

$$\Delta k_{a, TAWD} = 14,7 \cdot 10^6 \text{ EFH} \cdot 90 \% \cdot -5.200 \text{ Euro/} (a \cdot \text{EFH}) \cdot 281 \% \approx -193 \cdot 10^9 \text{ Euro/a}$$

Bei jeweils etwa sechs universell einsetzbaren Facharbeitern in ca. 49.000 Baukolonnen werden zusammen etwa 300.000 Arbeitskräfte gebunden. Für die unmittelbare Bauvorbereitung, -abwicklung und -nachbereitung kommen nochmals ca. 100.000 Fachangestellte hinzu.

In zehn Jahren sind so allein in 30 % der Einfamilienhäuser $n_{WP} = 4,4 \cdot 10^6$ Wärmepumpen zu installieren – was aktuelle Forderungen nach fünf bis sechs Millionen Wärmepumpen bis 2030 [27] und von rund 14 Millionen bis 2050 [10] nicht mehr als unrealistisch erscheinen lässt.

Nur mit einem umgehend eingeleiteten, staatlich gelenkten Programm, welches die

Interessen der betroffenen Eigentümer einbezieht, kann die Wärmewende gelingen.

Eine Realisierung mit spezialisierten Fachfirmen, aus einer Hand, in kürzester Zeit im bewohnten Bestand, eine neutrale Überwachung und Abnahme der Sanierung, eine Garantie niedrigster Heizkosten für die Dauer von 30 Jahren und ein angemessener Preis, der eine kostenneutrale Finanzierung über die eingesparten Heizkosten in einem überschaubaren Zeitraum ermöglicht, sind dafür ideale Voraussetzungen.

14. Ausblick

Eine thermisch aktivierte Wärmedämmung ist grundsätzlich auch für Mehrfamilienhäuser

und jede andere Form von Gebäuden geeignet, sowohl in der Sanierung als auch im Neubau. Zur Erzielung aller Synergieeffekte ist ein unge-dämmter Ausgangszustand optimal.

Als „TAWD +“ kann die thermisch aktivierte Wärmedämmung mit einem regenerativen Plus, also mit einer Photovoltaik-, Solarthermie- oder einer Kombination daraus, einer sogenannten PVT-Anlage kombiniert werden.

Aus positiven Skaleneffekten und der auch im Bauwesen zu erwartenden Digitalisierung, sowie bei einem staatlichen Ausschreibungs-verfahren für die Sanierungszertifikate sind bei der Umsetzung der Wärmewende – ähnlich der Energiewende im Stromsektor – noch wesent-liche Kostensenkungen zu erwarten.

Literatur

- [1] Triesch, F.: Wärmerückgewinnung als nachhaltige Beheizungsform. GI – Gebäudetechnik in Wissenschaft & Praxis 139, Heft 1/2018, S. 32-44, ITM InnoTech Medien GmbH, Augsburg.
- [2] Schafhausen, F.: Nationale Klimaschutzinitiative der Bundesregierung. (2011).
- [3] Umweltbundesamt, Nationale Treibhausgas-Inventare 1990 bis 2015 (Stand 02/2017) und Schätzung für 2016 (Stand 03/2017).

- [4] Bukold, S.: Die Kosten fossiler Energieimporte 2000-2012. EnergyComment, Hamburg (2013).
- [5] Energieflussbild 2014 der Bundesrepublik Deutschland. Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (04/2016).
- [6] Daten zur Energiepreisentwicklung von Januar 2000 bis März 2017. Statistisches Bundesamt (2017).
- [7] Jährliche Ausgaben Deutschlands für den Import fossiler Energieträger von 2000 bis 2011 und Prognosen bis 2050. (08/2012). Agentur für Erneuerbare Energien; www.unendlich-viel-energie.de.
- [8] Klimapolitische Ziele der Bundesregierung, Umweltbundesamt (2016).
- [9] Bioenergie – Möglichkeiten und Grenzen. Nationale Akademie der Wissenschaften – Leopoldina (2012).
- [10] Klimapfade für Deutschland. Studie im Auftrag des BDI von BCG und Prognos, 2018.
- [11] Monitoring der KfW-Programme „Energieeffizient Sanieren“ 2010 und „Ökologisch / Energieeffizient Bauen“ 2006 – 2010. Institut Wohnen und Umwelt Darmstadt, Bremer Energie Institut (2011).
- [12] <https://www.forschungsinitiative.de/effizienzhaus-plus/modellvorhaben/effizienzhaus-plus-wohnbauten/eussenheim/>
- [13] Baupreisindizes Wohngebäude 2000 – 2017. Statistisches Bundesamt (2017).
- [14] Model Home 2020 – LichtAktiv Haus wird am 19. November 2010 eröffnet. DBZ 11 (2010) Energie Spezial.
- [15] Energie für Haus und Auto – Wohnhaussanierung in Darmstadt-Dieburg. DBZ 01 (2012) Energie Spezial.
- [16] Plusenergie ist machbar, auch im Bestand – Sanierung eines Wohnhauses in Neu-Ulm. DBZ 01 (2016) 68-71.
- [17] Plusenergie im Bestand – Sanierung in Neu-Ulm. DBZ 09 (2016) 88-91.
- [18] Wege zum Effizienzhaus Plus – Grundlagen und Beispiele für energieerzeugende Gebäude, BMUB, 2016.
- [19] Gertis, K.; Erhorn, H.: Superdämmung oder Wärmerückgewinnung? Wo liegen die Grenzen des energiesparenden Wärmeschutzes? Bauphysik 2 (1981), S. 50-56.
- [20] Meier, C.: „Heizen wie die Sonne“. Raum & Zeit 144 (2006), S. 56-62.
- [21] Wyssen, I., Gasser, L., Wellig, B.: „Effiziente Niederhub-Wärmepumpen und Klimakälteanlagen“. 19. Tagung des BFE-Forschungsprogramms „Wärmepumpen und Kälte“ (2013), HTI Burgdorf.
- [22] von Werder, J., Kogan, D., Sack, M., Venzmer, H., Malorny, W.: „Algenvermeidung durch Fassadentemperierung“. in: Fassadensanierung – Praxisbeispiele, Produkteigenschaften, Schutzfunktionen; Beuth, Berlin (2011), S. 79-95.
- [23] Steiger, P.: „Architektur und Energie – Architektur im Spannungsfeld zwischen Energiebewusstsein und Lebensqualität“, VDI-Berichte Nr. 306 (1978), S. 3-12.
- [24] Halper, Ch.: 80%ige Einsparung: möglich, aber teuer. TGA Fachplaner 01 (2013), S. 21-23.
- [25] BS2 Niederhub-Wärmepumpe. Firmenbroschur. BS2 AG Schlieren / Schweiz; www.BS2.ch.
- [26] Sanierungsbedarf im Gebäudebestand – Ein Beitrag zur Energieeffizienzstrategie Gebäude. BMWi (2014).
- [27] Fraunhofer IWES/IBP: Wärmewende 2030. Schlüsseltechnologien zur Erreichung der mittel- und langfristigen Klimaschutzziele im Gebäudesektor. Studie im Auftrag von Agora Energiewende, Berlin (2017).



Dr.-Ing. FRANK TRIESCH

- 1978 – 1983 Studium der Energie- und Verfahrenstechnik, Erdöl-Erdgas-Institut „I. M. Gubkin“, Moskau
- 1983 – 1993 Energie-/Verfahrenstechniker in der Gasindustrie
- Seit 1993 Selbstständig auf dem Gebiet der Entwicklung innovativer wärmetechnischer Anlagen und Verfahren, Konzept-Planung, Beratung, Computersimulation
- Seit 2004 Geschäftsführender Gesellschafter Konzeption/Lieferung von Fernwärmekompaaktstationen, Frischwassermodulen Waleo, airtainern zur großtechnischen Luftkonditionierung, deutsche/internationale Patente, Gebrauchsmuster, Marken

Kontakt Thermo Integral GmbH & Co. KG
Gutsparkstraße 5-9
04328 Leipzig
Tel.: +49 341 252 2762
E-Mail: triesch@gmx.de
www.thermointegral.de

Symbolverzeichnis

a	[a]	Amortisation	e	-	außen
A	[m ²]	Fläche	ed	-	Heizgrenze
Barrel	[bbl]	Barrel (1 barrel = 158,987 l)	EE	-	Elektroenergie
E	[t/a]	Emissionen	Gas	-	Erdgas
f	[-]	Faktor	ges	-	gesamt
JAZ	[kWh _{th} /kWh _{EE}]	Jahresarbeitszahl	HZ	-	Heizung
k	[Euro/...]	spezifische Kosten	i	-	innen
K	[Euro]	Kosten	Import	-	Import
L	[mm]	Wanddicke	Inv	-	Investition
n	[Stück]	Anzahl	K	-	Kopf der Bevölkerung
P	[W]	Elektroenergiebedarf	Ko	-	Kondensator
PE	[W]	Primärenergiebedarf	KV	-	Kolbenverdichter
q	[W/m ²]	Wärmestrom	L	-	Luft
Q		Wärmemenge	N	-	Nutzfläche
R	[m ² *K/W]	Wärmedurchlasswiderstand	NH	-	Niederhub
T	[K]	absolute Temperatur	NT	-	Niedertemperatur
t	[°C]	Temperatur	Oil	-	Erdöl
u	[W/(m ² *K)]	Wärmedurchgangskoeffizient	PE	-	Primärenergie
α	[W/(m ² *K)]	Wärmeübergangskoeffizient	S	-	Sole
Δ	[-]	Differenz	san	-	Sanierung
ε	[-]	Leistungszahl	SK	-	Steinkohle
ζ	[-]	Gütegrad	stat	-	statisch
η	[%]	Wirkungsgrad der Wärmenutzung	TAWD	-	Sanierung mit Thermisch aktivierter Wärmedämmung
θ	[°C]	Monatsmitteltemperatur	th	-	thermisch
λ	[W/(m*K)]	Wärmeleitfähigkeit	TV	-	Turboverdichter
τ	[h]	Zeit	U	-	Umwelt
Φ	[%]	Rückwärmzahl	unsan	-	unsaniert
			VL	-	Vorlauf
			Vd	-	Verdampfer
			w	-	Wand
			W	-	Wasser
			WF	-	Wohnfläche
			WP	-	Wärmepumpe
			WRG	-	Wärmerückgewinnung
			-77%	-	herkömmliche Sanierung mit 77 % Energieeinsparung
			Σ	-	Summe

Indizes

a	-	Jahr
A	-	Fläche
ä	-	äquivalent
Bau	-	Baukosten
BRD	-	Bundesrepublik Deutschland
C	-	Carnot
CO ₂ e	-	CO ₂ -Äquivalent
dyn	-	dynamisch

Thermodynamik der feuchten Luft

PD Dr.-Ing. habil. Joachim Seifert

150 Seiten



Das vorliegende Werk ist als kompaktes Nachschlagewerk zum Thema „Thermodynamik der feuchten Luft“ zu verstehen.

Im zweiten und dritten Kapitel ist der Schwerpunkt auf die thermodynamischen Grundlagen gelegt, bevor im vierten Kapitel die Konstruktion des Mollier h, x -Diagramms beschrieben wird. Der fünfte Hauptabschnitt befasst sich mit Zustandsänderungen, wie z. B. Heizen, Kühlen und deren technische Umsetzung. Fortgeführt werden die Ausführungen mit einer speziellen Herleitung zur Befeuchtung und Entfeuchtung von Luft.

Abgeschlossen werden die Erläuterungen mit ausführlichen Komplex-Beispielen zu allen wichtigen klimatechnischen Systemen. Im besonderen Fokus stehen hierbei Nur-Luft-Klimaanlagen, Luft-Wasser-Klimaanlagen sowie neuere DEC-Klimaanlagen. Besonders wichtig sind dem Autor die praxisnahe Aufbereitung und Berechnung verschiedener klimatechnischer Prozesse.

Buch
€ 49,90

ISBN 978-3-96143-074-1

eBook
€ 49,90

ISBN 978-3-96143-075-8

Bestellungen unter:
buch@recknagel-online.de
Tel: +49 821 65 04 49-41

www.recknagel-online.de



139. Jahrgang · Heft 02

Herausgeber	PD Dr.-Ing. habil. Joachim Seifert , Technische Universität Dresden, Institut für Energietechnik, Helmholtzstr. 14, 01069 Dresden, Merkel-Bau (MER), Raum: 215, E-Mail: joachim.seifert@tu-dresden.de, Tel.: +49 351 463 34909 Prof. Dr.-Ing. Bert Oschatz , ITG Institut für Technische Gebäudeausrüstung Dresden, Tiergartenstraße 54, 01219 Dresden, E-Mail: oschatz@itg-dresden.de, Tel.: +49 351 4692 5474 Prof. Dr.-Ing. Martin Kriegel , Technische Universität Berlin, Hermann-Rietschel-Institut, FG Gebäude-Energie-Systeme, Marchstraße 4, 10587 Berlin, E-Mail: kriegel@di-verlag.de, Tel.: +49 30 314 24170
Schriftleiter	Prof. Dr.-Ing. Karl-Josef Albers , Hochschule Esslingen; Prof. Dr.-Ing. Michael Arnemann , Hochschule Karlsruhe; Prof. Dipl.-Ing. Katja Biek , Beuth Hochschule für Technik, Berlin; Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Detzer , ETS – Efficient Technical Solutions GmbH, Gießen; Prof. Dr.-Ing. Ulrich Finke , Beuth Hochschule für Technik, Berlin; Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Külpmann , Beuth Hochschule für Technik, Berlin, Hochschule Luzern; Prof. Dr.-Ing. habil. Birgit Müller , Hochschule für Technik und Wirtschaft, Berlin; Prof. em. Dr.-Ing. Michael Schmidt , Universität Stuttgart; Prof. em. Dr.-Ing. Achim Trogisch , Hochschule für Technik und Wirtschaft, Dresden; Prof. Dr.-Ing. Thomas Winkler , Technische Hochschule Mittelhessen
Redaktion im Verlag	Henriette von Feilitzsch (V. i. S. d. P.), Tel.: +49 821 65 04 49-15, Fax: +49 821 65 04 49-99, E-Mail: vonfeilitzsch@innotech-medien.de Silke Helbig, Tel.: +49 821 65 04 49-28, Fax: +49 821 65 04 49-99, E-Mail: helbig@innotech-medien.de
Verlag	ITM InnoTech Medien GmbH Bahnhofstraße 10, 86150 Augsburg Tel.: +49 821 65 04 49-0, Fax: +49 821 65 04 49-99 Internet: www.innotech-medien.de
Geschäftsführer	Carsten Augsburg, Kirstin Sommer
Anzeigen	Stephan Wedekind, Tel.: +49 821 65 04 49-55, Fax: +49 821 65 04 49-99, E-Mail: wedekind@innotech-medien.de
Satz, Layout und Herstellung	Sylvia Kierdorf
Druck	Druckerei Chmielorz GmbH, Ostring 13, 65205 Wiesbaden-Nordenstadt Printed in Germany
Abonnements Einzelheftbestellung	Dirk Sommer Tel.: +49 821 65 04 49-41, Fax: +49 821 65 04 49-99 E-Mail: abo@recknagel-online.de
Bezugsbedingungen	GI - Gebäudetechnik in Wissenschaft & Praxis erscheint sechs mal pro Jahr.

Der Jahres-Abonnementpreis beinhaltet den Bezug des gedruckten Heftes auf dem Postweg oder das ePaper an die E-Mailadresse des Abonnenten.

Jahres-Abonnement Print oder ePaper:	260,00 €
Studenten-Abonnement:	130,00 €
Einzelheft Print oder ePaper:	45,00 €
Mitglieder-Abonnement*:	49,00 €

* Das Vorzugsabo für 49,00 € gilt für Mitglieder des VDI sowie der Gesundheitstechnischen Gesellschaft (GG)

Die Berechnung von Abonnements umfasst den Zeitschriftenpreis inklusive Versandkosten. Die Preise enthalten bei Lieferung in EU-Staaten die Mehrwertsteuer, für das übrige Ausland sind sie Nettopreise. Studenten erhalten gegen Nachweis einer aktuellen Immatrikulationsbescheinigung einen Rabatt von 50 %. Der Abopreis ist zahlbar 14 Tage nach Rechnungserhalt. Bei Neubestellungen gelten die zum Zeitpunkt des Bestelleingangs gültigen Bezugspreise. Abonnements von Zeitschriften gelten unbefristet und können jeweils mit einer Frist von acht Wochen zum Ende des Kalenderjahres schriftlich gekündigt werden. Die Abonnementgebühren werden im Voraus in Rechnung gestellt oder bei Teilnahme am Lastschriftverfahren bei den Kreditinstituten abgebucht.

ISSN 2195-643X

Die Zeitschrift und alle in ihr enthaltenen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt. Mit Ausnahme der gesetzlich zugelassenen Fälle ist eine Verwertung ohne Einwilligung des Verlages strafbar. Für den Originalteil werden nur Aufsätze angenommen, die in gleicher Form noch nicht veröffentlicht worden sind. Ausnahmen sind vorher zu vereinbaren. Für unverlangt eingesandte Manuskripte wird keine Haftung übernommen. Die wissenschaftliche Verantwortung für den Inhalt der Aufsätze tragen die Autoren.