

Untersuchungsbericht 2021-04-26/2

Bewertung unterschiedlicher Dachkonstruktionen hinsichtlich des sommerlichen Wärmeeintrags

Auftraggeber: Industrieverband Polyurethan-Hartschaum e.V.
Heilbronner Straße 154, 70 191 Stuttgart

FMI Fachverband Mineralwolleindustrie e.V.
Friedrichstraße 95 (PB 138), 10117 Berlin

Datum: 2021-04-26

Inhalt

1. Einflussgrößen auf den sommerlichen Hitzeschutz
2. Das Heindl-Verfahren
 - Heindl-Verfahren und heutige Bauweise
 - TAV-, TAD- und φ -Schaubild
3. Dynamische Berechnung des Temperaturverlaufs im Raum und der Energiequellen und -senken
4. Bauteilbezogene Bewertung hinsichtlich des sommerlichen Wärmeschutzes mittels Simulation; Vergleich Heindl-Verfahren und Simulation
5. Zusammenfassung

1. Einflussgrößen auf den sommerlichen Hitzeschutz

Der sommerliche Wärmeschutz, namentlich der Temperaturverlauf in einem Raum im Sommer als maßgebliche Empfindungsgröße für die sommerliche thermische Behaglichkeit, hängt von einer Vielzahl von Parametern des gesamten Raumes ab. Die wichtigsten Einflussgrößen sind:

- Besonnung und solare Zustrahlung auf die Fenster
- Größe, Anzahl, Orientierung, Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert) der Fenster des Raumes
- Effizienz und Nutzungsdauer des Sonnenschutzes
- Eintrag von warmer Außenluft tagsüber (z.B. durch offene Fenster oder Undichtheiten)
- nächtliches Abkühlen des Raumes durch Nachtlüftung mit kühler Außenluft

Weiterhin haben folgende Parameter Einfluss auf den sommerlichen Wärmeschutz:

- Wärmedämmvermögen der Außenbauteile des Raumes
- Wärmespeicherfähigkeit des Raumes, insbesondere der raumnahen Schichten der Bauteile im Raum und der den Raum umgebenden Bauteile
- Größe des Raumes
- innere Abwärme im Raum durch Personen, Geräte, Beleuchtung

Die Wärmeübertragung ist ein instationärer Vorgang, hervorgerufen durch zeitlich versetzte Temperaturschwankungen. Ändert sich die Temperatur der Bauteiloberfläche, dringt die Temperaturveränderung zeitverzögert und gebremst in das Bauteil ein, abhängig von Wärmeleitfähigkeit, Dichte und Material der einzelnen Konstruktionsschichten. Wichtig ist bei schwankendem Energieeintrag in den Raum - z. B. Solarstrahlung durch Fenster - ob diese Energie im Raum gepuffert werden kann. Dann steigt die Temperatur im Raum langsamer an. Bei Temperaturschwankungen im Tagesrhythmus beträgt die maximale Eindringtiefe der Energiewelle aus der Innenraumluft in die Bauteile etwa 10 Zentimeter bei Massivbaustoffen und etwa 5 cm bei Dämmstoffen, jeweils von der Bauteilinnenoberfläche aus. Weiter außen, oder hinter Dämmstoffen liegende Schichten sind bauphysikalisch vom Raum abgekoppelt und können nicht mehr beim Puffern helfen. Ist ein Dämmstoff raumseitig durch Putz oder eine Beplankung abgedeckt, spielt die Pufferwirkung des Dämmstoffs im Vergleich zu jener der Abdeckung praktisch keine Rolle mehr. Als kurzfristige Wärmespeicher wirken nach DIN EN ISO 13786 nur die Schichten innerhalb der Eindringtiefe, und dort nur Schichten raumseitig von Wärmedämmung. Bei einer wärmegeprägten Holzdachkonstruktion ist das typischerweise nur die innere Bekleidung, z.B. Gipskartonplatten oder Beplankung.

Wärmespeicherschichten auf der Außenseite der Bauteile, z.B. direkt unter der Dacheindeckung, haben bei gut gedämmten Bauteilen einen sehr geringen Einfluss auf die Temperatur im Raum, eine gute Dämmwirkung des Bauteils, und die Wärmespeichermassen auf der Raumseite, sind viel effektiver als eine Wärmespeicherung auf der Außenseite des Bauteils.

Die Einflussgrößen auf den sommerlichen Wärmeschutz sind in Bild 1 und Bild 2 dargestellt, ohne Berücksichtigung ihrer relativen Bedeutung. Das Schaltbild in Bild 2 verdeutlicht die Komplexität der Funktion des sommerlichen Wärmeschutzes von Räumen. Es zeigt, dass die Beschränkung auf ein einzelnes opakes Außenbauteil, z.B. das Dach, unter Vernachlässigung aller anderen Zweige des Netzwerks, zur Beschreibung des sommerlichen Wärmeschutzes zu stark vereinfachend wäre.

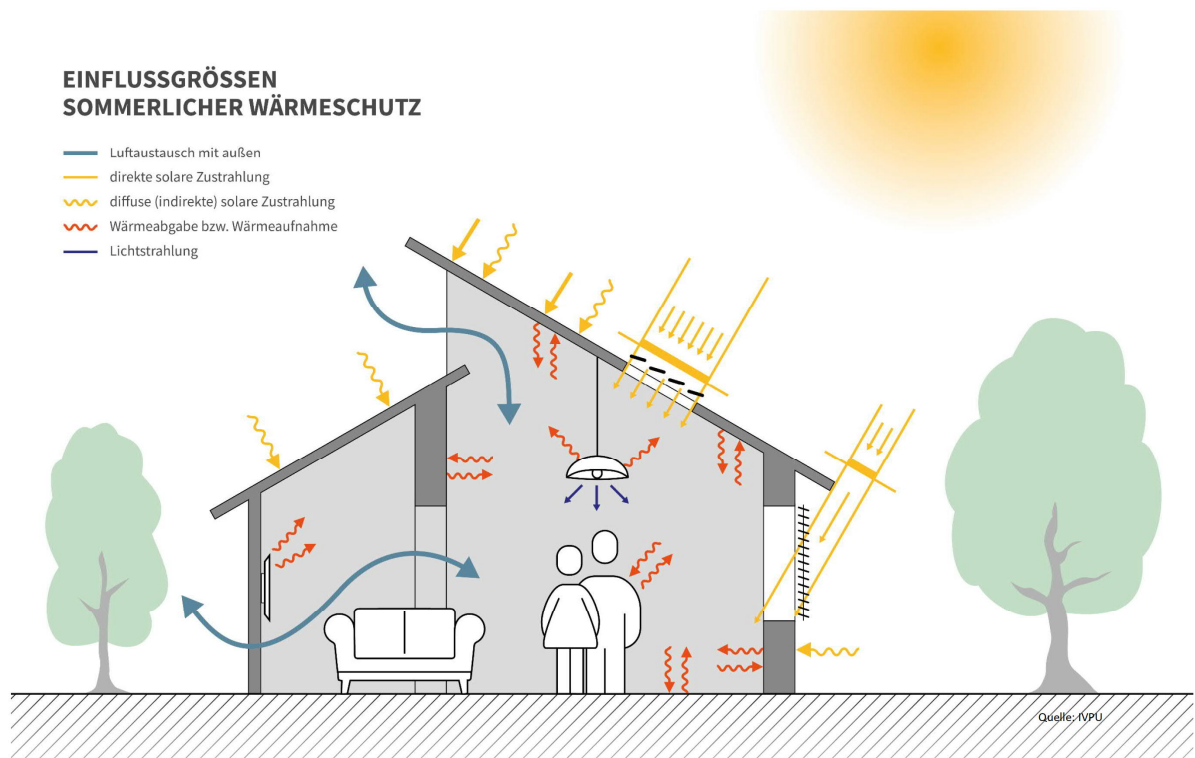


Bild 1: Einflussgrößen auf den sommerlichen Wärmeschutz.

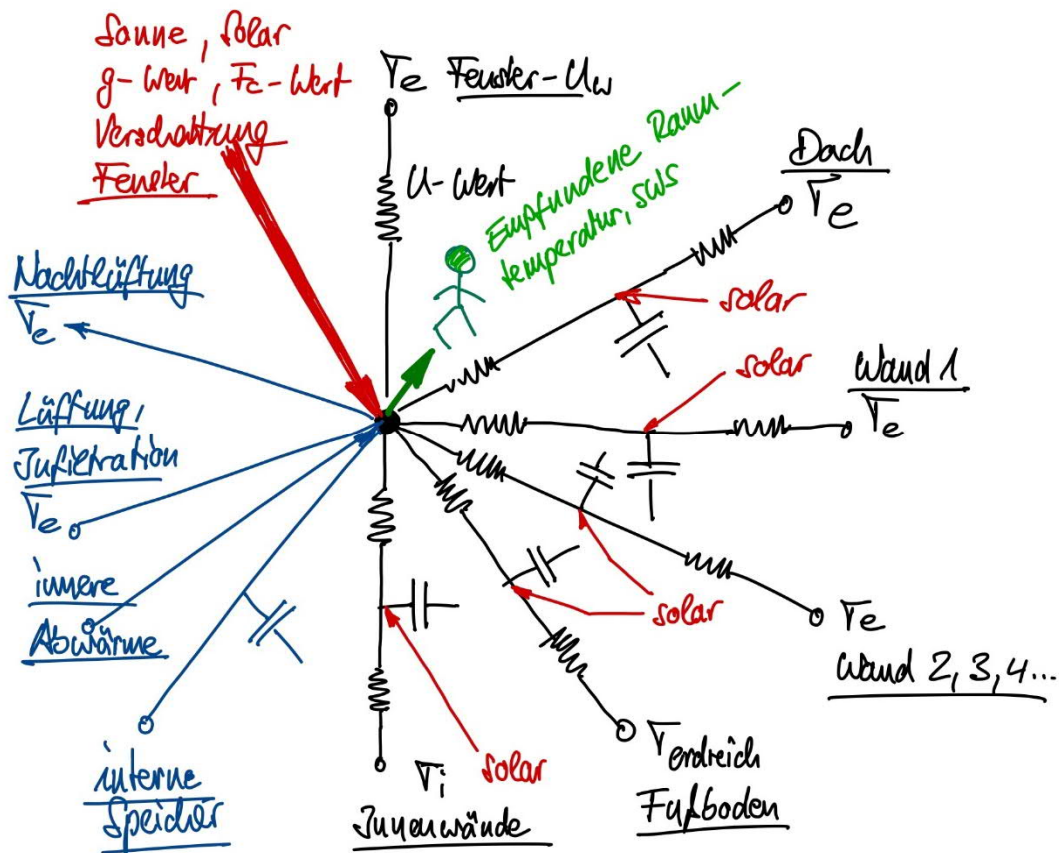


Bild 2: Prinzip „Schaltbild“ der Einflussgrößen auf die empfundene Raumtemperatur unter außenseitiger Hitzeeinwirkung und der Energiepfade, bestehend aus Temperaturknoten, Wärmedurchgangswiderständen und Wärmespeichereigenschaften. T_e = Außenlufttemperatur, T_i = Innenlufttemperatur.

Eine zutreffende, umfassende Bewertung des sommerlichen Wärmeschutzes kann sich immer nur auf den gesamten Raum inkl. aller maßgeblichen Aspekte gemäß obiger Liste (Fenster, Verschattung, Lüftung, Abwärme, Wärmespeicherfähigkeit der raumnahen Schichten) beziehen. Nachdem die Sonneneinstrahlung durch die Fenster die größte Belastung für den sommerlichen Hitzeschutz darstellt, kann der sommerliche Wärmeschutz des kompletten Raumes aus physikalischen Gründen NICHT auf die Bewertung einzelner opaker Bauteile des Raumes heruntergebrochen werden. Vor allem ist der Einfluss der verwendeten Dämmstoffe einzelner opaker Bauteile (bei gleichem U-Wert der Bauteile) auf die thermische Behaglichkeit im Raum vernachlässigbar gering. Es kommt hauptsächlich auf die Fenster und weiterhin v.a. auf das Lüftungsverhalten, die innere Abwärme, die Wärmespeicherfähigkeit der raumnahen Bauteilschichten und den U-Wert der Außenbauteile des Raumes an.

2. Das Heindl-Verfahren

Bereits in den 1960er Jahren bestand von Seiten der Ziegel-Mauerwerksindustrie der Wunsch, den sommerlichen Wärmeschutz, trotz der zuvor beschriebenen Komplexität, durch ein einfaches Bauteilverfahren beschreiben bzw. beurteilen zu können.

Die Wärmeübertragung ist ein instationärer Transportvorgang. Dies bedeutet, dass sich sehr viele Randbedingungen zeitlich ständig verändern. Die Wärmeübertragung für eine ebene Materialschicht kann mittels der Fourier-Gleichung (partielle Differentialgleichung) beschrieben werden. Dieses Gleichungssystem ist analytisch nicht ohne weiteres lösbar.

Zur Lösung des Gleichungssystems hat Dr. Walter Heindl (u.a. ZI 1966, ZI 1967) verschiedene Annahmen getroffen:

Die von Heindl entwickelte Matrix ist ein analytisches Gleichungssystem, welches Temperatur und Wärmestrom auf der einen Wandoberfläche mit Temperatur und Wärmestrom an der gegenüberliegenden Wandoberfläche miteinander verknüpft, unter Berücksichtigung von Wärmeleitung und Wärmespeicherung der Baustoffschichten. Hinsichtlich der Lösung für den Temperaturdurchgang handelt es sich im Prinzip um ein Gleichungssystem mit 2 Gleichungen und 4 Unbekannten (Temperatur und Wärmestromdichte, jeweils innen und außen).

Um dieses Gleichungssystem lösen zu können,

- wird die Außenoberflächentemperatur zahlenmäßig vorgegeben (sinusförmiger Verlauf $\theta_{se} = \theta_0 + \theta_{se,Ampl} \cdot \sin(\omega t + t_0)$ mit Periodendauer 24h und Maximum zum Zeitpunkt $t = 12h$),
- die Wärmestromdichte innen wird zu Null gesetzt: $q_i = 0$.

Damit bleiben nur noch 2 Unbekannte übrig, nämlich die außen eingebrachte Wärmestromdichte und die Temperatur der Innenoberfläche → das Gleichungssystem wird lösbar.

Zu beachten sind:

- Die Materialeigenschaften λ , c und ρ werden als temperaturunabhängig angenommen.
- Die Außentemperatur wird direkt auf die Oberfläche aufgeprägt, d.h., der äußere Temperaturverlauf beschreibt keine Außenlufttemperatur, sondern die Oberflächentemperatur. Solare Zu- strahlung oder langwellige Abstrahlung oder konvektive Wärmeaufnahme und -abgabe an der Außenoberfläche können nicht berücksichtigt werden; die Temperaturwelle und die aufgenommene Wärmemenge kann nur durch das Bauteil nach innen wandern.
- Es gibt keine Temperaturunterschiede innerhalb der Außen- bzw. der Innenoberfläche. Somit hat die Außenoberfläche innerhalb der Fläche überall dieselbe Temperatur, ebenso hat die Innenoberfläche überall dieselbe (von der Außenoberfläche verschiedene) Temperatur.

- An der Innenoberfläche wird der Wärmestrom zu Null gesetzt: $q_i = 0$. Das heißt, es gibt keine Wärmeabgabe der Innenoberfläche an die Raumluft und an andere Innenoberflächen. Die Innenoberfläche heizt sozusagen auf, ohne sich an den Raum abkühlen zu können. Ein Abkühlen kann wieder nur durch das Bauteil hindurch nach außen erfolgen. Dies entspricht einem Zustand, bei welchem auf der Innenoberfläche eine ideale Dämmschicht vorhanden wäre, unter der sich die Innenoberflächentemperatur zwar aufwärmt, aber nicht durch Wärmeabgabe an die Raumluft abkühlen könnte. Dies führt zu einer unrealistischen Überhöhung der Innenoberflächentemperatur gegenüber der Raumluft.

Die mathematisch notwendigen Annahmen $\theta_{se} = \theta_0 + \theta_{se,Ampl} \cdot \sin(\omega t + t_0)$ und $q_i = 0$ stellen einen theoretischen, praxisfernen Fall dar, der dementsprechend auch zu Berechnungsergebnissen TAV, TAD und φ führt, die deutlich von der erlebbaren Praxis abweichen.

Heindl-Verfahren und heutige Bauweise

Das sogenannte Heindl-Verfahren wurde nach seiner Veröffentlichung aufgrund der zuvor beschriebenen Einschränkungen kaum angewendet. Mit Einführung der Computer wurden kurz danach in den 1970er Jahren bereits erste numerische Simulationsverfahren zur Ermittlung von zeitlich veränderlichen Raumtemperaturen eingesetzt.

Erst durch die Implementierung des Heindl-Verfahrens in zwei handelsübliche Computerprogramme zur wärmeschutztechnischen Bauteilberechnung wurde die Diskussion um eine bauteilbezogene Beurteilung des sommerlichen Wärmeschutzes wiederbelebt.

Hier ist jedoch zu berücksichtigen, dass in den 1960er Jahren – als das Verfahren entwickelt wurde – die Außenbauteile einen im Vergleich zu heute sehr schlechten Wärmeschutz aufwiesen und die Fenster damals viel kleiner waren. Deshalb war der Wärmeeintrag durch die opaken Bauteile relativ zum Gesamtwärmeeintrag (durch Fenster, opake Bauteile, Lüftung und Abwärme) größer und damit entscheidender als heute. Weil Dach und Wand heutzutage wesentlich besser gedämmt und die Fenster tendenziell größer sind als früher, dringt nur noch ein kleiner Anteil des Gesamtwärmeeintrags durch die opaken Bauteile. Demzufolge ist der exakte zeitliche Verlauf dieses Energieeintrags für die Behaglichkeit im Raum auch unerheblich.

Trotzdem werden durch das Heindl-Verfahren signifikante Unterschiede zwischen einzelnen Baukonstruktionen ausgewiesen. Diese ergeben sich nicht zuletzt aus den mathematischen Vereinfachungsannahmen, die erforderlich sind, um das Verfahren überhaupt rechnen zu können. So wird z.B. die raumseitige Wärmeabgabe der Außenbauteile zu Null gesetzt und bleibt damit unberücksichtigt. Wärme, die von außen durch das Bauteil gelangt, führt anschließend an der Innenseite zu unrealistisch überhöhten Oberflächentemperaturen. Eventuelle, auch große Unterschiede zwischen den so bestimmten Kenngrößen TAV, TAD und φ verschiedener Konstruktionen sind bei gut gedämmten Räumen trotzdem vernachlässigbar, sobald der Raum Fenster und innere Wärmequellen aufweist, weil die gut gedämmten opaken Bauteile relativ zu den anderen Energiequellen lediglich einen geringen Beitrag leisten.

TAV-, TAD- und ϕ -Schaubild

Die nachfolgenden Grafiken in Bild 3, die in gleicher oder ähnlicher Form gerne zur Verdeutlichung von TAV, TAD und ϕ verwendet werden, können beim Betrachter einen falschen Eindruck bzgl. der „Wichtigkeit“ der genannten Größen wecken. Die rote Linie im oberen Diagramm stellt die Außenseite dar, die orange Linie im unteren Diagramm die Innenseite.

Die rote Linie suggeriert eine außenseitige Temperatur, welche an einem Tag zwischen 35°C und 5°C schwankt. Um die Lufttemperatur kann es sich dabei nicht handeln: Bei einem Tageshöchstwert von 35°C wird es in der darauffolgenden Nacht nicht 5°C kalt – jedenfalls nicht in Deutschland. Die rote Linie steht für die Außenoberflächentemperatur. Sie kann bei besonnten Flächen durchaus eine Spreizung von 30 K bzw. eine Amplitude von ± 15 K oder mehr aufweisen, aber nicht um einen Mittelwert von 20°C.

Der Vergleich der Amplituden der roten und der orangen Linie ergibt, dass die mit den beiden Linien dargestellte Situation eine Temperaturamplitudendämpfung TAD von knapp über 6 aufweist, das entspricht etwa 6 cm Dämmung im Dach. Einen solchen Fall gibt es heute nicht mehr – außer bei alten, energetisch unsanierten Gebäuden. Heutige Dächer haben, selbst bei Berechnung nach dem Heindl-Verfahren, eine Temperaturamplitudendämpfung TAD von etwa 20 oder mitunter deutlich mehr. Zeichnet man im unteren Diagramm einen dementsprechenden Temperaturgang auf der Innenseite ein, wäre dies die grüne Linie. Allerdings ist an der Linie praktisch keine „Temperaturwelle“ mehr sichtbar. Damit wird bereits optisch deutlich, wie unbedeutend bei heutigen TAD-Werten die Temperaturwelle auf der Innenseite und deren Phasenverschiebung sind. Ist TAD noch höher, wird aus der grünen Linie allmählich ein beinahe gerader Strich.

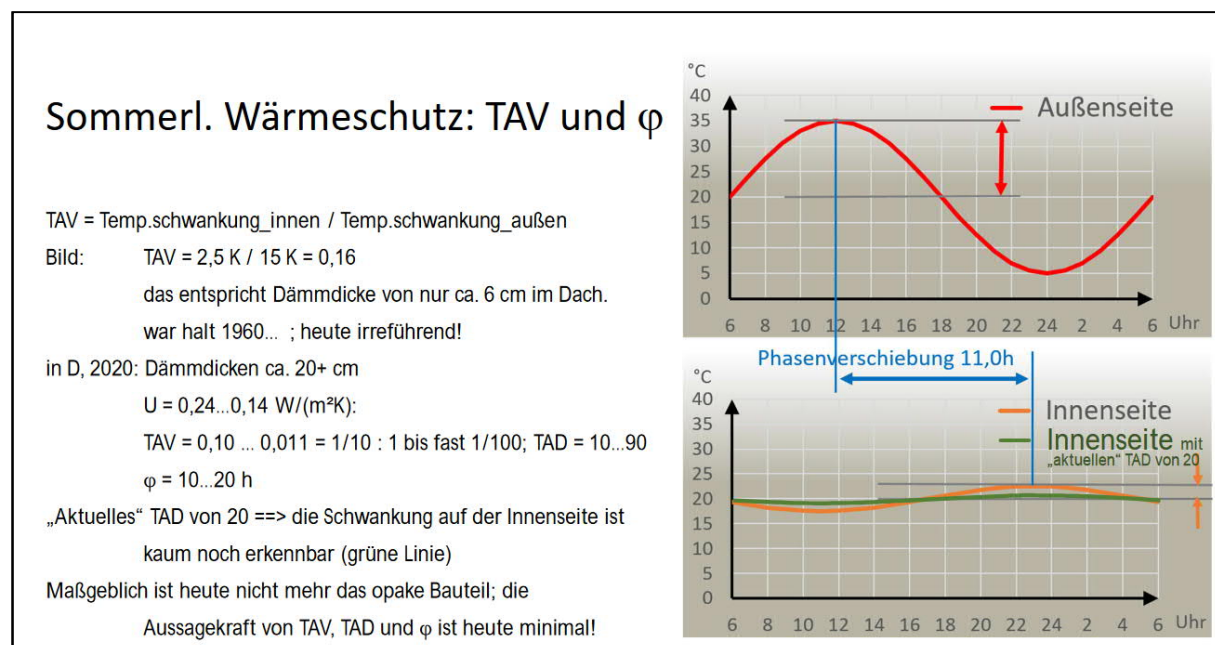


Bild 3: Diskussion üblicher TAV-Schaubilder.

3. Dynamische Berechnung des Temperaturverlaufs im Raum und der Energiequellen und -senken

Aus Sicht der Raumtemperatur wirken die Innenoberflächen der umgebenden opaken Bauteile als Wärmequellen oder Wärmesenken – je nach Außen- und Innenlufttemperatur, Besonnung auf der Außenseite, Dämmniveau und Wärmespeicherverhalten vor allem der raumnahen Schichten –, während der solare Energieeintrag durch die Fenster und die Energiefreisetzung aus innerer Abwärme aus Personen und Ausstattung immer Wärmequellen darstellen. Ob Infiltration und Luftwechsel / Lüftung (ohne Klimatisierung) eine Energiequelle oder -senke sind, hängt vom zeitlichen Verlauf des Verhältnisses zwischen Innen- und Außenlufttemperatur und dem Verlauf der Lüftungsintensität ab.

Bild 4 zeigt beispielhaft die Energiemengen (Quellen und Senken) für einen 15 m² großen Raum im Dachgeschoss eines Massivbaus mit aktuellem, gutem Dämmniveau und mit einem südorientierten, durch einen Rollladen verschatteten Dachflächenfenster mit einer Glasfläche von 1 m², für einen heißen, sonnenreichen Julitag (06:00 Uhr des 16.07. bis 06:00 Uhr des Folgetags) am Standort Potsdam. Positive Werte bedeuten, dass dem Raum bzw. der Raumluft Energie zugeführt wird, negative Werte bedeuten einen Energieentzug aus der Raumluft bzw. dem Raum. Deutlich erkennbar ist der starke Anstieg des solaren Energieeintrags durch das Fenster an diesem klaren Tag. Um 9:00 Uhr wird der außenliegende Rollladen geschlossen, weshalb die Linie für die Solargewinne „nach unten springt“. Um 18:00 Uhr wird der Rollladen wieder geöffnet. Die Außenlufttemperatur klettert im Verlauf des Tages auf fast 30°C, während der Temperaturanstieg im Raum durch die Wärmespeicherung der Bauteile begrenzt wird. Ist die Außenluft kühler als die Raumluft und beträgt die Raumluft über 24°C, wird das Fenster geöffnet und der Luftwechsel vom Grundluftwechsel $n = 0,6/h$ auf $3,0/h$ erhöht, um den Raum zu kühlen und die Speichermassen zu entladen.

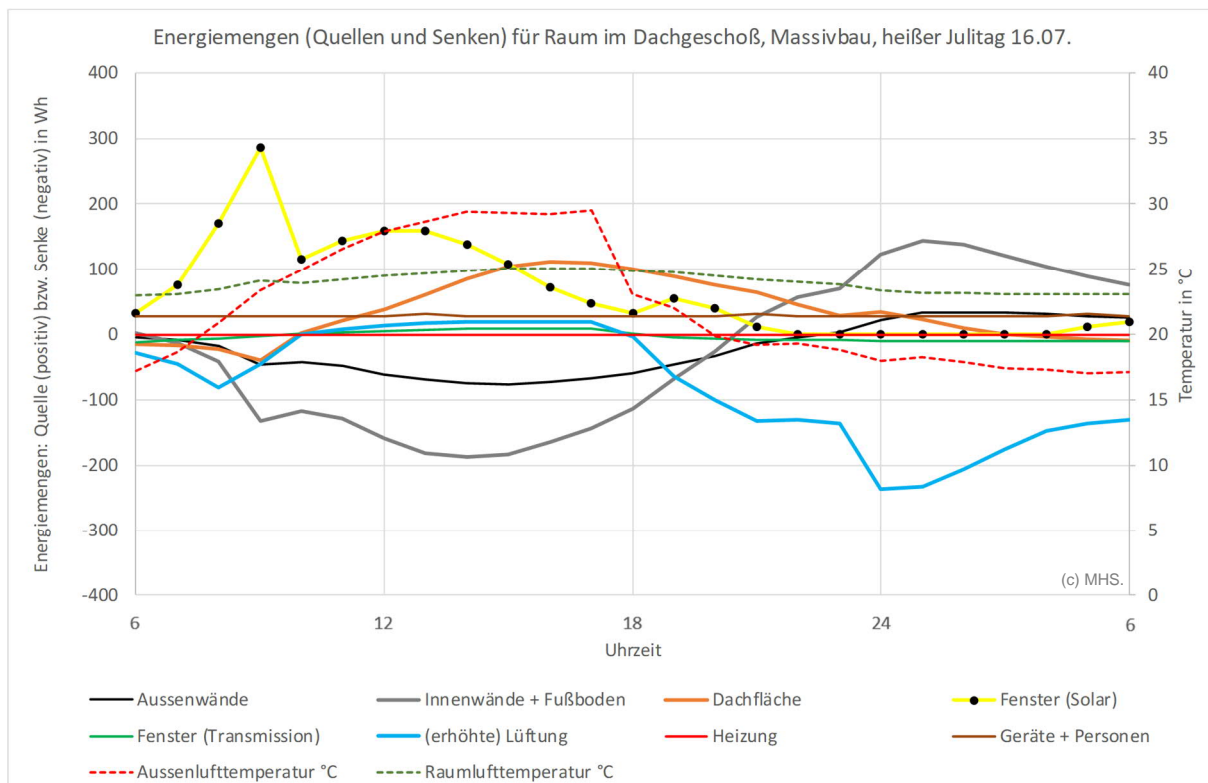


Bild 4: Energiemengen (Quellen und Senken) durch die Innenoberflächen der Bauteile, 15 m² großer Raum im Dachgeschoss, Massivbau, Steildach und Dachflächenfenster nach Süden orientiert, Rollladen, heißer, sonnenreicher Julitag (06:00h bis 06:00 des Folgetags), Standort Potsdam. Vorzeichen: positiv = in den Raum hinein.

Bild 5 zeigt für dieselbe Situation die über den betrachteten Tag aufsummierten, absoluten Energiemengen. Die Außen- und Innenwände entziehen dem Raum Wärme. Die so in den Bauteilen eingespeicherte Energie muss, je nach Wetter, in den folgenden Tagen bzw. nach dem Ende der Hitzeperiode wieder ausgespeichert werden. Das bedeutet, dass an diesen Tagen die Balken dieser Bauteile im Diagramm positiv orientiert sein werden. Deutlich erkennbar ist der große Beitrag der erhöhten Nachtlüftung zur Wärmeabfuhr aus dem Raum. Die solaren Gewinne durch das Glas des Fensters werden durch den außenliegenden Rollladen begrenzt, welcher von 09:00 bis 18:00 geschlossen ist. Die solaren Gewinne, die sich OHNE Rollladen oder bei Nichtbenutzung des Rollladens ergeben würden, sind zum Vergleich gestrichelt eingetragen.

Bild 6 zeigt dieselben Größen wie Bild 5, wiederum aufsummiert über 24 Stunden von 06:00 bis 06:00 Uhr des Folgetags, aber bezogen auf die Fläche der jeweiligen Bauteile, in $\text{Wh}/(\text{m}^2\text{d})$. Die Dominanz der Glasfläche hinsichtlich der flächenspezifischen Wärmeeinträge ist deutlich erkennbar, auch – wie hier – mit außenliegendem Rollladen von 09:00 bis 18:00 Uhr. Ohne Rollladen wäre die gelbe Säule etwa 3x so hoch.

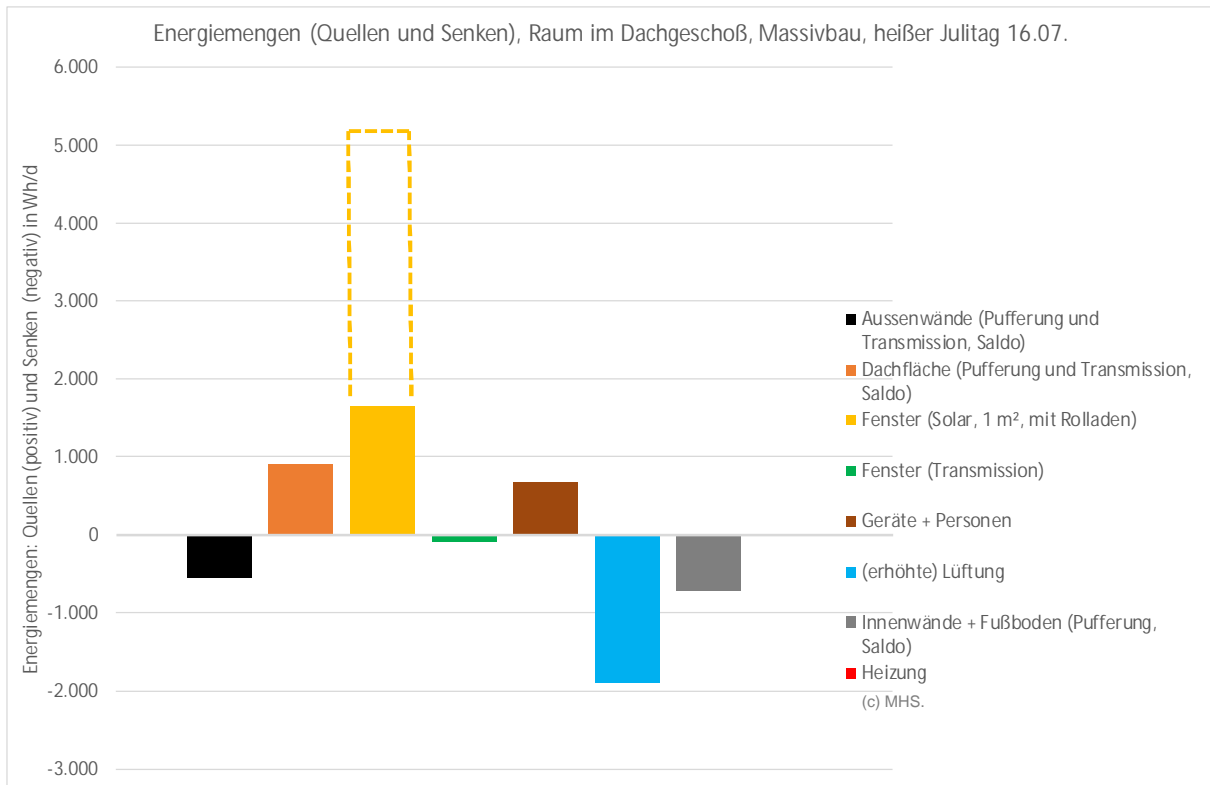


Bild 5: Energiemengen (Quellen und Senken) durch die Innenoberflächen der Bauteile aus Bild 3, aufsummiert über 24 Stunden von 06:00 bis 06:00 des Folgetags. Vorzeichen: positiv = in den Raum hinein. Gestrichelt = Fenster ohne Rolläden.

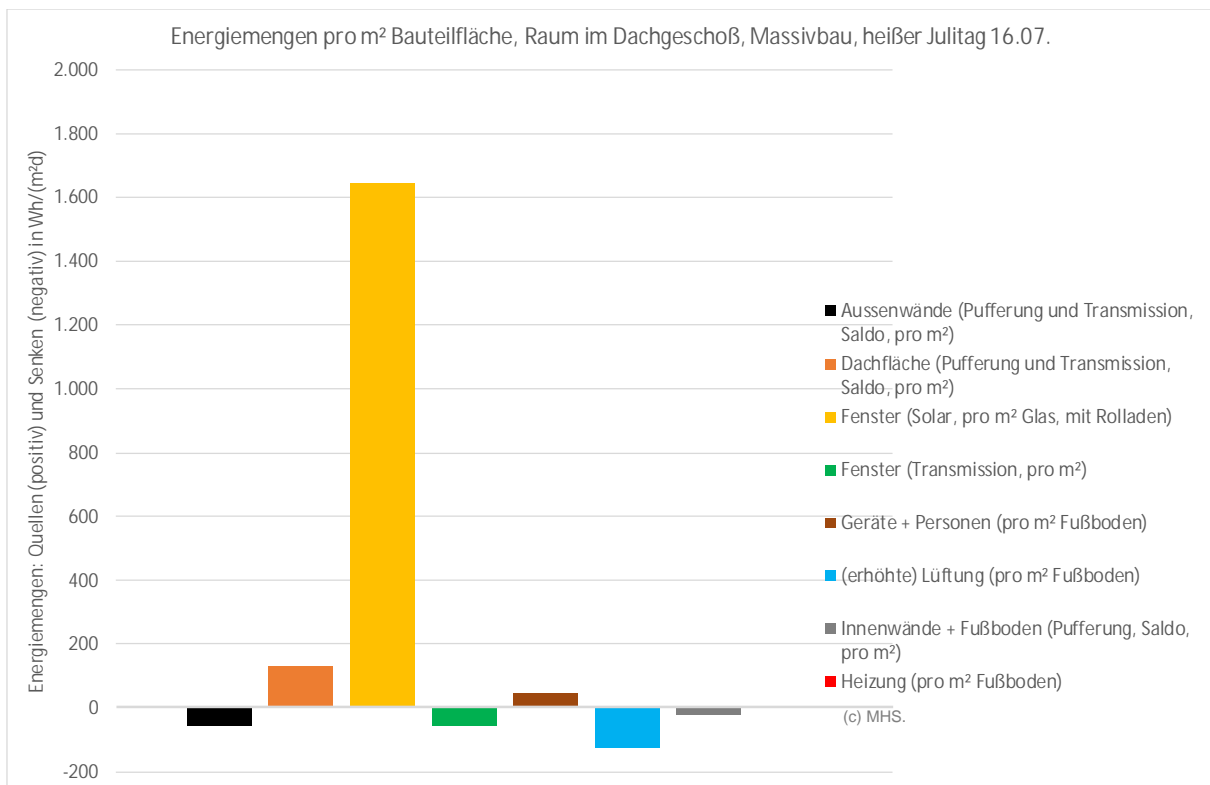


Bild 6: Energiemengen (Quellen und Senken) durch die Innenoberflächen der Bauteile aus Bild 3, pro Quadratmeter Bauteilfläche, aufsummiert über 24 Stunden von 06:00 bis 06:00 des Folgetags. Vorzeichen: positiv = in den Raum hinein.

4. Bauteilbezogene Bewertung hinsichtlich des sommerlichen Wärmeschutzes mittels Simulation; Vergleich Heindl-Verfahren und Simulation

Der Vorteil eines bauteilbezogenen Bewertungsverfahrens für den sommerlichen Wärmeschutz ist die einfache Handhabbarkeit für den Baustoff- oder Bauteilhersteller und der Aspekt, „sein“ Bauteil oder „seinen“ Baustoff unabhängig vom Rest des Gebäudes bewerten zu können. Allerdings ist die Aussagekraft begrenzt, siehe oben. Trotzdem werden im Folgenden, bei sonst gleichbleibenden anderen Randbedingungen (Fenstergröße, -orientierung, Verschattung, Standort, andere Bauteilaufbauten, Nutzerverhalten), Relativvergleiche zum Einfluss unterschiedlich aufgebauter und unterschiedlich gut gedämmter opaker Bauteile durchgeführt. Berücksichtigt werden sollte dabei jedoch, dass die Transmission durch die opaken Bauteilflächen nicht der entscheidende Wärmeintragsweg in den Raum ist.

Um das Temperaturverhalten der Bauteile realitätsnäher nachzubilden, wurden dynamische Bauteilsimulationen mit einem echten Wetter inklusive der Wärmeabgabe/-aufnahme an der Innen- und Außenseite der Bauteile durchgeführt und die Ergebnisse für verschiedene Konstruktionen miteinander verglichen. Nicht mitmodelliert wurden die anderen Einflussparameter aus dem Gebäude, d.h., es erfolgte keine thermische Gebäudesimulation oder Raumsimulation, sondern nur eine Bauteilsimulation. Damit kann sich ansatzbedingt der Verlauf der Raumlufttemperatur nicht im Rahmen der Simulation frei einstellen, sondern muss als Eingangsgröße vorgegeben werden, damit ein Wärmeübertrag zwischen Innenoberfläche und Raumluft berücksichtigt werden kann. Dazu wurde für die Raumluft im Sommer der übliche Ansatz für den Zusammenhang zwischen Innen- und Außenlufttemperatur aus DIN EN 15026 gemacht. Dieser Ansatz ist eine Mischung aus der unrealistischen Vorgabe des Heindl-Verfahrens (keine Wärmeabgabe, die Raumtemperatur dringt überhaupt nicht ein) und der Realität (Wärmetransfer zur Raumluft gemäß frei eingestellter Temperatur der Raumluft). Der Ansatz macht zwar, ähnlich wie das Heindl-Verfahren, einen Fehler hinsichtlich des thermischen und energetischen Verhaltens der Innenoberfläche. Dieser Fehler wird aber kleiner sein als beim Heindl-Verfahren mit seiner adiabaten Abschottung der Innenoberfläche. Nachdem es sich um eine Bauteilsimulation handelt, welche systembedingt nicht in der Lage ist, die raumabhängige Innentemperatur zu liefern, ist eine realitätsidentische Berechnung des thermischen und energetischen Verhaltens der Innenoberfläche nicht möglich.

In einem ersten Schritt wird 1 Dachaufbau in den 3 Orientierungen Süd, Südwest und West sowie den 3 Neigungen 30°, 45° und 60° gegenüber der Horizontalen analysiert, um den ungünstigsten Fall zu ermitteln und die weiteren Untersuchungen mit dieser Situation durchzuführen. Als ungünstigster Fall stellt sich Südorientierung mit 30° Neigung heraus.

Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf:

- Standort Potsdam des Gebäudes, inkl. Sonnenscheinintensität und Sonnenscheindauer in Stundenschritten anhand des Testreferenzjahres 2011 des DWD (korrespondierend zu DIN 4108-2:2013-02)
- nach Süden ausgerichtete Dachfläche mit 30° Neigung, unverschattet
- aufsparrengedämmtes Dach mit Ziegeleindeckung und Hinterlüftung
- Dachkonstruktionen mit den U-Werten 0,14 bzw. 0,24 bzw. 0,70 W/(m²K) und verschiedenen aktuellen Dämmstoffen (PU, Mineralwolle MW und Holzfaserdämmstoff WF)
(Bei mehreren gleichartigen Aufbauten mit gleichem U-Wert, aber unterschiedlichen Dämmstoffen, werden die Mittelwerte der Ergebnisse dargestellt.)
- Innenlufttemperatur in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur zwischen 20°C und 25°C gemäß DIN EN 15026

Bewertet und verglichen wird der gesamte Energieeintrag pro Quadratmeter durch die Innenoberfläche der opaken Dachfläche in die Innenraumluft, d.h. die Netto-Summe aus a) dem Wärmeeintrag von der Außenluft und b) dem Wärmeeintrag von der Besonnung der Dachoberfläche und c) den Wärmeein- und Wärmeausspeichervorgängen an der Innenseite des Daches im Tagesverlauf, und zwar über die betrachtete heiße Sommerwoche:

- höchste auftretende Tagessumme (24-Stunden-Summe, von Maximum zu Maximum), in der Einheit $\text{Wh}/(\text{m}^2 \cdot 24\text{h}) = \text{Wh}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$

Bild 7 zeigt die Außenlufttemperatur und die solare Zustrahlung auf die untersuchte Dachfläche während einer heißen Sommerwoche 16.-22.07. für den herangezogenen Standort Potsdam und die herangezogenen Klimadaten TRY2011.

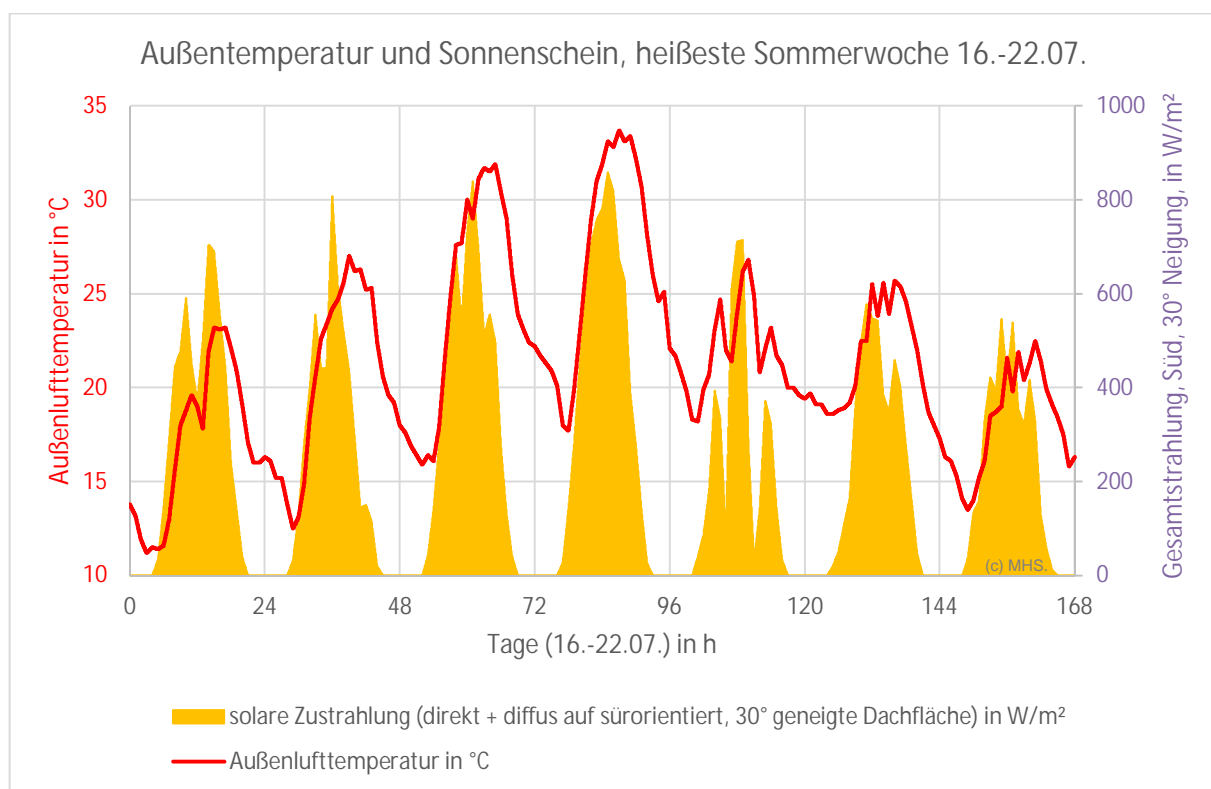


Bild 7: Außenlufttemperatur und solare Zustrahlung auf die untersuchte Dachfläche (Südorientierung, Dachneigung Neigung 30°, Standort Potsdam) während der heißesten Sommerwoche des DWD-Klimadatensatzes TRY2011.

Im folgenden Bild 8 ist der Einfluss des Dämmniveaus (U-Werte 0,14, 0,24 und 0,7 $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$) auf den Energieeintrag in den Raum durch die Innenoberfläche des Daches, pro Quadratmeter Dachfläche, dargestellt, und zwar anhand der höchsten 24-Stunden-Summe, die sich im Verlauf der Woche ergibt.

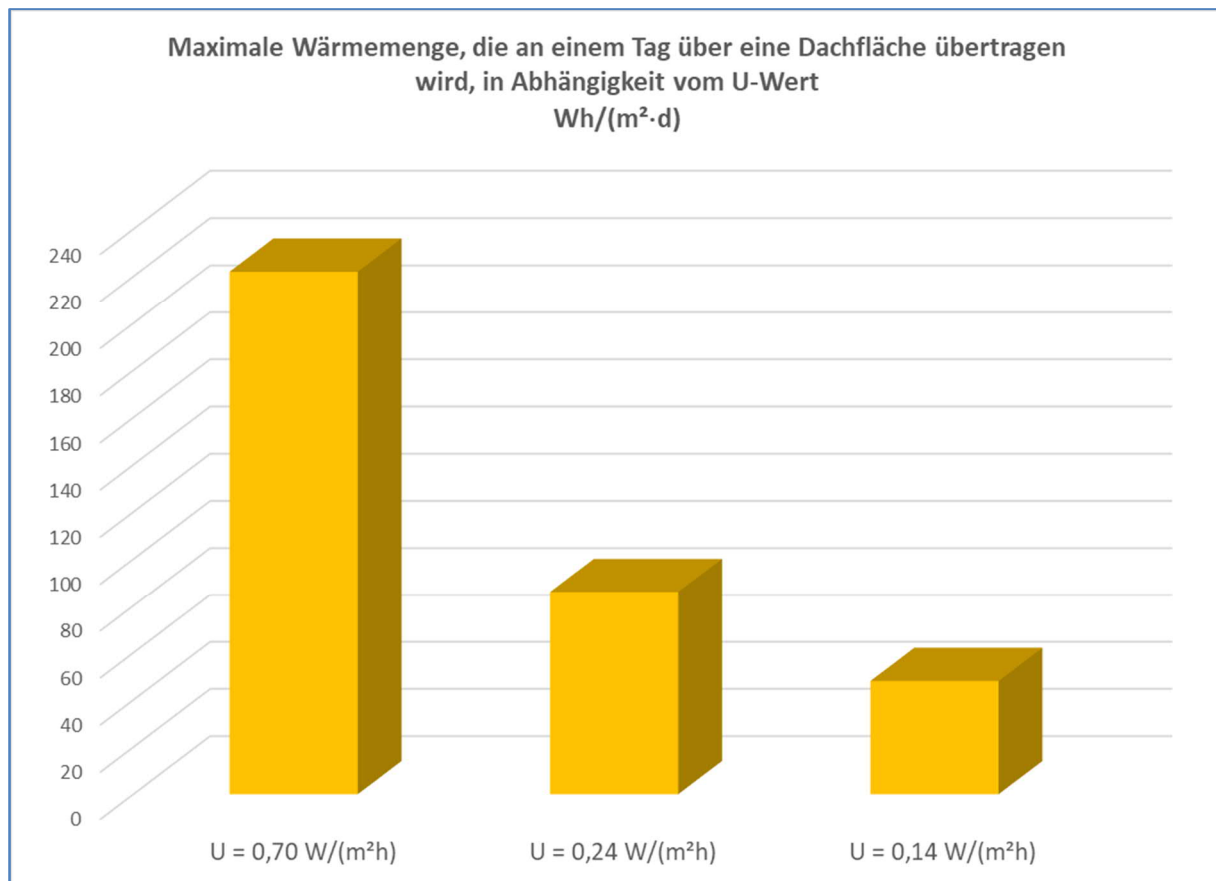


Bild 8: Höchste 24-Stunden-Summe der Energieabgabe von der Dachinnenoberfläche an die Innenraumluft innerhalb der heißen Woche 16.07.-22.07., bei verschiedenen U-Werten 0,7 bzw. 0,24 bzw. 0,14 W/(m²K) des Dachaufbaus, pro Quadratmeter Dachfläche.

Deutlich erkennbar ist, dass ein guter winterlicher Wärmeschutz auch einen guten sommerlichen Wärmeschutz bedeutet: Das Dach mit dem U-Wert 0,14 W/(m²K) hat nur eine etwa halb so hohe Energieabgabe der Dachinnenoberfläche an die Raumluft wie das Dach mit U = 0,24 W/(m²K). Auffallend ist der unangenehm große Energieeintrag durch das schlecht gedämmte Altbaudach (U = 0,7 W/(m²K)) von ca. 220 W Netto pro Quadratmeter Dachfläche über 24 Stunden.

Bild 9 zeigt die resultierenden Temperaturamplitudendämpfungen TAV bzw. die resultierenden Temperaturamplitudendämpfungen TAD = 1/TAV für die 3 Dächer, bestimmt aus den maximalen Temperatureusschlägen der Dachaußenoberfläche und der Dachinnenoberfläche um die jeweilige Mittellage, wie sie sich bei der realitätsnahen Simulation ergeben. Bild 10 enthält die sich aus der Simulation ergebenden Phasenverschiebungen zwischen den Temperaturmaxima auf der Dachaußen- und Dachinnenoberfläche.

Ebenfalls eingetragen in Bild 9 und Bild 10 sind die nach dem Heindl-Verfahren berechneten TAV_H, TAD_H und φ_H -Werte. Dies sind jene Werte, die die handelsüblichen Programme für die Bauteilkenngrößen TAV, TAD und φ angeben. Um die aus den Simulationen bestimmten Werte von denen nach dem Heindl-Verfahren zu unterscheiden, sind die Werte nach dem (theoretischen) Heindl-Verfahren mit einem Index „H“ gekennzeichnet.

Beim Vergleich der Zahlen wird deutlich, dass die Heindl-Bauteilkenngrößen so stark von den realitätsnah ermittelten Werten aus der Simulation abweichen, dass die Heindl-Werte kaum dem realitätsnahen Verhalten der Bauteile entsprechen. Die Bauteilkennwerte TAV_H, TAD_H und φ_H nach dem Heindl-Verfahren erweisen sich damit als irreführend und sind ungeeignet zur Beschreibung des tatsächlichen Bauteilverhaltens. Dies liegt den grob vereinfachenden Annahmen des Heindl-

Verfahrens zugrunde, die „seinerzeit“ erforderlich waren, weil keine Simulationsmethoden und keine Computer zur Verfügung standen. So wird nach Heindl u.a. für die Innenoberfläche angesetzt, dass diese keinen Wärmeaustausch mit der Innenluft hätte – sie wird sozusagen als zur Raumluft ideal gedämmt betrachtet. Das führt zu einem rechnerischen Temperaturanstieg der Innenoberfläche durch die von außen eindringende Wärmeenergie, der erheblich größer ist als in Wirklichkeit und in der Folge zu unzutreffenden TAV- und TAD-Werten führt. Aus heutiger Sicht sind die Werte nach dem Heindl-Verfahren weit überholt und für heutige, gut gedämmte Gebäude unbrauchbar.

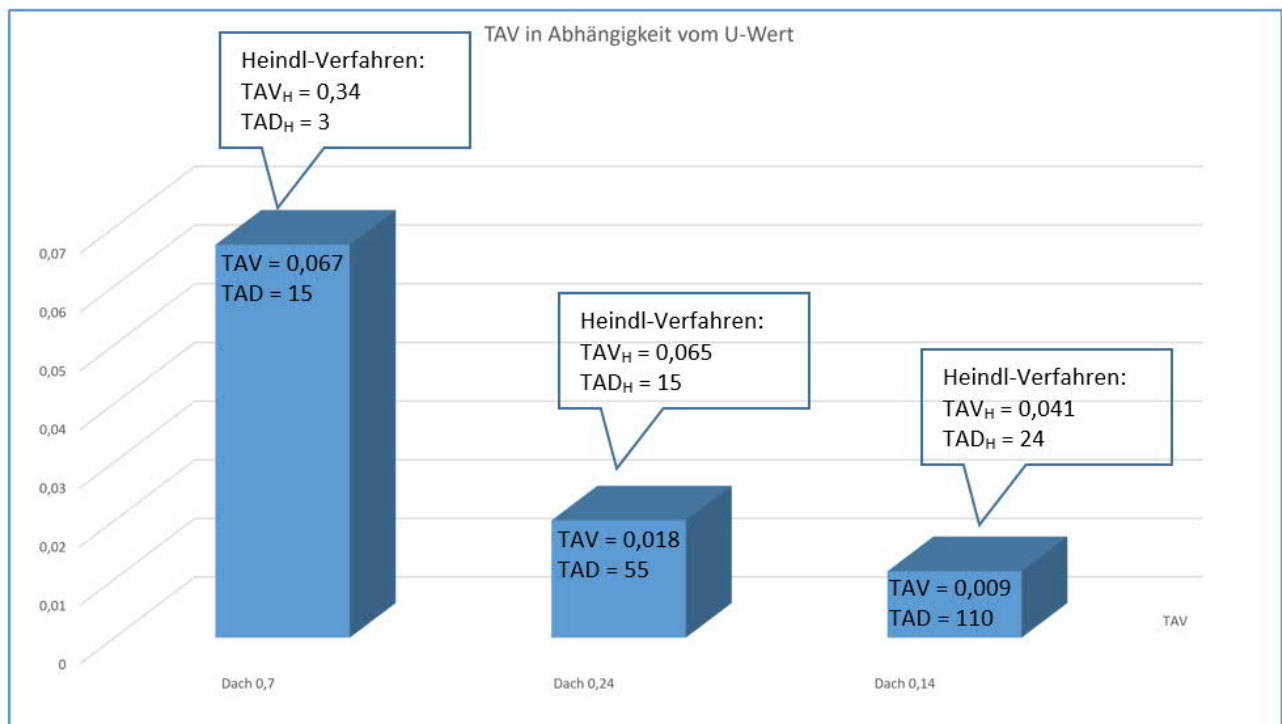


Bild 9: TAV und TAD aus der Simulation (bestimmt aus dem Temperaturverlauf von Dachaußenoberfläche und Dachinnenoberfläche; in den farbigen Balken eingetragen) für die untersuchten Dächer mit U-Werten 0,7 bzw. 0,24 bzw. 0,14 W/(m²K). Die separaten Textboxen enthalten jene Werte, die sich mit dem Heindl-Verfahren ergeben (gemäß handelsüblicher Bauteil- bzw. GEG/EnEV-Programme; Index „H“).

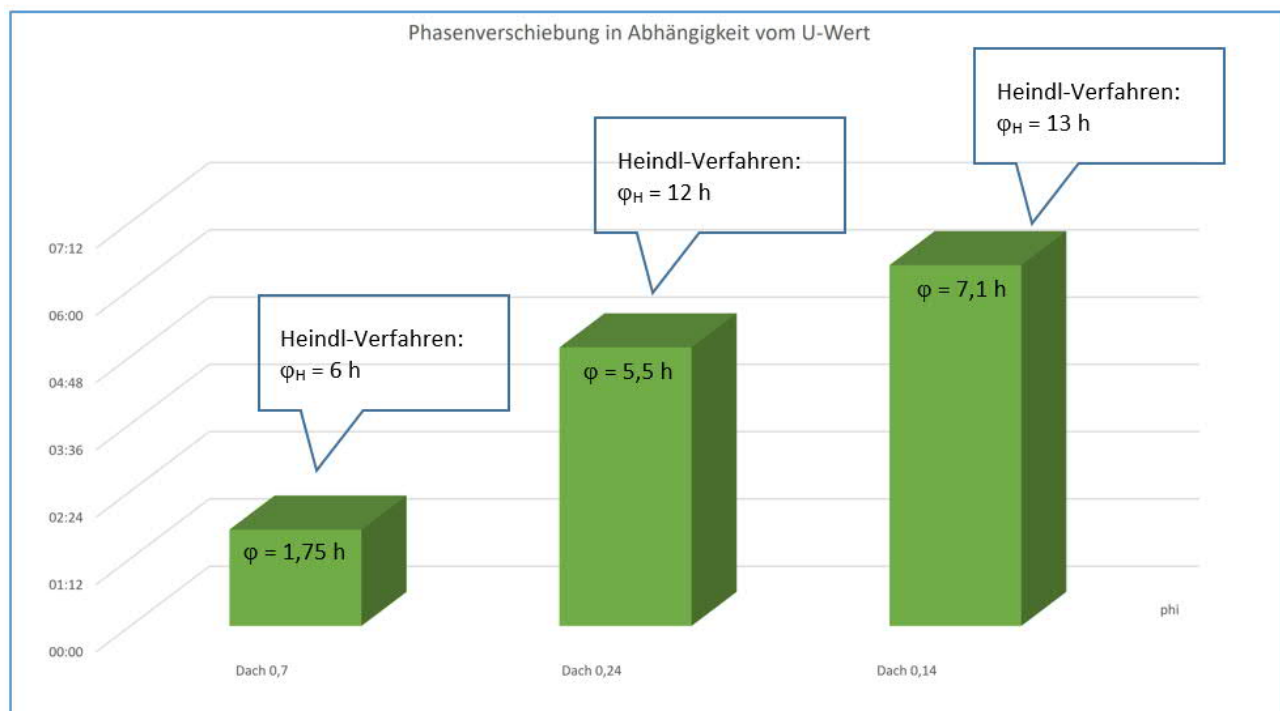


Bild 10: Phasenverschiebung φ aus der Simulation (bestimmt aus dem Temperaturverlauf von Dachaußenoberfläche und Dachinnenoberfläche; in den farbigen Balken eingetragen) für die untersuchten Dächer mit U-Werten 0,7 bzw. 0,24 bzw. 0,14 $W/(m^2K)$. Die separaten Textboxen enthalten jene Werte, die sich mit dem Heindl-Verfahren ergeben (gemäß handelsüblicher Bauteil- bzw. GEG/EnEV-Programme; Index „H“).

5. Zusammenfassung

Eine zutreffende Bewertung des sommerlichen Wärmeschutzes kann sich immer nur auf den gesamten Raum inklusive aller Energiepfade und Einflüsse (Fenster, Verschattung, Lüftung, Abwärme, Wärmespeicherfähigkeit der raumnahen Schichten) beziehen. Nachdem die Sonneneinstrahlung durch die Fenster die größte Belastung für den sommerlichen Hitzeschutz darstellt, kann der sommerliche Wärmeschutz des Raumes NICHT umfassend anhand der Bewertung einzelner opaker Bauteile des Raumes bewertet werden.

Trotzdem bestand in den 1960er Jahren der Wunsch, den sommerlichen Wärmeschutz, trotz seiner Komplexität, durch ein einfaches Bauteilverfahren beschreiben und beurteilen zu können. Dafür wurde durch Dr. Walter Heindl das sogenannte Heindl-Verfahren entwickelt, welches sich verschiedener Annahmen und Vereinfachungen bedient, um den eigentlich instationären Wärmetransportvorgang fassen zu können. Seinerzeit hatten die Außenbauteile einen im Vergleich zu heute sehr schlechten Wärmeschutz und die Fenster waren damals viel kleiner. Durch das Heindl-Verfahren werden signifikante Unterschiede zwischen einzelnen Baukonstruktionen für opake Bauteile ausgewiesen. Allerdings leisten in einem Raum mit Fenstern und inneren Wärmequellen die heutzutage gut gedämmten opaken Bauteile relativ zu den anderen Energiequellen für den Raum nur einen geringen Energiebeitrag und sind nicht mehr entscheidend für die empfundene Temperatur im Raum. Damit haben auch die Ergebnisgrößen TAD, TAV und φ bei heutigen, gut gedämmten Gebäuden keine praktische Bedeutung mehr für die empfundene Raumtemperatur.

Mittels Raumsimulationen eines Aufenthaltsraumes im Dachgeschoss eines Massivbaus werden Temperaturverlauf, Wärmeeinträge und Wärmeausträge des Raumes berechnet und die einzelnen Energiequellen und -senken miteinander verglichen. Der größte absolute Energieeintrag in den Raum erfolgt durch das Fenster, selbst bei Annahme eines tagsüber durchgehend geschlossenen,

außenliegenden Rollladens als Sonnenschutz. Bezogen auf die jeweilige Bauteilfläche tritt die Dominanz der Glasfläche des Fensters hinsichtlich des Energieeintrags noch deutlicher hervor. Gut erkennbar in den Ergebnissen ist der Beitrag der Wärmespeicherung der massiven Bauteile und der große Beitrag der erhöhten Nachtlüftung zur Wärmeabfuhr aus dem Raum.

Durch Bauteilsimulationen werden – trotz der im Vergleich zu Raumsimulationen beschränkten Aussagekraft – Relativvergleiche zum Einfluss unterschiedlich aufgebaute und unterschiedlich gut gedämmter opaker Bauteile, anhand des Testreferenzjahres für den Standort Potsdam und mit üblichen Annahmen für den Verlauf der Raumtemperatur in Abhängigkeit von der Außentemperatur, durchgeführt. Mithilfe der realitätsnah durch Simulationen bestimmten Verläufe der Außen- und Innenoberflächentemperaturen verschiedener Dachaufbauten werden die dort vorhandenen Bauteilkennwerte TAV, TAD und φ rechnerisch ermittelt und mit jenen Werten verglichen, die sich nach dem Heindl-Verfahren mit seinen vereinfachenden Annahmen für die untersuchten Bauteile ergeben. Es zeigt sich, dass TAV, TAD und φ nach dem Heindl-Verfahren deutlich von den korrespondierenden Größen aus der Simulation abweichen.

Zusätzlich zur Feststellung, dass die bauteilbezogenen Größen TAD, TAV und φ bei heutigen, gut gedämmten Gebäuden ohnehin keine praktische Bedeutung mehr für die empfundene Raumtemperatur haben, ist festzuhalten, dass die Werte für diese Größen bei Ermittlung mit dem Heindl-Verfahren stark von den realitätsnah ermittelten Werten aus der Simulation abweichen. TAV, TAD und φ nach dem Heindl-Verfahren sind ungeeignet zur Beschreibung des tatsächlichen Bauteilverhaltens und für heutige, gut gedämmte Gebäude unbrauchbar zur Bewertung des Hitzeschutzes.


Martin H. Spitzner / 2021-04-26