

Thermische Selektivität äusserer Gebäudeoberflächen und Energieverluste bei dynamischen Umweltbedingungen: ein Rechenmodell

Autor(en): **Wiss, Hardy P.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **96 (1978)**

Heft 50

PDF erstellt am: **26.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-73800>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Thermische Selektivität äusserer Gebäudeoberflächen und Energieverluste bei dynamischen Umweltbedingungen

Ein Rechenmodell

Von Hardy P. Weiss, Zürich

Viele der heute diskutierten Massnahmen zur Verminderung des Energiekonsums für Heizzwecke sind mit *grossen Investitionen* verbunden und *nur auf Neubauten* anwendbar. Die hier in Theorie und Experiment untersuchte Möglichkeit der Verwendung *selektiver äusserer Gebäudeoberflächen* lässt sich auf verschiedene Arten realisieren. Ein Anstrich als eine Möglichkeit zur Erzeugung von Selektivität, wie auch seine Erneuerung und Reinigung können zu den Unterhaltsarbeiten eines Gebäudes eingestuft werden. Wie dies i.a. bei der Einführung neuer Techniken im Bauwesen besonders ausgeprägt ist, müssen auch in bezug auf die Wirkung selektiver Oberflächen noch viele Vorurteile, Einwände und Tabus beseitigt werden. Die heute sich ausbreitende Verwendung *selektiv bedampfter Fensterscheiben* und die als konventionell zu bezeichnende Technik der Fabrikation *metallischer Fassadenelemente* als erste Grundlage zur Herstellung selektiver Schichten, lassen jedoch auf eine sich künftig ändernde Haltung hoffen. Nicht nur teure Solarkollektoren nützen unsere natürliche Energiequelle Sonne zu Heizzwecken.

Der Autor möchte hier weder auf die Problematik der Realisation selektiver Oberflächen, noch auf die zu überwindenden Hürden für ihre Einführung im Bauwesen eingehen. Vielmehr soll gezeigt werden, welche Möglichkeit der *Energieeinsparung* — um ein Modewort zu verwenden — uns heute noch offensteht. Andeutungsweise sei hier auf im Handel erhältliche Farben wie auch auf Produkte zur gezielten chemischen «Schwärzung» oder Oxidation metallischer Oberflächen hingewiesen.

Problemstellung, Zielsetzung

Als passive Massnahme zur Steuerung des Energieflusses sind Anstriche auf Gebäuden fast überall anwendbar. Als passiv muss ein Anstrich deshalb bezeichnet werden, weil er,

einmal angebracht, in seiner Wirkung nicht mehr verändert werden kann. Der vorliegende Beitrag soll sich mit der Auswirkung der thermischen Selektivität der äusseren Oberfläche von Gebäuden auf die Energieströme durch die Gebäudemauern befassen.

Bei der Verwendung einer selektiven Oberfläche muss man sich über die *Richtung der Beeinflussung der Energiebilanz*, d.h. über die Frage *Heiz- oder Kühlenergieverminderung* im klaren sein, denn einmal angebracht, kann die Wirkung nicht mehr verändert werden.

Zum *Begriff der Selektivität*: Alle Materialien haben die Eigenschaft, mit der einfallenden Wärmestrahlung zu reagieren, in dem sie solche absorbieren, emittieren, reflektieren und transmittieren. Aufgrund der stoffspezifischen Eigenschaften nehmen bei verschiedenen Wellenlängen unterschiedliche prozentuale Anteile der einfallenden Wärmestrahlung an diesen Reaktionen teil. Das Material trifft also z.B. insofern eine Auswahl (Selektion), als es nicht bei jeder Wellenlänge denselben Anteil der eingestrahelten Energie absorbiert. Den prozentualen Anteil der absorbierten Strahlungsenergie in Funktion der Wellenlänge nennt man *Absorptionsspektrum* (Bild 1). Für jede der oben genannten Reaktionen besteht also ein solches Spektrum, wobei zwischen den verschiedenen Spektren physikalische Beziehungen bestehen.

Im Zusammenhang mit der Selektivität, interessiert zunächst der *Energiebetrag*, der herrührend von einer externen Strahlungsquelle, in deren Wellenlängenbereich absorbiert wird; aber es interessiert auch die emittierte Energie im Spektrum der Eigentemperatur. Im vorliegenden Fall ist die *externe Strahlungsquelle* die *Sonne* oder die *diffuse Himmelsstrahlung*. Beide Strahlungsquellen können in erster Näherung durch ein *Schwarzkörperspektrum* dargestellt werden, wobei die externe Quelle einem Schwarzkörper von $T = 6000 \text{ K}$ und der Gebäudeteil z.B. $T = 300 \text{ K}$ (Eigentemperaturspektrum) entsprechen soll. Als Mass für die Selektivität verwendet man das Verhältnis der Absorptionszahl der Oberfläche bezüglich der externen Quelle zu deren Emissionszahl im Eigentemperaturspektrum. Dieses Verhältnis ist für jede Art Oberfläche verschieden (Bild 2).

Zur Beurteilung der Selektivität eines Stoffes muss man den in einem bestimmten Wellenlängenbereich von der Quelle abgegebenen Energieanteil kennen. Durch eine Integration des Schwarzkörperspektrums von der Wellenlänge $\lambda = 0$ (μm) bis zu einem bestimmten Wert λ kann bekanntlich der in diesem Bereich ausgesandte Energieanteil ermittelt werden. Die auf diese Weise gefundenen Werte können als *Funktionsleiter* in ein Absorptions- oder Emissionsspektrum eingezeichnet werden (Bild 1).

Die Beträge der absorbierten und emittierten Energien sind abhängig vom Absorptions- und Emissionsspektrum der Oberfläche und von der spektralen Intensitätsverteilung der externen Strahlungsquelle bzw. des Eigentemperaturspektrums. Diese Energien sind bei jeder Wellenlänge proportio-

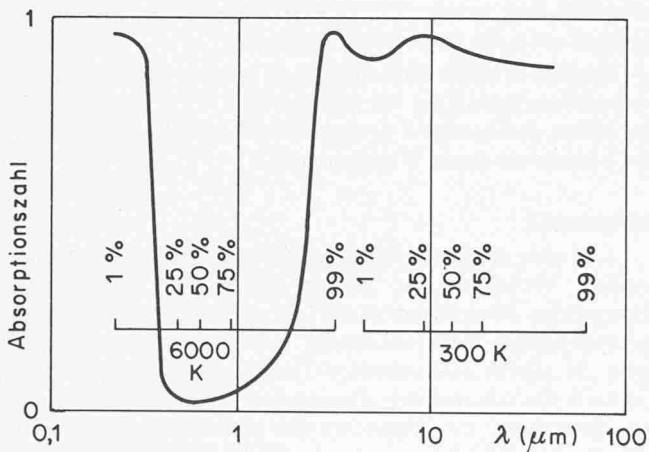


Bild 1. Normale spektrale Absorptionszahl von Titandioxid. Eingezeichnet sind die prozentualen Energieabgaben zweier schwarzer Strahlungsquellen von 6000 K und 300 K (vergleiche Text)

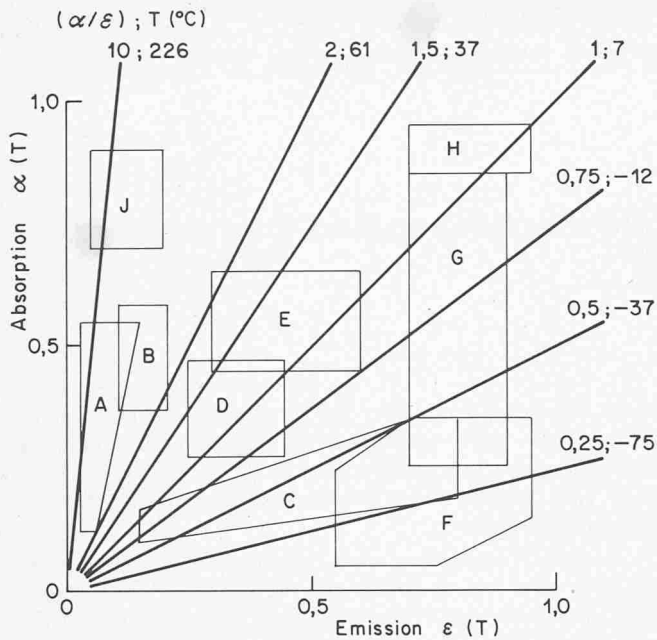


Bild 2. Einfluss des Verhältnisses (α/ϵ) auf die Gleichgewichtstemperatur $T(^{\circ}\text{C})$ einer Kugel im Vakuum, die mit der Solarkonstanten beschienen wird. Charakterisierung verschiedener Oberflächenarten. A polierte Metalle B Metalle C bedampfte Metalle D metallische Farben E sandgestrahlte Metalle F weisse Farben, metallisierte Kunststoffe G diverse Farben H schwarze Farben J selektive Solarabsorber

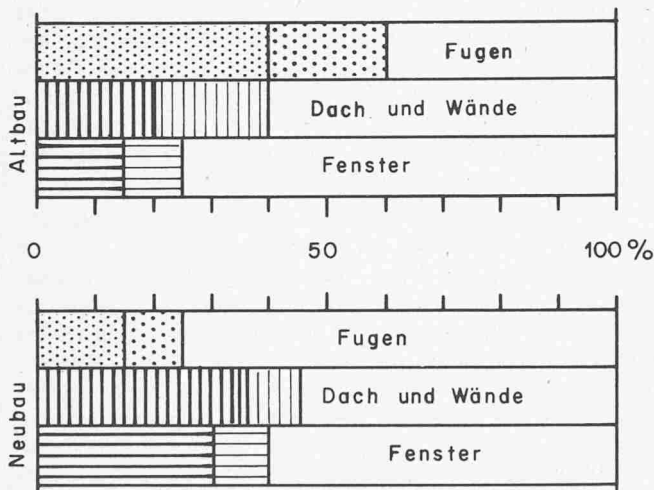


Bild 3. Prozentuale Energieverluste für Durchschnittsbauten. Die Hauptanteile sind: Lüftungsverluste durch Fugen; konvektive und Abstrahlungsverluste durch Dächer, Wände und Fenster

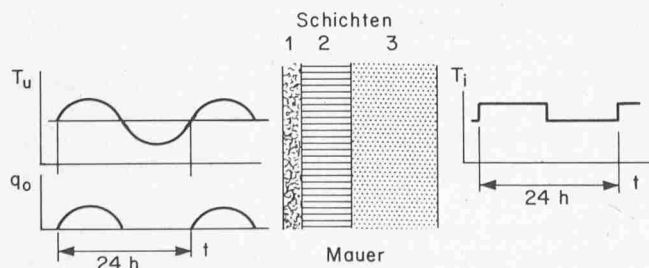


Bild 4. Schematische Darstellung eines Mauerelementes und der Randbedingungen für die Einstrahlung q_0 und die Temperaturen T_i innen und T_u aussen in Funktion der Zeit t

nal zur spektralen Intensität, wobei als Proportionalitätskonstante das Absorptions- bzw. Emissionsspektrum auftritt.

Ein Vergleich dieser Aussage mit den in Bild 1 eingezeichneten prozentualen Energieanteilen zeigt eine geringe Absorption im Spektrum der externen Strahlungsquelle und eine hohe Emission im Eigentemperaturspektrum. Im vorliegenden Fall weist die Selektivität einen Wert von etwa 0,16 auf.

Als altbekanntes Anwendungsbeispiel sei auf die *weiss getünchten Häuser in südlichen Ländern* verwiesen. Die in diesen Anstrichen verwendeten Oxide, Sulfate und Karbonate usw. weisen i.a. im Bereich des Sonnenspektrums ein niedriges Absorptionsvermögen auf, während die Emission im Eigentemperaturbereich einen hohen Wert annimmt. Somit kann ganzjährig der Energiefluss ins Hausinnere vermindert werden. Die Selektivität hat einen niedrigen Wert (kleiner eins).

Primär wird hier also der Energiedurchtritt je Quadratmeter und Tag durch ein beliebig aufgebautes Mauerelement gesucht. Im allgemeinen handelt es sich dabei in unseren Breiten um Heizenergieverluste. Sekundär sollen die Einflüsse auf diese Grösse durch den äusseren Wärmeübergang, die maximale Sonneneinstrahlung und die Nachtabenkung der Raumtemperatur bestimmt werden.

Annahmen, Beschränkungen

Die physikalischen Eigenschaften der in einzelnen Schichten aufgebauten Gebäudewand werden als homogen betrachtet. Weder Veränderungen durch Alterung noch durch Feuchtigkeit sollen untersucht werden. Die auf der äusseren Oberfläche angenommene selektive Schicht wird als so dünn betrachtet, dass sie das thermische Verhalten des Mauerwerks bezüglich Wärmeleitung und Wärmespeicherung nicht verändert.

Die in diesem Beitrag aufgeführten Resultate gelten nur für eine *unendlich ausgedehnte Wand*; so werden also Einflüsse von benachbarten Fenstern, wie auch Eckpartien nicht berücksichtigt. Das *mathematische Modell*, das zur Beurteilung der Wandelemente dient, ist *eindimensional, instationär*. Der *Wandaufbau* darf aus *beliebig vielen Schichten beliebiger Eigenschaften* bestehen.

Die Aussagen über die Energieverluste gelten also nur losgelöst von den Verlusten durch die Fenster und der Leckage durch undichte Stellen. Bei der Beurteilung des Gesamtenergiehaushaltes eines Gebäudes müssen daher die aufgeführten Resultate mit der Bedeutung des Maueranteils gewichtet werden. Man muss dieses Vorgehen bei der Beurteilung der Resultate im Auge behalten, denn gerade die genannten Einflüsse können trotz idealem Aufbau des Wandelementes einen entscheidenden Einfluss auf den Gesamtenergiehaushalt haben (Bild 3). Etwas überspitzt: bei offenen Fenstern nützt die beste Isolierung nichts.

Die *klimatischen Umwelteinflüsse* werden durch ein *Wettermodell* berücksichtigt. Es versteht sich von selbst, dass die mit diesen Rechnungen gewonnenen Resultate nicht besser sein können als dieses Wettermodell.

Wettermodell

Um eine möglichst repräsentative Beurteilung des thermischen Verhaltens der Wände zu erhalten, werden im vorliegenden Simulationsmodell die wichtigen instationären Umwelteinflüsse mitberücksichtigt. Zu diesen zählen in erster Linie die *täglich schwankenden Temperaturen der Aussenluft* wie auch die *schwankende Einstrahlung durch die Sonne*. Der *Bewölkungsgrad*, der besonders die nächtliche Abstrahlung beeinflusst, wird *nicht einbezogen*. Eine grobe Berücksichtigung erfolgt durch die Anpassung der Strahlungstemperatur der Atmosphäre.

Die Verwendung eines Wettermodells soll die Rechnungen nicht allzusehr komplizieren, sondern prinzipiellen Aufschluss über den Einfluss der verschiedenen Parameter geben. Als besondere Eigenschaft dieses Modells ist die *Periodizität aller instationären Grössen* zu erwähnen. Dies bedeutet, dass in der Simulation ein Mauerelement während mehrerer Tage demselben Wetter ausgesetzt wird. Es werden also *quasi-stationäre Zustände* untersucht. Ein feineres Wettermodell könnte durchaus verwendet werden, doch wird dadurch die Anzahl der Parameter gross.

Im Gegensatz zur weit verbreiteten Betrachtungsweise wurde hier *keine Sonnenlufttemperatur* eingeführt. Die Temperatur der Umgebungsluft sowie die Temperatur der strahlenden Atmosphäre und die Intensität der einfallenden Sonnenenergie (maximale Amplitude entsprechend der Orientierung der Oberfläche) wurden separat berücksichtigt.

Einer konstanten Umgebungstemperatur wird eine sinusförmige Schwankung überlagert. Die Periode dieser Schwankung beträgt 24 Stunden. Das Temperaturmaximum kann gegenüber 12 Uhr mittags um eine bestimmte Zeit verschoben werden (Bild 4). Die Strahlungstemperatur der Atmosphäre wird als konstant betrachtet.

Die einfallende Sonnenenergie (W/m^2) wird nach einem Kosinusetz verändert. Das Maximum der Einstrahlung wird mittags 12.00 Uhr erreicht. Der Sonnenaufgang ist auf 6.00 Uhr festgesetzt und kann bei gleichbleibendem Tagesmaximum der Sonneneinstrahlung um eine gewisse Zeit vorder oder zurückverlegt werden, um den jahreszeitlichen Schwankungen gerecht zu werden (Bild 4).

Die Orientierung des betrachteten Wandelementes bezüglich des Weltraumes und seiner unmittelbaren Umgebung, d.h. das Raumwinkelverhältnis, muss durch die maximale Amplitude der einfallenden Sonnenintensität berücksichtigt werden.

Mathematisches Modell

Zur Lösung des beschriebenen Problems muss die *ein-dimensionale, instationäre Wärmeleitungsgleichung* gelöst werden. Im vorliegenden Fall geschah dies mittels eines numerischen Verfahrens. Es bestehen keine Einschränkungen bezüglich der Anzahl Schichten des Mauerwerks und deren physikalischen Eigenschaften. Die Randbedingungen können ein beliebig instationäres Verhalten aufweisen. Als Anfangsbedingung wird eine konstante Mauertemperatur durch alle Schichten vorgegeben. Diese konstante Anfangstemperatur ist willkürlich gewählt worden und entspricht hier der Aussentemperatur. Es wird sozusagen ein *natürlicher Einschwingvorgang* durchgerechnet. Die *Randbedingungen* auf der *Aussen-seite* sind durch das *Wettermodell*, die *Wärmeübergangszahl* und die *Oberflächeneigenschaften* gegeben. Auf der *Innenseite* sind sie durch die *Wärmeübergangszahl* und die *Raumtemperatur* bestimmt. Die letztere hat im allgemeinen ebenfalls ein instationäres Verhalten, indem während der Nacht die Temperatur um einen bestimmten Betrag gesenkt wird. Bild 4 stellt die Verhältnisse schematisch dar.

Resultate

In den vorangegangenen Ausführungen wurden die Voraussetzungen besprochen, unter denen die folgenden Resultate ermittelt wurden. Es sei nochmals in Erinnerung gerufen, dass es hier um prinzipielle qualitative Aussagen gehen soll.

Bild 5 zeigt den täglichen Energieverlust eines Wandelementes bei zwei verschiedenen Wärmeübergangszahlen an der äusseren Oberfläche in Funktion der maximalen Sonneneinstrahlung (Amplitude). Als Parameter ist die Selektivität η aufgetragen. Wo nicht anders bezeichnet, wurde sowohl für

das Wetter, wie auch für den Temperaturverlauf im Rauminnern, der sog. Standardfall, der als Referenz gewählt wurde, verwendet. Bei diesem beträgt die mittlere Aussentemperatur 273 K und die Temperaturschwankung über den Tag 5 K, wobei das Tagesmaximum um 13.00 Uhr erreicht wird. Die Einstrahlung beginnt um 6.00 Uhr und endet um 18.00 Uhr. Die Strahlungstemperatur der Atmosphäre beträgt 250 K. Die Temperatur im Rauminnern beträgt zwischen 6.00 und 18.00 Uhr 293 K und während der Nachtzeit (übrige Zeit) 289 K. Die Wärmeübergangszahl auf der Rauminnenseite wie auch aussen beträgt $20 (W/m^2 K)$.

Das genannte Diagramm zeigt bei allen Wärmeübergangszahlen an der äusseren Oberfläche eine eindeutige Abnahme des Energieverlustes mit zunehmender Selektivität. Die heutige Technik erlaubt, Selektivitäten bis zum Wert von etwa dreissig zu erreichen. Diese Spitzenwerte kommen jedoch für den betrachteten Anwendungsfall nicht in Frage und sind auch nicht nötig, wie das Diagramm deutlich zeigt. Ein Wert der Selektivität von sechs scheint hingegen unter Berücksichtigung der zu ergreifenden Massnahmen für eine Langlebigkeit der Schicht realisierbar. Als interessantes Resultat ist der evidente Einfluss bei Selektivitäten von kleiner als eins zu werten. Diese wären also unbedingt zu vermeiden.

Die Beeinflussung durch die Selektivität nimmt mit zunehmender Einstrahlungsintensität und abnehmenden konvektiven Verlusten zu. Deshalb wurden die später besprochenen Messungen an einer Nordfassade durchgeführt, um den auch bei geringer Einstrahlung vorhandenen Einfluss nachzuweisen. Die Selektivität von unendlich entspricht dem theoretischen Grenzwert.

Das der Berechnung in Bild 5 zugrunde gelegte Wandelement wird immer wieder als Referenz verwendet und kann dadurch charakterisiert werden, dass die *isolierende Schicht zwischen zwei gleich grossen Betonschichten liegt*. Bild 6 zeigt den Einfluss der Selektivität auf die Temperaturamplitudendämpfung. Dieser Einfluss ist positiv zu werten, da bei identischer äusserer Wandtemperatur die innere Wandtemperatur bei höherer Selektivität weniger schwankt, was sich letztlich in einer erhöhten Behaglichkeit auswirkt. Diese

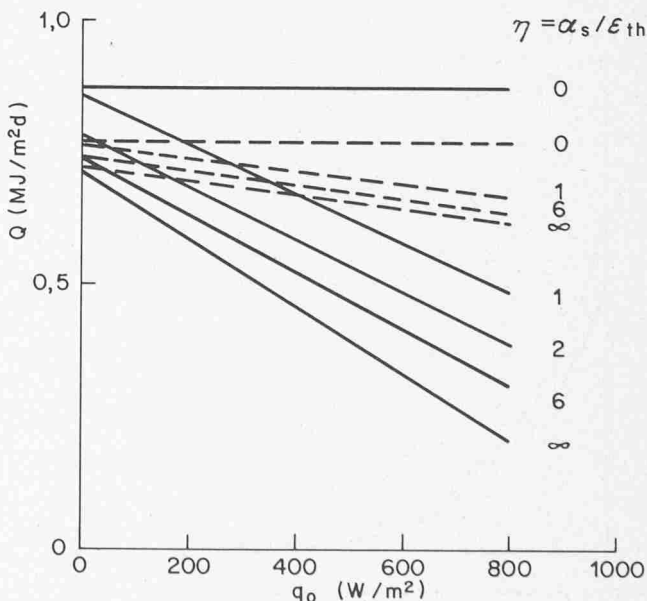


Bild 5. Täglicher Energieverlust Q eines Wandelementes, bestehend aus zwei Betonschichten mit dazwischenliegender Isolation, in Funktion der maximalen täglichen Einstrahlung q_0 . Parameter ist die Selektivität η . Wärmeübergangszahl aussen: — $\alpha_{konv} = 20 W/m^2K$, - - - $\alpha_{konv} = 100 W/m^2K$

Aussage hat insofern nur eine relative Bedeutung, als die Temperaturamplitudendämpfung in erster Linie vom Wandaufbau abhängt und nicht von den Oberflächeneigenschaften. Im übrigen übt auch das Raumtemperaturprogramm (Nachtabsenkung) und die Möblierung im weitesten Sinne einen Einfluss aus, so dass eine Beurteilung praktisch individuell erfolgen muss. Aus diesem Grunde wurde der in Bild 6 aufgezeichnete Verlauf nur auf eine angenommene Besetzungszeit des Raumes von 7.00 und 18.00 Uhr bezogen.

In Bild 7 sind die Energieverluste dargestellt, wie sie bei unterschiedlicher Dicke des schweren Anteils des Mauerwerks entstehen. Bezeichnenderweise nimmt der Energieverlust mit abnehmender Mauerstärke zu und die Behaglichkeit ab. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die Werte für die Temperaturamplitudendämpfung in Bild 6 nicht eingezeichnet, weisen aber einen analogen Verlauf auf, wobei bei grösserer Dicke die Kurven nach unten und bei geringerer Dicke nach oben verschoben sind.

Aus Bild 7 ist der unterschiedliche Einfluss der schweren Maueranteile bei gleicher Einstrahlung und unterschiedlicher Selektivität nicht ersichtlich, ist aber vorhanden. Wird der Energieverlust der leichtesten Wand als Bezugswert angenommen, so beträgt die Reduktion des Energieverlustes bei $q_0 = 0$ von der leichtesten zur schwersten Konstruktion 7,3% bei $\eta = 1$ und 8,4% bei $\eta = 6$ und von der leichtesten Konstruktion bei $\eta = 1$ zur schwersten Konstruktion bei $\eta = 6$ gar 20,2%. Der letzte Wert nimmt bei einer Einstrahlung von 800 W/m^2 auf 42% zu, während bei konstanter Selektivität und anderer Einstrahlung die Verhältnisse etwa unverändert bleiben.

Wie wir schon in Bild 5 gesehen haben, hat die äussere Wärmeübergangszahl einen wesentlichen Einfluss auf den Energieverlust einer Wand. Bild 8 zeigt diesen Einfluss für die theoretischen Grenzen der Selektivität von null bzw. unendlich. Eine Selektivität von null bedeutet ausschliessliche Eigenemission und keine Solarabsorption; umgekehrt sind die Verhältnisse bei der Selektivität unendlich. Im ersten Fall erkennt man eine Verminderung des Energieverlustes durch einen erhöhten äusseren konvektiven Wärmeübergang. Diese Tatsache ist durch eine Unterkühlung der äusseren Oberfläche unter die Umgebungstemperatur bedingt, so dass

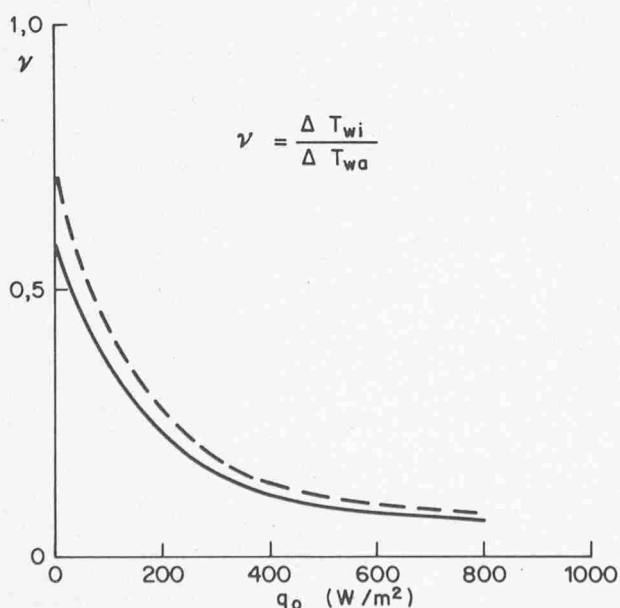


Bild 6. Temperaturamplitudendämpfung bezogen auf die Besetzungszeit des Raumes in Funktion der maximalen täglichen Einstrahlung q_0 . Als Parameter tritt die Selektivität η auf: — $\eta = 6$, - - - $\eta = 1$

durch eine erhöhte Konvektion der Wand aus der Umgebung Energie zugeführt wird.

Bei einer hohen Selektivität dagegen befindet sich die Wand auf einer höheren Temperatur als die Umgebung, womit die Wärmeverluste durch eine starke Konvektion vergrössert werden.

Für die energetische Rechtfertigung einer selektiven Beschichtung der äusseren Oberfläche eines Mauerwerks wird hier als Kriterium die Energieeinsparung herangezogen, die dadurch resultiert, dass ein Anstrich der Selektivität 1 (grauer Körper) durch einen solchen der Selektivität 6 ersetzt wird. Die Reduktion des Energieverlustes wird bei verschiedenen maximalen Einstrahlungsintensitäten berechnet. In Bild 9 ist die prozentuale Verminderung des Energieverlustes ΔQ bei Verbesserung der Selektivität vom Wert 1 auf 6 bei verschiedenen mittleren Umgebungstemperaturen eingezeichnet. Daraus ersieht man, dass bei einer Temperatur von 258 K entsprechend minus 15°C eine Energieeinsparung zwischen 3,5 und 10,5% bei 0 und 800 W/m^2 Einstrahlungsmaximum möglich ist. Bei einer Temperatur von 15°C ist schon ab 300 W/m^2 Einstrahlungsmaximum ein Energieüberschuss vorhanden. Diese Auswertung zeigt deutlich die energetische Wirksamkeit einer selektiven Oberfläche sowohl bei relativ grossen Fensteranteilen, als auch Temperaturverhältnissen wie sie ganzjährig in den dichter besiedelten Teilen unseres Landes vorkommen.

Bei einer Jahresmitteltemperatur von beispielsweise 0°C und den repräsentativen Verlusten nach Bild 3 könnten die bestehenden Energieverluste bei 400 W/m^2 Einstrahlungsmaximum im Durchschnitt bei Altbauten um etwa 6%, bei Neubauten um etwa 8% vermindert werden. Die entsprechenden Zahlen lauten für eine Durchschnittstemperatur von 10°C 17% und 23%. Bei der Betrachtung dieser Prozentzahlen muss man sich vor Augen halten, dass die Verluste absolut gesehen natürlich bei den Altbauten grösser sind.

Als weitere interessante Erkenntnis kann der Umstand gewertet werden, dass die prozentuale Verminderung des Energieverlustes unabhängig von der Wärmedurchgangszahl ist. Als Parameter tritt in diesem Falle nur die Intensität der Einstrahlung auf. Dies bedeutet, dass die Verminderung der Energieverluste durch Erhöhung der Selektivität um so bedeutender ist, je höher die Wärmedurchgangszahl ist, d.h. die Verluste um so mehr verringert werden, je schlechter eine Wand isoliert ist. Dies bestätigt wiederum die Tatsache: das Stopfen grosser «Löcher» bringt am meisten.

Messungen

Ohne Experimente wären die bisher besprochenen Simulationsresultate nutzlos. So ging es hier im wesentlichen darum, eine qualitative Bestätigung zu finden.

Die Versuche wurden an einem einfachen, im wesentlichen einschichtigen Wandelement durchgeführt. Drei Elemente mit unterschiedlichen äusseren Strahlungseigenschaften, sonst aber völlig identisch, wurden gleichzeitig gemessen. Bild 10 zeigt die Temperaturverläufe an den Oberflächen, an der Wandinnenseite wie auch den Verlauf der Umgebungstemperatur. Getestet wurden als Oberflächen eine blanke Aluminiumfolie, ein matter Lack, der gemäss Spektrum des Herstellers eine Selektivität von eins aufweist und eine nach Literaturangaben chemisch behandelte Metalloberfläche mit einer Selektivität von etwa sechs. Die Wärmeverluste über die in Bild 10 dargestellte Periode verhalten sich bezüglich der vorher genannten Reihenfolge wie 0,85:1:0,83 mit den entsprechenden Selektivitäten von etwa 4,5:1:6.

Die Tendenz dieser Messungen bestätigen eindeutig die Rechnungen. Die gemessene Einsparung zwischen den Selektivitäten

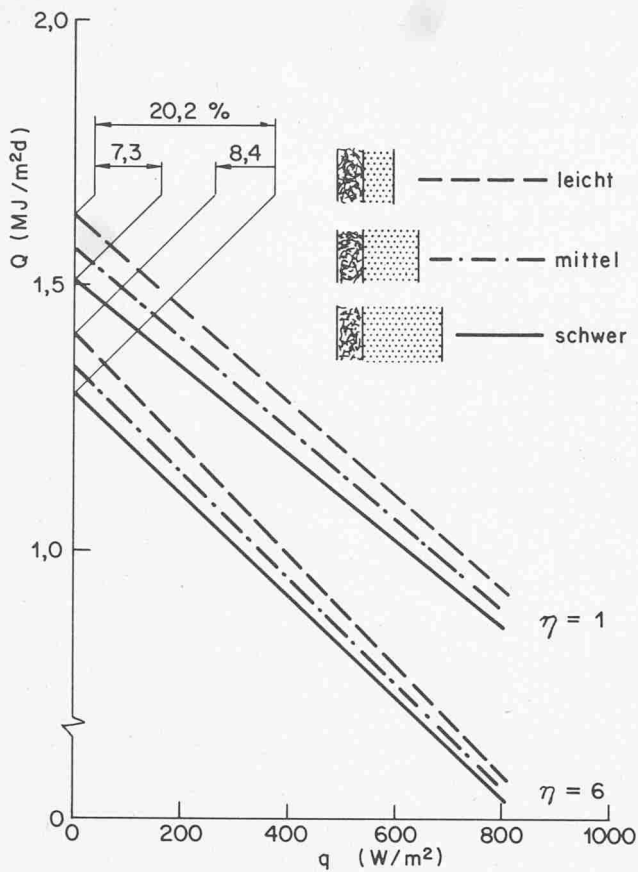


Bild 7. Einfluss des schweren Maueranteils bei verschiedenen Selektivitäten auf den Energieverlust Q in Funktion der maximalen täglichen Einstrahlung q_0

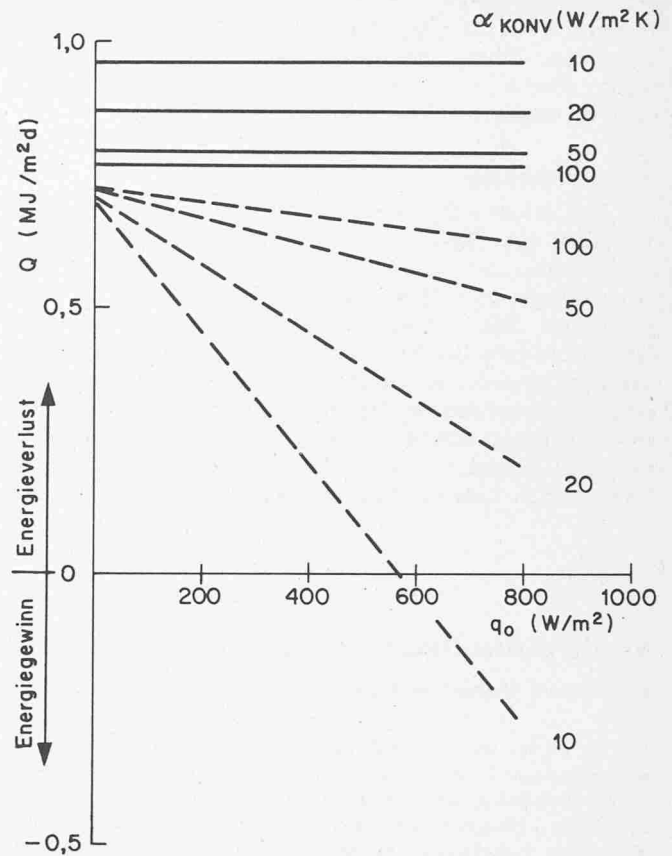


Bild 8. Einfluss der äusseren Wärmeübergangszahl α_{KONV} auf den Energieverlust Q in Funktion der maximalen täglichen Einstrahlung q_0 für die theoretischen Grenzen der Selektivität: $\eta = 0$ —, $\eta = \infty$ - - -

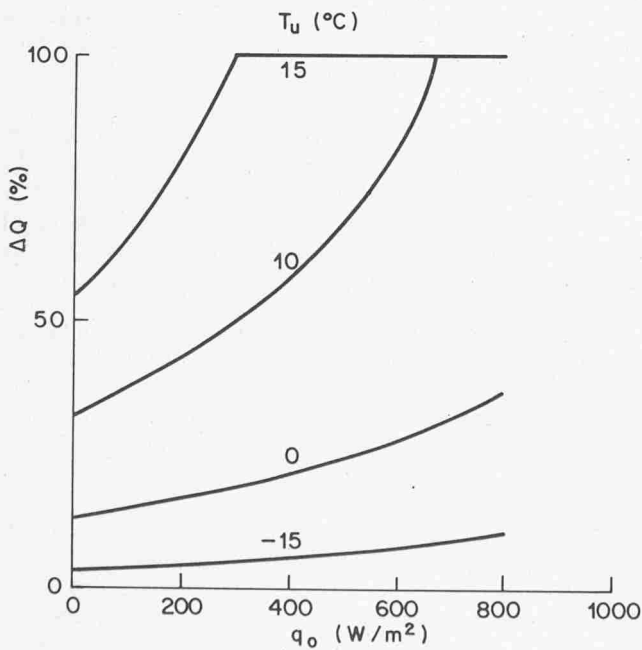


Bild 9. Reduktion des Energieverlustes ΔQ bei Veränderung der Selektivität von $\eta = 1$ auf $\eta = 6$ in Funktion der maximalen täglichen Einstrahlung q_0 für verschiedene mittlere Umgebungstemperaturen. Klima- und Raumtemperaturprogramm sonst wie im Standardfall

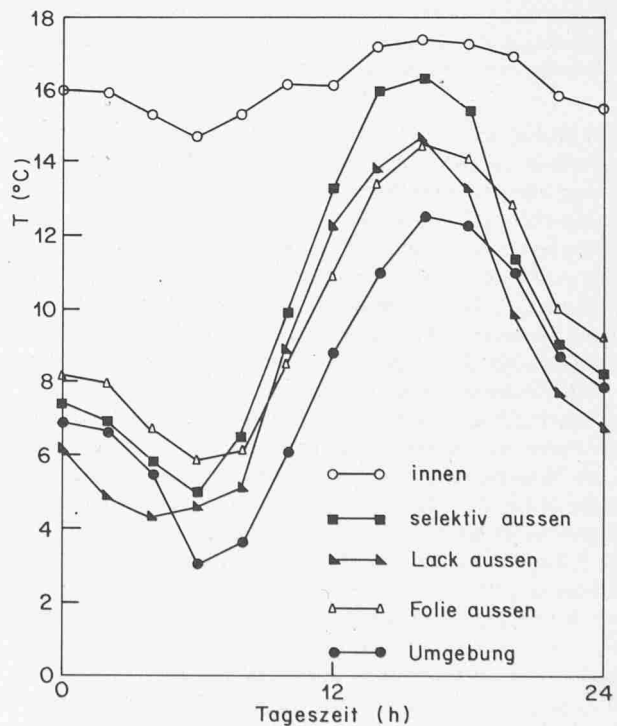


Bild 10. Tagesverlauf der Temperaturen T an der Innen- und Aussen-seite eines experimentellen Wandelementes

tivitäten $\eta = 1$ und $\eta = 6$ liegt bei 15%, während die entsprechende Einsparung gemäss Bild 9 etwa 25% betragen würde. Hierbei wurden allerdings verschiedene Wetterverhältnisse bei unsicheren Selektivitätswerten verglichen.

Schlussbemerkung

Das mit dem Simulationsmodell untersuchte dynamische Verhalten von Gebäudemauern unter Einfluss verschiedener Selektivitäten der äusseren Oberfläche zeigt eine noch weitgehend ungenutzte Möglichkeit zur Beeinflussung des Energiestromes. Die rechnerisch und experimentell ermittelte Grössenordnung der Verminderung von Gebäudewärmeverlusten in unseren Breiten durch die dargestellte Massnahme verdient ein vermehrtes Augenmerk, sind es doch viele Einzelmassnahmen, welche unsere landesweite Energiebilanz in Zukunft verbessern sollen. Als Besonderheit sei die im Gegensatz zu vielen anderen Massnahmen stehende Realisa-

tionsmöglichkeit auch an bestehenden Gebäuden unterstrichen, wobei in einer ersten Phase an solche mit metallischen Fassaden zu denken ist. Einer zweiten Phase wären die übrigen Fassaden wie auch die Dächer vorbehalten.

Literaturverzeichnis

William L. Wolfe: «Handbook of Military Infrared Technology», 1965.

Rietschel/Raiss: «Heiz- und Klimatechnik», 1968.

CCI-Symposium: «Zum Fenster hinausheizen – Energiesparen durch kontrollierte Lüftung», 1978.

Zeitschrift für Wärmeschutz, Kälteschutz, Schallschutz, Brandschutz, 1976.

Adresse des Verfassers: Dr. H.P. Weiss, Lehrbeauftragter für «Wärmestrahlungsprobleme im Ingenieurwesen» an der ETHZ. c/o Innovent Zürich AG, Lavaterstr. 45, 8027 Zürich.

Wohnhausdecken ohne obere Bewehrung

Von Farouk Mohamed, Basel

Im Sinne einer Sparmöglichkeit werden die Grenzen für die Anwendung von Wohnhausdecken ohne obere Bewehrung abgesteckt. Durch Einhaltung eines Sicherheitsfaktors von gut 2,0 gegen die Beton-Biegezugfestigkeit werden die Wahrscheinlichkeit und das Ausmass einer Rissebildung infolge Negativmomente beschränkt. Mit dieser Festlegung werden auch die Grenzspannweiten definiert, bis zu denen auf die obere Armierung verzichtet werden kann. Diese empfohlenen Grenzspannweiten reichen von 3,1 m für einachsige gespannte, zweifeldrige 16-cm-Decken aus BH300 bis zu 5,3 m für zweiachsige gespannte, neunfeldrige 20-cm-Decken aus BS400. Eine Abschätzung der Deckendeformation ergab eine grösste zu erwartende Rissbreite von etwa 0,3 mm über der Zwischenstützung, was normalerweise unbedenklich ist. Die problematische Querkraftübertragung in einem durch die ganze Deckenstärke durchgehenden Schwindriss wird durch das Fehlen der oberen Armierung zwar etwas verschlechtert, die untere Armierung allein kann jedoch nie durch die Gebrauchslasten abgesichert werden und kann die Querkraft allein mit der Dübelwirkung zum Beton übertragen. Eine kritische Literatur-Diskussion zeigt schliesslich, dass Versuche zur Momentenumlagerung bei durchlaufenden Platten

eher für als gegen den Verzicht auf die obere Armierung im abgesteckten Rahmen sprechen.

Die Wirtschaftlichkeit der Decken ohne obere Armierung wird an den Armierungskosten bei drei verschiedenen Decken quantitativ gezeigt. Die direkte Armierungskosten-Ersparnis liegt demnach im Durchschnitt aller Wohnhausdecken bei 25%, d.h. etwa 2.25 Fr./m² Deckenfläche. Noch dazu kommen die indirekten Gewinne, die aus der Bauzeit-Verkürzung und der Erleichterung der übrigen Arbeiten erzielt werden. Diese lassen sich nur von Fall zu Fall quantitativ abschätzen und können gleich gross wie die direkte Einsparung ausfallen, was eine Gesamteinsparung von 4.50 Fr./m² ergibt. Dies bedeutet einerseits eine 10%ige Senkung der Wohnhausdecken-Kosten und andererseits eine Totalersparnis von etwa 14 Mio Franken jährlich bei einer Wohnungsflächen-Produktion in der Schweiz von 3,2 Mio m². Durch weitere Untersuchungen kann das erzielbare Resultat noch verbessert werden, da die Wirtschaftlichkeitsgrenze der Decken ohne obere Bewehrung weiter liegt als die hier empfohlenen Grenzspannweiten, wie die Darstellung der Armierungskosten in Funktion der Spannweite zeigt.

Im Wohnungsbau wird die Deckenstärke oft grösser gewählt als statisch erforderlich, u. a. wegen der Schallsolation. Zudem wird noch ein minimaler Bewehrungsgehalt empfohlen [1] bzw. vorgeschrieben [2]. Daher kann die Feldarmierung bei kleineren Spannweiten kaum reduziert werden, auch wenn man die Negativmomente – aus der Durchlaufwirkung oder Randeinspannung – voll mit oberer Armierung deckt. Aber auch bei mittleren Spannweiten ist es unter Umständen wirtschaftlicher, auf die Deckung der Negativmomente ganz zu verzichten und die volle Feldarmierung für einfache Lagerung einzulegen; damit wird die arbeitsintensive und wegen den Stützbügeln teurere obere Armierung völlig vermieden [3]. Allerdings steht dies im Widerspruch zur SIA-Norm und zu anerkannten Arbeiten [4 bis 7]. Dennoch wird auf die obere Armierung in der Praxis nicht selten verzichtet – vor allem bei Spannweiten bis zu 3–4 m. Trotzdem konnte ausser [3] kein Hinweis in der Fachliteratur gefunden werden, der die völlige Weglassung der oberen Armierung von Wohnhausdecken in bestimmten Fällen befürwortet. Das ist in gewissem Sinne eine Kluft zwischen Norm und Praxis. Wenn man aber bedenkt, welche volkswirtschaftliche Ersparnis die allgemeine Anwendung von nur unten armierten Wohnhausdecken mit sich bringt, so wird klar, dass es ein Bedürfnis unserer Zeit «des Sparens» ist, die Bedingungen für die Anwendung solcher Decken fachgerecht zu formu-

lieren. Damit wird auch ein erster Schritt getan, um die erwähnte Kluft zwischen Norm und Praxis zu überbrücken. In diesem Sinne sollen diese Ausführungen verstanden werden. Es sei noch festgehalten, dass man sich hier nur auf diejenigen normal belasteten Decken des Wohnungsbaues bezieht, bei denen ausschliesslich Positivmomente das Gleichgewicht gewährleisten können und sollen, d.h. bei denen Negativmomente nur als Folge des monolithischen Charakters des Stahlbetonbaues wegen statisch unnötiger Kontinuität oder Randeinspannung auftreten. Damit sind Auskragungen und dergleichen ausgeschlossen. Zur Hauptsache sind also zwei- und vierseitig gelagerte, ein- und mehrfeldrige Decken gemeint.

Die Minimalbewehrung

Sie hat den Zweck, einen schlagartigen spröden Bruch mit genügender Sicherheit auszuschliessen, der durch sofortiges Zerreißen der Armierung unter der Risslast des Betons beim Übergang vom homogenen zum gerissenen Zustand erfolgen kann [1, 6, 7]. Dieser «Mindest-Armierungsgehalt» hängt daher vom effektiv vorhandenen Betonquerschnitt ab, wächst mit dem Verhältnis der Beton-Biegezugfestigkeit zur Armierungszugfestigkeit und kann für die Betonqualität BH 300 mit dem Armierungsstahl III oder IV mit 0,10 bis 0,15% angegeben werden. Die SIA-Norm [2] schreibt i. a. 0,15% als Mindest-