Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt

Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine

Band: 102 (1984)

Heft: 21

Artikel: Spannungen in der Verputzschicht von Wärmedämmsystemen an Aussenwänden

Autor: Epple, Hansjörg

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-75464

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 10.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Spannungen in der Verputzschicht von Wärmedämmsystemen an Aussenwänden

Von Hansjörg Epple, Dübendorf

Über die Spannungsverhältnisse im Verputz von Aussenwärmedämmsystemen ist noch wenig bekannt. Dies scheint erstaunlich, da die Funktionstüchtigkeit der Systeme vorwiegend von der Rissefreiheit des Verputzes abhängt. Misserfolge bleiben in den Anfängen der Entwicklung von Wärmedämmsystemen nicht aus. Vielfach mussten auf empirischem Weg, aufgrund von Schadenfällen, allmählich die notwendigen Massnahmen zur Sicherstellung eines rissfreien Verputzes getroffen werden. In diesem Beitrag sollen nun die theoretischen Grundlagen über die Spannungsverhältnisse im Verputz von Aussenwärmedämmsystemen aufgezeigt werden. Es wird gezeigt, dass die gemachten Erfahrungen mit der Theorie übereinstimmen.

Die verputzte Aussenwärmedämmung

Die ersten verputzten Aussenwärmedämmungen kamen bereits vor mehr als zwei Jahrzehnten zur Anwendung. Zu Beginn der siebziger Jahre, als der Ruf zum energiebewussten Bauen immer lauter wurde, erlebte die *Aussenwärmedämmung* einen eigentlichen Aufschwung. Zahlreiche neue Aussenwärmedämmsysteme kamen zu dieser Zeit in den Handel. Sie erreichten auch schnell einen beachtlichen Marktanteil. Dieser Erfolg gründet im wesentlichen auf die aus bauphysikalischer Sicht in unseren Breitengraden günstige Anordnung der Wärmedämmung an den Aussenseiten der tragenden Konstruktionsteile, die meist als *Wärmespeicher* dienen. Ausserdem müssen bei der *Gestaltung der Fassaden* in ästhetischer Hinsicht kaum Einbussen in Kauf genommen werden und als besonderer Vorzug erweist sich *bei Neubauten die geringe Aussenwandabmessung.* Als Nachteil muss die noch *kurze Erprobungszeit* und die noch *ungewisse Lebensdauer* von Aussenwärmedämmsystemen angesehen werden. Die Lebensdauer des Aussenwärmedämmsystems ist insbesondere davon abhängig, wie lange die Verputzschicht ausreichenden Schutz gegen in die Wärmedämmung eindringende Feuchtigkeit bietet. Treten Risse im Verputz auf, ist der Feuchtigkeitsschutz an wetterbeanspruchten Fassaden nicht mehr gewährleistet und das ganze Aussenwärmedämmsystem ist in hohem Masse gefährdet. Um die Funktionstüchtigkeit der Aussenwärmedämmung über Jahre zu sichern, ist deshalb vordringlich die Rissbildung im Verputz zu verhindern. Dies ist nur bei Kenntnis der auftretenden Spannungen im Verputz mit angemessener Sicherheit möglich.

Alle heute üblichen, verputzten Wärmedämmsysteme sind gemäss Bild 1 aufgebaut. Die Wärmedämmung wird auf die Aussenwand geklebt oder mechanisch befestigt und anschliessend mit einem gewebearmierten Mörtel verputzt. Als letzter Auftrag erfolgt im allgemeinen ein eingefärbter Deckputz. Systemabhängig sind die Materialqualitäten der Wärmedämmstoffe und des Verputzes. Die Dicke der Wärmedämmung liegt aufgrund von bauphysikalischen Erfordernissen zwischen 20 und 120 mm, während die Schichtdicke des Verputzes je nach System 3 bis 10 mm beträgt.

Beanspruchungen

Temperaturänderungen

Der auf die Wärmedämmung aufgebrachte Verputz ist einer *grossen thermischen Beanspruchung* ausgesetzt. Direkt besonnte Verputze erwärmen sich sehr rasch. Die Temperaturen im Verputz steigen dabei je nach Wandorientierung und Farbe auf 50 bis 70 °C. Die Abkühlung kann im Sommer beispielsweise bei einem Gewitterregen wiederum sehr rasch erfolgen. Im Winter wird der Verputz durch sehr tiefe Aussentemperaturen beansprucht.

Wird angenommen, dass auf der Raumseite des Bauteils konstante Lufttemperaturen von 20 °C herrschen, erzeugen die hohen Temperaturänderungen auf der Aussenseite entsprechend hohe Temperaturunterschiede im Bauteil. Bei Aussenwärmedämmungen treten diese Temperaturunterschiede in den äussersten Zonen, insbesondere in der Verputzschicht auf.

Temperaturunterschiede im Bauteil haben immer Spannungen zur Folge. Bei hohen Aussentemperaturen wird die

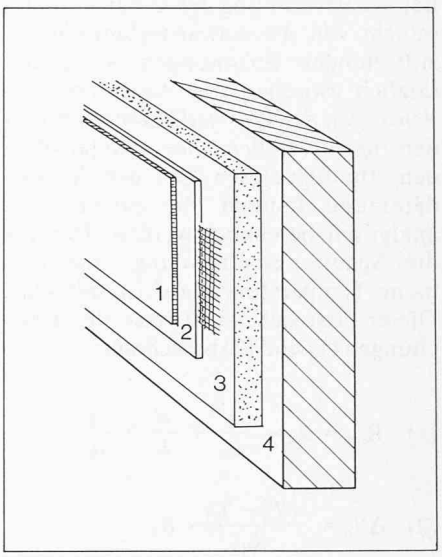


Bild 1. Aufbau des Aussenwärmedämmsystems. 1 Deckputz und 2 Einbettungsmasse mit Armierungsgewebe: Verputzschicht, 3 Wärmedämmung, 4 Mauerwerk (tragende Wand)

temperaturbedingte Ausdehnung des Verputzes von der Wärmedämmung behindert. Erzeugt werden dabei Druckspannungen im Verputz und Zugspannungen in der Wärmedämmschicht. Umgekehrt entstehen bei tiefen Aussentemperaturen oder auch bei schneller Abkühlung Zugspannungen im Verputz und Druckspannungen in der Wärmedämmschicht. Kritisch für die Rissbildung im Verputz sind die Zugspannungen, die bei tiefen Aussentemperaturen oder schneller Abkühlung auftreten. In einer Untersuchung [1], deren Resultate in [2] veröffentlicht wurden, zeigte es sich, dass die *Zugspannungen* im Verputz bei tiefen Aussentemperaturen im Winter wesentlich höher liegen als bei schneller Abkühlung von besonnten Verputzflächen. Für die vorliegende Untersuchung wurden deshalb tiefe Aussentemperaturen infolge Winterbedingungen zugrunde gelegt.

Schwinden der Wärmedämmung

Viele Wärmedämm-Materialien haben die Eigenschaft, sich im Verlauf der Zeit zu verkürzen. Diese als Schwinden bezeichnete Verkürzung ist auf chemische Vorgänge und auf die Austrocknung von durchnässten Materialien zurückzuführen. Das Schwinden der Wärmedämmstoffe bewirkt über Fugen der Wärmedämmung Zugspannungen in der Verputzschicht. Im Gegensatz zu den temperaturbedingten Beanspruchungen erfolgt der Spannungsaufbau beim Schwinden langsam.

Berechnungsgrundlagen

Analytische Lösung

Bei der Berechnung der in der Verputzschicht von Aussenwärmedämmungen auftretenden Spannungen ist grundsätzlich zwischen den *Bereichen über den Fugen der Wärmedämmplatten* und den *fugenlosen Bereichen* zu unterscheiden. Im fugenlosen Teil der Wärmedämmung können die Spannungen analytisch berechnet werden. Der für die Spannungsberechnung angenommene Temperaturverlauf ist stationär. Dieser lässt sich leicht nach den Gleichungen (1) und (2) berechnen:

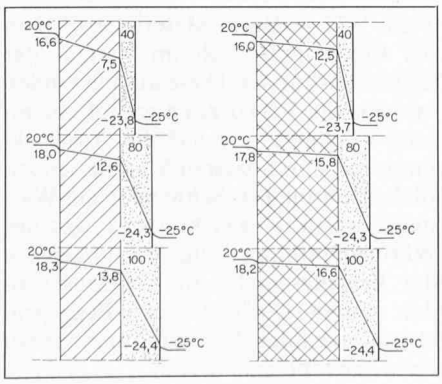
$$(1)\quad R_{tot} = R_n = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_a}$$

$$(2)\quad \Delta\vartheta_n = \frac{(T_a - T_i)}{R_{tot}} \cdot R_n$$

wobei

- R_n: Wärmedurchlasswiderstand [m²K/W] der Einzelschicht n
- $\Delta\vartheta_n$: Temperatursprung in der Schicht n
- T_a: Aussentemperatur
- T_i: Innentemperatur
- α: Wärmeübergangszahl [W/m²K]
- d: Schichtdicke [m]
- λ: Wärmeleitzahl [W/mK]

Anhand dieser Formeln erhält man bei einer Aussentemperatur von −25 °C und einer Innentemperatur von 20 °C für Beton- oder Backsteinwände, die mit einer Aussenwärmedämmung unterschiedlicher Dicke versehen sind, den in Bild 2 eingetragenen Temperaturverlauf. Für die Berechnung der Spannung muss noch die Temperaturverteilung im spannungslosen Zustand, das heisst im Einbauzustand, bekannt sein. Als Einbautemperatur wird für diese Untersuchung 20 °C angenommen. Damit wird für die Berechnung der Spannungen eine aussenseitige Abkühlung um 45 K berücksichtigt.



Die Berechnung der Spannungsverteilung in einem schmalen Streifen des Bauteils erfolgt nach der Gleichung (3).

$$(3)\quad \sigma(x) = -E(x) \cdot \left[\omega(x) \cdot T(x) + \frac{x-a}{R} - \varepsilon_m\right]$$

- $\sigma(x)$: Spannung an der Stelle x
- x: Graph über Wanddicke
- a: neutrale Axe der Wand
- $E(x)$: Elastizitätsmodul an der Stelle x
- $T(x)$: Temperatur an der Stelle x
- $\omega(x)$: Wärmeausdehnungskoeffizient
- R: Krümmungsradius
- ε_m: mittlere Dehnung

Da das Temperaturprofil nebeneinanderliegender Bauteilstreifen gleich ist, können die Spannungen aus der Querrichtung der Bauteilstreifen unter Annahme einer Querdehnungszahl berücksichtigt werden. Bei einer Querdehnungszahl von 0,3 vergrössern sich die Spannungen der einzelnen Streifen um den Faktor 1,3.

Der Einfluss der Geschossdecken, der Innenwände sowie der Einfluss der Wandsteifigkeiten auf den Spannungsverlauf in der Verputzschicht ist in Diagramm 1 dargestellt. Die *Berechnung der Verputzspannungen* für die in Bild 2 angegebenen *Wandquerschnitte* erfolgt unter vier Bedingungen:

1. Unter der ersten Bedingung kann sich die tragende Wand frei verformen. Die Krümmung und die Längenänderung der tragenden Wand sind nicht behindert. Die Verputzspannungen sind in Diagramm 1 strichpunktiert aufgezeichnet.
2. Unter der zweiten Bedingung wird die Verkürzung der Ausdehnung der Aussenwand durch die Geschossdecken behindert, das heisst $\varepsilon_m = 0$ angenommen. Unter dieser Voraussetzung ergeben sich bei unterschiedlichen Dicken der Wärmedämmung die in Diagramm 1 als ausgezogene Kurve eingetragenen Spannungen im Verputz.
3. Unter der dritten Bedingung wird die Verbiegung $1/R$ der Aussenwand durch die Innenwände behindert. Der Verlauf der Spannungen im Verputz ist in Diagramm 1 gestrichelt eingezeichnet.
4. Als vierte Bedingung wird der Untergrund starr angenommen, also keine Verformung des Mauerwerks zugelassen. In Diagramm 1 ist der sich daraus ergebende Spannungsverlauf im Verputz mit «starr» bezeichnet.

Aus Diagramm 1 ist ersichtlich, dass der Einfluss der Verformungsbehinderung des Untergrundes auf die Verputzspannung gering ist. Die Verputzspannungen bei behinderter Verkürzung von Beton- und Backsteinwänden ($\varepsilon_m = 0$) liegen etwa 8 bis 10% tiefer als bei vollständiger Verformungsbehinderung (starr). Mit Ausnahme der Backsteinwand ohne Verformungsbehinderung aber behinderter Verbiegung nehmen die Spannungen im Verputz bei ansteigender Dicke der Wärmedämmung leicht zu. Ebenfalls grösser sind die Verputzspannungen bei zunehmender Behinderung der tragenden Wände.

Bei den analytischen Betrachtungen werden im Abschnitt «Berechnete Spannungen in der Verputzschicht bei Temperaturbeanspruchung» die Spannungen unter behinderter Verkürzung der Betonwand, also unter der zweiten Bedingung, und für unterschiedliche Dicken der Wärmedämmung berechnet.

Numerische Lösung

Über den Fugen der Wärmedämmplatten ist eine analytische Berechnung der Spannungen im Verputz nicht mehr möglich. Hierzu sind numerische Verfahren wie beispielsweise die *Methode der Finiten Elemente* geeignet. Für die vorliegenden Untersuchungen ist das Programm *Flash* vom *Institut für Baustatik und Konstruktion* der *ETH Zürich* verwendet worden.

Die Berechnung erfolgt unter der Annahme eines ebenen Verzerrungszustandes. Diese Annahme ist näherungsweise zutreffend, da die Längenausdehnungen des Wärmedämmsystems gegenüber der Dicke um ein Mehrfaches grösser sind und die Temperatur in allen senkrecht zu einer Wärmedämmplattenfuge liegenden Ebenen gleich ist. Der Temperaturverlauf entspricht Bild 2. Der Untergrund der Wärmedämmung wird entsprechend der vierten Bedingung starr angenommen. Das zugrundeliegende System ist in Bild 3 aufgezeichnet. Unter diesen Voraussetzungen erhält man, wie aus Diagramm 1 bekannt ist, etwas zu hohe Spannungen in der Verputzschicht. Um den Spannungen aus der Querrichtung Rechnung zu tragen, ist wiederum eine Querdehnungszahl von 0,3 eingeführt worden.

Bild 2. Temperaturverteilung im Wandquerschnitt aus Backsteinmauerwerk, 150 mm dick (links), und Beton, 200 mm dick (rechts), mit jeweils 40, 80 und 100 mm Wärmedämmung bei 20 °C Innentemperatur und −25 °C Aussentemperatur. Wärmeleitzahlen: Beton λ = 1,8 W/mK, Backstein λ = 0,45 W/mK, Wärmedämmung λ = 0,035 W/mK, Verputz λ = 0,9 W/mK. Übergangszahlen: innen α_i = 8 W/m²K, aussen α_a = 24 W/m²K

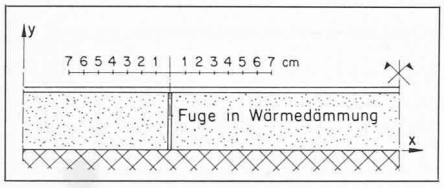
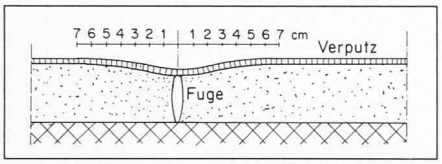


Bild 3. Modell für die Berechnung mit der Methode der finiten Elemente. Annahmen: ebener Verzerrungszustand, Wand als Untergrund starr, Verputzaufbau homogen und einschichtig

Bild 4. Verformung der Wärmedämmung und des Verputzes bei kalten Aussentemperaturen und infolge des Schwindens der Wärmedämmung



Berechnete Spannungen in der Verputzschicht bei Temperaturbeanspruchung

Spannungsverlauf in Abhängigkeit des Elastizitätsmoduls und des Wärmeausdehnungskoeffizienten

Die im Verputz auftretenden Spannungen sind stark abhängig vom Elastizitätsmodul und Wärmeausdehnungskoeffizient der Verputzschicht. Wie Diagramm 2 für den fugenfreien Bereich zeigt, steigen die Spannungen bei wachsendem Elastizitätsmodul oder Wärmedehnungskoeffizient linear an. Diagramm 3 zeigt die Verputzspannungen in Abhängigkeit des Elastizitätsmoduls der Wärmedämmschicht über den Fugen von Wärmedämmplatten. In diesem Diagramm ist der numerisch berechnete Spannungsverlauf in der Verputzschicht in Funktion des Abstandes von der Fuge aufgezeichnet. Dabei beschreibt die durchgezogene Kurve den Verlauf der Spannungen an der Verputzunterseite, die gestrichelte Linie den Verlauf an der Verputzoberfläche. Die wesentlich höheren Spannungen an der Verputzunterseite zeigen an, dass sich der Verputz über der Fuge, wie in Bild 4 angedeutet, nach innen verbiegt und zwar verstärkt bei zunehmendem Elastizitätsmodul der Wärmedämmung. Etwa 7 cm nach der Fuge überlagern sich die Spannungen der oberen und unteren Verputzschicht und gehen in den «fugenlosen» Bereich über, wo sie auf analytischem Weg berechnet werden können. In diesem Bereich sind die Verputzspannungen praktisch unabhängig vom Elastizitätsmodul der Wärmedämmung. Generell ist festzustellen, dass die mittleren Spannungen (Mittelwert der oberen und unteren Spannungen im Verputz) über der Fuge höher liegen als im «fugenlosen» Bereich und bei zunehmendem Elastizitätsmodul etwas ansteigen.

Spannungsverlauf in Abhängigkeit der Verputzdicke und Dicke der Wärmedämmung

Aus Diagramm 5 ist ersichtlich, dass die Spannungen im Verputz im fugenlosen Teil der Wärmedämmung bei zunehmender Dicke der Verputzschicht etwa konstant bleiben. Wie sich die Spannungen über den Fugen der Wärmedämmplatten in unterschiedlich dicken Verputzschichten verhalten, kann durch Vergleich der Diagramme 3 (3 mm Verputzdicke) und 4 (9 mm Verputzdicke) abgelesen werden. Auffallend ist die deutliche Abnahme der Zugspannungen an der Unterseite der dickeren Verputzschicht. An der Verputzoberseite nimmt die Spannung zu. Als Folge nehmen die Verformungen, wie sie in Bild 4 angedeutet sind, von dickeren Verputzschichten ab.

Der Einfluss der Dicke der Wärmedämmung auf den Spannungsverlauf in der Verputzschicht über einer Fuge ist aus Diagramm 6 ersichtlich. Mit zunehmender Dicke der Wärmedämmung vergrössern sich die Verformungen des Verputzes, während die mittleren Spannungen nur leicht zunehmen. In den Diagrammen 1, 2 und 5 sind die Spannungen im Verputz im fugenlosen Teil der Wärmedämmung für verschieden dicke Wärmedämmungen eingetragen. Es zeigt sich, dass die Dicke der Wärmedämmung auf die Spannungen im Verputz keinen grossen Einfluss nimmt.

Spannungen in der Verputzschicht infolge Schwinden der Wärmedämmung

Das Schwinden der Wärmedämmung verursacht im fugenlosen Teil vernachlässigbar kleine Druckspannungen im Verputz. Über den Fugen von Wärmedämmplatten hingegen treten im Verputz grössere Zugspannungen auf, die bei zunehmendem Elastizitätsmodul der Wärmedämmung anwachsen, wie aus Diagramm 7 abzulesen ist. In diesem Diagramm ist der Spannungsverlauf im Verputz einer um 0,1 % abgeschwundenen 100 mm dicken Wärmedämmung aufgezeichnet. Unter höheren Schwindmassen nehmen die Spannungen linear zu, wie aus Diagramm 8 zu sehen ist. In diesem Diagramm sind die Spannungen im Verputz bei unterschiedlichen Schwindmassen einer 40 mm dicken Wärmedämmschicht aufgezeichnet. Es zeigt sich, dass bei abnehmender Dicke der Wärmedämmung der Spannungsanteil aus dem Schwinden kleiner wird. Der Querdehnungseinfluss ist übrigens in den Diagrammen 7 und 8 nicht berücksichtigt worden, da anzunehmen ist, dass die sich langsam aufbauenden Schwindspannungen durch Relaxation wieder teilweise abgebaut werden.

Anwendung der Diagramme

An dieser Stelle sei angeführt, dass die berechneten Werte lediglich die Grössenordnung der Spannungen im Verputz von Aussenwärmedämmsystemen angeben, da für die Berechnung Vereinfachungen vorgenommen worden sind. Anhand der Diagramme kann aber bei bekannten Materialeigenschaften die Tendenz der zu erwartenden Spannungen angegeben werden. Dies soll an zwei Beispielen gezeigt werden.

Beispiel 1

Gegeben:	*Dicke [mm]*	*E-Modul [N/mm²]*	ω [K^{-1}]
Verputz	9	2000	$1{,}9 \cdot 10^{-5}$
Wärmedämmung	100	20	$5{,}0 \cdot 10^{-5}$

Temperaturverteilung gemäss Bild 2; Abkühlung um 45 K, Schwinden der Wärmedämmung 0,2%.

Gesucht: Spannungen in der Verputzschicht über den Plattenfugen der Wärmedämmung sowie im fugenlosen Bereich infolge Temperaturänderung und Schwinden.

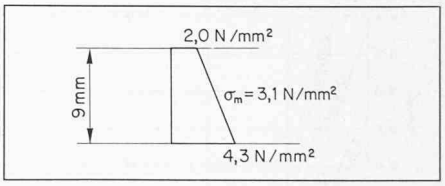


Bild 5. Spannungszustand im Verputz über einer Fuge in der Wärmedämmung infolge Temperaturänderung

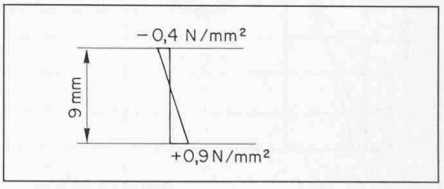
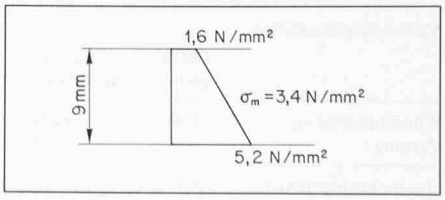


Bild 6. Spannungszustand im Verputz über einer Fuge in der Wärmedämmung infolge Schwinden der Wärmedämmung

Bild 7. Gesamtverformungen: Spannungsüberlagerung von Bild 5 und Bild 6



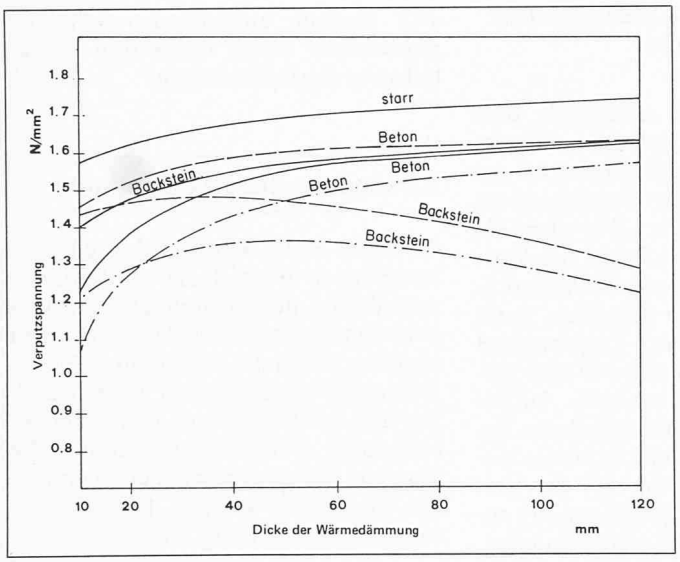


Diagramm 1. Einfluss der Behinderung der tragenden Wände aus Beton und Backstein auf die Verputzspannungen eines Aussenwärmedämmsystems in Abhängigkeit der Dicke der Wärmedämmschicht bei einer Abkühlung auf der Aussenseite um 45 K.

-.-.-.- keine Behinderung der tragenden Wand

- - - - - Behinderung der Verbiegung, keine Krümmung der Wand möglich

——— Verkürzung der Wand behindert

starr vollständige Behinderung der tragenden Wände

Materialeigenschaften:

	Dicke [mm]	Elastizitäts-modul [N/mm²]	Wärmeausdehnungs-zahl [K^{-1}]
Beton	200	30 000	$1{,}0 \cdot 10^{-5}$
Backstein	150	4 000	$5{,}0 \cdot 10^{-6}$
Wärmedämmung	variabel	10	$7{,}0 \cdot 10^{-5}$
Verputz	3	1 700	$1{,}5 \cdot 10^{-5}$

Querdehnungszahl: 0,3 Abkühlung aussen: 45 K

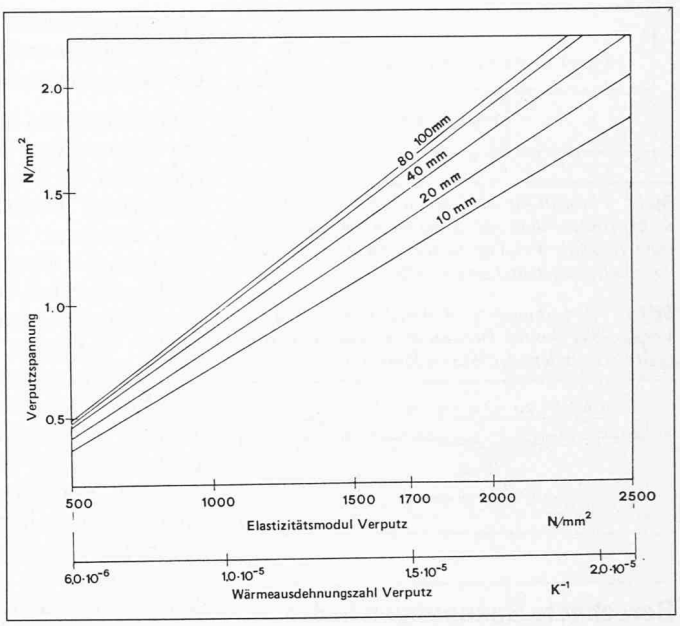


Diagramm 2 (fugenloser Bereich). Spannungen in der Verputzschicht eines Aussenwärmedämmsystems in Abhängigkeit des Elastizitätsmoduls (obere Skala) und des Wärmeausdehnungskoeffizienten (untere Skala) der Verputzschicht mit unterschiedlich dicken Wärmedämmungen (10, 20, 40, 80 und 100 mm) auf der tragenden Betonwand bei behinderter Ausdehnung unter einer aussenseitigen Abkühlung um 45 K.

Materialeigenschaften:

	Dicke [mm]	Elastizitäts-modul [N/mm²]	Wärmeausdehnungs-zahl [K^{-1}]
Beton	200	30 000	$1{,}0 \cdot 10^{-5}$
Wärmedämmung	variabel	10	$7{,}0 \cdot 10^{-5}$
Verputz (o. Skala)	3	variabel	$1{,}5 \cdot 10^{-5}$
Verputz (u. Skala)	3	1 700	variabel

Querdehnungszahl: 0,3 Abkühlung aussen: 45 K

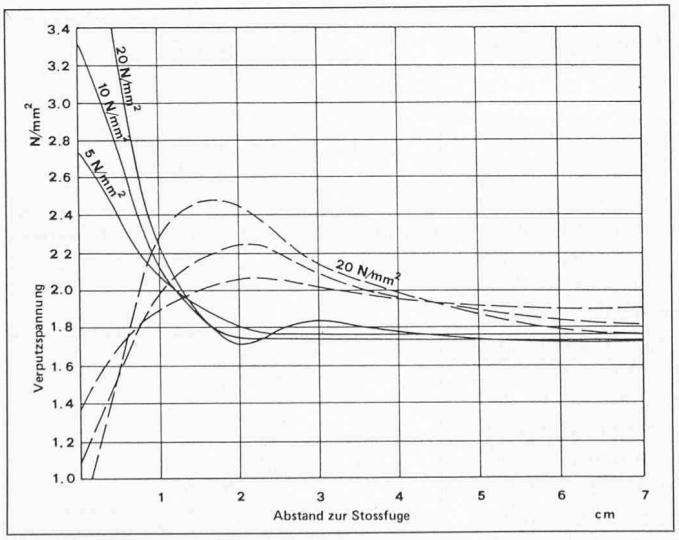


Diagramm 3 (Fugenbereich). Verputzspannungen in einem Aussenwärmedämmsystem in Abhängigkeit zum Abstand von der Stossfuge der Wärmedämmung bei unterschiedlichen Elastizitätsmoduln (5, 10 und 20 N/mm²) der Wärmedämmung unter einer aussenseitigen Abkühlung von 45 K.

- - - - - Verputzoberseite

——— Verputzunterseite (Grenzschicht zu Wärmedämmung)

Materialeigenschaften:

	Dicke [mm]	Elastizitäts-modul [K/mm²]	Wärmeausdehnungs-zahl [k^{-1}]
Wärmedämmung	100	variabel	$7{,}0 \cdot 10^{-5}$
Verputz	3	1 700	$1{,}5 \cdot 10^{-5}$

Querdehnungszahl: 0,3 Abkühlung aussen: 45 K

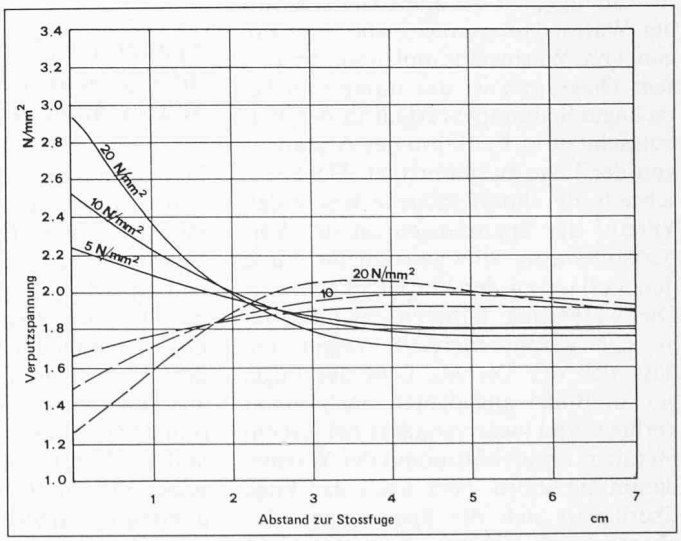


Diagramm 4 (Fugenbereich). Verputzspannungen in einem Aussenwärmedämmsystem in Abhängigkeit zum Abstand von der Stossfuge der Wärmedämmung bei unterschiedlichen Elastizitätsmoduln (5, 10 und 20 N/mm²) der Wärmedämmung unter einer aussenseitigen Abkühlung von 45 K.

- - - - - Verputzoberseite

——— Verputzunterseite (Grenzschicht zu Wärmedämmung)

Materialeigenschaften:

	Dicke [mm]	Elastizitäts-modul [N/mm²]	Wärmeausdehnungs-zahl [K^{-1}]
Wärmedämmung	100	variabel	$7{,}0 \cdot 10^{-5}$
Verputz	9	1 700	$1{,}5 \cdot 10^{-5}$

Querdehnungszahl: 0,3 Abkühlung aussen: 45 K

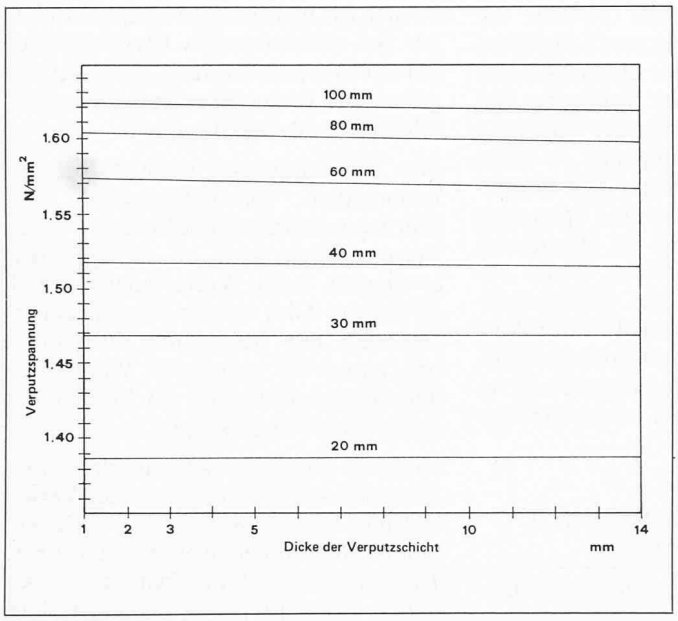


Diagramm 5 (fugenloser Bereich). Verputzspannungen in Abhängigkeit der Verputzdicke für unterschiedlich dicke Wärmedämmungen (20 bis 100 mm) auf 20 cm dicker Betonwand bei unbehinderter Ausdehnung unter einer aussenseitigen Abkühlung von 45 K.

Materialeigenschaften:

	Dicke [mm]	Elastizitätsmodul [N/mm²]	Wärmeausdehnungszahl [K^{-1}]
Beton	200	30 000	$1{,}0 \cdot 10^{-5}$
Wärmedämmung	variabel	10	$7{,}0 \cdot 10^{-5}$
Verputz	variabel	1 700	$1{,}5 \cdot 10^{-5}$

Querdehnungszahl: 0,3 Abkühlung aussen: 45 K

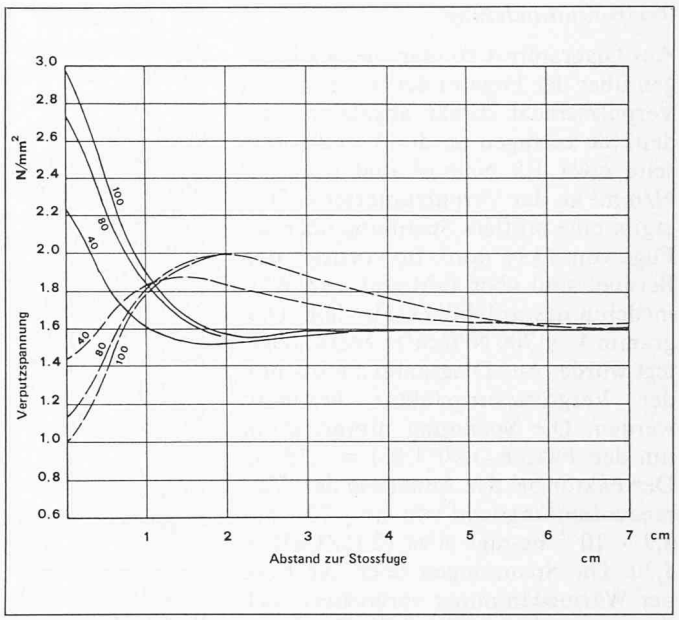


Diagramm 6 (Fugenbereich). Verputzspannungen in Abhängigkeit zum Abstand zu einer Stossfuge der Wärmedämmung bei unterschiedlichen Dicken (40, 80 und 100 mm) der Wärmedämmung unter einer aussenseitigen Abkühlung von 40 K.

- - - - - Verputzoberseite

——— Verputzunterseite (Grenzschicht zu Wärmedämmung)

Materialeigenschaften:

	Dicke [mm]	Elastizitätsmodul [N/mm²]	Wärmeausdehnungszahl [K^{-1}]
Wärmedämmung	variabel	10	$7{,}0 \cdot 10^{-5}$
Verputz	3	1 700	$1{,}5 \cdot 10^{-5}$

Querdehnungszahl: 0,3 Abkühlung aussen: 40 K

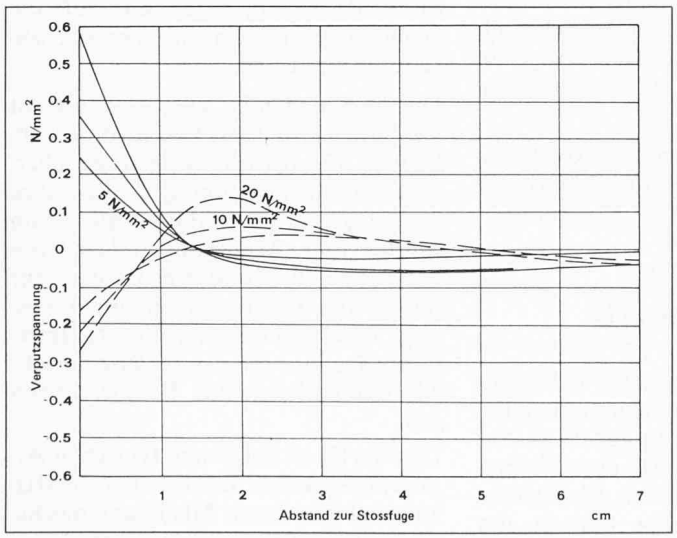


Diagramm 7 (Fugenbereich). Verputzspannungen in Abhängigkeit zum Abstand zu einer Stossfuge in der Wärmedämmung bei unterschiedlichen Elastizitätsmoduln (5, 10 und 20 N/mm²) der Wärmedämmung unter 0,1% Schwinden der Wärmedämmung.

- - - - - Verputzoberseite

——— Verputzunterseite (Grenzschicht zu Wärmedämmung)

Materialeigenschaften:

	Dicke [mm]	Elastizitätsmodul [N/mm²]	Wärmeausdehnungszahl [K^{-1}]
Wärmedämmung	100	variabel	$7{,}0 \cdot 10^{-5}$
Verputz	3	1 700	$1{,}5 \cdot 10^{-5}$

Querdehnungszahl: 0,0 Schwinden 0,1%

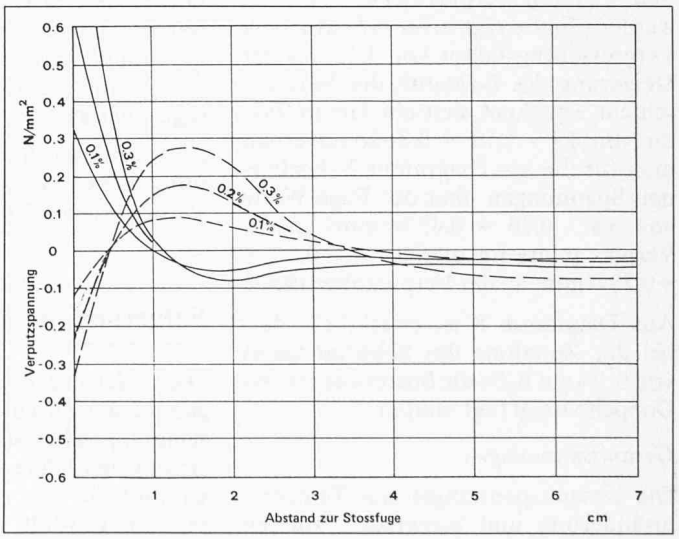


Diagramm 8 (Fugenbereich). Verputzspannungen in Abhängigkeit zum Abstand zu einer Stossfuge in der Wärmedämmung bei unterschiedlichem Schwindmass (0,1, 0,2 und 0,3%) der Wärmedämmung.

- - - - - Verputzoberseite

——— Verputzunterseite (Grenzschicht zu Wärmedämmung)

Materialeigenschaften:

	Dicke [mm]	Elastizitätsmodul [N/mm²]	Wärmeausdehnungszahl [K^{-1}]
Wärmedämmung	40	20	$7{,}0 \cdot 10^{-5}$
Verputz	3	1 700	$1{,}5 \cdot 10^{-5}$

Querdehnungszahl: 0,0 Schwinden: 0,1%, 0,2%, 0,3%

Temperaturänderung

Aus Diagramm 4 können die Spannungen über der Fuge in der 9 mm dicken Verputzschicht direkt abgelesen werden. Sie betragen an der Verputzoberseite etwa 1,3 N/mm² und etwa 2,9 N/mm² an der Verputzunterseite. Dies ergibt eine mittlere Spannung über der Fuge von 2,1 N/mm². Im vorliegenden Beispiel sind aber E-Modul und Wärmedehnungszahl höher als dem Diagramm 4 (1700 N/mm²) zugrundegelegt wurde. Aus Diagramm 2 muss nun der Vergrösserungsfaktor bestimmt werden. Die Spannung nimmt somit um den Faktor (1,90/1,65) = 1,15 zu. Der Faktor bei der Änderung der Wärmeausdehnungszahl von $1{,}5 \cdot 10^{-5}$ auf $1{,}9 \cdot 10^{-5}$ beträgt etwa (2,15/1,65) = 1,30. Die Spannungen über der Fuge der Wärmedämmung vergrössern sich damit um 1,15 · 1,30 = 1,50. Die Änderung der Wärmeausdehnungszahl der Wärmedämmung kann gemäss den zuvor gemachten Angaben vernachlässigt werden. Infolge Temperaturänderung ergibt sich der in Bild 5 dargestellte Spannungszustand im Verputz.

Schwinden

In Diagramm 7 sind die Schwindspannungen für 3 mm dicke Verputzschichten und ein Schwindmass von 0,1% angegeben. Bei zunehmender Dicke der Verputzschicht nehmen die Randspannungen ab. Der Abminderungsfaktor kann aus den Diagrammen 3 (3 mm) und 4 (9 mm Verputzdicke) bestimmt werden. Er beträgt etwa 0,7. Mit dem Vergrösserungsfaktor von 1,15 aus der Steigerung des E-Moduls der Verputzschicht errechnet sich ein Gesamtfaktor von 0,7 · 1,15 = 0,8. Somit erhält man für die aus Diagramm 7 abgelesenen Spannungen über der Fuge Werte von 0,8 · 0,56 = 0,45 N/mm² an der Verputzunterseite und 0,8 · −0,25 = −0,2 N/mm² an der Verputzoberfläche.

Aus Diagramm 8 ist ersichtlich, dass bei der Zunahme des Schwindmasses von 0,1% auf 0,2% die Spannung um das Doppelte steigt (vgl. Bild 6).

Gesamtspannungen

Die Gesamtspannungen aus Temperaturänderung und Schwinden können durch Überlagerung beider Zustände angegeben werden. Ihr Betrag ist in Bild 7 dargestellt.

Im fugenlosen Bereich können die Spannungen aus Diagramm 2 abgelesen werden. Man erhält für einen E-Modul von 2000 N/mm² eine Spannung von etwa 1,9 N/mm². Infolge der Zunahme der Wärmeausdehnungszahl ist diese Spannung mit dem Faktor 1,30 zu multiplizieren. Dies ergibt eine Spannung von etwa 2,5 N/mm² im fugenlosen Teil. Die unterschiedliche Dicke der Verputzschicht und der Schwindeinfluss sind im fugenlosen Teil der Wärmedämmung von untergeordneter Bedeutung auf den Spannungsverlauf im Verputz und können vernachlässigt werden.

Beispiel 2

Gegeben:	Dicke [mm]	E-Modul [N/mm²]	[K⁻¹]
Verputz	5	1700	$1{,}5 \cdot 10^{-5}$
Wärmedämmung	60	10	$7{,}0 \cdot 10^{-5}$

Schwinden 0,1%, Abkühlung um 45 K.

Gesucht: Spannungen in der Verputzschicht über den Plattenfugen der Wärmedämmung sowie im fugenlosen Bereich infolge Temperaturänderung und Schwinden.

Gesamtspannungen

Die Verputzspannung über der Fuge der Wärmedämmung kann durch Interpolation zwischen den Diagrammen 3 und 4 (Änderung der Verputzdicke) und aus Diagramm 6 (Änderung der Dicke der Wärmedämmung) bestimmt werden. Zur Berechnung der Schwindspannungen ist zusätzlich zwischen Diagramm 7 und 8 zu interpolieren (vgl. auch Bild 8).

Im fugenlosen Bereich kann die Spannung direkt aus Diagramm 5 bestimmt werden. Sie beträgt etwa 1,57 N/mm².

Folgerung für die Praxis

Die in der Praxis gemachten Erfahrungen werden durch die theoretischen Berechnungen bestätigt. In der Praxis hat sich insbesondere gezeigt, dass Wärmedämmstoffe mit niederen Elastizitätsmoduln gewählt werden müssen, um Verputzrisse über den Fugen der Wärmedämmplatten zu verhindern. Wie aus den Berechnungen abzulesen ist, werden die Spannungen in der Tat kleiner bei abnehmendem Elastizitätsmodul der Wärmedämmung. Eine Verringerung des Risserisikos in der Verputzschicht wird dadurch erreicht.

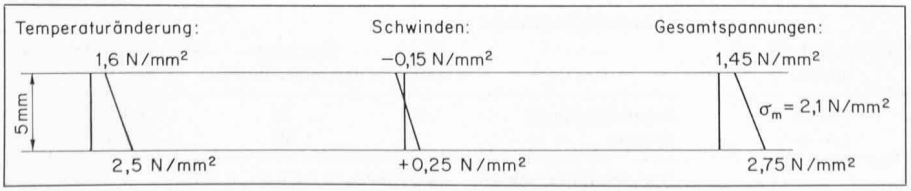
Die Zugspannungen wachsen bei zunehmendem Elastizitätsmodul und Wärmeausdehnungskoeffizient der Verputzschicht stark an. Es wäre also erwünscht, beide Werte möglichst tief zu halten. Dies ist aus verschiedenen Gründen nur beschränkt durchführbar, zumal bei geringeren Wärmeausdehnungskoeffizienten der Elastizitätsmodul in der Regel steigt.

Heute ist allgemein bekannt, dass *möglichst schwindarme* oder vor der Verarbeitung *abgeschwundene Wärmedämm-Materialien* zu verwenden sind. Tatsächlich steigen die Spannungen bei hohen Schwindmassen stark an. Die Schwindspannungen liegen aber um einiges unterhalb den Spannungen aus Temperaturänderungen. Der Einfluss des Schwindens der Wärmedämmstoffe auf die Zugspannungen im Verputz ist somit geringer als allgemein angenommen wird. Ausserdem ist der Schwindeinfluss des Verputzes selbst zu berücksichtigen. Diese Spannungen liegen je nach Art des Verputzes bei 0,5 bis 1,0 N/mm², werden aber rasch durch Relaxation abgebaut. Es besteht aber die Gefahr, dass unter ungünstigen Witterungsverhältnissen während der Verarbeitung oder bei falscher Dosierung des Verputzmörtels im frühen Stadium Risse entstehen, die auf die Schwindspannungen im Verputz zurückzuführen sind.

Die Spannungen im Verputz sind nicht wesentlich von der Verputzdicke abhängig. Zu berücksichtigen ist aber, dass für die Berechnungen die ganze Verputzdicke als Verbundsystem von Mörtel und Armierungseinlage mitwirkt. Sobald der Mörtel infolge sehr feiner Rissbildungen nicht mehr mitträgt, übernimmt das Armierungsgewebe die Spannungen des Verputzmörtels, wie das nachstehende Beispiel zeigen soll.

Gemäss [2] ist bei einem typischen Armierungsgewebe infolge der Festigkeitseinbusse durch Alkali- und mechanische Beanspruchung mit einer Langzeitfestigkeit von etwa 18 N/mm (18 dN/cm) und bei einem Verputzmörtel mit einer Festigkeit von etwa 1,4 N/mm² zu rechnen. In einem 3 mm dicken Verputz erfolgt somit die volle Belastung des Armierungsgewebes im Rissestadium des Verputzmörtels bei einer Kraft von 1,4 N/mm² · 3 mm = 4,2 N/mm (4,2 dN/cm) in einem 10 mm dicken Verputz erst bei einer Kraft von 1,4 N/mm² · 10 mm = 14 N/mm (14 dN/cm). Im ersten Fall

Bild 8. Spannungsverteilung im Verputz über einer Fuge in der Wärmedämmung gemäss Beispiel 2



wird der Wert der Langzeitfestigkeit der Armierungseinlage etwa zu einem Viertel, im zweiten Fall zu etwa drei Viertel erreicht. Die Armierungseinlage wird somit im Zeitpunkt der Rissentstehung in dicken Verputzschichten höher belastet und entsprechend mehr gedehnt als in dünnen. Dabei ist zu beachten, dass der Elastizitätsmodul des Armierungsgewebes unter dem des Verputzes liegt. Dies führt dazu, dass bei zunehmenden Verputzdicken und unveränderten Armierungseinlagen zunehmend breitere Risse auftreten. In dicken Verputzschichten ist aus diesem Grund der «Armierungsgehalt» zu steigern. Möglichst dünne Verputze sind daher vorzuziehen. Allerdings besteht bei dünnen Verputzschichten die Gefahr, dass die einwandfreie Einbettung des Armierungsgewebes, die Grundvoraussetzung für das Funktionieren des Verbundsystems Armierungsnetz-Verputzmörtel, nicht gewährleistet ist. Die ideale Dicke der Einbettungsmasse dürfte etwa 3 bis 4 mm betragen.

Die Berechnungen zeigen, dass die Spannungen bei tiefen Temperaturen mit Sicherheit über der Rissfestigkeit des Verputzmörtels liegen. Aus diesem Grund ist es unbedingt erforderlich, mit einer entsprechenden Armierungseinlage für eine Rissverteilung zu sorgen. Die Armierungseinlage muss etwa in der Mitte der Einbettungsmasse liegen.

Adresse des Verfassers: H. Epple, dipl. Ing. ETH, Abt. Bauschäden, EMPA-Dübendorf, 8600 Dübendorf.

Literaturangaben

[1] EMPA-Untersuchungsbericht Nr. 42 920/ (1980): «Berechnungen in der Verputzschicht eines Aussendämmsystems auftretenden Zugspannungen über der Stossfuge der Wärmedämmplatten infolge von Temperaturänderungen»

[2] *Stieger, J.* (1980): «Armierungsgewebe für Aussenputze bei Vollwärmeschutz». Kunststoff/«Schweizer Baublatt», Nr. 104

[3] *Künzel, H.* (1977): «Untersuchungen über das Verhalten von kunststoffbeschichteten Styropor-Hartschaumplatten auf Aussenwänden in der Praxis». Deutsche Bauzeitung 9

[4] EMPA-Untersuchungsbericht Nr. 10 879 (1980): «Spannungen in mehrschichtigen Bauteilen infolge Temperaturänderungen»

[5] *Kiessl, K., Gertis, K. (1979): «Wärmeeigenspannungen in mehrschichtigen Aussenbauteilen infolge instationärer Temperatureinwirkung». Informationsverbundzentrum Raum und Bau der Fraunhofer-Gesellschaft, Stuttgart, F 1546*

Beständigkeit von Stahlbeton

Von Bruno Meyer, Zürich

Über Schadenursachen, Vorbeugen und Sanieren bei Stahlbetonbauten wurde am 3. und 4. April 1984 von 16 Referenten an der ETH in Zürich berichtet. Etwa 350 Teilnehmer aus Ingenieurbüros und Unternehmung, aus Verwaltung und Hochschule sowie aus der Bauchemie nahmen daran teil. Organisiert wurde die Tagung von der SIA-Fachgruppe für Industrielles Bauen (Präsident: Peter Lüthi, Bern), geleitet wurde sie von Prof. Folker H. Wittmann, ETH Lausanne. Der nachfolgende Überblick fasst die Tagung zusammen und gibt sie anwendungsorientiert wieder.

Stahlbeton ist beständig,...

Meldungen der Tagespresse und anderer Medien über *unerwartete Schäden an Stahlbetonbrücken* haben aufhorchen lassen und haben auch eine breitere Öffentlichkeit auf die beschränkte Beständigkeit von Stahlbeton aufmerksam gemacht. Fachleuten ist das Thema freilich längst bekannt; ihre Frage lautet bereits nicht mehr, ob Bauten aus Stahlbeton beständig seien, sondern wie künftig *dauerhaftere Konstruktionen* herzustellen sind. Wie das grosse Interesse an der Tagung zeigte, ist dieses Thema berechtigt, zumal Beständigkeit und Bausanierung im klassischen Ausbildungsgang an der Hochschule noch zu wenig beachtet werden.

An der Tagung wurden zuerst die Grundlagen der Baustoffe *Beton* und *Stahl* im Hinblick auf ihre Anwendung im Stahlbetonbau behandelt. Beständigkeit und Betongefüge stehen in einem Zusammenhang, der wie bisher experimentell, neuerdings aber am «numerischen Beton» gesucht wird (Bild 1). Zu diesem Zweck sind drei Gefügeniveaus eingeführt worden, denen die einzelnen Einflussgrössen zuzuordnen sind. Vorgänge wie Karbonatisation, Austrocknung usw. können simuliert und mit den Resultaten aus der Praxis verglichen werden, woraus Voraussagen und Bemessungen möglich sind.

Häufig wird von den Experten als Schadenursache die *Werkstoffkorrosion* genannt. Beim Beton sind es bekannte chemische Vorgänge, wie beispielsweise Angriffe von Säuren und Gasen. Jedes Bauwerk ist ihnen ausgesetzt, doch die Grössenordnung variiert und ist von Fall zu Fall zu beurteilen. Damit chemische Reaktionen überhaupt ablaufen, müssen Reaktionsstoffe aufeinandertreffen. Zu unterscheiden sind dabei die Transportarten «Diffusion» und «Strömung», die durch das Betongefüge, namentlich durch die Porenstruktur, steuerbar sind. Verbesserungen wirken sich hier glücklicherweise im gleichen Sinn auf die mechanischen

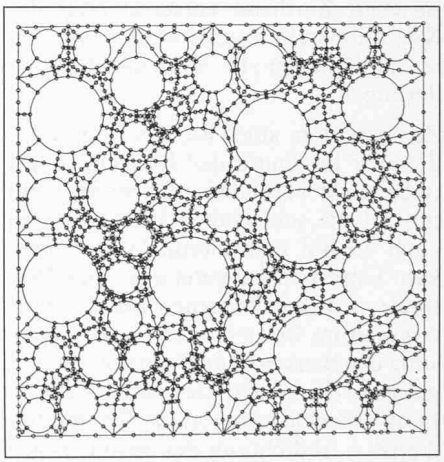


Bild 1. Numerischer Beton. Repräsentation eines zufallsgenerierten Betongefüges mit finiten Elementen (nach F. Wittmann [1])

Eigenschaften aus, so dass die praktische Regel gilt: «Beton mit hoher Festigkeit hat hohe chemische Beständigkeit». Wurde früher propagiert, den Beton nur nach den statischen Festigkeitswerten herzustellen, so soll er heute im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit auch eine Mindest-Dichtigkeit aufweisen.

Die Schadensmechanismen infolge *Frosttau- und Frosttausalzeinwirkung* sind heute bereits hinlänglich bekannt. Entscheidend ist in erster Linie der Korrosionsschutz der Armierung, der mit der nötigen Sorgfalt für eine vereinbarte Lebensdauer zu gewährleisten ist. Kleinere Schäden wie z.B. Abplatzungen können nicht ganz vermieden werden, und das Langzeitverhalten ist noch nicht restlos geklärt.

Korrosionsschäden *am Armierungsstahl* selbst sind erst bei ungenügend dicker oder inhomogener Betonüber-