Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 111 (1993)
Heft: 50

Artikel: Dielektrische Sensoren
Autor: Rudolphi, H.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-78294

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: 08.08.2025

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

Dielektrische Sensoren

Dielektrische Sensoren sind chemische Sensoren, die die dielektrischen Eigenschaften eines sensitiven Materials messen und zur Detektion von Chemikalien nützen. Als chemische Nachweisreaktion dient in den meisten Fällen die reversible Adsorption eines Stoffes an einem dünnen isolierenden Film. Durch diese Nachweisreaktion werden die dielektrischen Materialeigenschaften (Volumeneffekt) und die Grenzflächen (Oberflächeneffekt) der sensitiven Schicht geändert. Die gebräuchlichsten Bauelemente für dielektrische Sensoren sind Interdigitalkondensatoren (Kammstrukturen).

Interdigitalkondensatoren

Der Aufbau dielektrischer Sensoren ist verhältnismässig einfach. Sie bestehen aus einer gassensitiven Schicht, die ihre dielektrischen Eigenschaften aufgrund einer Nachweisreaktion mit einem bestimmten Stoff ändert und einem Bauelement, das diese dielektrischen Materialeigenschaften in ein elektrisches Signal umsetzen kann. Einfache Bauelemente für dielektrische Sensoren sind planare Kondensatoren (Interdigitalkondensatoren, Kammstrukturen). Das Prinzip ist in Bild 1 dargestellt.

Die Kapazität eines Interdigitalkondensators kann analytisch und numerisch (Finite Elemente-Methode) berechnet werden. Aus Symmetriegründen kann unter Vernachlässigung der Rand- und bestimmter Oberflächeneffekte die Kapazität von Interdigitalkondensatoren aus der Kapazität einer Einheitszelle (Bild 1) in einer zweidimensionalen Ebene errechnet werden. Die Einheitszelle reicht von der Mitte einer Elektrode bis zu Mitte der nächsten Elektrode (Bild 2). Bei einer grossen Elektrodenzahl sind die Randeffekte vernachlässigbar. Die Kapazität der Einheitszelle C_{EZ} hat die Einheit F/m. Die Gesamtkapazität des Interdigitalkondensators C_{IDK} errechnet sich dann zu $C_{IDK} = C_{EZ} \cdot (N-1) \cdot L$ mit N = Anzahl der Elektroden und L = Länge der Elektroden. Eine einfache analytische Berechnung der Kapazität für dielektrische Sensoren in Gasen kann mit Hilfe der Methode der konformen Abbildungen durchgeführt werden. Dazu wird die Einheitszelle in drei Bereiche aufgeteilt, deren Teilkapazitäten getrennt berechnet werden:

- Oberer Halbraum (C_1)
- unterer Halbraum (C_2)
- Raum zwischen den Elektroden (C_3)

Die Gesamtkapazität der Einheitszelle ergibt sich aus der Summe dieser Teilkapazitäten als Parallelschaltung: $C_{IDK} = C_1 + C_2 + C_3$.

Bei unendlich dünnen Elektroden kann die Kapazität des oberen und unteren Halbraums mit einer konformen Abbildung (vollständiges elliptisches Integral 1. Ordnung K[x]) berechnet werden. Diese konforme Abbildung bildet die Geometrie des Interdigitalkondensators auf einen Plattenkondensator ab (Bild 3). Die Kapazität der beiden Halbebenen ergibt sich dann einfach aus der Formel für Plattenkondensatoren. Damit erhält man

$$C_{1,2} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{1,2} \cdot \frac{K\,[1-(a/b)^2]^{1/2}}{2\,K\,[a/b]}$$

Der Abbildungsparameter der konformen Abbildung K(x) ist der Quotient a/b aus dem Elektrodenabstand a und der Breite der Einheitszelle b. Die Indizes 1 und 2 bezeichnen den oberen bzw. unteren Halbraum (Gasraum und Substrat).

Der Raum zwischen den Elektroden C_3 ($C_3 = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_3 \cdot [a/b]$) wird durch einen Plattenkondensator mit den Parametern a = Abstand, h = Elektrodendicke und ε_3 = Dielektrizitätskonstante des Materials zwischen den Elektroden berücksichtigt.

Wesentliches Ergebnis der Rechnung mit konformen Abbildungen ist, dass die Grundkapazität des Interdigitalkondensators im wesentlichen durch die Dielektrizitätskonstante des Substrats und dem Parameter a/b beeinflusst wird. Die «sensitive Kapazität» ist hauptsächlich die Kapazität C_3. Damit ist es möglich, durch Variation der Geometrie der Elektroden (Breite, Abstand und Dicke) die Grundkapazität $C_1 + C_2$ des Interdigitalkondensators und die «sensitive» Kapazität C_3 an die jeweilige sensitive Schicht anzupassen. Dies konnte auch experimentell mit einer sensitiven Schicht nachgewiesen werden (Bild 4)

Dielektrische Sensoren in Flüssigkeiten sind nicht so einfach zu behandeln. Bei dünnen sensitiven Schichten werden in jedem Fall auch die entsprechenden

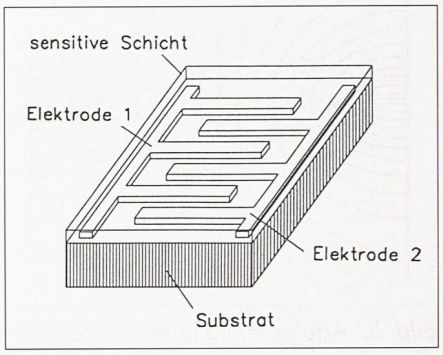

Bild 1. Schema eines Interdigitalkondensators

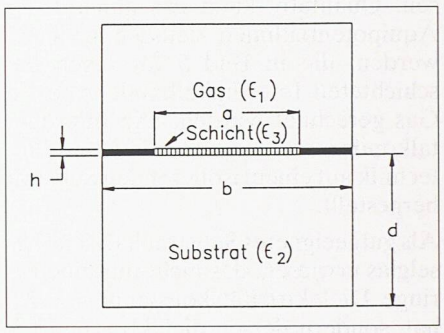

Bild 2. Einheitszelle eines Interdigitalkondensators

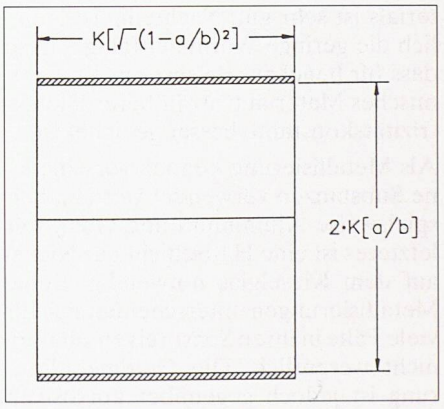

Bild 3. Konforme Abbildung einer Halbebene der Einheitszelle des Interdigitalkondensators

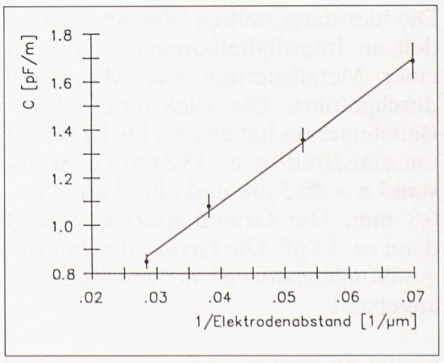

Bild 4. Schichtkapazität C_3 eines Interdigitalkondensators (Modellgerade eingezeichnet), bezogen auf den inversen Elektrodenabstand

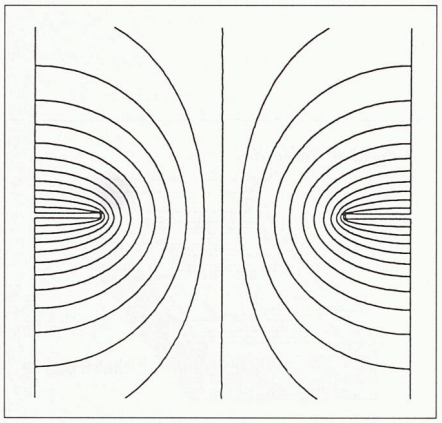

Bild 5. Äquipotentiallinien eines Interdigitalkondensators

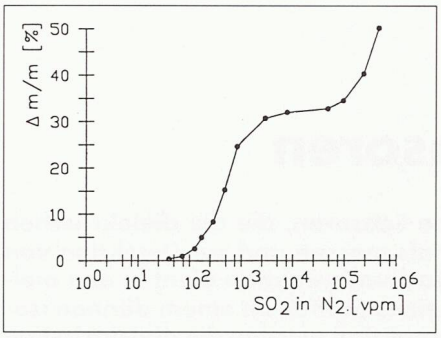

Bild 6. Gravimetrisch gemessene SO_2-Adsorptionsisotherme an einer Sensorschicht (aufgetragen ist die relative Massenänderung der Probe über der Gaskonzentration)

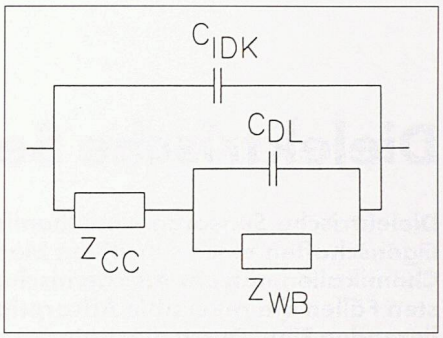

Bild 7. Ersatzschaltbild eines Interdigitalkondensators

Flüssigkeitseigenschaften mitgemessen. Qualitativ kann das anhand der Äquipotentiallinien deutlich gemacht werden, die in Bild 5 für einen beschichteten Interdigitalkondensator in Gas gerechnet wurden. Die Interdigitalkondensatoren werden in Dünnfilmtechnik auf einem isolierenden Substrat hergestellt.

Als gutgeeignetes Substrat hat sich Kieselglas erwiesen, das nicht nur eine geringe Dielektrizitätskonstante $\varepsilon = 3.8$ hat, sondern dessen dielektrischen Eigenschaften über einen grossen Frequenzbereich konstant bleiben. Auch die chemische Beständigkeit dieses Materials ist sehr gut. Nachteilig ist lediglich die geringe Wärmeleitfähigkeit, so dass für beheizbare Sensoren ein keramisches Material trotz höherer Dielektrizitätskonstante besser geeignet ist.

Als Metallisierung können verschiedene Substanzen verwendet werden, beispielsweise Aluminium und Gold. Für letzteres ist eine Haftschicht aus Nickel auf dem Kieselglas notwendig. Beide Metallisierungen unterscheiden sich für viele Fälle in ihren Sensoreigenschaften nicht wesentlich. Die Goldmetallisierung ist jedoch gegenüber korrosiven Bestandteilen, die in sensitiven Schichten enthalten sein können, beständiger. Die Dicke der Metallisierung liegt üblicherweise bei 0.5 µm.

Die hier dargestellten Messungen wurden an Interdigitalkondensatoren mit einer Metallisierung aus Aluminium durchgeführt. Die Elektroden dieses Bauelementes haben eine Dicke h = 0.7 µm, eine Breite b–a = 13.8 µm, einen Abstand a = 26.2 µm und eine Länge L = 6.3 mm. Die Grundkapazität beträgt dann ca. 13 pF. Die Grösse des Interdigitalkondensators ist an den Chipträger angepasst.

Detektionsmechanismus

Zur Messung von Stoffen in der Gasphase wird der Interdigitalkondensator mit einer dünnen sensitiven Schicht bedeckt, die die Nachweisreaktion vermittelt. Im allgemeinen wird das eine reversible Adsorption eines Stoffes an der Oberfläche dieser Schicht sein.

Die Adsorption ist eine chemische Bindung, deren Aktivierungsenergie so gering ist, dass die Gase bereits bei Raumtemperatur wieder desorbieren können. In diesem Fall ist die Anzahl der adsorbierten Gasmoleküle im Gleichgewicht mit ihrer Konzentration im umgebenden Gas. Dieser Gleichgewichtsprozess erlaubt es überhaupt erst, Gaskonzentrationen in einer Atmosphäre zu messen, da andernfalls die Zahl der adsorbierten Gasmoleküle nicht proportional zu ihrer Konzentration im umgebenden Medium wären.

Die in der Natur auftretenden Adsorptionsprozesse sind im allgemeinen eine nichtlineare Funktion der Gaskonzentration im umgebenden Medium, für die es empirische Formeln gibt. Eine gravimetrisch gemessene Adsorptionsisotherme ist in Bild 6 gezeigt. Daraus ergibt sich zwangsläufig, dass auch das Sensorsignal keine lineare Funktion der Gaskonzentration sein kann. Eine rechnerische Linearisierung des Sensorsignals ist also unumgänglich.

Adsorbieren die Gase nur an der Oberfläche, spricht man von einem Oberflächeneffekt, diffundieren sie in das Innere der sensitiven Schicht, spricht man von einem Volumeneffekt. Die Adsorptions- und Desorptionszeiten hängen von den jeweiligen thermodynamischen Randbedingungen ab.

Gemessen wird bei einem dielektrischen Sensor die Impedanz Z des Bauelements. Die Impedanz ist eine komplexe Grösse, deren Realteil im wesentlichen mit der Dämpfung und deren Imaginärteil mit der Kapazität des Bauelements korreliert ist. Die Impedanz eines Interdigitalkondensators ist keine Konstante, sondern eine Funktion $Z(\omega)$ der Frequenz ω. Zu der Impedanz des Interdigitalkondensators tragen neben der Grundimpedanz des Interdigitalkondensators die Polarisationsprozesse der sensitiven Schicht wesentlich bei. Bei dielektrischen Sensoren, die meistens in einem Frequenzbereich < 1 MHz gemessen werden, handelt es sich im wesentlichen um die dipolare Polarisierbarkeit des Festkörpers, die durch die Adsorption von Gasen geändert wird. In geringem Masse liefern auch weitere Effekte, wie Oberflächenleitfähigkeit und Grenzflächenpolarisation an den Elektroden, einen Beitrag zu der gemessenen Impedanz. Mit der dielektrischen Spektroskopie können sowohl Aufschlüsse über die elektrische Polarisierbarkeit wie den günstigsten Frequenzbereich für den Sensor gewonnen werden. Zur theoretischen Behandlung der dielektrischen Funktion wird ein empirisches Modell verwendet. Dieses Modell ist ein elektrisches Ersatzschaltbild des Festkörpers und erlaubt die getrennte Modellierung des Volumens und der Grenzfläche zu den Elektroden (Bild 7).

C_{IDK} ist die Kapazität des unbeschichteten Interdigitalkondensators, der nahezu keine Dämpfung hat. Analog zu Abb. 2 ist dieser parallel zur sensitiven Schicht geschaltet. Z_{CC} bezeichnet die Volumenimpedanz der sensitiven Schicht, das mit einem Modell nach Cole-Cole modelliert wird. In diesem Teil ist auch der Anteil einer Oberflächenleitfähigkeit zur Gesamtimpedanz enthalten. Mit dem in Serie geschalteten Kreis, der eine Grenzflächenpolarisation C_{DL} und eine Warburg-Impedanz Z_{WB} enthält, wird die

Literatur

Zeitschrift Sensors & Actuators, Elsevier Sequoia Verlag, Lausanne

W. Göpel, J. Hesse (Hrsg.), Sensors, a comprehensive survey, Weinheim 1989

J.R. Macdonald (Hrsg.), Impedance Spectroscopy, New York 1987

H.-E. Endres, Kapazitive Gassensoren mit sensitiven Schichten aus Heteropolysiloxan, München 1989

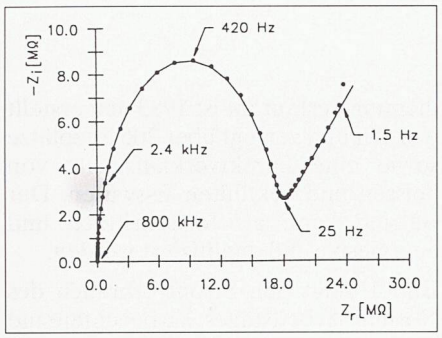

Bild 8. Ortskurve eines beschichteten Interdigitalkondensators mit angepasster Kurve

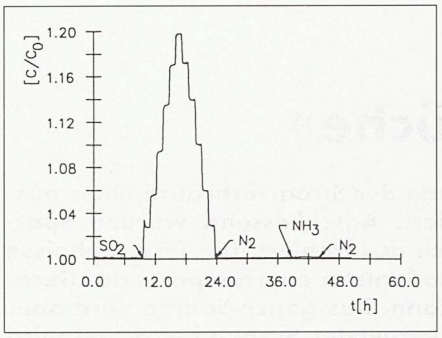

Bild 9. Messkurve (Kapazität) eines beschichteten Interdigitalkondensators (Heteropolysiloxanschicht) in trockenen Prüfgasgemischen

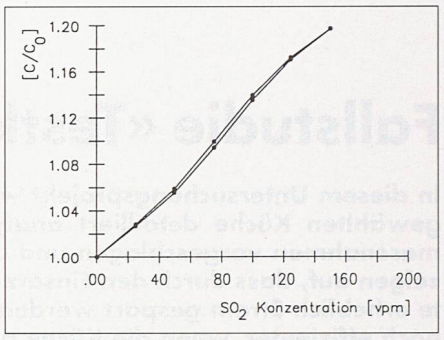

Bild 10. Elektrische Adsorptionsisotherme (SO_2 in trockenem Stickstoff) eines beschichteten Interdigitalkondensators (Heteropolysiloxanschicht)

Grenzfläche der sensitiven Schicht zur Elektrode modelliert. Volumen- und Grenzflächenimpedanz werden in Serie geschaltet. Bild 8 zeigt die Ortskurve einer Sensorschicht bei Adsorption von Schwefeldioxid.

Beispiel einer sensitiven Schicht: Heteropolysiloxane

Am Fraunhofer-Institut für Silicatforschung in Würzburg wurden als sensitive Schicht für Schwefeldioxid spezielle organische Werkstoffe (organisch modifizierte Silicate, Heteropolysiloxane, Ormocere) hergestellt, die sich für Sensorzwecke gut eignen und mit einem einfache Spin-On-Verfahren auf der Oberfläche des Sensors abgeschieden werden können. Diese Heteropolysiloxane enthalten tertiäre Aminogruppen als Adsorptionszentren für Schwefeldioxid. Der Sol-Gel-Prozess, mit dem diese Substanzen hergestellt werden, bietet die Möglichkeit, mit üblichen Verfahren (spin-on) dünne Filme auf beliebigen Bauelementstrukturen herzustellen.

Für den dielektrischen Effekt ist die reversible Bildung eines schwachen Adduktes von Schwefeldioxid mit Trimethylamin mit einem relativ hohen Dipolmoment (p = 4.96 D) und einer geringen Bindungsenthalpie ($\Delta H = -46$ kJ/mol) verantwortlich. Die Bildung des Adduktes ist eine zwar selektive, aber auch weitgehend reversible chemische Reaktion und stellt die elektrische Detektierbarkeit von Schwefeldioxid sicher. Eine typische Messreihe mit Schwefeldioxid von 0–150 vpm und Ammoniak (NH_3) von 0–1.5 vol.-Prozent in trockenem Stickstoff zeigt Bild 9.

Die Querempfindlichkeit zu Ammoniak ist sehr gering, Zu anderen Gasen wie Sauerstoff (O_2), Kohlenmonoxid (CO), Kohlendioxid ($C0_2$) und Methan (CH_4) besteht praktisch keine Querempfindlichkeit. Diese Eigenschaften können auf den Adsorptionsmechanismus zurückgeführt werden, der einer Säure-Base-Reaktion sehr ähnlich ist, und natürlich auf die Reaktionsbereitschaft der einzelnen Gase. Dieser Adsorptionsmechanismus lässt jedoch eine Querempfindlichkeit zu sauren Gasen erwarten, wie sie beispielsweise zu Stickstoffdioxid (NO_2) gefunden wurde.

Eine Auftragung der elektrischen Adsorptionsisothermen zeigt Bild 10. Dargestellt sind die relativen Kapazitäten bezogen auf die Gaskonzentration. Beachtenswert ist, dass bereits 150 vpm Schwefeldioxid in Stickstoff bei diesen Heteropolysiloxanen zu einer relativen Kapazitätsänderung von 20 Prozent, bezogen auf den Kapazitätswert in reinem Stickstoff, führt.

Ausblick

Dielektrische Sensoren sind Bauelemente, die zusammen mit geeigneten sensitiven Schichten einen wichtigen Platz in einem Sensorsystem einnehmen. Da die vielen Nachweisreaktionen auf der Adsorption beruhen, ist die Kombination mit Massensensoren immer vorteilhaft. Als Einzelsensoren dienen sie gegenwärtig nur zur Messung von Feuchte, begünstigt durch das hohe Dipolmoment des Wassermoleküls und den relativ hohen Wassergehalt von einigen tausend ppm in normaler Raumluft (relative Feuchte 50 Prozent). Interdigitalkondensatoren sind zudem Grundbauelemente für Leitfähigkeitssensoren.

H. Rudolphi

Bücher

Physik für Ingenieure

Von *Bohrmann/Pitka/Stöcker/Terlecki.* 844 Seiten, Preis: DM 48.–. Verlag Harri Deutsch, Frankfurt a.M. 1. Auflage 1993. ISBN 3-8171-1242-4

Dieses völlig neukonzipierte Lehr- und Lernbuch umfasst alle Standardgebiete der Physik. Es bietet Studenten der Ingenieur- und Naturwissenschaften an Fachhochschulen, Technischen Hochschulen und Universitäten eine detaillierte Darlegung der elementaren Grundlagen und fortgeschrittener Anwendungen.

Das Buch zeichnet sich durch seinen Praxisbezug und die studentennahe Entwicklung der einzelnen Gebiete aus. Zahlreiche ausführlich durchgerechnete Beispiele und Klausuraufgaben mit Lösungen erleichtern das Verständnis. Die wichtigsten physikalischen Gesetzmässigkeiten sind in Zusammenfassungen der einzelnen Kapitel mit kommentierenden Texten enthalten.

Hinterlüftete Fassaden

EMPA-Forschungsbericht 127378. Von *Ch. Tanner.* 2., überarbeitete Auflage. 90 Seiten, über 50 Abb., geb., A4, Preis: Fr. 40.–. Dübendorf 1993. Bezug Bericht 2. Auflage oder Zusammenfassung der Ergänzungen: mittels Klebeetikette bei der EMPA, Abt. 176, 8600 Dübendorf

Der Forschungsbericht umfasst folgende bauphysikalischen Untersuchungen vom September 1992: verschiedene Laborprüfungen bezüglich Wassereinfluss auf die Wärmedämmung und bezüglich Wärmebrückenwirkung der Fassadenanker (speziell am Beispiel der Natursteinfassaden), unterstützt durch Computerberechnungen. Weitere Themen: Verkleidung, Fugen (offen und geschlossen), Hinterlüftungsspalt, Befestigungen, k-Wert u.a.

Ergänzt wird der Bericht durch Untersuchungen bezüglich dem effektiven Schlagregeneinfluss, Messungen und Beobachtungen an Gebäuden sowie einem umfangreichen Literaturverzeichnis. Weiter sind ergänzende Hinweise zu Statik und Werkstofftechnologie sowie weitere Wärmebrückenresultate zu finden. – Die Broschüre richtet sich an Planer und Praktiker.